

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Viktor Pandža

**Numeričko i eksperimentalno modeliranje  
mehanizama termoplastičnosti i oštećenja u  
nodularnom lijevu**

Zagreb, 2015.

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za numeričku mehaniku te Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku pri Zavodu za tehničku mehaniku, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu pod vodstvom prof. dr. sc. Zdenka Tonkovića i prof. dr. sc. Ivanke Boras te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2014./2015.

Rad je izrađen u okviru RCOP projekta „Centre of Excellence for Structural health“ (CEEStructHealth) sufinanciranog iz sredstava Europske unije (ugovor IPA2007/HR/16IPO/001-040513).

Viktor Pandža

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Motivacija .....	1
1.2. Cilj rada.....	2
2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA.....	3
2.1. Optički mjerni sustav ARAMIS 4M .....	3
2.2. Infracrvena termografska kamera FLIR ThermaCAM SC 2000 .....	5
2.3. Servohidraulička kidalica Walter Bai LFV-50-HH .....	6
2.4. Opis materijala .....	7
2.5. Opis korištenih epruveta .....	9
2.6. Izračunavanje karakteristika materijala .....	10
2.7. Utjecaj brzine deformiranja na dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji .....	12
2.8. Promjena temperature ispitnog uzorka prilikom deformiranja .....	13
2.9. Opis provedenih ispitivanja .....	14
2.10. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja .....	20
2.10.1. Vlačna ispitivanja pri brzinama od 0,1 mm/s i 0,2 mm/s .....	20
2.10.2. Vlačna ispitivanja pri brzini od 20 mm/s.....	26
2.10.3. Ispitivanje savijanjem u tri točke brzinom od 20 mm/s.....	33
3. NUMERIČKI MODEL .....	35
3.1. O metodi konačnih elemenata.....	35
3.2. Programski paket ABAQUS [21] .....	36
3.2.1. Opis korištenog konačnog elementa .....	36
3.3. Verifikacija numeričkog modela.....	36
3.3.1. Analitički proračun membrane.....	38
3.3.2. Numerički proračun membrane .....	39
3.4. Numeričko modeliranje oštećenja materijala.....	43
3.5. Numeričko modeliranje termoplastičnog efekta .....	48
3.6. Numeričko modeliranje vlačnog ispitivanja plosnate epruvete i rezultati .....	49
3.6.1. Implementacija materijalnog modela i prikaz rezultata za brzinu deformiranja 0,1 mm/s.....	50
3.6.2. Implementacija materijalnog modela i prikaz rezultata za brzinu deformiranja 20 mm/s.....	53
3.7. Numeričko modeliranje ispitivanja savijanjem u tri točke i rezultati .....	56
4. USPOREDBA REZULTATA .....	61
4.1.1. Usporedba rezultata za vlačna ispitivanja pri brzinama 0,1 mm/s i 0,2 mm/s....	61
4.1.2. Usporedba rezultata za vlačna ispitivanja pri brzini 20 mm/s .....	62
4.1.3. Usporedba rezultata ispitivanja savijanjem u tri točke brzinom 20 mm/s .....	63
5. ZAKLJUČAK.....	66

---

ZAHVALE .....	69
LITERATURA.....	70
SAŽETAK.....	72
SUMMARY .....	73

## POPIS SLIKA

Slika 1.	ARAMIS 4M [10] .....	4
Slika 2.	Stohastički uzorak [9].....	4
Slika 3.	Mreža <i>faceta</i> [9] .....	4
Slika 4.	FLIR ThermoCAM SC 2000 infracrvena termokamera [13].....	6
Slika 5.	Servohidraulička kidalica Walter Bai LFV-50-HH.....	7
Slika 6.	Mikrostruktura nodularnog lijeva EN-GJS-400-18-LT [29].....	8
Slika 7.	Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje (dimenzije su u mm).....	9
Slika 8.	Epruveta bez zarez za ispitivanje savijanjem u tri točke .....	10
Slika 9.	Utjecaj promjene brzine deformiranja na dijagram ovisnosti naprezanja i deformacija [17] .....	12
Slika 10.	Plosnate epruvete za vlačno ispitivanje u početnom stanju (lijevo) te nakon nanošenja spreja sa stohastičkim uzorkom (desno).....	15
Slika 11.	Postupak postavljanja epruvete u čeljust kidalice .....	16
Slika 12.	Pozicija optičkog mjernog sustava i infracrvene termokamere za vrijeme ispitivanja .....	16
Slika 13.	Plosnate epruvete slomljene vlačnim ispitivanjem pri brzinama 0,1 mm/s i 0,2 mm/s .....	17
Slika 14.	Epruveta E1 prije i nakon deformiranja do loma brzinom od 20 mm/s .....	18
Slika 15.	Epruveta E2 prije i nakon deformiranja do loma brzinom od 20 mm/s .....	18
Slika 16.	Epruveta E1 prije i nakon ispitivanja savijanjem u tri točke brzinom od 20 mm/s .....	19
Slika 17.	Epruveta E2 prije i nakon ispitivanja savijanjem u tri točke brzinom od 20 mm/s .....	20
Slika 18.	Dijagram ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji za brzine ispitivanja od 0,1 mm/s i 0,2 mm/s .....	21
Slika 19.	Dijagram ovisnosti stvarnog naprezanja o stvarnoj deformaciji za brzine ispitivanja od 0,1 mm/s i 0,2 mm/s .....	22
Slika 20.	Dijagram ovisnosti stvarnog naprezanja o plastičnoj deformaciji za brzine ispitivanja od 0,1 mm/s i 0,2 mm/s .....	22
Slika 21.	Usporedba opisanog materijalnog modela i rezultata eksperimenta za svih pet epruveta .....	24
Slika 22.	Vrijednosti temperature za vrijeme deformiranja epruvete pri brzini 0,1 mm/s ...	25
Slika 23.	Vrijednosti temperature za vrijeme deformiranja epruvete pri brzini 0,2 mm/s ...	25
Slika 24.	Dijagram ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji za brzinu ispitivanja od 20 mm/s .....	27
Slika 25.	Dijagram ovisnosti stvarnog naprezanja o stvarnoj deformaciji za brzinu ispitivanja od 20 mm/s .....	28
Slika 26.	Dijagram ovisnosti stvarnog naprezanja o plastičnoj deformaciji za brzinu ispitivanja od 20 mm/s .....	29
Slika 27.	Usporedba materijalnog modela i vrijednosti dobivenih ispitivanjem pri brzini deformiranja od 20 mm/s .....	31
Slika 28.	Vrijednosti temperature za vrijeme deformiranja epruvete pri brzini 20 mm/s ....	32
Slika 29.	Skica epruvete s prikazanom linijom po kojoj se očitavaju pomaci u smjeru osi y .....	33

Slika 30.	Raspodjela pomaka u smjeru osi $y$ po horizontalnoj liniji simetrije za epruvete E1 i E2 pri djelovanju sile iznosa 20 000 N .....	34
Slika 31.	Uprosječna raspodjela pomaka u smjeru osi $y$ po horizontalnoj liniji simetrije pri djelovanju sile iznosa 20 000 N .....	34
Slika 32.	Shematski prikaz programa [20] .....	35
Slika 33.	Konačni element za opisivanje ravninskog stanja naprezanja CPS4 .....	36
Slika 34.	Prikaz geometrije i načina opterećenja membrane .....	37
Slika 35.	Proračunski model četvrtine membrane nakon primjene uvjeta dvostruke simetrije .....	38
Slika 36.	Normalno naprezanje membrane u smjeru osi $x$ [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] .....	39
Slika 37.	Normalno naprezanje membrane u smjeru osi $y$ [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] .....	40
Slika 38.	Duljinska deformacija membrane u smjeru osi $x$ [-] .....	41
Slika 39.	Duljinska deformacija membrane u smjeru osi $y$ [-] .....	41
Slika 40.	Raspodjela pomaka membrane u smjeru osi $x$ [mm] .....	42
Slika 41.	Raspodjela pomaka membrane u smjeru osi $y$ [mm] .....	42
Slika 42.	Tipičan dijagram inženjersko naprezanje – inženjerska deformacija za jednoosno opterećeni metalni uzorak [24].....	44
Slika 43.	Pojava oštećivanja i loma materijala uslijed pojave sitnih pukotina, njihovog rasta i spajanja [25] .....	45
Slika 44.	Kvalitativni prikaz omekšanja materijala i degradacije modula elastičnosti .....	47
Slika 45.	Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje diskretizirana s 156, 500 i 2244 CPS4 konačna elementa .....	49
Slika 46.	Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje sa zadanim rubnim uvjetima .....	50
Slika 47.	Usporedba raspodjele pomaka epruvete u smjeru osi $y$ u trenutku potpunog sloma pri brzini deformiranja 0,1 mm/s za diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa.....	52
Slika 48.	Usporedba ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji pri brzini deformiranja 0,1 mm/s dobivenih numeričkim proračunom za diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa .....	53
Slika 49.	Usporedba raspodjele pomaka epruvete u smjeru osi $y$ u trenutku potpunog loma pri brzini deformiranja 20 mm/s za diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa.....	55
Slika 50.	Usporedba ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji pri brzini deformiranja 20 mm/s dobivenih numeričkim proračunom za diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa .....	56
Slika 51.	Epruveta za ispitivanje savijanjem u tri točke diskretizirana s 478, 1940 i 4492 CPS4 konačna elementa .....	57
Slika 52.	Epruveta za ispitivanje savijanjem u tri točke s pripadnim ispitnim valjcima i rubnim uvjetima .....	58
Slika 53.	Usporedba raspodjele pomaka po epruveti opterećenoj silom iznosa 20 000 N diskretiziranom s 478, 1940 i 4492 CPS4 konačna elementa .....	59
Slika 54.	Usporedba raspodjela pomaka u smjeru osi $y$ po horizontalnoj liniji simetrije za epruvete diskretizirane s 478, 1940 i 4492 konačna elementa pri djelovanju sile iznosa 20 000 N.....	60
Slika 55.	Usporedba rezultata numeričkog proračuna za tri različite diskretizacije s rezultatima eksperimentalnog ispitivanja na pet epruveta pri brzinama deformiranja 0,1 mm/s i 0,2 mm/s .....	61
Slika 56.	Usporedba rezultata numeričkog proračuna za tri različite diskretizacije s rezultatima eksperimentalnog ispitivanja na dvije epruvete pri brzini deformiranja 20 mm/s .....	63

Slika 57.	Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za raspodjelu pomaka u smjeru osi y po horizontalnoj osi simetrije za ispitivanje savijanjem u tri točke silom iznosa 20 000 N .....	64
Slika 58.	Usporedba raspodjele pomaka u smjeru osi y dobivene eksperimentom i numeričkim proračunom za ispitivanje savijanjem u tri točke silom iznosa 20 000 N .....	65

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke karakteristike infracrvene kamere FLIR ThermaCAM SC 2000 [13].....	6
Tablica 2. Ovisnost naprezanja tečenja o plastičnoj deformaciji pri malim brzinama deformiranja (0,1 mm/s i 0,2 mm/s).....	23
Tablica 3. Vrijednosti funkcije disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju pri brzinama deformiranja 0,1 mm/s i 0,2 mm/s .....	26
Tablica 4. Ovisnost naprezanja tečenja o plastičnoj deformaciji pri brzini deformiranja od 20 mm/s .....	30
Tablica 5. Vrijednosti funkcije disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju pri brzini deformiranja 20 mm/s .....	32
Tablica 6. Podaci potrebni za proračun membrane .....	37
Tablica 7. Konzistentne jedinice u programskom paketu ABAQUS .....	52



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$\text{mm}^2$	Trenutna površina poprečnog presjeka epruvete
$a$	mm	Širina membrane
$A_0$	$\text{mm}^2$	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
$b$	mm	Visina membrane
$c_p$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku
$c_v$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom volumenu
$D$	-	Razina oštećenja materijala
$E$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Youngov modul elastičnosti
$E_d$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Youngov modul elastičnosti oštećenog materijala
$F$	N	Vlačna sila kojom se opterećuje epruveta
$G_f$	$\text{J}/\text{mm}^2$	Energija potrebna za otvaranje pukotine jedinične površine
$l$	mm	Trenutna mjerna duljina epruvete
$L$	mm	Karakteristična duljina elementa
$l_0$	mm	Početna mjerna duljina epruvete
$p$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Tlačno naprezanje
$q$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Ekvivalentno naprezanje po teoriji najveće distorzijske energije
$Q$	J	Toplina nastala uslijed mehaničkog rada plastičnih deformacija
$q_m$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Vlačno opterećenje po jedinici površine
$r^{\text{pl}}$	$\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$	Specifični toplinski tok po jedinici volumena
$T$	K	Sobna temperatura uzorka
$t$	mm	Debljina membrane
$u_f^{\text{pl}}$	mm	Ekvivalentni plastični pomak pri potpunom slomu
$u^{\text{pl}}$	mm	Ekvivalentni plastični pomak
$W$	J	Mehanički rad plastičnih deformacija
$\alpha$	1/K	Koeficijent temperaturene ekspanzije
$\varepsilon_D^{\text{pl}}$	-	Vrijednost plastične deformacije pri kojoj dolazi do oštećenja
$\varepsilon_E$	-	Inženjerska deformacija
$\varepsilon_f^{\text{pl}}$	-	Vrijednost plastične deformacije pri kojoj dolazi do potpunog sloma
$\varepsilon^{\text{pl}}$	-	Tenzor plastičnih deformacija
$\varepsilon_T$	-	Stvarna deformacija
$\varepsilon_T^{\text{el}}$	-	Elastična komponenta stvarne deformacije
$\varepsilon_T^{\text{pl}}$	-	Plastična komponenta stvarne deformacije
$\eta$	-	Funkcija disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju

$\eta_{tr}$	-	Faktor troosnosti opterećenja
$\nu$	-	Poissonov faktor
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća materijala
$\sigma$	$\text{N/mm}^2$	Tenzor naprezanja
$\sigma_1$	$\text{N/mm}^2$	Glavno naprezanje 1
$\sigma_2$	$\text{N/mm}^2$	Glavno naprezanje 2
$\sigma_3$	$\text{N/mm}^2$	Glavno naprezanje 3
$\sigma_E$	$\text{N/mm}^2$	Inženjersko naprezanje
$\sigma_T$	$\text{N/mm}^2$	Stvarno naprezanje
$\sigma_{y0}$	$\text{N/mm}^2$	Granica tečenja materijala u trenutku nastanka oštećenja
$\omega_D$	-	Varijabla stanja kojom se definira nastanak oštećenja

## 1. UVOD

### 1.1. Motivacija

Sve stroži zahtjevi na sigurnost, pouzdanost, učinkovitost i trajnost mehaničkih konstrukcija uz što nižu cijenu nameću potrebu za primjenom novih materijala složene mikrostrukture, optimirane za zadovoljavanje traženih svojstava. Kako bi se takvi materijali mogli učinkovito primjenjivati u nosivim konstrukcijama, potrebno je korištenje naprednih alata numeričke analize.

Eksperimentalna ispitivanja procesa deformiranja cjelovite konstrukcije često su zahtjevna, dugotrajna i samim time neisplativa. Numerička analiza u velikoj mjeri smanjuje potrebu za takvim složenim eksperimentalnim ispitivanjima, ali točnost numeričkog modela konstrukcije u velikoj mjeri ovisi o točnom opisu korištenog materijala, tj. o ugrađenom materijalnom modelu. Pritom je potrebno opisati ponašanje materijala u cijelom području deformiranja, od elastičnog područja, preko plastičnog tečenja i akumuliranja oštećenja, do pojave loma.

Zbog visoke duktilnosti i dinamičke izdržljivosti (trajne dinamičke čvrstoće), mnoge nosive dinamički opterećene konstrukcije izrađuju se od nodularnog lijeva. U proteklim desetljećima provedena su brojna istraživanja kako bi se utvrdio utjecaj mikrostrukture na mehanička svojstva ovog materijala pri monotonom i cikličkom opterećivanju [1]-[6]. Ipak, ne postoji mnogo literature koja opisuje mehanička svojstva nodularnog lijeva pri dinamičkom opterećivanju. To je i bio poticaj za provedbu istraživanja procesa deformiranja nodularnog lijeva oznake EN-GJS-400-18-LT prema normi [7] pri dinamičkom opterećenju. Osim toga, razlog provedbe opisanih istraživanja je što je ovaj materijal korišten za izradu glavčine KONČAR-vjetroagregata snage 1 MW, dok je kod vjetroagregata snage 2,5 MW, osim glavčine i osovinski rukavac izrađen iz ovog materijala. Končar vjetroagregati su objekti istraživanja na projektu pod nazivom *Centre of Excellence for Structural Health*

(*CEEStructHealth*) koji je financiran od strane Europske Unije, unutar programa RCOP (*Regional competitiveness operational programme*), a u okviru kojeg je rad napravljen. Osim toga, kod novih vjetroagregata većih snaga većina komponenata izrađena je iz nodularnog lijeva. Isto tako, navedeni materijal korišten je za izradu niza konstrukcijskih komponenata KONČAREVOG niskopodnog regionalnog elektromotornog vlaka EMW i KONČAREVOG niskopodnog tramvaja serije TMK 2200.

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih istraživanja i numeričkog modeliranja dinamičkog elastoplastičnog odziva nodularnog lijeva EN-GJS-400-18-LT koji se sve više koristi za izradu komponenata modernih konstrukcija koje su izložene dinamičkom opterećenju. . Eksperimentalna istraživanja osim statičkih ispitivanja, uključuju i dinamička ispitivanja pri različitim brzinama deformiranja. Numerička analiza procesa deformiranja, akumuliranja oštećenja i loma provedena je upotrebom konačnih elemenata za opisivanje ravninskog stanja naprezanja te neizoternog elastoplastičnog konstitutivnog modela.

## **1.2. Cilj rada**

Cilj ovog rada je razvoj neizoternog elastoplastičnog konstitutivnog modela za opisivanje mehaničkog ponašanja nodularnog lijeva oznake EN-GJS-400-18-LT koji bi povećao točnost numeričkih simulacija deformiranja nosivih konstrukcija izrađenih od tog materijala.

U svrhu izrade i validacije numeričkog modela potrebno je provesti eksperimentalna ispitivanja u statičkim i dinamičkim uvjetima pri različitim brzinama deformiranja. Za vrijeme eksperimenta namjera je mjeriti pomake korištenjem fotogrametrije i temperature korištenjem infracrvene termografske kamere [1], [8] za što točnije kalibriranje parametara materijala u konstitutivnim relacijama.

## 2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

U ovom radu provedena su vlačna ispitivanja na plosnatim epruvetama te ispitivanja savijanjem u tri točke. Ispitivanja su provedena u kvazistatičkim i dinamičkim uvjetima pri različitim brzinama deformiranja.

Eksperimentalna istraživanja provedena su u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu te u Laboratoriju za konstrukcije Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje na Sveučilištu u Splitu.

### 2.1. Optički mjerni sustav ARAMIS 4M

ARAMIS 4M njemačke tvrtke GOM (Gesellschaft für Optische Messtechnik) je beskontaktni optički mjerni sustav koji služi za analizu, izračun i zapisivanje deformacija statički ili dinamički opterećenog mjernog objekta [9]. Pomoću sustava ARAMIS može se, bez utjecaja na rezultate mjerenja, odrediti raspodjela pomaka po čitavom mjernom objektu, dok se korištenjem konvencionalnih kontaktnih metoda poput mjerenja tenzometarskim trakama pomak mjeri isključivo u točkama na kojem su trake prethodno postavljene. Zbog izrazite točnosti mjerenja (do 0,005 %) i brzine mjerenja, tj. velikog broja mjerenja u sekundi (do 1334 Hz) ARAMIS 4M je izvrstan alat za mjerenje deformacija potrebnih za određivanje svojstava materijala.

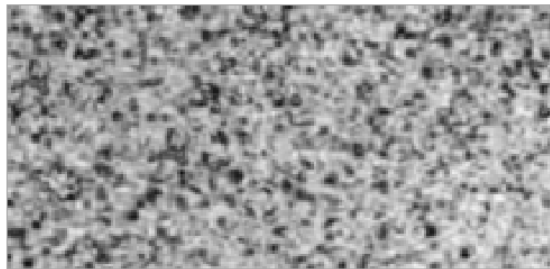
ARAMIS 4M (slika 1) sastoji se od stativa, osvjetljenja te dvije kamere visoke brzine i rezolucije čiji se položaj kalibrira u prostoru ovisno o mjernom objektu (čija veličina može varirati u rasponu od reda veličine mm<sup>2</sup> pa sve do m<sup>2</sup>) te računala s pripadnim programskim paketom za obradu i prikaz podataka.

Pri analizi mjernog objekta homogene strukture potrebna je posebna priprema površine, primjerice nanošenjem spreja sa stohastičkim uzorkom (stohastički *raster*) prikazanim na slici

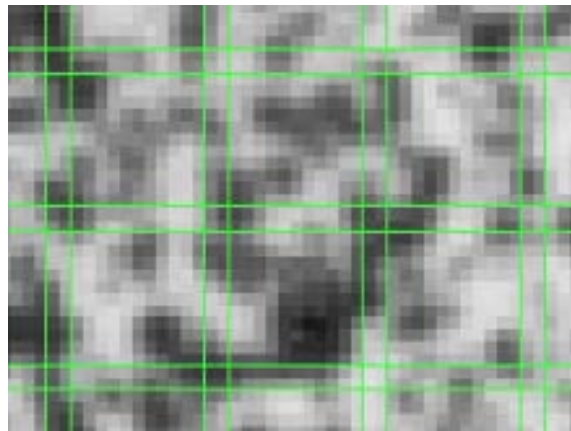
2. Na nanesenom rasteru potrebno je odabrati početnu točku oko koje programski paket ARAMIS-a izrađuje mrežu *faceta* prikazanih na slici 3. Pomoću *faceta*, a uz prethodno kalibriranje, programski paket izrađuje trodimenzionalni model mjernog objekta.



Slika 1. ARAMIS 4M [10]



Slika 2. Stohastički uzorak [9]



Slika 3. Mreža *faceta* [9]

## **2.2. Infracrvena termografska kamera FLIR ThermaCAM SC 2000**

Infracrvena kamera FLIR ThermaCAM SC 2000 (slika 4) koristi se za beskontaktno, nerazorno mjerenje temperaturne raspodjele na površini mjernog objekta metodom mjerenja toplinskog zračenja kojeg odašilje objekt mjerenja. Tehničke karakteristike kamere prikazane su u tablici 1.

Infracrvena termografska kamera bilježi toplinsko zračenje (valne duljine unutar infracrvenog spektra) površine mjernog objekta. Pritom se mjeri ukupno zračenje koje odašilje površina, a ono se sastoji od vlastitog emitiranog zračenja (izvor zračenja je promatrani objekt) i reflektiranog zračenja (izvor zračenja su objekti u okolini mjernog objekta). Budući da je temperatura objekta isključivo funkcija njegovog vlastitog emitiranog zračenja potrebno je, zbog točnosti, od ukupnog zračenja oduzeti reflektirano. Nanošenje stohastičkog rastera potrebnog za mjerenje optičkim sustavom ARAMIS također djeluje pogodno na smanjenje reflektiranog zračenja.

Također, pri vlačnom ispitivanju plosnatih epruveta, mjerenje temperature izvršeno je i primjenom termoparova, čime su verificirana mjerenja dobivena infracrvenom termokamerom. U radu [12] prikazan je opsežni opis mjerenja temperature, prikazani su svi rezultati i njihova verifikacija mjerenjem termoparovima.



Slika 4. FLIR ThermaCAM SC 2000 infracrvena termokamera [13]

Tablica 1. Tehničke karakteristike infracrvene kamere FLIR ThermaCAM SC 2000 [13]

Točnost	$\pm 2\%$ ili $2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Mjerna osjetljivost	$0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri $30\text{ }^{\circ}\text{C}$
Vidno polje	$24^{\circ} \times 18^{\circ} / 0,3\text{ m}$
Radna temperatura	$-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $55\text{ }^{\circ}\text{C}$
Područje osjetljivosti	$7,5 - 13\text{ }\mu\text{m}$
Detektor	FPA $320 \times 240$ piksela (nehlađeni bolometar)
Temperatura mjernog područja	$-40\text{ }^{\circ}\text{C} - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$0\text{ }^{\circ}\text{C} - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$350\text{ }^{\circ}\text{C} - 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 2.3. Servohidraulička kidalica Walter Bai LFV-50-HH

Vlačna ispitivanja provedena su na servohidrauličkoj kidalici W+B LFV 50-HH s upravljačkom jedinicom DIGWIN 2000 švicarskog proizvođača Walter Bai prikazanoj na slici 5. Najveća radna sila koju kidalica može ostvariti pri statičkom opterećivanju iznosi  $63\text{ kN}$ , dok pri dinamičkom ispitivanju iznosi  $50\text{ kN}$  [11]. Prije ispitivanja u upravljački program unose se parametri ispitivanja, odnosno u ovom slučaju brzina pomicanja čeljusti kidalice. U svakom vremenskom trenutku za odgovarajući pomak gornje čeljusti kidalice mjeri se pripadna sila.



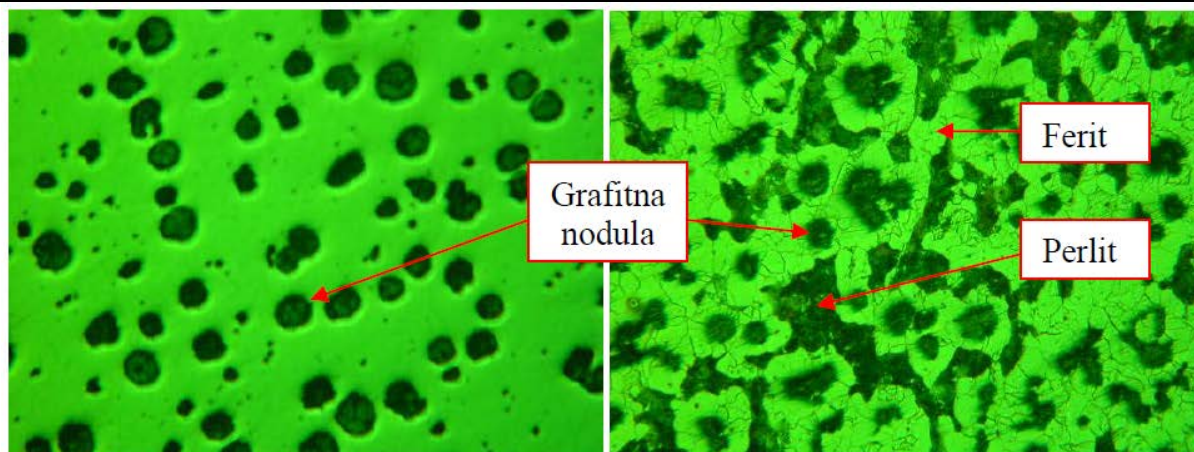


**Slika 5. Servohidraulička kidalica Walter Bai LFV-50-HH**

#### **2.4. Opis materijala**

Ispitivanja u ovom radu provedena su na nodularnom lijevu oznake EN-GJS-400-18-LT prema europskoj normi EN 1563 [7] u kojoj je definirana minimalna vlačna čvrstoća  $400 \text{ N/mm}^2$ , minimalna istezljivost 18 %, a ispitivanje udarne radnje loma provodi se pri niskim temperaturama ( $-20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ ).

Nodularni lijev je vrsta lijeva na bazi željeza kojeg karakterizira prisustvo grafita u obliku kuglica, tj. nodula. Nodule grafita raspršene su u feritnoj i/ili perlitnoj željeznoj osnovi kako je za nodularni lijev EN-GJS-400-18-LT prikazano na slici 6. Osim ferita i perlita koji su prisutni u promatranoj vrsti nodularnog lijeva, moguća je i austenitna mikrostruktura željezne osnove.



**Slika 6. Mikrostruktura nodularnog lijeva EN-GJS-400-18-LT [29]**

Ferit je najčistija faza željeza u nodularnom lijevu za koju je karakteristična niska čvrstoća i tvrdoća, uz visoku istezljivost i žilavost. Perlit je mješavina lamelnog cementita u matrici ferita, a svojstvena mu je visoka čvrstoća i tvrdoća, uz nisku istezljivost. [30]

Zbog tako suprotnih svojstava, svojstva konačnog nodularnog lijeva u velikoj mjeri ovise o vrsti matrice. Različitim udjelima ferita i perlita moguće je postići mehanička svojstva širokog raspona.

Glavna svojstva nodularnog lijeva prema [29] i [31]:

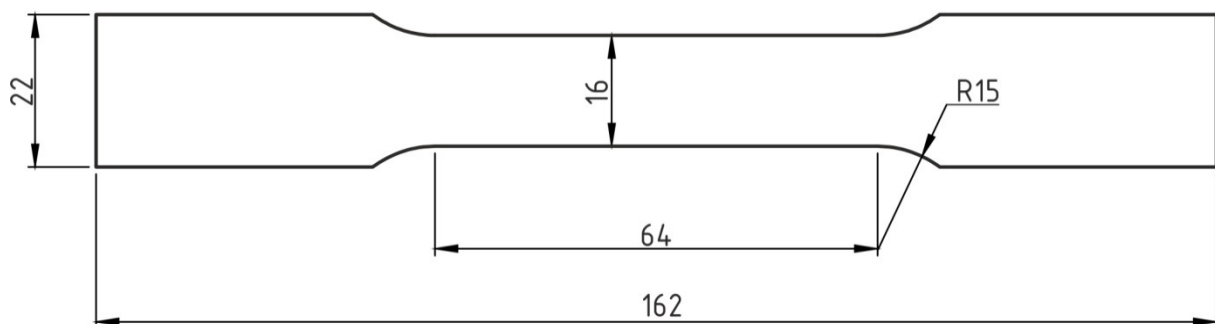
- mehanička su svojstva bolja od sivog lijeva, a slabija od svojstava čeličnog lijeva. Dinamička izdržljivost je visoka, posebno u poboljšanom stanju kao i vlačna čvrstoća, i to radi kuglastog oblika grafita. Izotermičkim poboljšavanjem dobiva se povećana žilavost. Modul elastičnosti je visok – oko  $180\,000\text{ N/mm}^2$  s izrazitim područjem elastičnosti u dijagramu naprezanje – istezanje:
- grafit prisutan u obliku nodula djeluje kao zaustavljač pukotina;
- sposobnost prigušenja vibracija (povećava otpornost na zamor) je dva puta niža nego kod sivog lijeva s listićavim grafitom, ali viša nego kod čelika;
- dobro se obrađuje odvajanjem čestica;

- može se zavarivati;
- bolja ljevačka svojstva od čelika (skupljanje kod skrućivanja manje nego kod sivog lijeva)
- otpornost na trošenje, koroziju i oksidaciju je bolja nego kod sivog lijeva s listićavim grafitom;
- dobra ležišna svojstva
- toplo i ograničeno hladno oblikovljiv;
- legiranjem se postižu posebna svojstva – npr. otpornost na djelovanje agresivnih medija i vatrootpornost kod austenitnih vrsta.

Detaljan opis mikrostrukture, metoda lijevanja i utjecaja same mikrostrukture na svojstva nodularnog lijeva EN-GJS-400-18-LT prikazana su u [29].

## 2.5. Opis korištenih epruveta

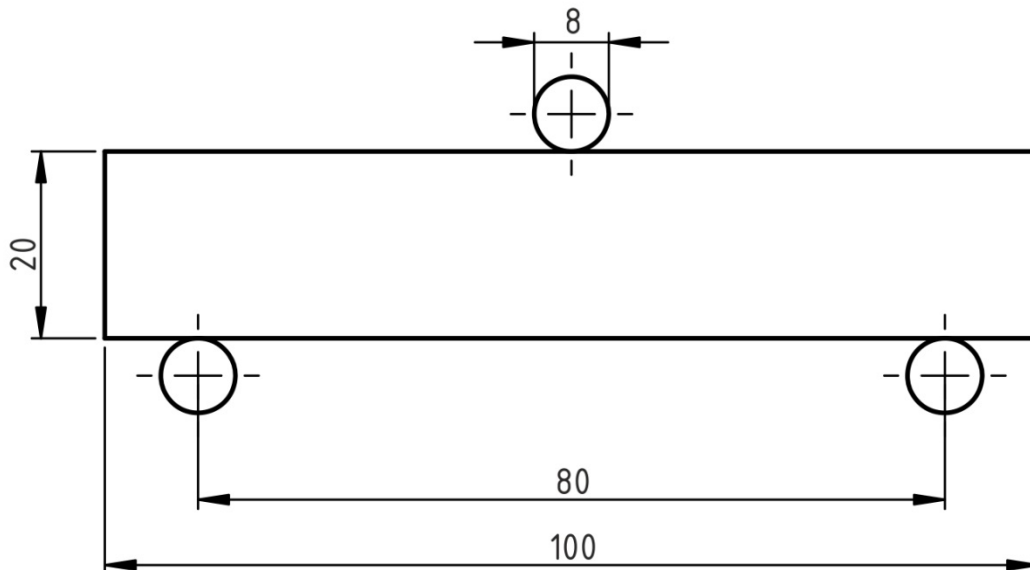
Vlačno ispitivanje u svrhu određivanja ovisnosti napreznja i deformacije provedeno je na plosnatim epruvetama dimenzija prema slici 7, debljine 5 mm.



Slika 7. Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje (dimenzije su u mm)

Ispitivanje savijanjem u tri točke provedeno je na epruvetama dimenzija prema slici 8, debljine 10 mm.

Površine svih epruveta su polirane kako bi se omogućilo nanošenje spreja sa stohastičkim uzorkom potrebnog za provedbu mjerenja optičkim sustavom ARAMIS 4M.



Slika 8. Epruveta bez zarez za ispitivanje savijanjem u tri točke

## 2.6. Izračunavanje karakteristika materijala

Za vrijeme vlačnog ispitivanja na kidalici se mjeri i bilježi vlačna sila  $F$  kojom gornja čeljust kidalice razvlači epruvetu. Uz poznati poprečni presjek epruvete  $A_0$ , moguće je izračunati inženjersko naprezanje  $\sigma_E$ , koje se definira kao omjer trenutne sile  $F$  i početne površine  $A_0$ :

$$\sigma_E = \frac{F}{A_0}. \quad (1)$$

Uz poznavanje početne duljine  $l_0$  i duljine  $l$  mjerene za vrijeme vlačnog ispitivanja moguće je izračunati inženjersku deformaciju  $\varepsilon_E$ , koja se definira kao omjer trenutnog produljenja  $\Delta l$  i početne duljine  $l_0$ :

$$\varepsilon_E = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}. \quad (2)$$

Za većinu inženjerskih problema dovoljno je poznavanje ovisnosti inženjerskog naprežanja o inženjerskoj deformaciji, dok je za proučavanje problema s većim deformacijama, a posebno korištenjem numeričkih metoda, važno poznavanje ovisnosti stvarnog naprežanja o iznosu stvarne deformacije. Važnost primjene stvarnih naprežanja i stvarnih deformacija umjesto inženjerskih pokazana je i u [14].

Stvarno naprežanje  $\sigma_T$  definira se kao omjer trenutne sile  $F$  i trenutne površine  $A$ :

$$\sigma_T = \frac{F}{A}. \quad (3)$$

Poznato je da elastične deformacije uzrokuju promjene u volumenu, dok u području plastičnih deformacija materijal teče uz zanemarive promjene u volumenu [15], [16]. Iz pretpostavke konstantnog volumena slijedi izraz:

$$dV = 0 \rightarrow A \cdot l = A_0 \cdot l_0 \rightarrow \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0}. \quad (4)$$

Izraz (3) može se zapisati kao:

$$\sigma_T = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A}, \quad (5)$$

iz čega se nakon uvrštenja izraza (2) i (4) dobiva konačni izraz za izračunavanje stvarnog naprežanja:

$$\sigma_T = \sigma_E \cdot (1 + \varepsilon_E). \quad (6)$$

Prirast stvarne deformacije  $d\varepsilon_T$  definira se kao omjer infinitezimalnog produljenja  $dl$  i trenutne duljine  $l$ :

$$d\varepsilon_T = \frac{dl}{l}, \quad (7)$$

iz čega se integracijom od početne duljine  $l_0$  do konačne duljine  $l$  dobiva izraz:

$$\varepsilon_T = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \left( \frac{l}{l_0} \right), \quad (8)$$

iz čega se nakon uvrštenja izraza (2) dobiva konačni izraz za izračunavanje stvarne deformacije:

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_E). \quad (9)$$

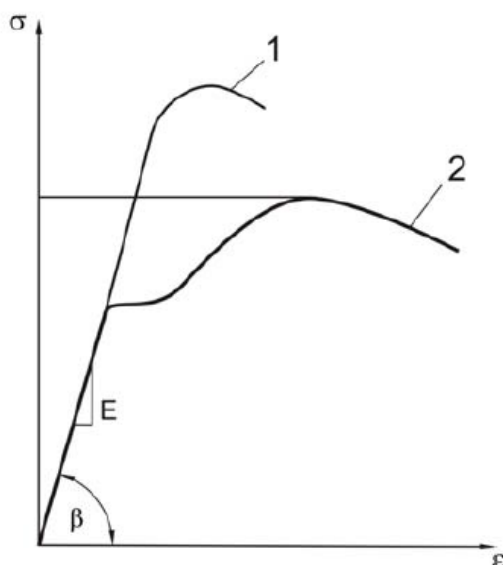
Osim stvarne deformacije, za potrebe definiranja materijalnog modela važan je iznos plastične deformacije  $\varepsilon_T^{pl}$ , koji se može izračunati kao razlika ukupne stvarne deformacije  $\varepsilon_T$  i njenog elastičnog dijela  $\varepsilon_T^{el}$  koji prati Hookeov zakon:

$$\varepsilon_T^{pl} = \varepsilon_T - \varepsilon_T^{el} = \varepsilon_T - \ln\left(1 + \frac{\sigma_E}{E}\right), \quad (10)$$

gdje  $E$  predstavlja Youngov modul elastičnosti.

## 2.7. Utjecaj brzine deformiranja na dijagram ovisnosti naprežanja o deformaciji

Promjenom brzine deformiranja mijenja se dijagram ovisnosti naprežanja i deformacija. Povećanjem brzine deformiranja u dijagramu nema izražene plohe tečenja, viša je vlačna čvrstoća, a do loma dolazi pri manjoj ukupnoj deformaciji [17]. Utjecaj promjene brzine deformiranja na dijagram ovisnosti naprežanja i deformacija kvalitativno je prikazan na slici 9 gdje krivulja 1 predstavlja ovisnost pri povišenim brzinama deformiranja dok krivulja 2 predstavlja ovisnost u statičkim uvjetima, tj. pri zanemarivo malim brzinama deformiranja.



Slika 9. Utjecaj promjene brzine deformiranja na dijagram ovisnosti naprežanja i deformacija [17]

## 2.8. Promjena temperature ispitnog uzorka prilikom deformiranja

Prilikom opterećivanja ispitnog uzorka u elastičnom području dolazi do promjene njegove temperature koja je proporcionalna iznosu naprezanja, tj. prvoj invarijanti naprezanja. Kvantitativna ovisnost promjene temperature u ovisnosti o promjeni naprezanja opisana je jednadžbom termoelastičnosti [18]:

$$\Delta T = \frac{-\alpha T}{\rho c_p} (\sigma_1 + \sigma_2), \quad (11)$$

gdje  $\alpha$  predstavlja koeficijent temperaturene ekspanzije,  $T$  sobnu temperaturu uzorka,  $\rho$  gustoću materijala,  $c_p$  specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku, a  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  su glavna naprezanja. U ovom slučaju suma ( $\sigma_1 + \sigma_2$ ) predstavlja prvu invarijantu naprezanja, jer je treća komponenta prve invarijante (glavno naprezanje  $\sigma_3$ ) jednaka nuli na površini tijela.

Važno je napomenuti da izraz (11) vrijedi isključivo uz pretpostavku adijabatskog stanja, tj. uz pretpostavku da se za vrijeme deformiranja između uzorka i okoline ne izmjenjuje toplina. Povećanjem brzine deformiranja (brzine odvijanja procesa), proces se sve više približava adijabatskom čime se povećava točnost pretpostavke.

Za razliku od elastičnog deformiranja, pri plastičnom deformiranju generira se toplinska energija. Ukupni rad plastičnih deformacija jednak je površini ispod krivulje ovisnosti stvarnog naprezanja o plastičnim deformacijama. Prema [19] dio rada plastičnih deformacija troši se na stvaranje oštećenja poput pukotina i dislokacija unutar samog materijala čime se povećava njegova unutarnja energija (time i temperatura uzorka), dokse ostatak rada plastičnih deformacija u obliku topline predaje okolini.

Ovdje se također uvodi pretpostavka adijabatskog procesa, tj. pretpostavlja se da između uzorka i okoline za vrijeme procesa plastičnog deformiranja nema izmjene topline, pa stoga cjelokupna u procesu generirana toplinska energija povećava unutarnju energiju uzorka, a

time i njegovu temperaturu. Također, kao i kod elastičnog deformiranja, povećanjem brzine deformiranja proces se sve više približava adijabatskom i povećava se točnost pretpostavke.

Mehanički rad plastičnih deformacija  $\Delta W$  definiran je kao površina ispod krivulje ovisnosti stvarnog naprezanja o plastičnim deformacijama:

$$\Delta W = \int_0^{\varepsilon_T^{pl}} \sigma_T d\varepsilon_T^{pl}. \quad (12)$$

Ako se definira funkcija disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju  $\eta$  kao dio ukupnog mehaničkog rada  $\Delta W$  koji se troši na stvaranje toplinske energije  $\Delta Q$ :

$$\eta = \frac{\Delta Q}{\Delta W}, \quad (13)$$

može se izvesti konačan izraz za porast temperature kao funkcija iznosa plastične deformacije:

$$\eta \cdot \Delta W = \Delta Q, \quad (14)$$

$$\eta \cdot \int_0^{\varepsilon_T^{pl}} \sigma_T d\varepsilon_T^{pl} = \rho \cdot c_v \cdot \Delta T, \quad (15)$$

$$\Delta T(\varepsilon_T^{pl}) = \frac{\eta}{\rho \cdot c_v} \cdot \int_0^{\varepsilon_T^{pl}} \sigma_T d\varepsilon_T^{pl}, \quad (16)$$

gdje  $\rho$  predstavlja gustoću materijala,  $c_v$  predstavlja specifični toplinski kapacitet pri konstantnom volumenu (jer je proces plastičnog tečenja u pravilu izohorna promjena),  $\sigma_T$  je iznos stvarnog naprezanja, a  $\varepsilon_T^{pl}$  pripadni iznos plastične deformacije.

Iz svega navedenog, za vrijeme vlačnog ispitivanja plosnate epruvete od rasterećenog stanja do loma, očekuje se u elastičnom području blagi pad temperature prema izrazu (11), a zatim nakon granice tečenja, tj. ulaskom u plastično područje očekuje se nagli porast temperature prema izrazu (16) koji će trajati sve do loma epruvete.

## 2.9. Opis provedenih ispitivanja

Provedena su tri vlačna ispitivanja na plosnatim epruvetama (E1, E2 i E3) pri brzinama 0,1 mm/s te dva (E4 i E5) pri brzinama 0,2 mm/s. Prije samog ispitivanja na svih pet epruveta, prikazanih na lijevoj strani slike 10, nanesen je sprej sa stohastičkim uzorkom, kako



je prikazano na desnoj strani slike 10, u svrhu omogućavanja praćenja pomaka optičkim mjernim sustavom ARAMIS 4M kako je opisano u poglavlju 2.1.



**Slika 10. Plosnate epruvete za vlačno ispitivanje u početnom stanju (lijevo) te nakon nanošenja spreja sa stohastičkim uzorkom (desno)**

Nakon opisane pripreme, epruvete su postavljene u čeljusti kidalice kako je prikazano na slici 11, a potom su ispred epruvete postavljene optički mjerni sustav ARAMIS 4M te infracrvena termokamera, kako je prikazano na slici 12. Potom su u upravljački program kidalice zadani parametri ispitivanja, te su epruvete deformirane do loma. Epruvete u slomljenom stanju prikazane su na slici 13.



**Slika 11. Postupak postavljanja epruvete u čeljust kidalice**



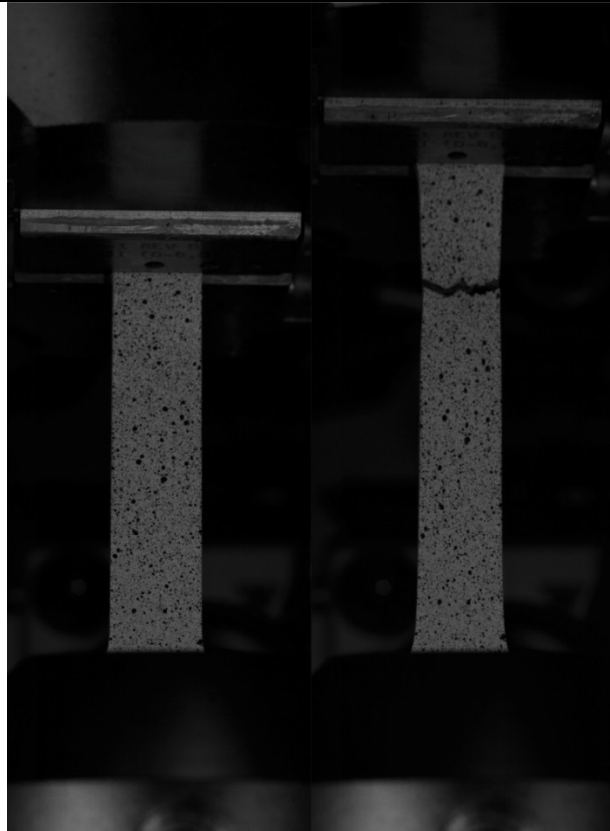
**Slika 12. Pozicija optičkog mjernog sustava i infracrvene termokamere za vrijeme ispitivanja**



**Slika 13. Plosnate epruvete slomljene vlačnim ispitivanjem pri brzinama 0,1 mm/s i 0,2 mm/s**  
Zbog toga što kidalica u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagreba ne može postizati dovoljno velike brzine deformiranja, ostatak ispitivanja proveden je u suradnji s profesorom Lovrom Krstulović-Oparom iz Laboratorija za konstrukcije Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje na Sveučilištu u Splitu pri čemu je korišten isti optički mjerni sustav ARAMIS 4M.

U ovom radu su prikazani rezultati vlačnih ispitivanja provedenih na dvije plosnate epruvete (E1 i E2) dimenzija prema slici 7 brzinom od 20 mm/s. Epruvete su pripremljene, postavljene i ispitane na već opisan način, s jedinom razlikom u brzini deformiranja.

Na slikama 14 i 15 prikazane su slike epruveta na početku i na kraju deformiranja do loma brzinom 20 mm/s, snimljene ARAMIS-om.



**Slika 14. Epruveta E1 prije i nakon deformiranja do loma brzinom od 20 mm/s**



**Slika 15. Epruveta E2 prije i nakon deformiranja do loma brzinom od 20 mm/s**

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja savijanjem u tri točke provedenih na dvije epruvete (E1 i E2) dimenzija prema slici 8. Epruvete su oslonjene na valjke, a potom deformirane brzinom 20 mm/s do gubitka mehaničkih svojstava.

Na slikama 16 i 17 prikazane su slike epruveta na početku i na kraju ispitivanja savijanjem u tri točke brzinom od 20 mm/s, snimljene ARAMIS-om.



**Slika 16.** Epruveta E1 prije i nakon ispitivanja savijanjem u tri točke brzinom od 20 mm/s



**Slika 17. Epruveta E2 prije i nakon ispitivanja savijanjem u tri točke brzinom od 20 mm/s**

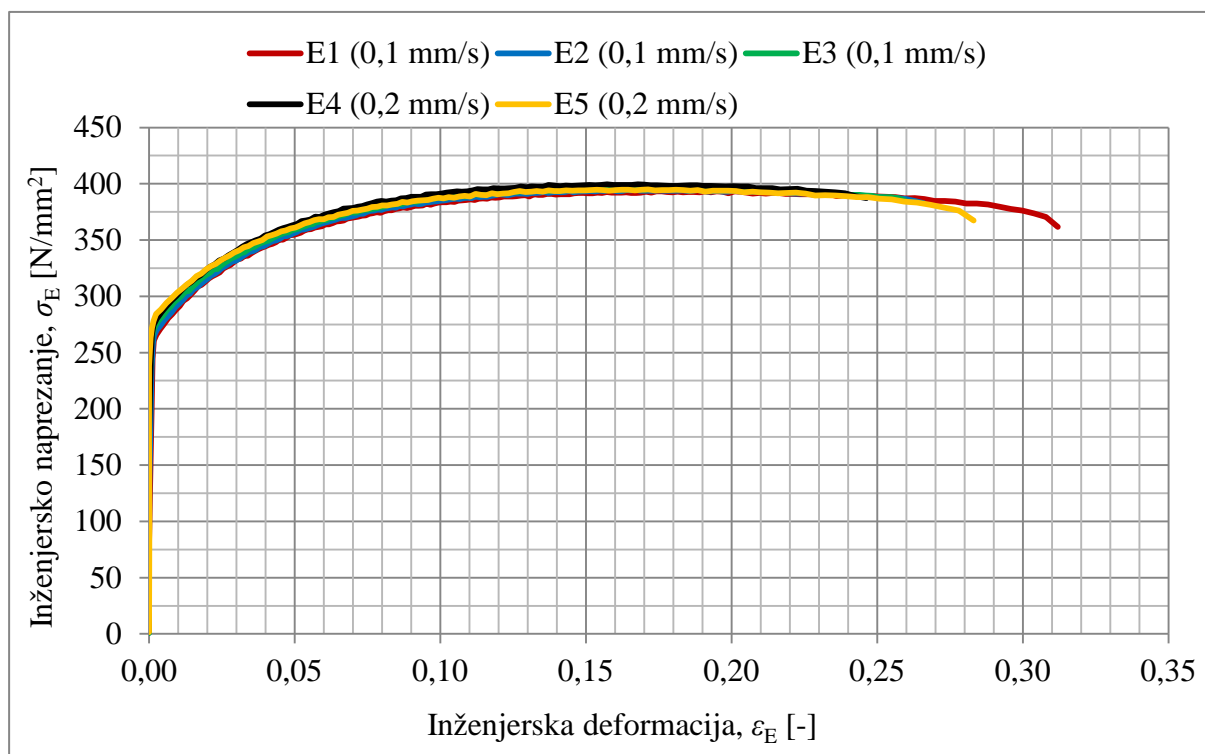
## **2.10. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja**

### ***2.10.1. Vlačna ispitivanja pri brzinama od 0,1 mm/s i 0,2 mm/s***

Brzine ispitivanja od 0,1 mm/s i 0,2 mm/s dovoljno su niske da se ispitivanja pri tim brzinama mogu smatrati kvazistatičkim. Također, razlike u rezultatima između ispitivanja pri 0,1 mm/s i 0,2 mm/s zanemarive su pa će rezultati za prvih pet ispitivanih epruveta (E1 – E5) prikazanih na slikama 10 i 13 biti prikazano zajedno.

Na slici 18 prikazani su dijagrami ovisnosti inženjerskog naprežanja o inženjerskoj deformaciji pri brzinama ispitivanja 0,1 mm/s i 0,2 mm/s. Dijagrami su izrađeni tako da se za vrijeme deformiranja pomoću ARAMIS-a na epruveti prati produljenje linije početne duljine oko 25 mm te se pomoću tih podataka izračunava inženjerska deformacija prema izrazu (2). Istovremeno, korištenjem senzora na kidalici bilježe se vrijednosti sile koja se potom dijeli s početnom površinom epruvete kako bi se dobila vrijednost inženjerskog naprežanja (izraz

(1)). Uparivanjem tako dobivenih vrijednosti dobivaju se dijagrami inženjersko naprezanje – inženjerska deformacija.

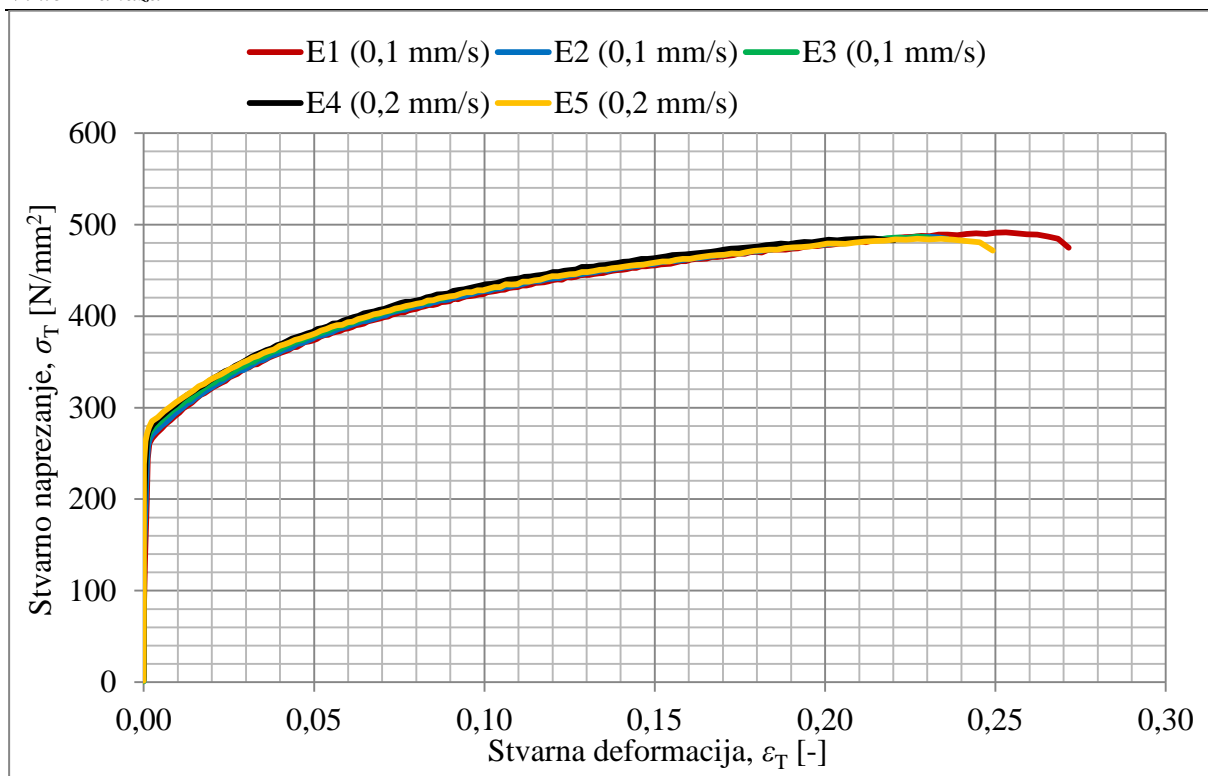


**Slika 18. Dijagram ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji za brzine ispitivanja od 0,1 mm/s i 0,2 mm/s**

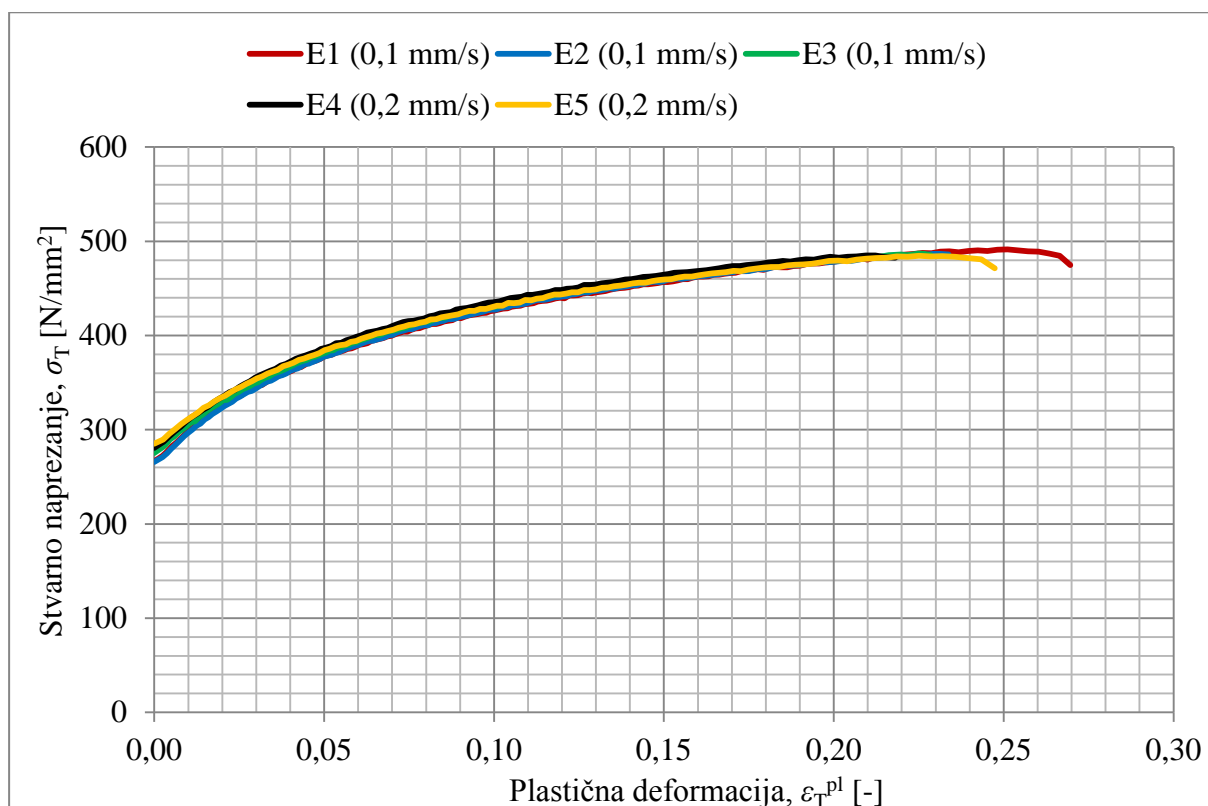
Iz dijagrama se vidi jako dobro poklapanje rezultata granice tečenja, vlačne čvrstoće i općenito tijekom krivulje inženjersko naprezanje – inženjerska deformacija. Jedini podatak koji bitnije odstupa od jedne epruvete do druge je vrijednost istežljivosti, tj. inženjerske deformacije pri kojoj dolazi do loma.

Kao što je već prethodno objašnjeno, za potrebe izrade materijalnog modela potrebno je poznavanje ovisnosti stvarnog naprezanja o stvarnoj deformaciji. Korištenjem izraza izvedenih u poglavlju 2.6 vrijednosti inženjerskog naprezanja i inženjerske deformacije preračunavaju se u stvarno naprezanje, stvarnu deformaciju i plastičnu deformaciju.

Na slici 19 prikazana je ovisnost stvarnog naprezanja o stvarnoj deformaciji, dok je dijagramom na slici 20 prikazana ovisnost stvarnog naprezanja o plastičnoj deformaciji.



Slika 19. Dijagram ovisnosti stvarnog naprezanja o stvarnoj deformaciji za brzine ispitivanja od 0,1 mm/s i 0,2 mm/s



Slika 20. Dijagram ovisnosti stvarnog naprezanja o plastičnoj deformaciji za brzine ispitivanja od 0,1 mm/s i 0,2 mm/s



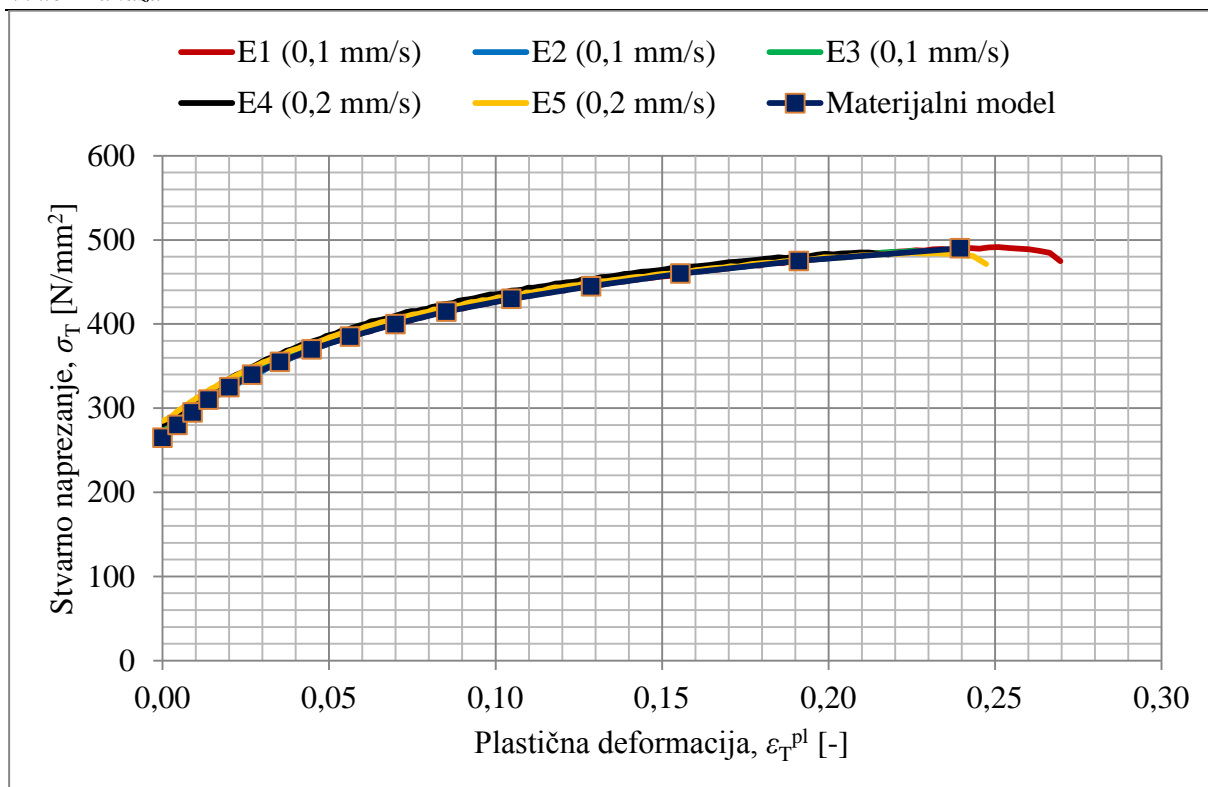
Materijalni model ovisnosti stvarnog naprezanja, tj. naprezanja tečenja o plastičnoj deformaciji pri malim brzinama deformiranja (0,1 mm/s i 0,2 mm/s) definiran je tablicom 2.

Materijalni model dobro opisuje ponašanje svih pet epruveta u području do pojave oštećenja i loma, kako je prikazano na slici 21, dok je posljednja vrijednost plastične deformacije u tablici jednaka prosječnoj vrijednosti od vrijednosti izračunatih za svaku epruvetu.

**Tablica 2. Ovisnost naprezanja tečenja o plastičnoj deformaciji pri malim brzinama deformiranja (0,1 mm/s i 0,2 mm/s)**

Plastična deformacija [-]	Naprezanje tečenja [N/mm <sup>2</sup> ]
0,0000	265
0,0045	280
0,0091	295
0,0139	310
0,0201	325
0,0269	340
0,0353	355
0,0448	370
0,0564	385
0,0700	400
0,0853	415
0,1048	430
0,1287	445
0,1556	460
0,1911	475
0,2395	490

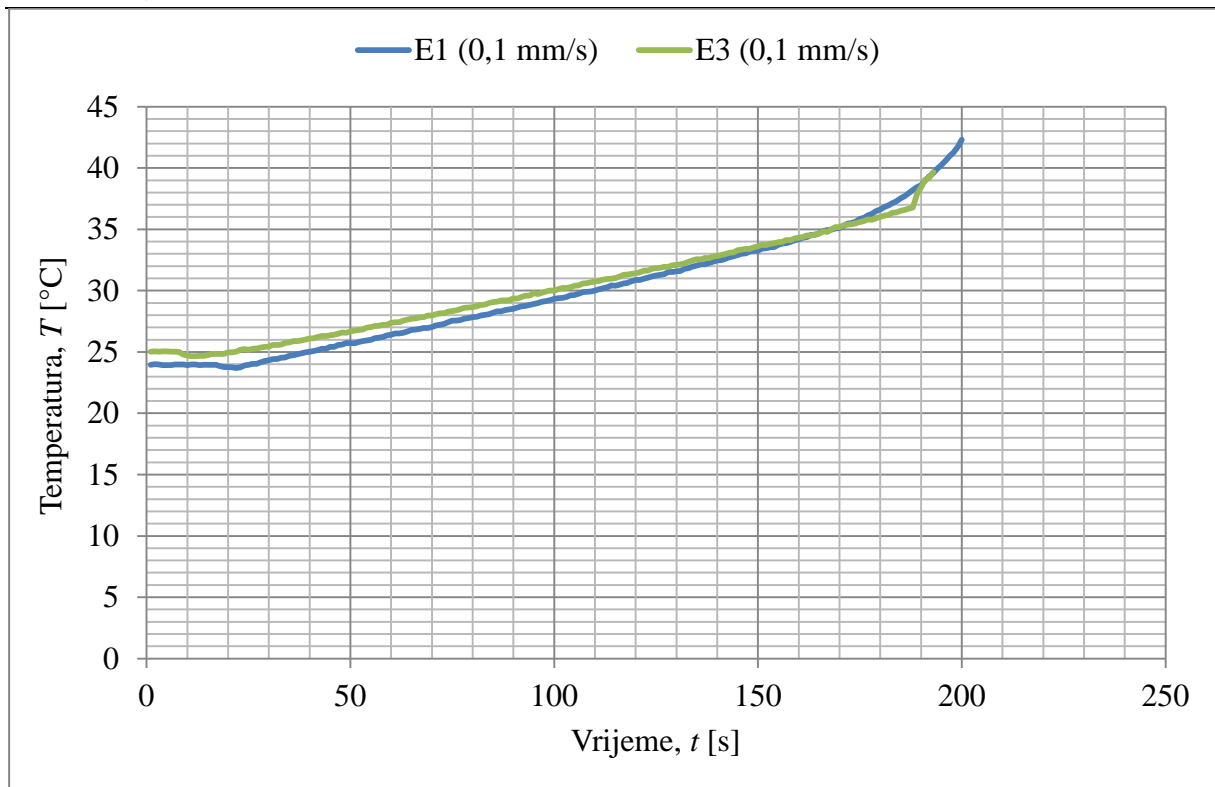
U numeričkom materijalnom modelu, za svaku vrijednost plastične deformacije linearno se interpolira između dvije najbliže vrijednosti naprezanja tečenja, a pretpostavlja se konstantna vrijednost naprezanja tečenja nakon posljednje vrijednosti navedene u tablici, tj. u ovom slučaju naprezanje tečenja iznosi 490 N/mm<sup>2</sup> za sve vrijednosti plastične deformacije veće ili jednake 0,2395.



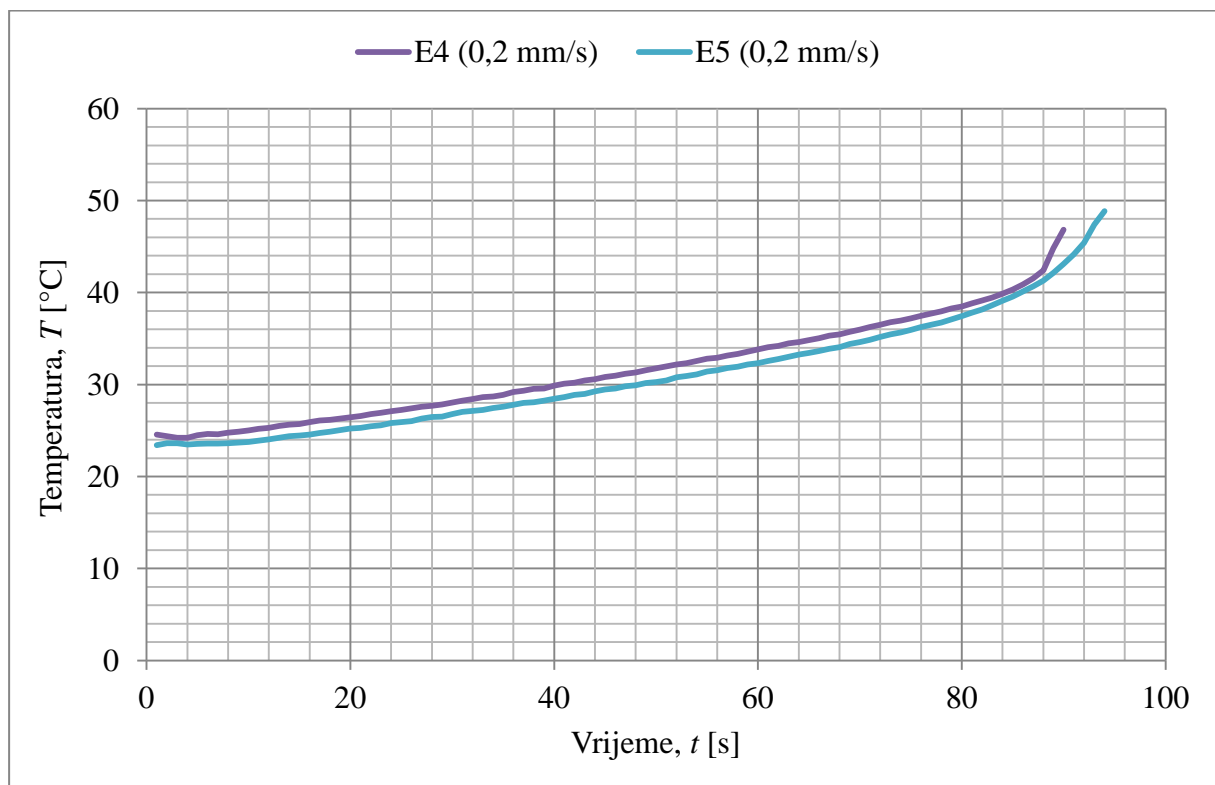
**Slika 21. Usporedba opisanog materijalnog modela i rezultata eksperimenta za svih pet epruveta**

Vrijednosti temperature epruvete za vrijeme ispitivanja, tj. njenog deformiranja do loma prikazane su na slikama 22 i 23. Za epruvetu E2 nisu prikazani rezultati jer su se pojavili određeni problemi s termokamerom i rezultati nisu relevantni.

Na slikama se može primijetiti pad temperature uslijed efekta termoelastičnosti opisanog u poglavlju 2.8 koji je reda veličine 0,2 °C, nakon čega počinje tečenje materijala i rast temperature uslijed pretvorbe mehaničkog rada u toplinu, kako je opisano u poglavlju 2.8. Uslijed malih vrijednosti pada temperature (u skladu s rezultatima prikazanim u [18]), efekt termoelastičnosti se može zanemariti pri opisivanju materijalnog modela. Također, može se primijetiti znatno veći prirast temperature pri deformiranju brzinama 0,2 mm/s, nego pri 0,1 mm/s, zbog toga što je proces bliži adijabatskom.



Slika 22. Vrijednosti temperature za vrijeme deformiranja epruvete pri brzini 0,1 mm/s



Slika 23. Vrijednosti temperature za vrijeme deformiranja epruvete pri brzini 0,2 mm/s

Uz poznavanje prirasta temperature i ovisnosti stvarnog naprežanja o plastičnoj deformaciji iz izraza (16) za svaku epruvetu izračunava se funkcija disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju  $\eta$ . Izračunate vrijednosti prikazane su u tablici 3.

**Tablica 3. Vrijednosti funkcije disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju pri brzinama deformiranja 0,1 mm/s i 0,2 mm/s**

Epruveta (brzina deformiranja)	$\eta$
E1 (0,1 mm/s)	0,59
E3 (0,1 mm/s)	0,57
E4 (0,2 mm/s)	0,89
E5 (0,2 mm/s)	0,88

Vrijednosti funkcije disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju za deformiranje pri brzini 0,1 mm/s znatno odstupaju od iskustvenih vrijednosti za metale koje se kreću preko 0,9, što se objašnjava velikom greškom u pretpostavci adijabatskog procesa, tj. pri tako maloj brzini značajna je izmjena topline s okolinom, dok se vrijednosti za brzine od 0,2 mm/s približavaju iskustvenim vrijednostima. Za sigurno određivanje funkcije disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju potrebno je eksperiment provesti i pri višim brzinama te usporediti odstupanje od vrijednosti dobivenih pri brzini 0,2 mm/s.

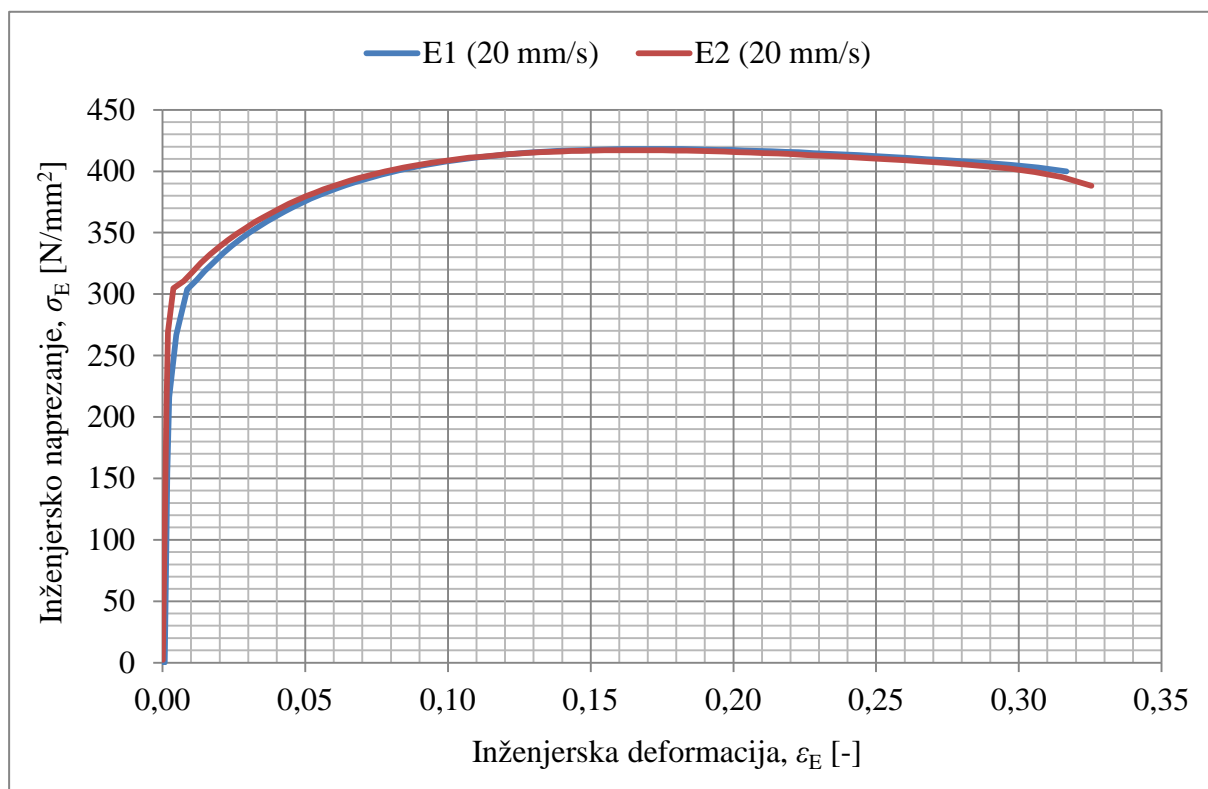
### **2.10.2. Vlačna ispitivanja pri brzini od 20 mm/s**

Na slici 24 prikazani su dijagrami ovisnosti inženjerskog naprežanja o inženjerskoj deformaciji za dvije epruvete ispitane pri brzini 20 mm/s. Dijagrami su dobiveni praćenjem produljenja ARAMIS-om i bilježenjem sile pomoću kidalice na isti način kao i dijagrami za ispitivanja provedena pri manjim brzinama. Odstupanja u rezultatima ispitivanja za dvije epruvete su zadovoljavajuće mala.

Kako je opisano u poglavlju 2.7 pri povišenim brzinama deformiranja očekuje se veća vrijednost vlačne čvrstoće uz nižu istezljivost materijala. Prema očekivanjima, za brzinu deformiranja postignuta je vrijednost vlačne čvrstoće oko 420 N/mm<sup>2</sup>, što je za oko 20 N/mm<sup>2</sup>, tj. za približno 5 % veće od vrijednosti postignute pri ispitivanju brzinama od 0,1 mm/s i 0,2 mm/s. Ipak, efekt smanjenja istezljivosti nije primijećen, što se može objasniti

znatnim odstupanjem vrijednosti istežljivosti za različite epruvete ispitane pri istim uvjetima.

Uočavanje tog efekta može se očekivati ispitivanjem pri znatno većim brzinama (što s dostupnom opremom nije bilo moguće) ili na mnogo većem uzorku, čime bi se umanjio, tj. uklonio utjecaj odstupanja vrijednosti istežljivosti za pojedine epruvete ispitane u istim uvjetima.



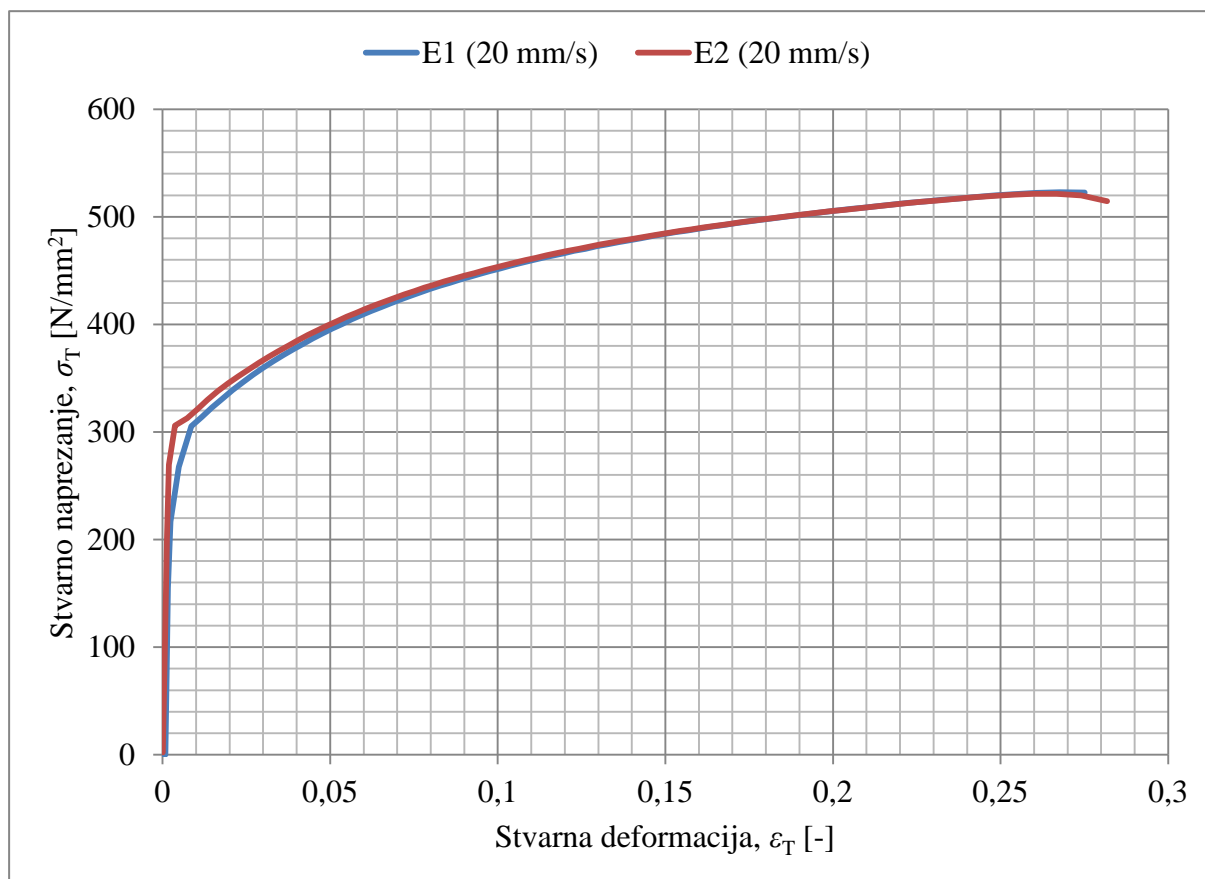
**Slika 24. Dijagram ovisnosti inženjerskog napreznja o inženjerskoj deformaciji za brzinu ispitivanja od 20 mm/s**

Kao i za ispitivanja pri nižim brzinama, korištenjem izraza izvedenih u poglavlju 2.6 vrijednosti inženjerskog napreznja i inženjerske deformacije preračunavaju se u stvarno napreznje, stvarnu deformaciju i plastičnu deformaciju.

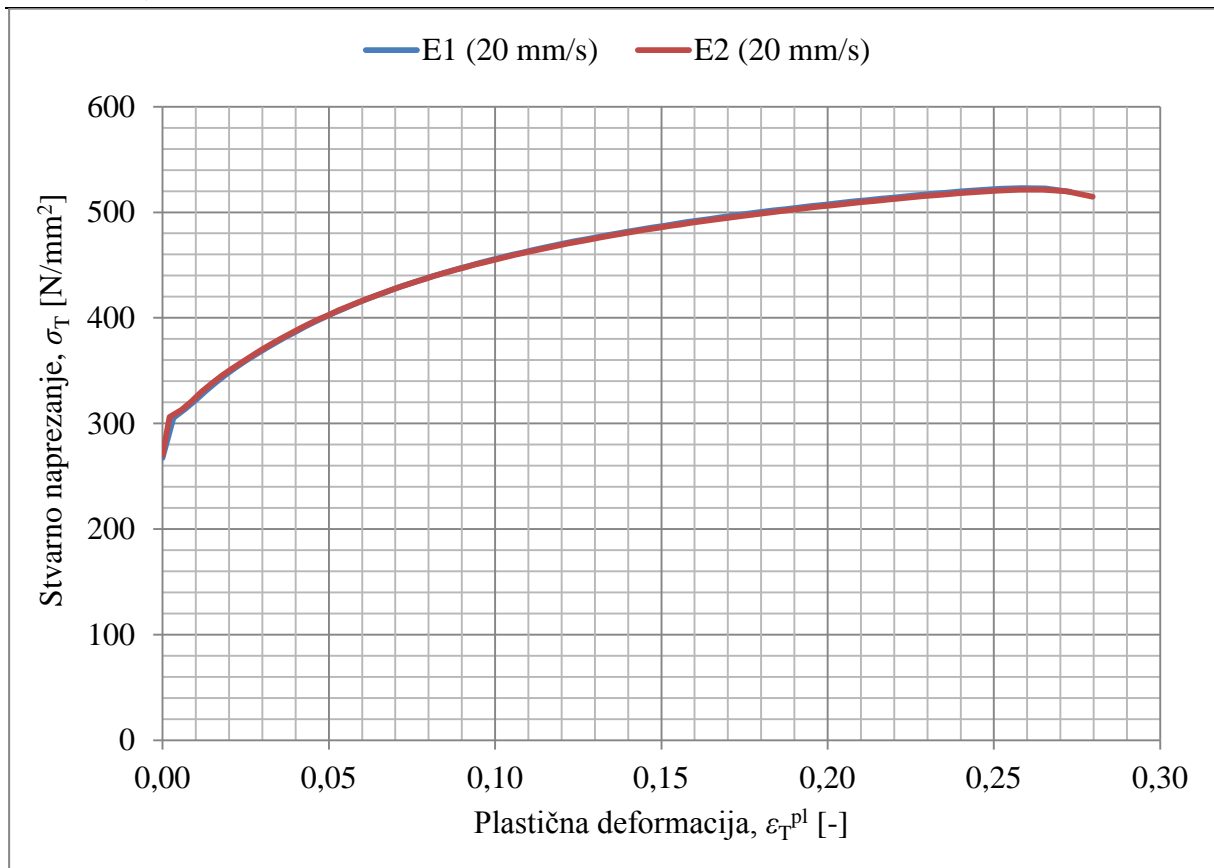
Na slici 25 prikazana je ovisnost stvarnog napreznja o stvarnoj deformaciji, dok je dijagramom na slici 26 prikazana ovisnost stvarnog napreznja o plastičnoj deformaciji.

Materijalni model ovisnosti stvarnog naprezanja, tj. naprezanja tečenja o plastičnoj deformaciji pri brzini deformiranja od 20 mm/s definiran je tablicom 4.

Usporedba vrijednosti dobivenih ispitivanjem i opisa materijalnog modela prikazanog u tablici 4 prikazana je na slici 27.



Slika 25. Dijagram ovisnosti stvarnog naprezanja o stvarnoj deformaciji za brzinu ispitivanja od 20 mm/s



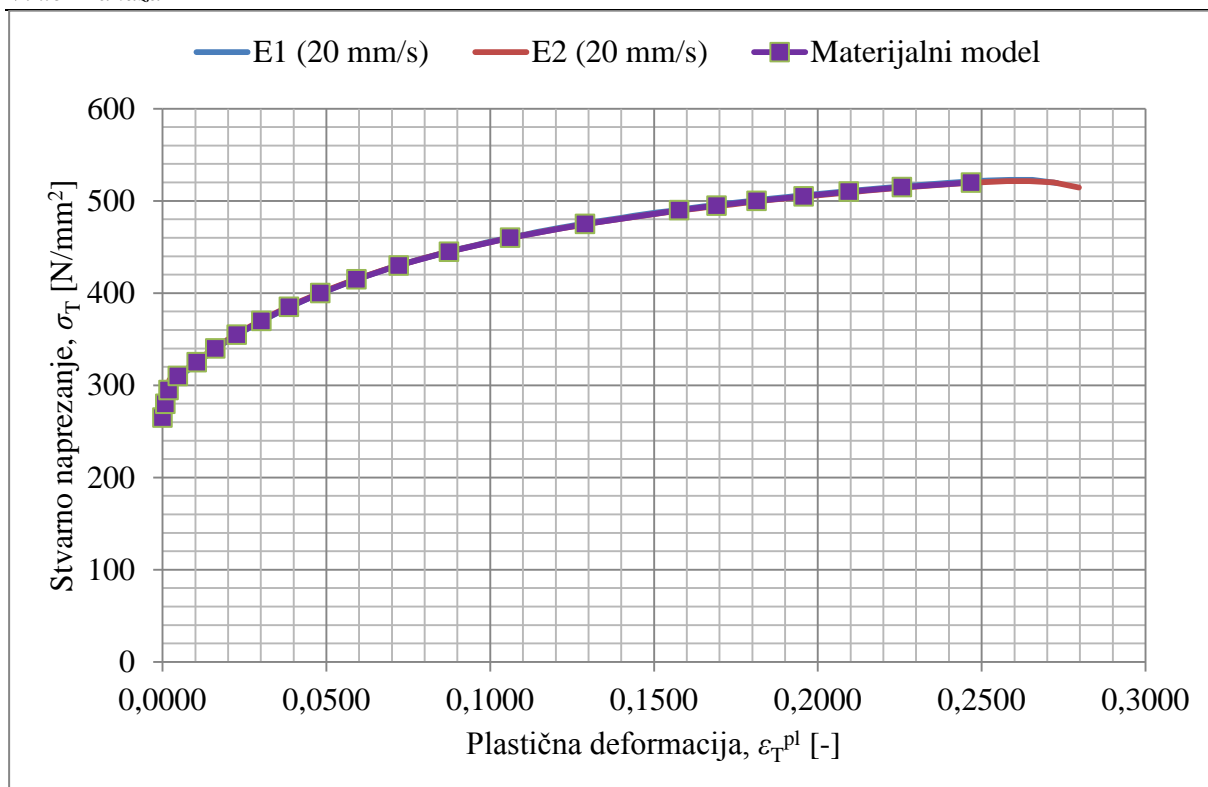
**Slika 26. Dijagram ovisnosti stvarnog naprezanja o plastičnoj deformaciji za brzinu ispitivanja od 20 mm/s**

Također, kao i u prethodnom slučaju, za svaku vrijednost plastične deformacije linearno se interpolira između dvije najbliže vrijednosti naprezanja tečenja, a pretpostavlja se konstantna vrijednost naprezanja tečenja nakon posljednje vrijednosti navedene u tablici, tj. u ovom slučaju naprezanje tečenja iznosi  $520 \text{ N/mm}^2$  za sve vrijednosti plastične deformacije veće ili jednake 0,2468.

**Tablica 4. Ovisnost napreznja tečenja o plastičnoj deformaciji pri brzini deformiranja od 20 mm/s**

Plastična deformacija [-]	Napreznje tečenja [N/mm <sup>2</sup> ]
0	265
0,0009	280
0,0019	295
0,0047	310
0,0105	325
0,0161	340
0,0227	355
0,0302	370
0,0386	385
0,0482	400
0,0592	415
0,0721	430
0,0875	445
0,1061	460
0,129	475
0,1577	490
0,1691	495
0,1813	500
0,1957	505
0,2095	510
0,2257	515
0,2468	520



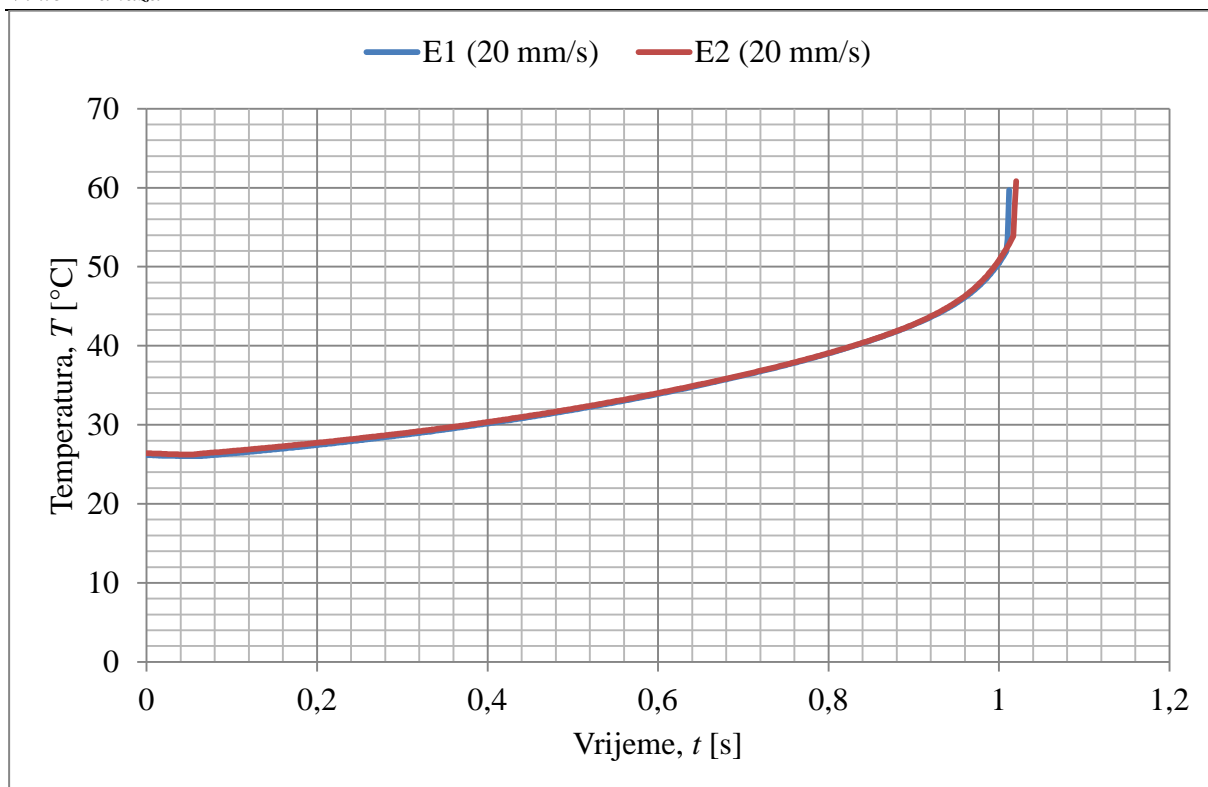


**Slika 27. Usporedba materijalnog modela i vrijednosti dobivenih ispitivanjem pri brzini deformiranja od 20 mm/s**

Na slici 28 prikazane su vrijednosti temperature za dvije epruvete deformirane do loma pri brzini 20 mm/s.

Za niže brzine i ovdje se može primijetiti pad temperature na početku deformiranja uslijed efekta termoelastičnosti opisanog u poglavlju 2.8. Pad temperature u oba eksperimenta je manji od 0,2 °C, čime se potvrđuje opravdanost zanemarivanja efekta termoelastičnosti u opisivanju materijalnog modela. Nakon pada temperature počinje tečenje materijala i temperatura raste uslijed pretvorbe mehaničkog rada u toplinu, kako je opisano u poglavlju 2.8.

Može se primijetiti da su vrijednosti temperature u trenutku loma za brzinu deformiranja 20 mm/s (slika 28) znatno veće nego što je to bilo pri nižim brzinama (slike 22 i 23) zbog toga što je opisani proces deformiranja bliži adijabatskom, tj. pri povišenoj brzini deformiranja manje se topline prenese na okolinu.



**Slika 28.** Vrijednosti temperature za vrijeme deformiranja epruvete pri brzini 20 mm/s

Kao i za prethodna ispitivanja, za svaku epruvetu izračunava se funkcija disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju  $\eta$  iz poznavanje prirasta temperature i ovisnosti stvarnog naprežanja o plastičnoj deformaciji korištenjem izraza (16). Izračunate vrijednosti prikazane su u tablici 5.

**Tablica 5.** Vrijednosti funkcije disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju pri brzini deformiranja 20 mm/s

Epruveta (brzina deformiranja)	$\eta$
E1 (20 mm/s)	0,98
E2 (20 mm/s)	0,98

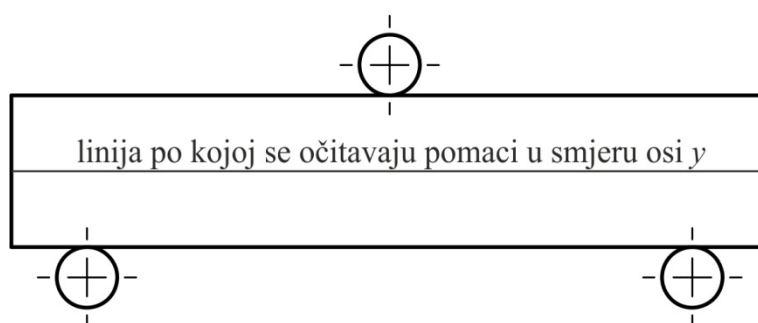
Pretpostavka adijabatskog procesa, a samim time i vrijednost izračunate funkcije disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju, pri brzini deformiranja od 20 mm/s može se smatrati dovoljno točnom. Daljnjim porastom brzine deformiranja ne očekuje se porast vrijednosti

funkcije disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju te se vrijednost od 0,98 može uzeti kao karakteristika materijala.

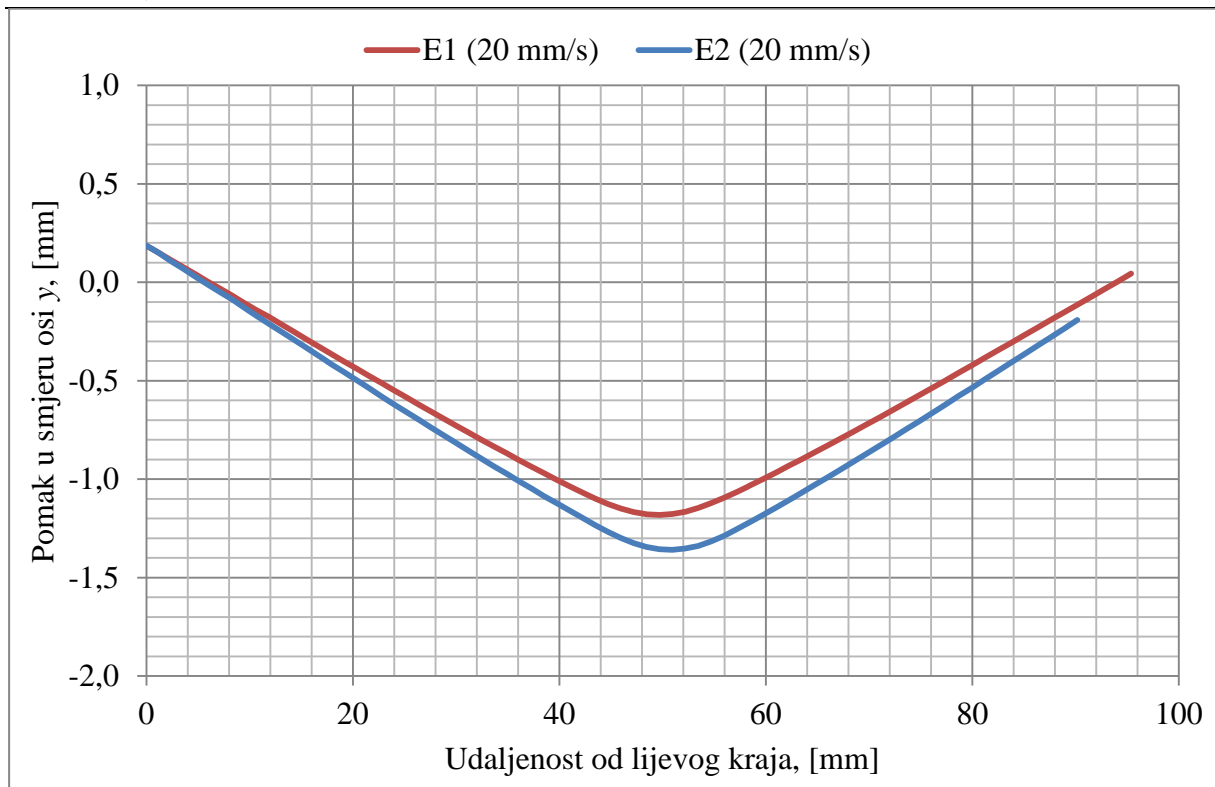
### 2.10.3. Ispitivanje savijanjem u tri točke brzinom od 20 mm/s

Za potrebe prikaza rezultata i njihove usporedbe s numeričkim modelom, u optičkom mjernom sustavu ARAMIS pomaci u smjeru osi  $y$  pratili su se po horizontalnoj liniji simetrije epruvete, kako je prikazano na slici 29.

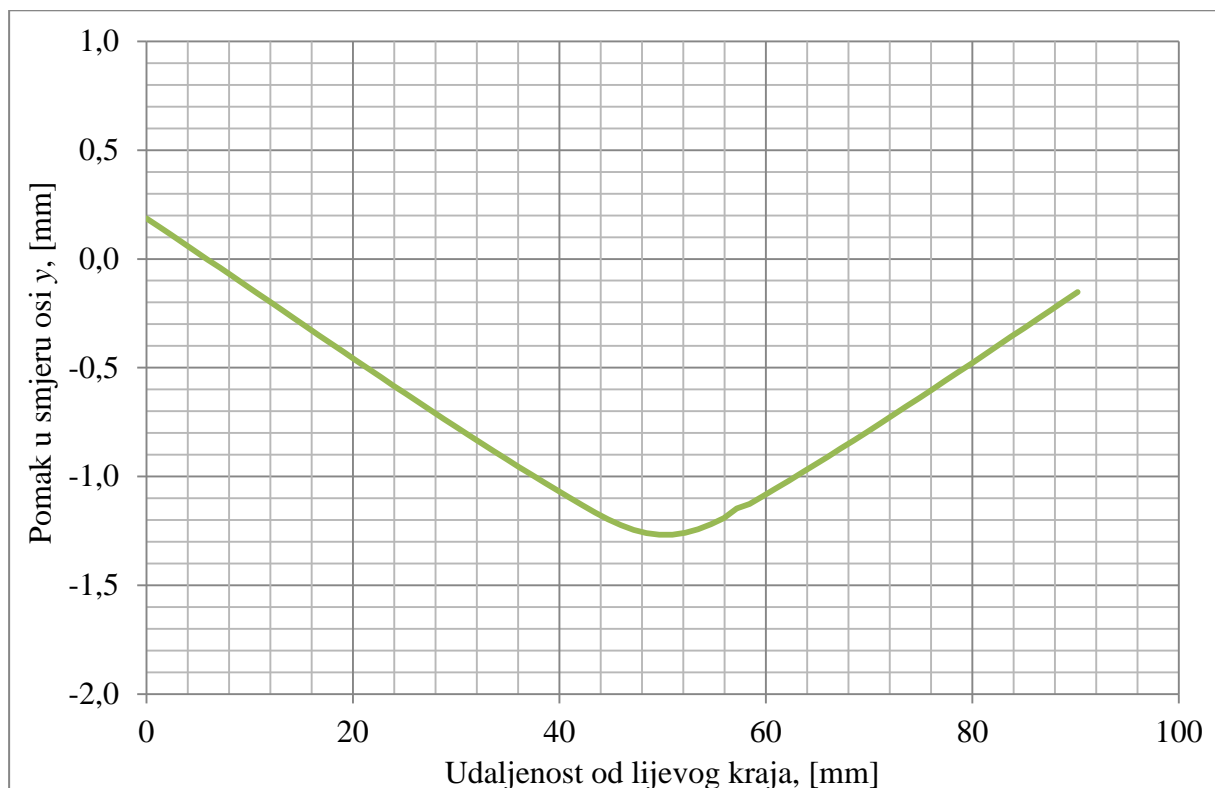
Na slici 30 prikazan je dijagram raspodjele pomaka u smjeru osi  $y$  po prikazanoj liniji simetrije za epruvete E1 i E2 ispitane savijanjem u tri točke pri djelovanju sile iznosa 20 000 N. Kako je vidljivo odstupanje između rezultata dvaju eksperimenata, u svrhu usporedbe s numeričkim rezultatima, napravljen je dijagram prosječnih vrijednosti prikazan na slici 31.



Slika 29. Skica epruvete s prikazanom linijom po kojoj se očitavaju pomaci u smjeru osi  $y$



**Slika 30. Raspodjela pomaka u smjeru osi y po horizontalnoj liniji simetrije za epruvete E1 i E2 pri djelovanju sile iznosa 20 000 N**



**Slika 31. Uprosječna raspodjela pomaka u smjeru osi y po horizontalnoj liniji simetrije pri djelovanju sile iznosa 20 000 N**

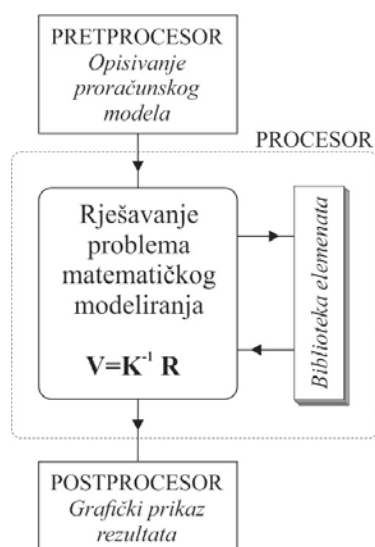
### 3. NUMERIČKI MODEL

#### 3.1. O metodi konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je približna numerička metoda pri kojoj se diferencijalne jednačbe, koje se javljaju kod klasičnih metoda, zamjenjuju sustavom algebarskih jednačbi.

Metoda konačnih elemenata temelji se na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Drugim riječima, područje kontinuuma dijeli se na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi, odnosno razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata [20].

Rješavanje problema pomoću metode konačnih elemenata provodi se primjenom računala korištenjem postojećih programskih paketa. Glavni zadatak korisnika je izrada proračunskog modela i definiranje ulaznih podataka. Potrebno je imati na umu da je metoda numerička i samim time približna, a točnim rješenjima moguće se dovoljno približiti samo pravilnim opisom proračunskog modela te pravilnim odabirom konačnih elemenata. Na slici 32 prikazana je shema rada računalnog programa.



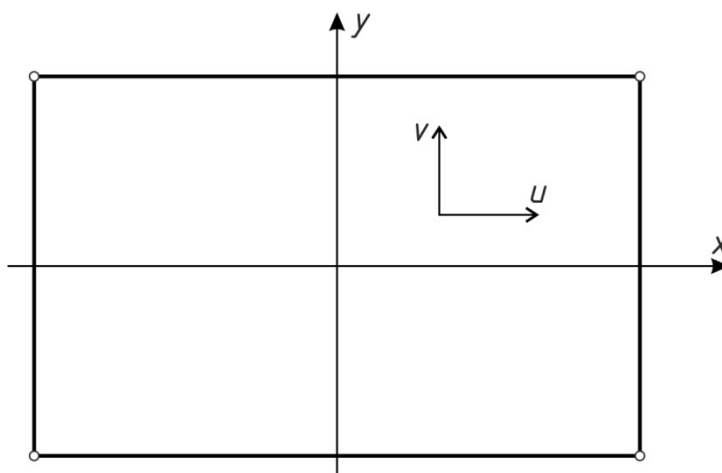
Slika 32. Shematski prikaz programa [20]

### 3.2. Programski paket ABAQUS [21]

U ovom radu je za izradu numeričkog modela te za sami izračun korišten programski paket ABAQUS/Standard. ABAQUS sadrži već implementirane sve alate potrebne za izradu potpunog numeričkog modela (modeliranje geometrije, definiranje materijalnog modela, definiranje rubnih uvjeta, diskretizaciju) koji se potom rješava. Po završetku numeričkog izračuna, moguća je obrada rezultata unutar sučelja programskog paketa ABAQUS.

#### 3.2.1. Opis korištenog konačnog elementa

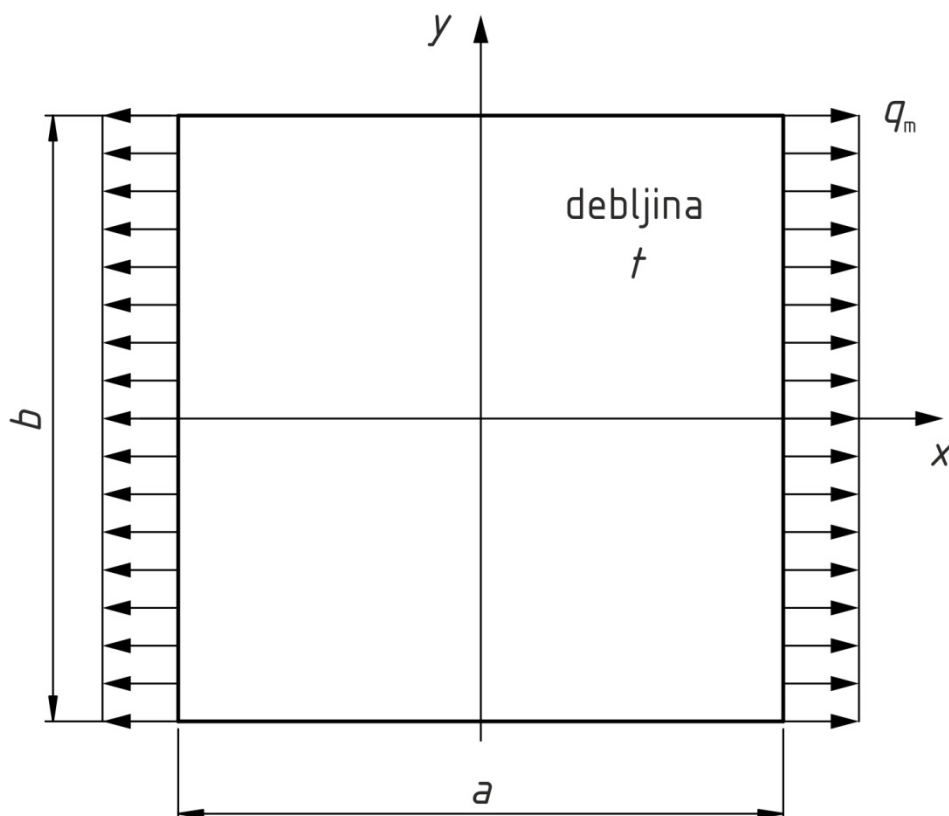
U ovom radu korišten je konačni element za dvodimenzijску analizu CPS4 [22] implementiran u programskom paketu ABAQUS. Konačni element CPS4, prikazan na slici 33, opisuje ravninsko stanje napreznja, a sastoji se od četiri čvora u vrhovima četverokuta s po dva stupnja slobode u svakom čvoru. Konačni element CPS4 opisuje bilinearnu raspodjelu deformacija i napreznja po površini, tj. deformacija, a samim time i napreznje mijenjaju se linearno po površini elementa u ovisnosti o koordinatama  $x$  i  $y$ .



Slika 33. Konačni element za opisivanje ravninskog stanja napreznja CPS4

### 3.3. Verifikacija numeričkog modela

Izračun korištenjem CPS4 konačnih elemenata u programskom paketu ABAQUS verificiran je na membrani zadanoj i opterećenoj prema slici 34, za koju je moguće izračunati analitička rješenja za iznose naprezanja, deformacija i pomaka u smjeru  $x$  i  $y$  osi.

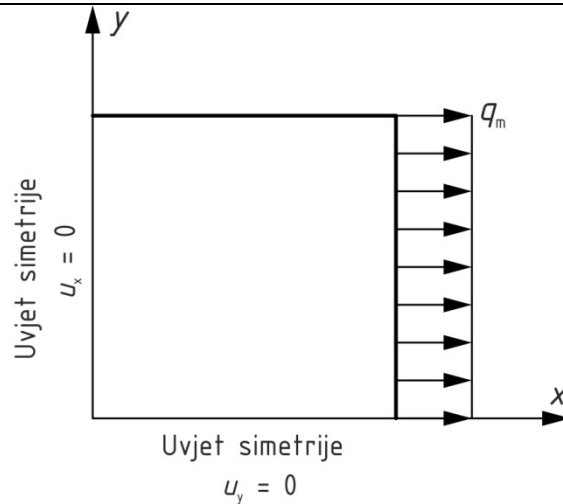


Slika 34. Prikaz geometrije i načina opterećenja membrane

Svi podaci potrebni za proračun prikazani su u tablici 6. Kako je membrana dvostruko simetrična, moguće je proračun provesti na jednoj četvrtini membrane prema slici 35.

Tablica 6. Podaci potrebni za proračun membrane

Oznaka	Iznos	Opis
$a$	100 mm	Širina membrane
$b$	100 mm	Visina membrane
$t$	1 mm	Debljina membrane
$q_m$	100 N/mm <sup>2</sup>	Vlačno opterećenje po jedinici površine
$E$	200 000 N/mm <sup>2</sup>	Youngov modul elastičnosti
$\nu$	0,3	Poissonov faktor



**Slika 35.** Proračunski model četvrtine membrane nakon primjene uvjeta dvostruke simetrije

### 3.3.1. Analitički proračun membrane

Analitički proračun membrane temelji se na teoriji Nauke o čvrstoći [23].

Naprezanja u smjeru osi  $x$  i  $y$  iznose:

$$\sigma_x = 100 \text{ N/mm}^2, \quad (17)$$

$$\sigma_y = 0 \text{ N/mm}^2. \quad (18)$$

Deformacije u smjeru osi  $x$  i  $y$  izračunavaju se korištenjem Hookeovog zakona za dvoosno stanje naprezanja:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y) = \frac{1}{200000} \cdot (100 - 0,3 \cdot 0) = 0,0005, \quad (19)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x) = \frac{1}{200000} \cdot (0 - 0,3 \cdot 100) = -0,00015. \quad (20)$$

Uz poznavanje deformacija, iz same definicije za deformaciju moguće je izračunati pomake u smjeru osi  $x$   $u_x$  te u smjeru osi  $y$   $u_y$ :

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\frac{\Delta a}{2}}{\frac{a}{2}} = \frac{u_x}{\frac{a}{2}} = \frac{2u_x}{a} \rightarrow u_x = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_x \cdot a = \frac{1}{2} \cdot 0,0005 \cdot 100, \quad (21)$$

$$u_x = 0,025 \text{ mm}$$

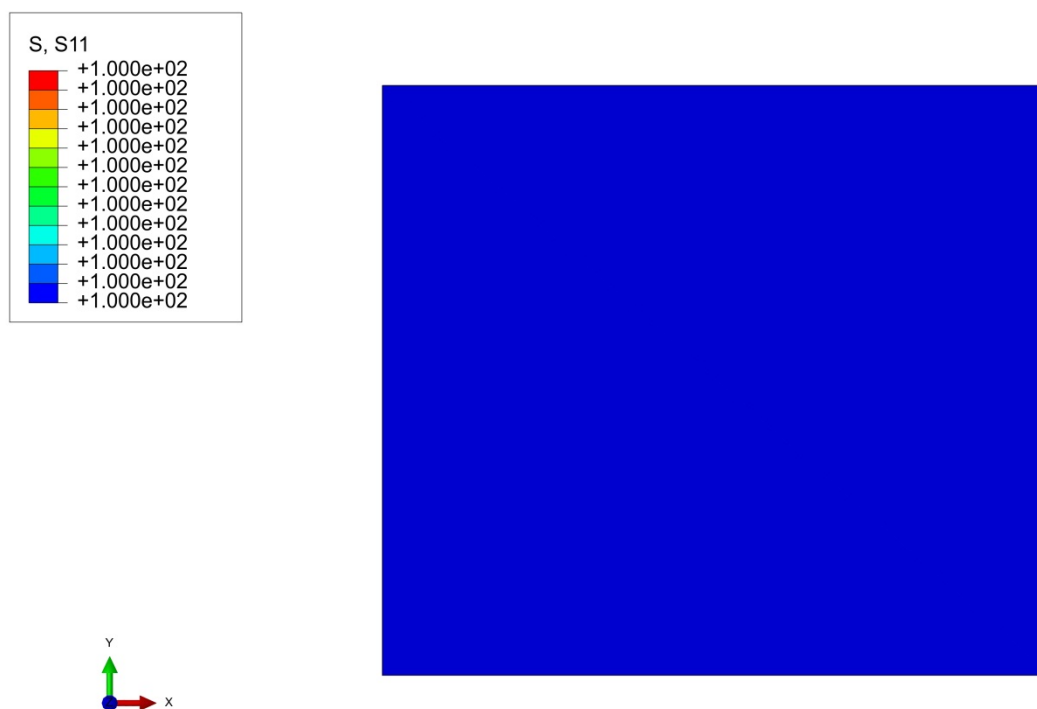


$$\varepsilon_y = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\frac{\Delta b}{2}}{\frac{b}{2}} = \frac{u_y}{\frac{b}{2}} = \frac{2u_y}{b} \rightarrow u_y = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_y \cdot b = -\frac{1}{2} \cdot 0,00015 \cdot 100$$

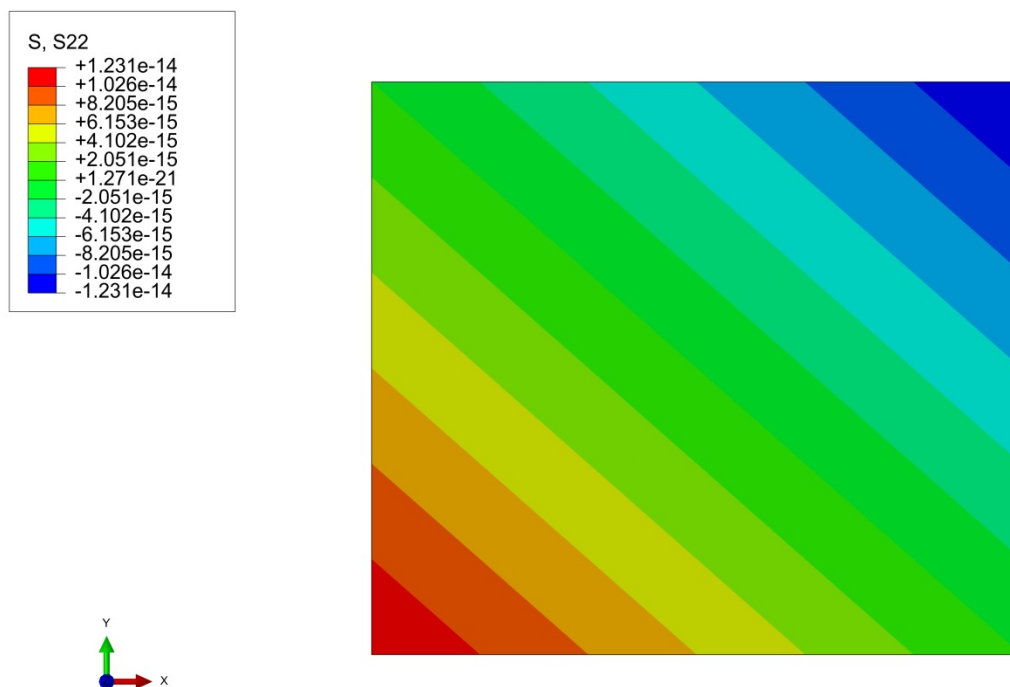
$$u_y = -0,0075 \text{ mm}$$
(22)

### 3.3.2. Numerički proračun membrane

U programskom paketu ABAQUS modelirana je četvrtina membrane, zadana su svojstva materijala iz tablice 6, rubni uvjeti simetrije i opterećenje. Membrana je potom diskretizirana jednim CPS4 konačnim elementom. Na slikama 36 i 37 prikazani su iznosi normalnih naprezanja u smjeru osi  $x$  i  $y$ .

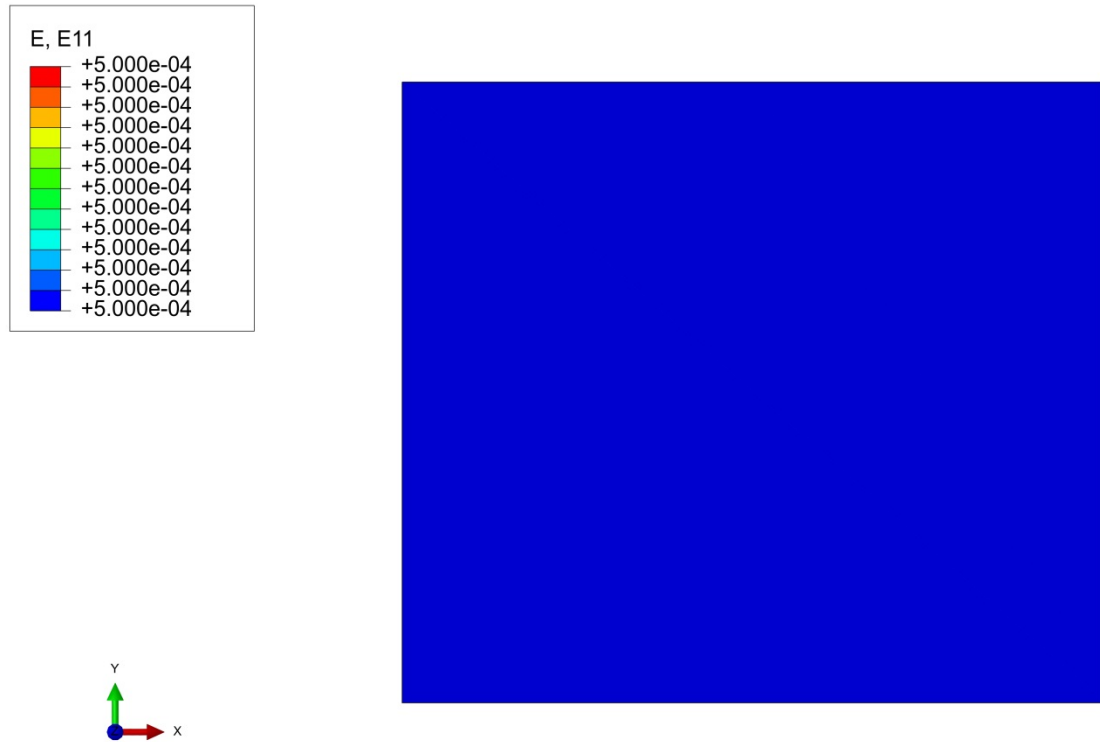


Slika 36. Normalno naprezanje membrane u smjeru osi  $x$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

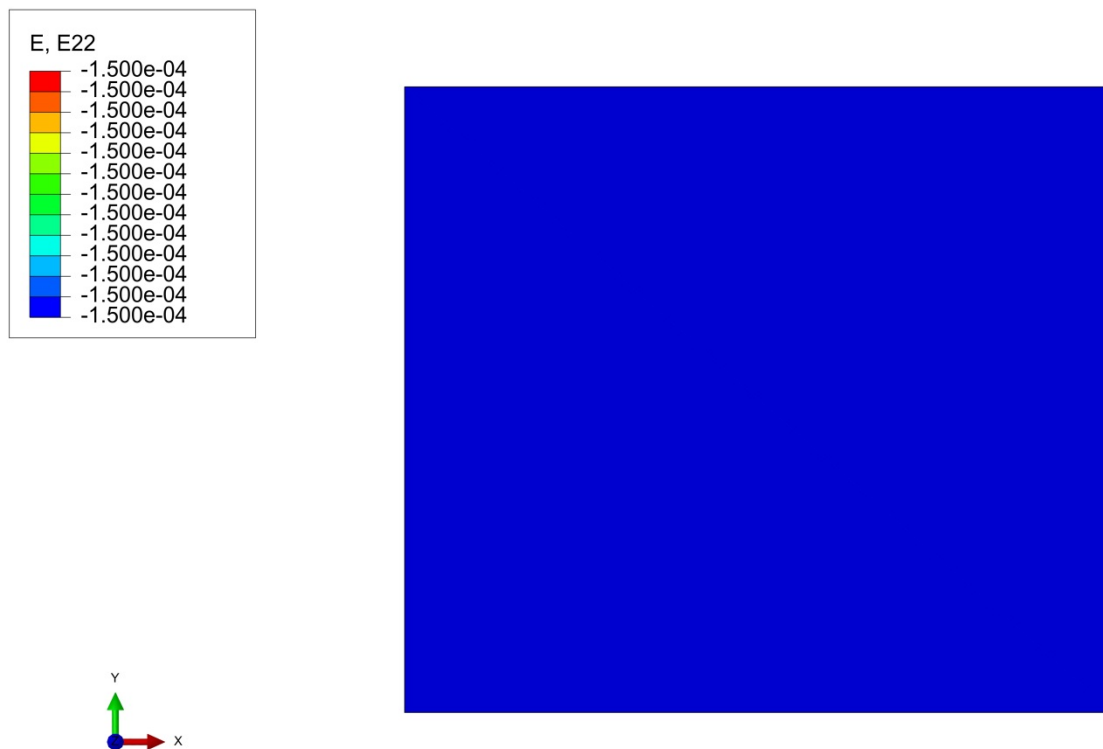


**Slika 37. Normalno naprezanje membrane u smjeru osi y [N/mm<sup>2</sup>]**

Iz slike 36 vidljivo je kako izračunato naprezanje u smjeru osi  $x$  iznosi  $100 \text{ N/mm}^2$  što se u potpunosti poklapa s analitičkim rješenjem (17). Svi iznosi naprezanja prikazani na slici 37 zanemarivo su mali, tj. predstavljaju numeričku nulu, što je u skladu s analitičkim rješenjem (18). Na slikama 38 i 39 prikazani su iznosi duljinskih deformacija u smjeru osi  $x$  i  $y$ . Iz slike 38 vidljivo je kako izračunata duljinska deformacija u smjeru osi  $x$  iznosi  $0,0005$  što se u potpunosti poklapa s analitičkim rješenjem (19). Iz slike 39 vidljivo je kako izračunata duljinska deformacija u smjeru osi  $y$  iznosi  $-0,00015$  što se u potpunosti poklapa s analitičkim rješenjem (20).

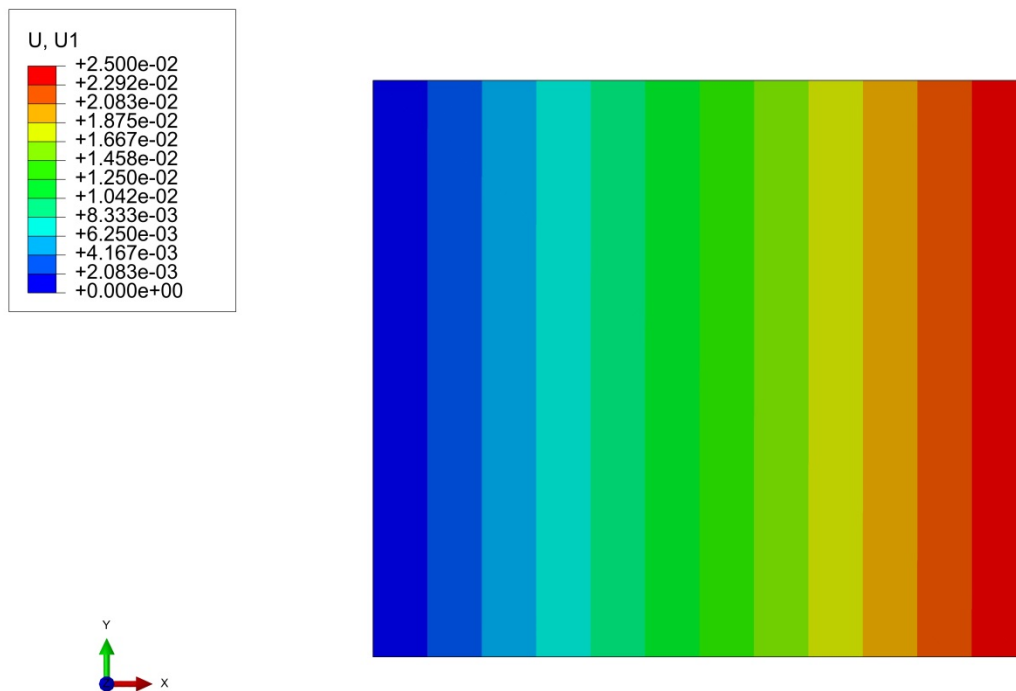


Slika 38. Duljinska deformacija membrane u smjeru osi  $x$  [-]

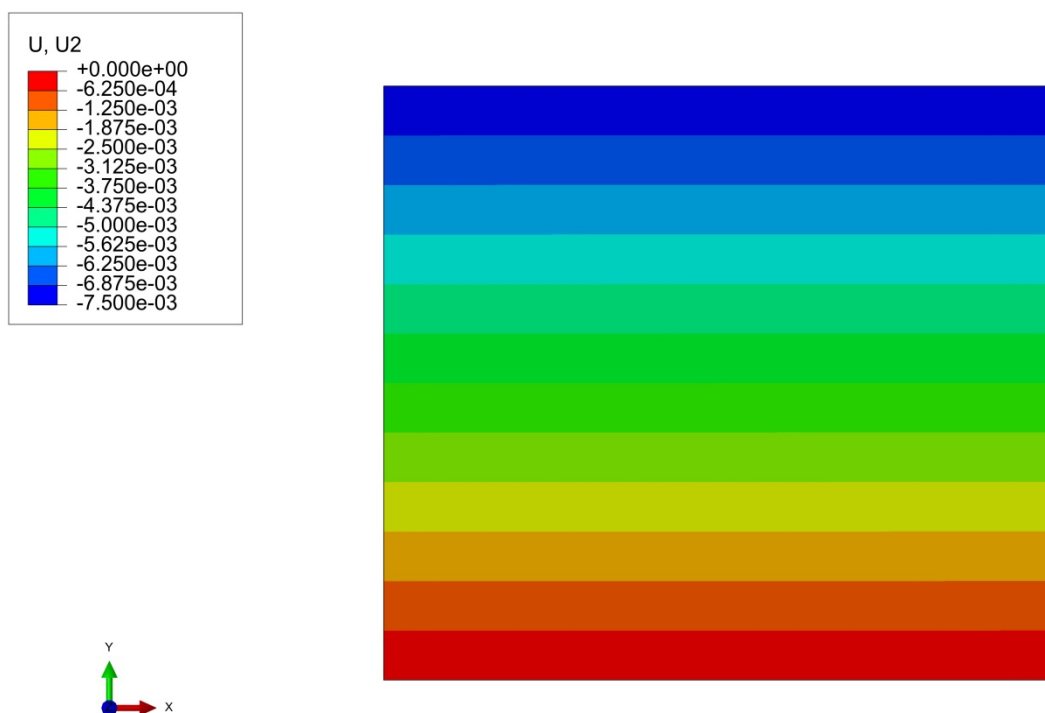


Slika 39. Duljinska deformacija membrane u smjeru osi  $y$  [-]

Na slikama 40 i 41 prikazane su raspodjele pomaka u smjeru osi  $x$  i  $y$ .



Slika 40. Raspodjela pomaka membrane u smjeru osi  $x$  [mm]

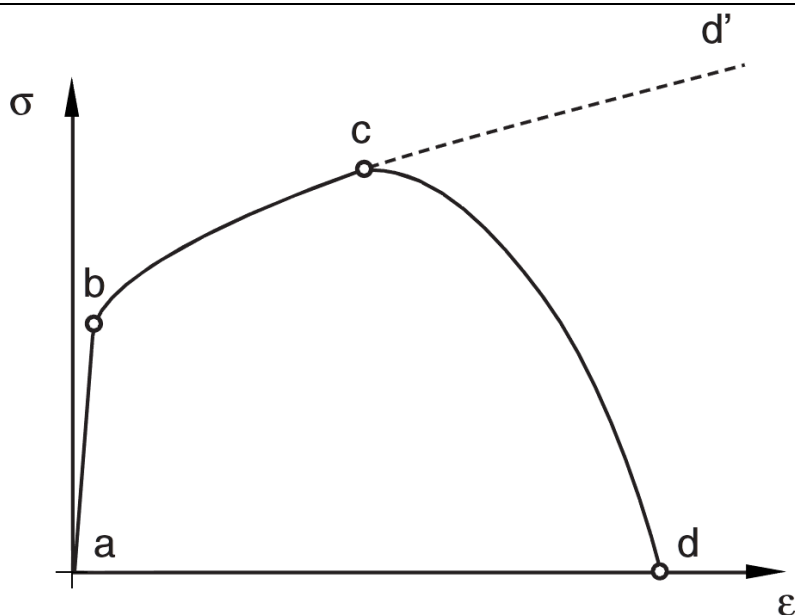


Slika 41. Raspodjela pomaka membrane u smjeru osi  $y$  [mm]

Iz slike 40 vidljivo je kako vrijednost najvećeg pomaka u smjeru osi  $x$  iznosi 0,025 mm što se u potpunosti poklapa s analitičkim rješenjem (21). Iz slike 41 vidljivo je kako vrijednost najvećeg pomaka u smjeru osi  $y$  iznosi -0,0075 mm što se također u potpunosti poklapa s analitičkim rješenjem (22).

### **3.4. Numeričko modeliranje oštećenja materijala**

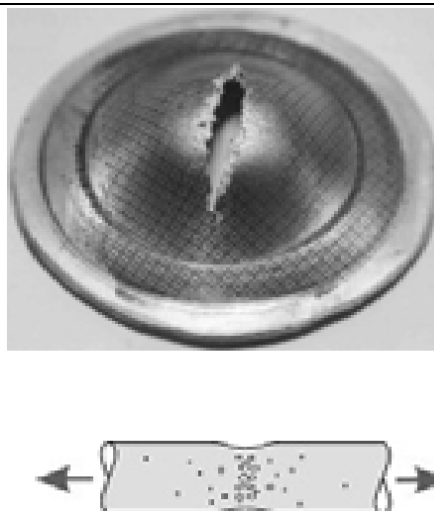
Uobičajeni kvalitativni dijagram ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji pri jednoosnom opterećivanju metalnih uzoraka prikazan je na slici 42. Područje  $a - b$  prikazuje početni linearni odziv materijala, nakon čega slijedi plastično tečenje  $b - c$ . U točki  $c$  počinje oštećivanje materijala, nakon čega se sposobnost materijala u podnošenju naprezanja postepeno smanjuje do konačnog loma  $c - d$ . U tom području karakteristična je pojava lokalnog suženja presjeka koje se često naziva „stvaranje vrata epruvete“. Odziv materijala u području  $c - d$  definira se kao odziv neoštećenog materijala  $c - d'$  (koji bi se ostvario u slučaju izostanka oštećivanja) čija krutost progresivno degradira s povećanjem plastičnih deformacija.



**Slika 42. Tipičan dijagram inženjersko naprezanje – inženjerska deformacija za jednoosno opterećeni metalni uzorak [24]**

Prvi korak u zadavanju materijalnog modela je zadavanje ovisnosti naprezanja o deformaciji za neoštećeni materijal. U elastičnom području za jednoznačno definiranje dovoljno je zadavanje Youngovog modula elastičnosti  $E$  i Poissonovog faktora  $\nu$ . U plastičnom području tablično se definira ovisnost granice tečenja o iznosu plastične deformacije.

U ovom radu oštećenje materijala modelirano je korištenjem duktilnog kriterija prema [25]. Osnovni fizikalni mehanizam nastanka oštećenja prema ovom kriteriju je nastajanje sitnih pukotina, njihov rast i spajanje. Takvo oštećivanje materijala prikazano je na slici 43 gdje se vidi jedan realan primjer takvog loma, uz kvalitativni prikaz pojave loma na epruveti.



**Slika 43. Pojava oštećivanja i loma materijala uslijed pojave sitnih pukotina, njihovog rasta i spajanja [25]**

U modelu je pretpostavljena ovisnost vrijednosti plastične deformacije pri kojoj dolazi do oštećenja  $\varepsilon_D^{\text{pl}}$  o brzini plastične deformacije  $\dot{\varepsilon}^{\text{pl}}$  i faktoru troosnosti naprezanja  $\eta_{\text{tr}}$ :

$$\varepsilon_D^{\text{pl}}(\eta_{\text{tr}}, \dot{\varepsilon}^{\text{pl}}). \quad (23)$$

Pritom se faktor troosnosti naprezanja može izračunati kao:

$$\eta_{\text{tr}} = -\frac{p}{q}, \quad (24)$$

gdje  $p$  označava tlačno naprezanje, a  $q$  ekvivalentno naprezanje po Misesu, tj. prema teoriji najveće distorzijske energije.

Oštećenje nastaje ukoliko je zadovoljen kriterij:

$$\omega_D = \int \frac{d\varepsilon^{\text{pl}}}{\varepsilon_D^{\text{pl}}(\eta_{\text{tr}}, \dot{\varepsilon}^{\text{pl}})} = 1, \quad (25)$$

pri čemu je  $\omega_D$  varijabla stanja koja se monotono povećava s iznosom plastične deformacije.

U svakom inkrementu analize, inkrementalni porast  $\Delta\omega_D$  se računa kao:

$$\Delta\omega_D = \frac{\Delta\varepsilon^{\text{pl}}}{\varepsilon_D^{\text{pl}}(\eta_{\text{tr}}, \dot{\varepsilon}^{\text{pl}})} \geq 0. \quad (26)$$

Kako je prethodno opisano, razvoj oštećenja materijala modelira se kao progresivno degradiranje krutosti. U tu svrhu uvodi se nova varijabla  $D$  koja definira razinu oštećenja materijala. Pritom se pretpostavlja mogućnost opisivanja razvoja oštećenja korištenjem samo jedne skalarne varijable. Pomoću tako definirane varijable  $D$ , tenzor naprezanja  $\sigma$  u svakom vremenskom trenutku izračunava se pomoću izraza:

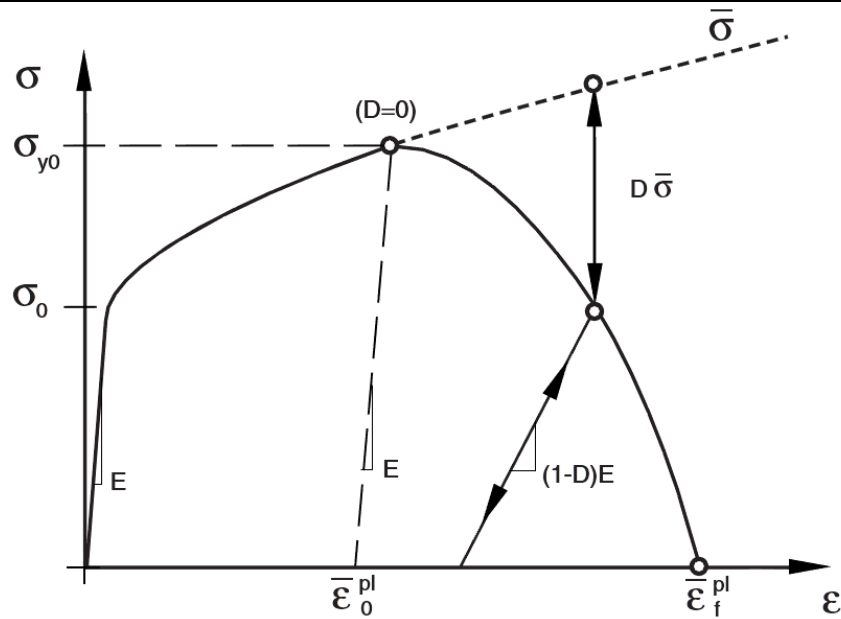
$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma}, \quad (27)$$

gdje  $\bar{\sigma}$  predstavlja tenzor naprezanja koji bi postojao u materijalu u istom vremenskom trenutku za slučaj neoštećenog materijala. Osim samog omekšanja materijala pri njegovom oštećivanju, tj. smanjenja granice tečenja, istovremeno se odvija degradacija modula elastičnosti, pri čemu se novi modul elastičnosti u svakom vremenskom intervalu  $E_d$  izračunava kao:

$$E_d = (1 - D)E. \quad (28)$$

Na slici 44 kvalitativno su prikazane pojave koje nastaju pri razvoju oštećenja materijala, tj. njegovo omekšanje i degradacija modula elastičnosti. Ukoliko bi se u model izravno zadavala vrijednost plastične deformacije pri kojoj dolazi do potpunog loma, rezultati bi u velikoj mjeri ovisili o izabranoj veličini konačnih elemenata. Stoga se prema [26] uvodi novi parametar materijala  $G_f$  koji definira energiju potrebnu za otvaranje pukotine jedinične površine.





**Slika 44. Kvalitativni prikaz omekšanja materijala i degradacije modula elastičnosti**

Također, u svrhu bolje formulacije numeričkog modela korisno je uvesti ekvivalentni plastični pomak  $u^{pl}$ , koji je jednak nuli do trenutka nastanka oštećenja, a potom raste brzinom:

$$\dot{u}^{pl} = L\dot{\varepsilon}^{pl}, \quad (29)$$

pri čemu  $L$  predstavlja karakterističnu duljinu konačnog elementa.

U radu je pretpostavljen linearni razvoj oštećenja, tj. nakon zadovoljavanja kriterija oštećenja (25), varijabla  $D$  raste brzinom:

$$\dot{D} = \frac{L\dot{\varepsilon}^{pl}}{u_f^{pl}} = \frac{\dot{u}^{pl}}{u_f^{pl}}, \quad (30)$$

pri čemu  $u_f^{pl}$  predstavlja ekvivalentni plastični pomak pri potpunom lomu, a iz zadane energije potrebne za otvaranje pukotine jedinične površine izračunava se pomoću izraza:

$$u_f^{pl} = \frac{2G_f}{\sigma_{y0}}, \quad (31)$$

gdje  $\sigma_{y0}$  predstavlja granicu tečenja materijala u trenutku nastanka oštećenja, tj. zadovoljenja kriterija (25).

### 3.5. Numeričko modeliranje termoplastičnog efekta

Kako je već opisano u poglavlju 2.8 pri deformiranju materijala temperatura se mijenja uslijed dvije različite fizikalne pojave. Prvi dio odnosi se na efekt termoelastičnosti, pri čemu je promjena temperature opisana izrazom (11), koji se u numeričkoj analizi zanemaruje zbog malih vrijednosti (oko 0,2 °C) kako je pokazano u poglavlju 2.10.

Drugi efekt je termoplastičnost, gdje se temperatura povećava zbog djelomične pretvorbe mehaničkog rada u toplinsku energiju i nemogućnosti odvođenja topline zbog velike brzine odvijanja procesa. Kao i za potrebe izvođenja izraza (16) i za potrebe numeričkog modeliranja uvodi se pretpostavka adijabatskog procesa.

Analitički izraz za prirast temperature (16) može se zapisati u inkrementalnom obliku kao:

$$\dot{T} = \frac{\eta}{\rho \cdot c_v} \sigma \cdot \dot{\varepsilon}^{pl}, \quad (32)$$

pri čemu  $\sigma^{ij}$  predstavlja tenzor naprezanja, a  $\varepsilon_{ij}^{pl}$  tenzor plastičnih deformacija.

Kako bi se omogućila implementacija u ABAQUS, potrebno je definirati specifični toplinski tok po jedinici volumena  $r^{pl}$ :

$$r^{pl} = \eta \cdot \sigma \cdot \dot{\varepsilon}^{pl}, \quad (33)$$

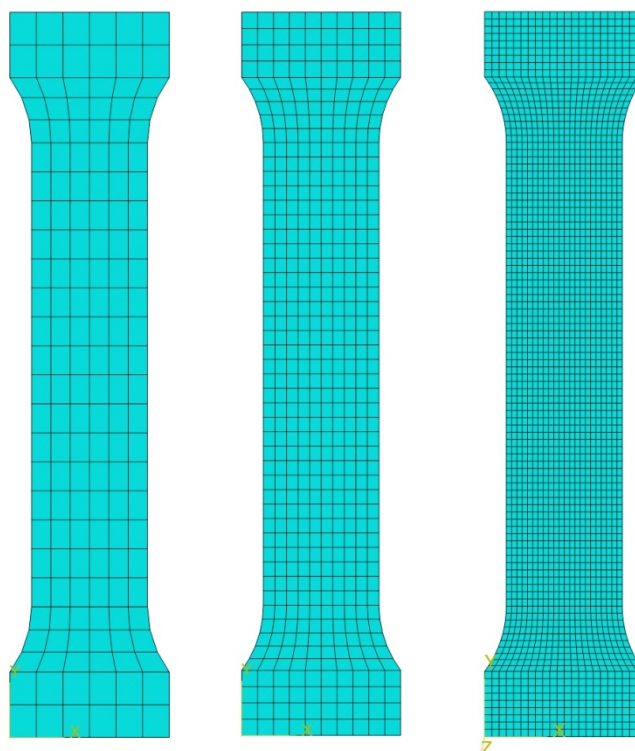
a nakon uvrštavanja izraza (32) u (33) dobiva se konačni izraz za brzinu prirasta temperature u svakom vremenskom inkrementu koji se poklapa s izrazom navedenim u [27]:

$$\dot{T} = \frac{r^{pl}}{\rho c_v}. \quad (34)$$

Verifikacija prirasta temperature uslijed termoplastičnog efekta na konačnom elementu za analizu ravninskog stanja naprezanja (CPS4) koji je korišten u ovom radu, prikazana je u [28] gdje je utvrđeno dobro poklapanje s analitičkim rješenjem.

### 3.6. Numeričko modeliranje vlačnog ispitivanja plosnate epruvete i rezultati

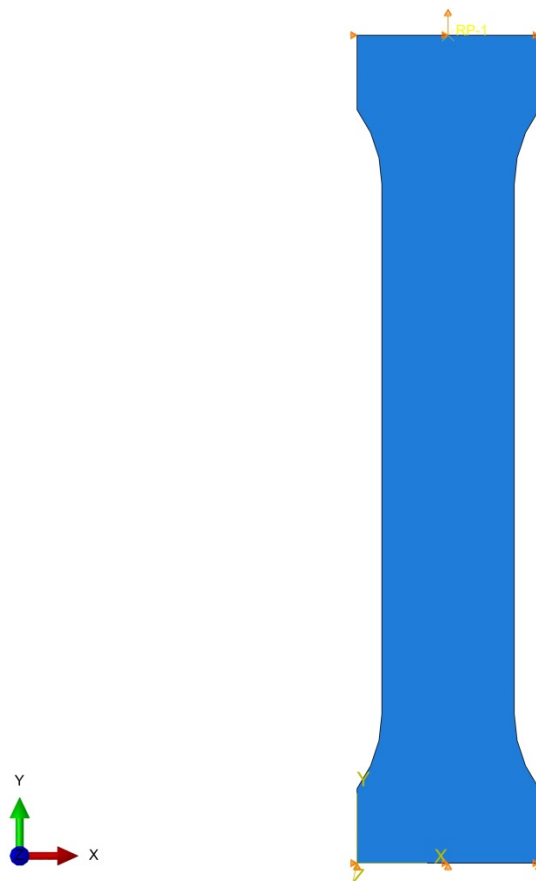
Geometrija plosnate epruveta za vlačno ispitivanje (dimenzije prikazane na slici 7) modelirana je u programskom paketu ABAQUS te diskretizirana konačnim elementima za opisivanje ravninskog stanja naprezanja (CPS4). U svrhu prikaza konvergencije rezultata, napravljene su tri mreže konačnih elemenata različite gustoće, tj. epruveta je diskretizirana s 156, 500 i 2244 konačna elementa kako je prikazano na slici 45.



**Slika 45.** Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje diskretizirana s 156, 500 i 2244 CPS4 konačna elementa

Na vrhu epruvete, na sredini linije postavljena je referentna točka (engl. *reference point*), čiji su stupnjevi slobode kinematskom vezom (engl. *coupling*) povezani s gornjom linijom. Na donjoj liniji epruvete zadan je rubni uvjet kojim se ograničava pomak u smjeru osi  $x$  i  $y$  čime se simulira veza s nepomičnom (donjom) čeljusti kidalice. Referentnoj točki, a samim time i gornjoj liniji ograničava se pomak u smjeru osi  $x$ , dok se pomak u smjeru osi  $y$  definira u

ovisnosti o vremenu čime se simulira veza s pomičnom (gornjom) čeljusti kidalice. Epruveta sa zadanim rubnim uvjetima prikazana je na slici 46.



**Slika 46.** Plosnata epruveta za vlačno ispitivanje sa zadanim rubnim uvjetima

### **3.6.1. Implementacija materijalnog modela i prikaz rezultata za brzinu deformiranja 0,1 mm/s**

Materijalni model ponašanja ispitivanog nodularnog lijeva pri brzini deformiranja 0,1 mm/s u programskom paketu ABAQUS definiran je u ulaznoj datoteci (engl. *input file*) u skladu s prikazanim rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. Vrijednosti iz tablice 2 prilagođene su za područje prije nastanka loma prema preporukama iz [24], tj. prikazuje se veće očvršćivanje materijala, što se nadoknađuje modelom oštećenja. Vrijednosti navedene u materijalnom modelu definirane su za SI sustav u mm poštujući pravila o konzistentnim jedinicama u

---

programskom paketu ABAQUS prikazana u tablici 7. Dio ulazne datoteke koji se odnosi na

materijalni model pri brzini deformiranja 0,1 mm/s ima sljedeći oblik:

```
** MATERIALS
```

```
**
```

```
*Material, name=EN-GJS-400-18-LT
```

```
*Damage Initiation, criterion=DUCTILE
```

```
0.29, 0.33, 0.
```

```
*Damage Evolution, type=ENERGY
```

```
49.,
```

```
*Elastic
```

```
189800., 0.275
```

```
*Plastic
```

```
265., 0.
```

```
280., 0.0045
```

```
295., 0.0091
```

```
310., 0.0139
```

```
325., 0.0201
```

```
340., 0.0269
```

```
355., 0.0353
```

```
370., 0.0448
```

```
385., 0.0564
```

```
400., 0.07
```

```
415., 0.0853
```

```
430., 0.1048
```

```
445., 0.1287
```

```
460., 0.1556
```

```
475., 0.1911
```

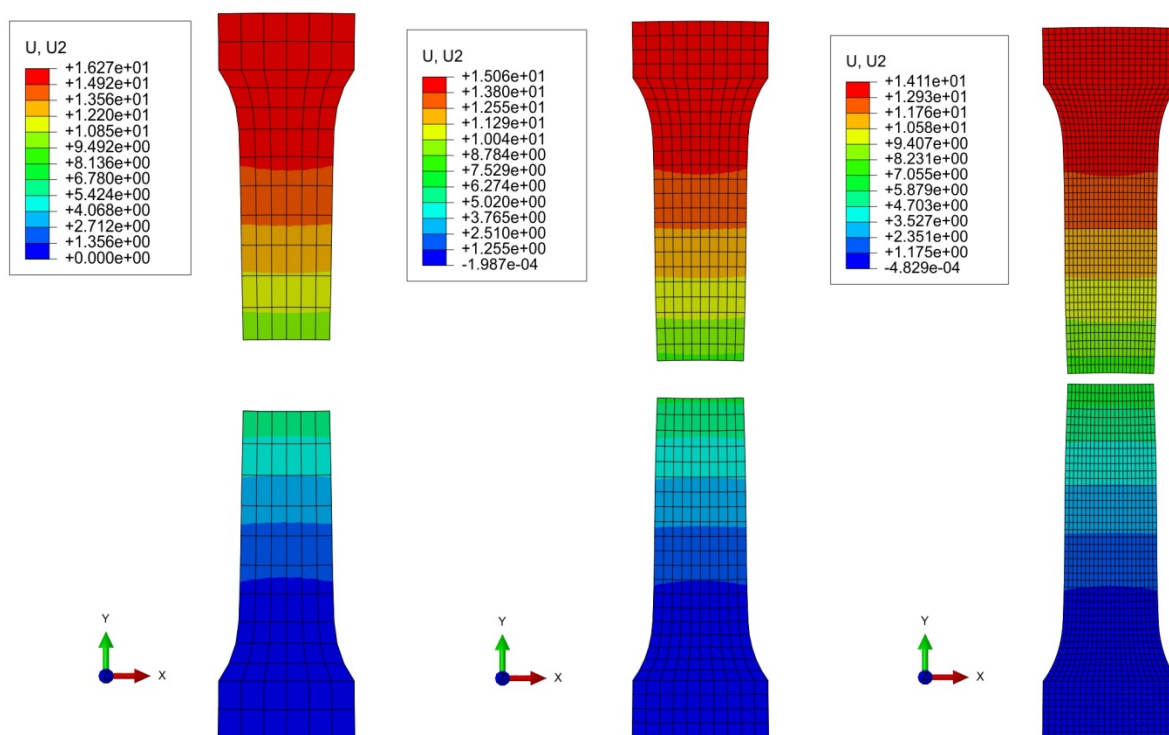
```
500., 0.2554
```

```
500., 0.3 .
```

Tablica 7. Konzistentne jedinice u programskom paketu ABAQUS

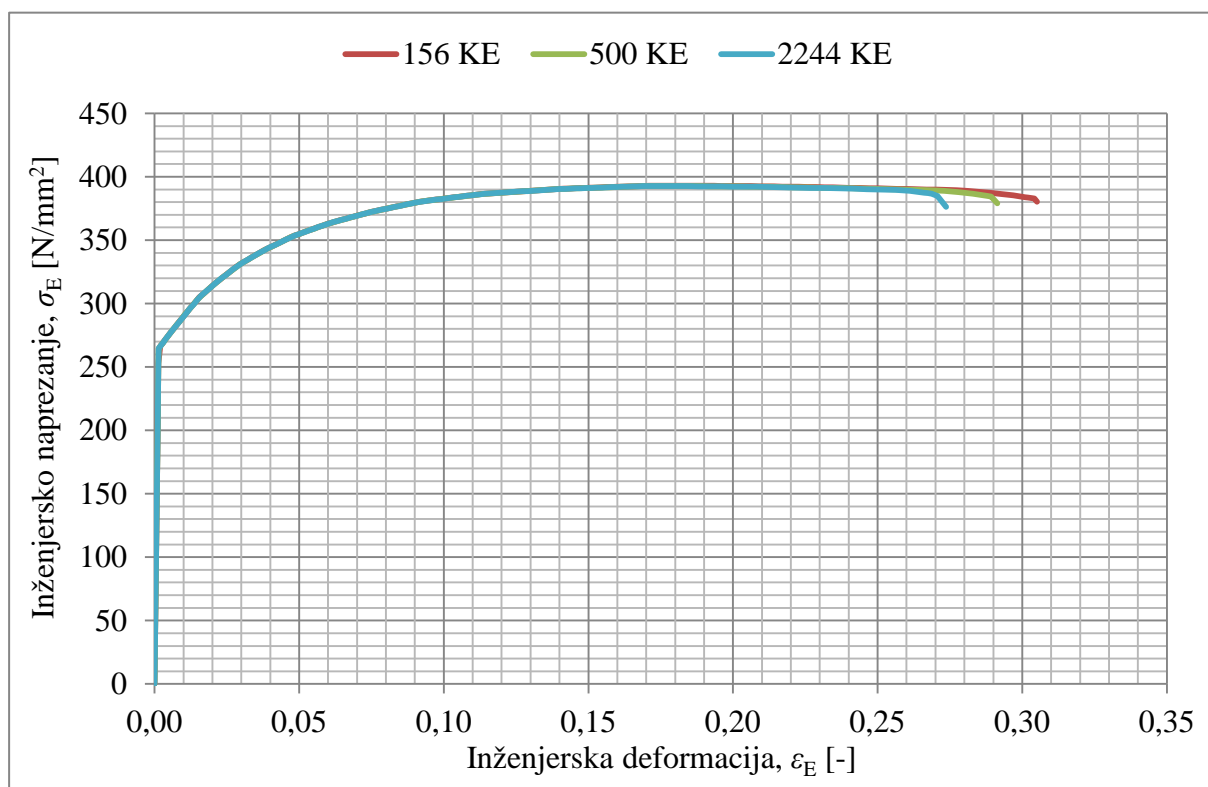
Konzistentne jedinice				
Veličina	SI	SI (mm)	SAD (ft)	SAD (inch)
Duljina	m	mm	ft	in
Sila	N	N	lbf	lbf
Masa	kg	t (1000 kg)	slug	lbf·s <sup>2</sup> /in
Vrijeme	s	s	s	s
Naprezanje	Pa (N/m <sup>2</sup> )	MPa (N/m <sup>2</sup> )	lbf/ft <sup>2</sup>	psi (lbf/in <sup>2</sup> )
Energija	J (N·m)	mJ (10 <sup>-3</sup> J)	ft·lbf	in·lbf
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	t/mm <sup>3</sup>	slug/ft <sup>3</sup>	lbf·s <sup>2</sup> /in <sup>4</sup>

Za sve tri diskretizacije epruvete prikazane na slici 45 proveden je proračun deformiranja do loma pri brzini 0,1 mm/s, a na slici 47 prikazana je usporedba raspodjele pomaka u smjeru osi y u trenutku potpunog sloma za diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa.



Slika 47. Usporedba raspodjele pomaka epruvete u smjeru osi y u trenutku potpunog sloma pri brzini deformiranja 0,1 mm/s za diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa

Kao što su za eksperimentalne podatke u svrhu dobivanja dijagrama inženjersko naprezanje – inženjerska deformacija u ARAMIS-u pomaci praćeni uzduž linije duljine oko 25 mm, tako se i za rezultate numeričkog proračuna u ABAQUS-u, u svrhu verifikacije, prate pomaci uzduž linije u ovisnosti o vremenu. Također, istovremeno se prate i vrijednosti sile kojom je potrebno djelovati na vrhu epruvete da bi se ostvarili takvi pomaci. Nakon upotrebe izraza (1) i (2), dobivaju se dijagrami ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji pri brzini deformiranja od 0,1 mm/s dobiveni numeričkim proračunom za tri različite diskretizacije prikazani na slici 48.



**Slika 48.** Usporedba ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji pri brzini deformiranja 0,1 mm/s dobivenih numeričkim proračunom za diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa

### 3.6.2. Implementacija materijalnog modela i prikaz rezultata za brzinu deformiranja 20 mm/s

Kao što je već opisano u prethodnom poglavlju, materijalni model se definira u ulaznoj datoteci, pri čemu su ponovno vrijednosti dobivene eksperimentalnim ispitivanjem za

---

područje prije nastanka loma prikazane u tablici 4 prilagođene prema preporukama iz [24], tj.

definirano je veće očvršćivanje materijala, koje se nadoknađuje modelom oštećenja. Također,

vrijednosti su definirane za SI sustav u mm prema tablici 6. Dio ulazne datoteke koji se

odnosi na materijalni model pri brzini deformiranja 20 mm/s ima oblik:

\*\* MATERIALS

\*\*

\*Material, name=EN-GJS-400-18-LT

\*Damage Initiation, criterion=DUCTILE

0.45, 0.33, 0.

\*Damage Evolution, type=ENERGY

49.,

\*Elastic

189800., 0.275

\*Plastic

265., 0.

280., 0.0009

295., 0.0019

310., 0.0047

325., 0.0105

340., 0.0161

355., 0.0227

370., 0.0302

385., 0.0386

400., 0.0482

415., 0.0592

430., 0.0721

445., 0.0875

460., 0.1061

475., 0.129



490., 0.1577

495., 0.1691

500., 0.1813

505., 0.1957

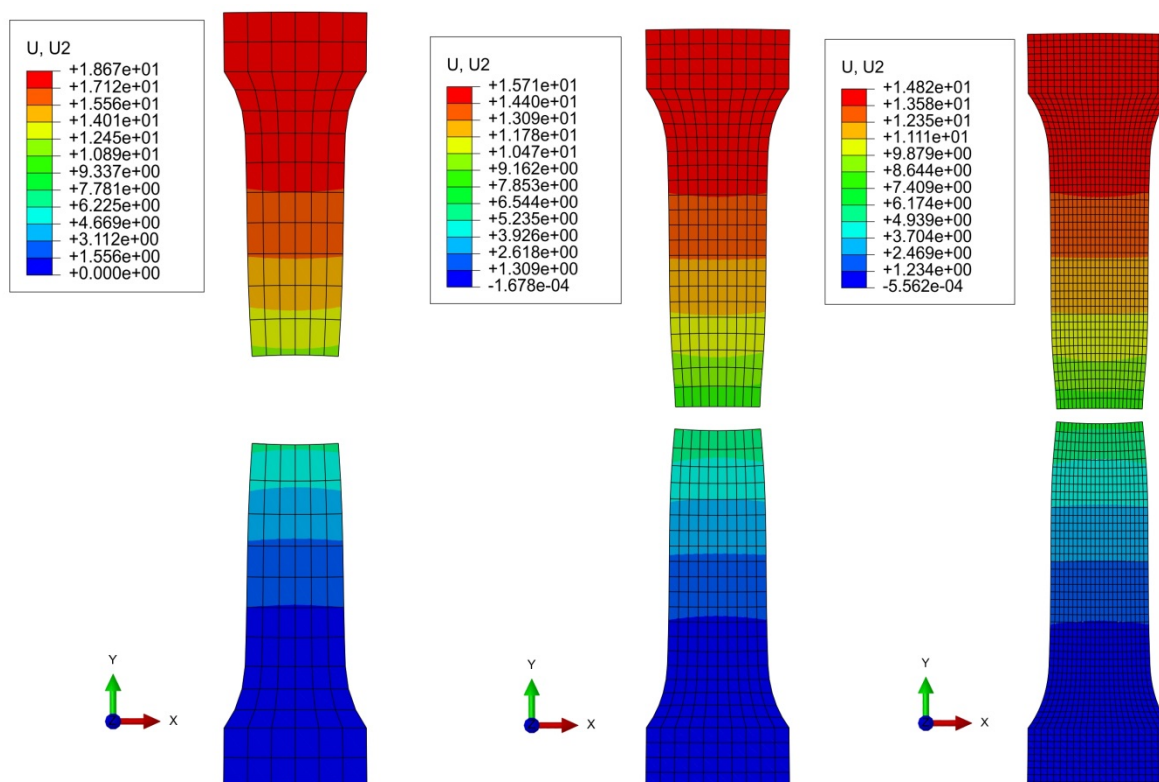
510., 0.2095

515., 0.2257

524., 0.2468

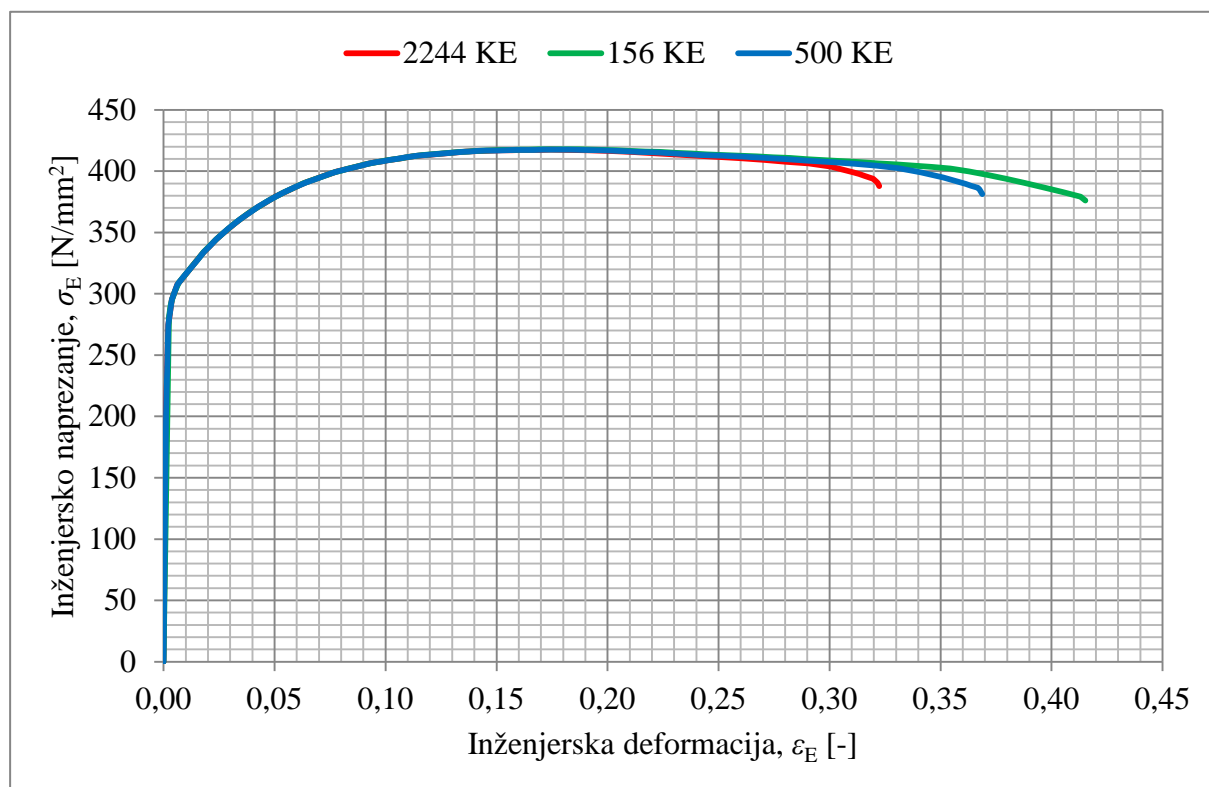
560., 0.35 .

Potom se za tri diskretizacije epruvete prikazane na slici 45 provodi proračun deformiranja do loma, ovaj put pri brzini 20 mm/s. Na slici 49 prikazana je usporedba raspodjele pomaka u smjeru osi y u trenutku potpunog sloma za diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa.



**Slika 49. Usporedba raspodjele pomaka epruvete u smjeru osi y u trenutku potpunog loma pri brzini deformiranja 20 mm/s za diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa**

Nakon provedenog proračuna deformiranja do loma, u programskom paketu ABAQUS prate se pomaci uzduž linije u ovisnosti o vremenu, uz istovremeno praćenje sile potrebne za ostvarivanje takvih pomaka. Nakon upotrebe izraza (1) i (2), dobivaju se dijagrami ovisnosti inženjerskog napreznja o inženjerskoj deformaciji pri brzini deformiranja od 20 mm/s dobiveni numeričkim proračunom za tri različite diskretizacije prikazani na slici 50.

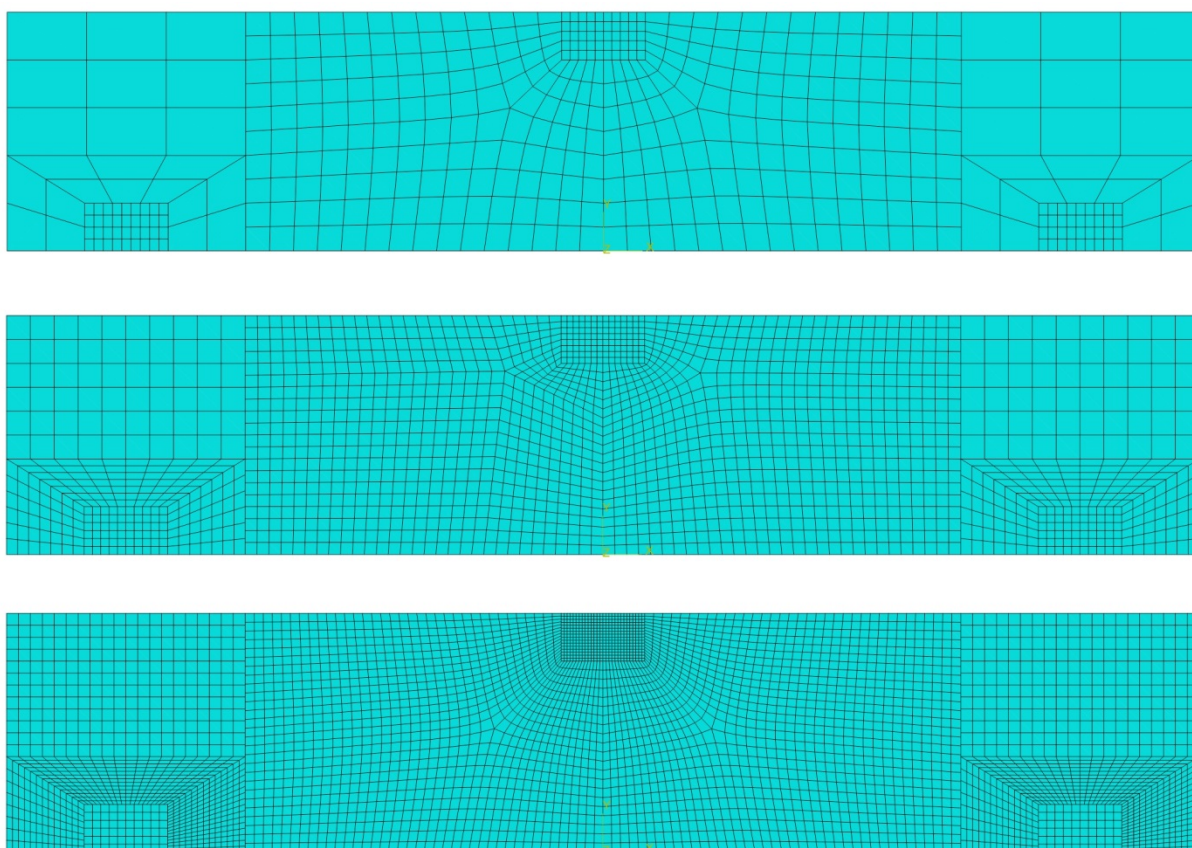


**Slika 50. Usporedba ovisnosti inženjerskog napreznja o inženjerskoj deformaciji pri brzini deformiranja 20 mm/s dobivenih numeričkim proračunom za diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa**

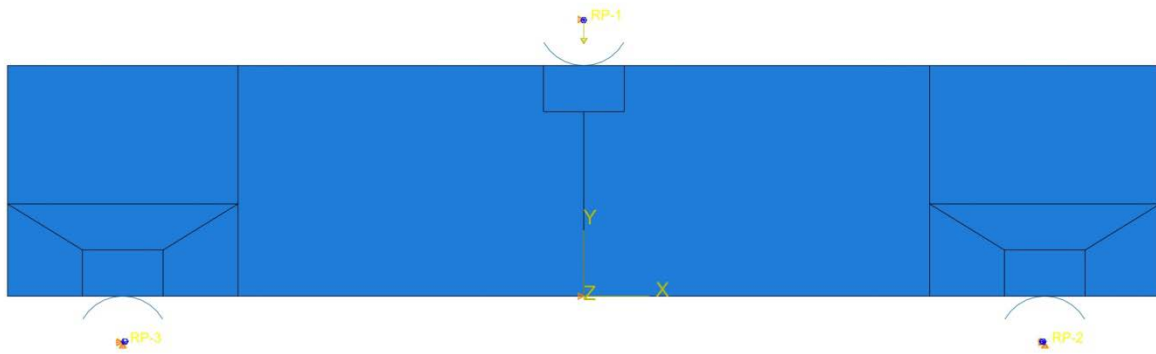
### 3.7. Numeričko modeliranje ispitivanja savijanjem u tri točke i rezultati

Geometrija epruvete za ispitivanje savijanjem u tri točke (dimenzije prikazane na slici 8) modelirana je u programskom paketu ABAQUS te diskretizirana konačnim elementima za opisivanje ravninskog stanja napreznja (CPS4). U svrhu prikaza konvergencije rezultata, napravljene su tri mreže konačnih elemenata različite gustoće, tj. epruveta je diskretizirana s 478, 1940 i 4492 konačna elementa kako je prikazano na slici 51.

Osim same geometrije epruvete, valjci kidalice modelirani su kao kruta tijela povezana kinematskim vezama s referentnim točkama postavljenima u njihovom središtu. Između valjaka i epruvete definiran je kontakt s trenjem. U referentnim točkama donjih valjaka dodijeljeni su rubni uvjeti pomaka kojima se ograničava pomak u smjeru osi  $x$  i  $y$  čime se simuliraju nepomični valjci. U referentnoj točki gornjeg valjka dodijeljen je rubni uvjet kojim je ograničen pomak u smjeru osi  $x$ , a potom se u smjeru osi  $y$  dodjeljuje sila ili pomak. Epruveta sa zadanim rubnim uvjetima prikazana je na slici 52.

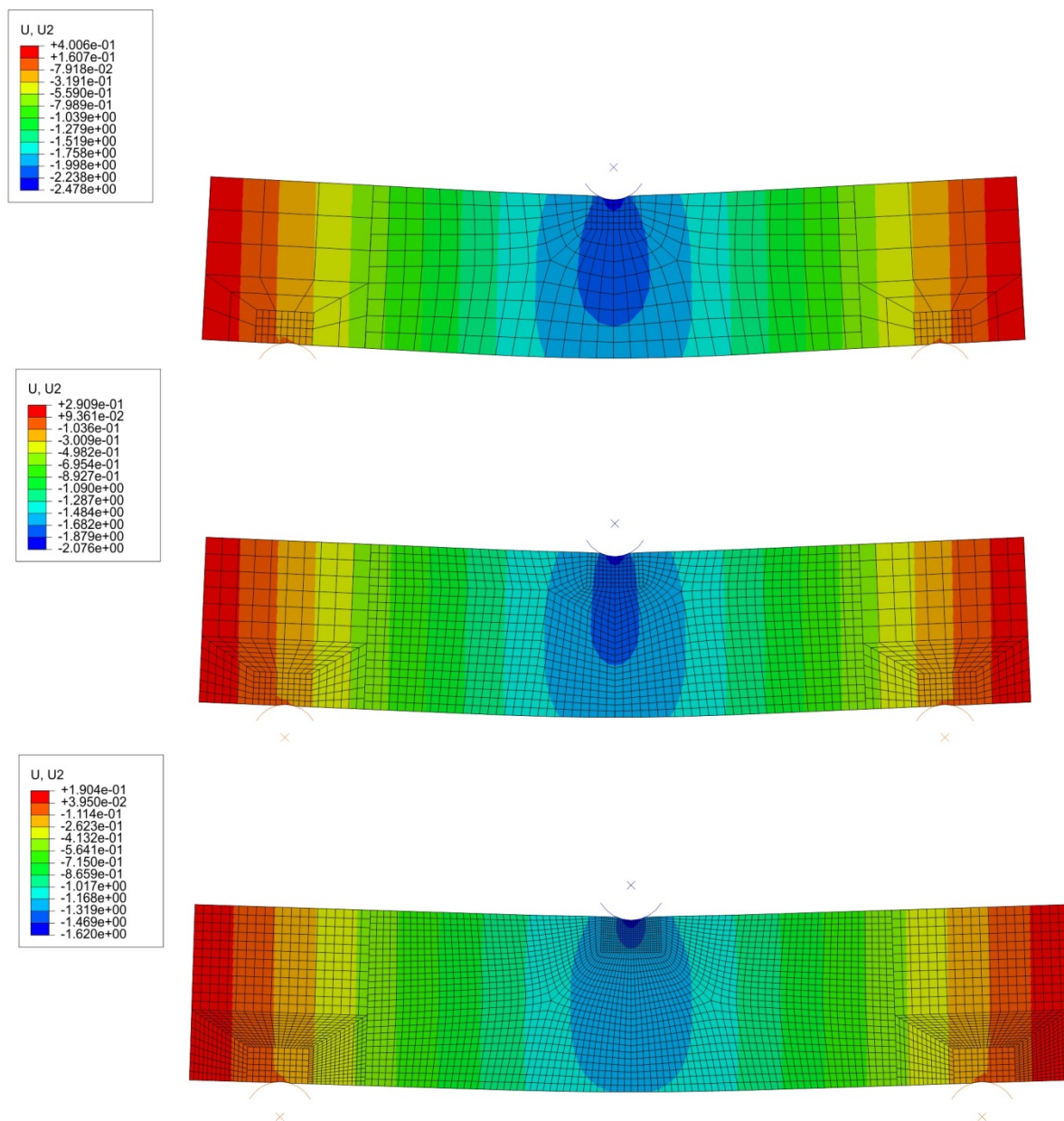


**Slika 51. Epruveta za ispitivanje savijanjem u tri točke diskretizirana s 478, 1940 i 4492 CPS4 konačna elementa**



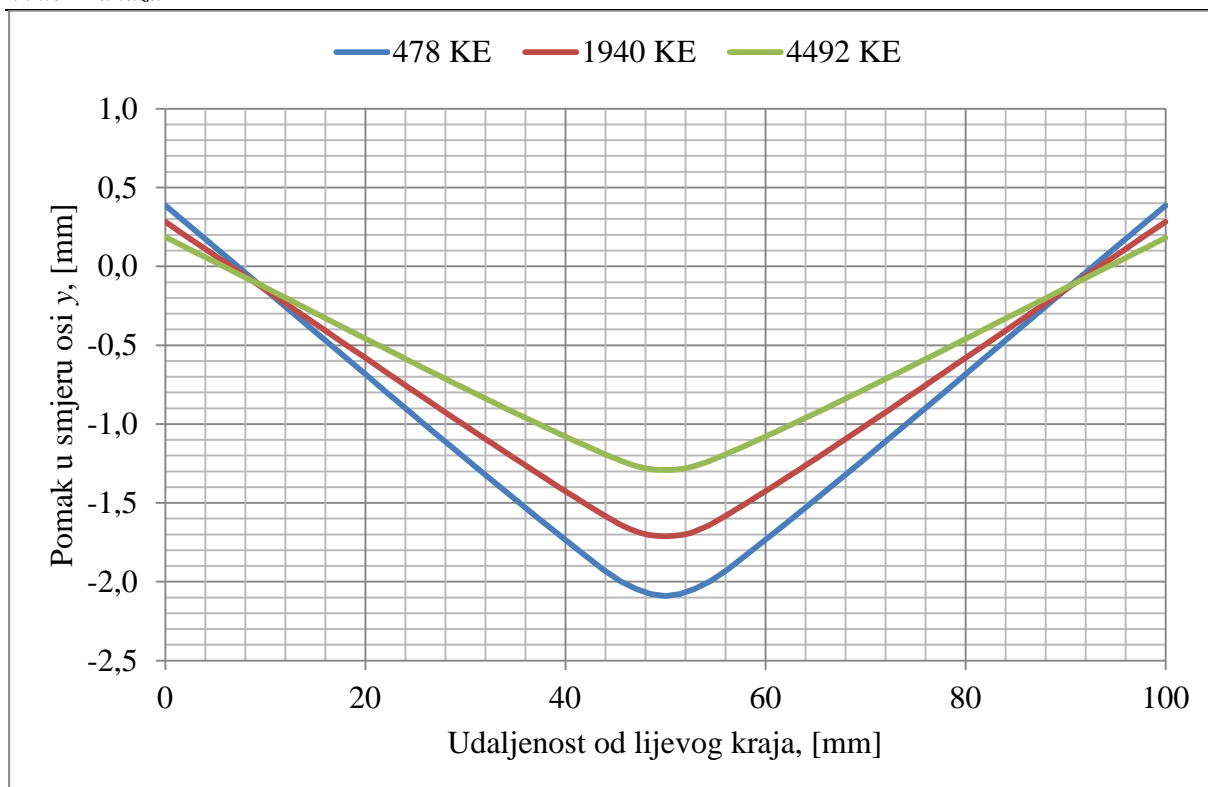
**Slika 52. Epruveta za ispitivanje savijanjem u tri točke s pripadnim ispitnim valjcima i rubnim uvjetima**

Nakon implementacije materijalnog modela prikazanog u poglavlju 3.6.2. epruveta je opterećena silom iznosa 20 000 N, a na slici 53 prikazana je usporedba raspodjele pomaka u smjeru osi y po epruveti za tri različite diskretizacije.



**Slika 53.** Usporedba raspodjele pomaka po epruveti opterećenoj silom iznosa 20 000 N diskretiziranom s 478, 1940 i 4492 CPS4 konačna elementa

Potom su iz rezultata numeričkog proračuna očitani pomaci u smjeru osi  $y$  po horizontalnoj liniji simetrije (prikazani na slici 54), kako bi se mogli usporediti s podacima očitanim mjernim sustavom ARAMIS.



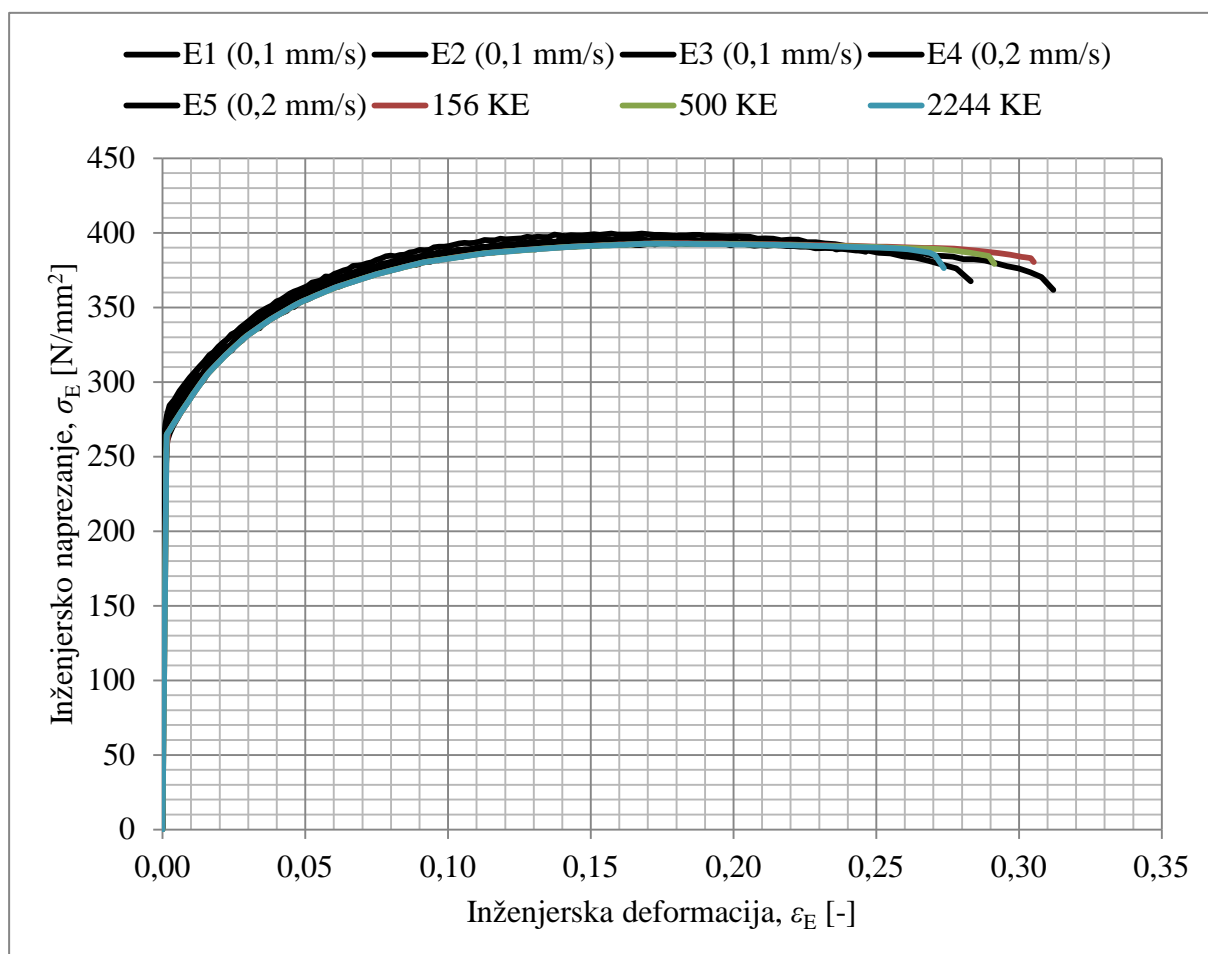
Slika 54. Usporedba raspodjela pomaka u smjeru osi y po horizontalnoj liniji simetrije za epruvete diskretizirane s 478, 1940 i 4492 konačna elementa pri djelovanju sile iznosa 20 000 N

## 4. USPOREDBA REZULTATA

Kako bi se potvrdila valjanost materijalnih modela izvedenih i prikazanih u poglavlju 2, implementiranih u numerički model kako je opisano u poglavlju 3, potrebno je napraviti usporedbu dobivenih rezultata.

### 4.1.1. Usporedba rezultata za vlačna ispitivanja pri brzinama 0,1 mm/s i 0,2 mm/s

Prethodno su pokazani dijagrami ovisnosti inženjerskog naprežanja o inženjerskoj deformaciji dobiveni eksperimentalnim ispitivanjem na pet epruveta te numeričkim proračunom za tri različite diskretizacije, pri brzinama deformiranja 0,1 mm/s i 0,2 mm/s, a na slici 55 prikazana je njihova usporedba.



Slika 55. Usporedba rezultata numeričkog proračuna za tri različite diskretizacije s rezultatima eksperimentalnog ispitivanja na pet epruveta pri brzinama deformiranja 0,1 mm/s i 0,2 mm/s

Iz dijagrama je vidljivo kako sve tri diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa dobro opisuju ponašanje materijala u području do vlačne čvrstoće, ali potom se događaju razlike, koje se najbolje vide po razlikama u istezljivosti, tj. inženjerskoj deformaciji pri kojoj dolazi do loma. Vrijednosti istezljivosti se povećavanjem broja konačnih elemenata približavaju prosječnoj vrijednosti istezljivosti dobivenoj eksperimentom u iznosu od 0,2733, kako je i očekivano jer je materijalni model napravljen prema uprosječenim vrijednostima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjem na pet epruveta. Numerički modeli s manjim brojem konačnih elemenata pokazuju veću vrijednost istezljivosti jer je za potpuni lom u tim modelima potrebno postići potpunu degradaciju konačnih elemenata koji obuhvaćaju veću površinu (što se može primijetiti na slici 47) za što je naravno potrebna veća energija.

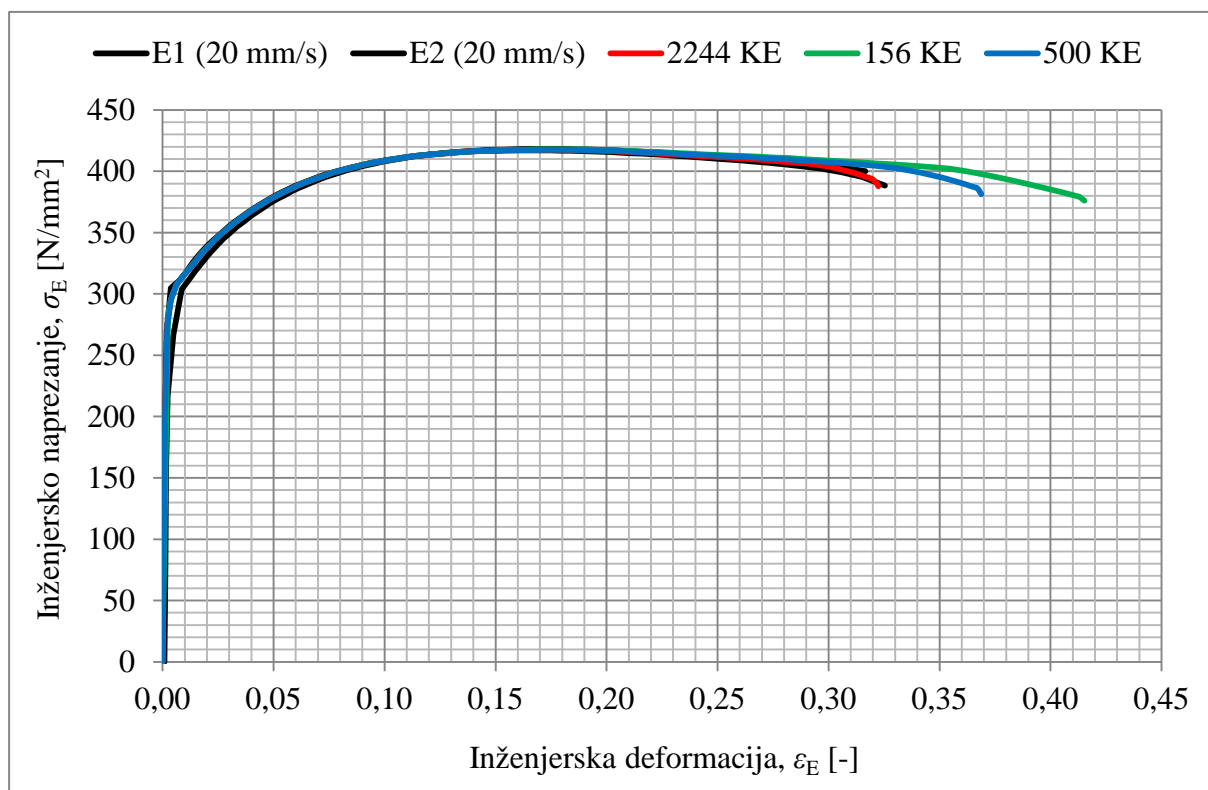
#### **4.1.2. Usporedba rezultata za vlačna ispitivanja pri brzini 20 mm/s**

Na jednak način obrađeni su rezultati eksperimentalnih ispitivanja i numeričkog proračuna pri brzini deformiranja od 20 mm/s, a usporedba dijagrama ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji dobivenog eksperimentalnim ispitivanjem te numeričkim proračunom za tri različite diskretizacije prikazana je na slici 56.

Iz dijagrama je ponovno vidljivo kako sve tri diskretizacije s 156, 500 i 2244 konačna elementa dobro opisuju ponašanje materijala u području do vlačne čvrstoće, ali potom se događaju razlike, koje se najbolje vide po razlikama u istezljivosti, tj. inženjerskoj deformaciji pri kojoj dolazi do loma. Vrijednosti istezljivosti se povećavanjem broja konačnih elemenata ponovno približavaju prosječnoj vrijednosti istezljivosti dobivenoj eksperimentom u iznosu od 0,3211, kako je i očekivano jer je materijalni model napravljen prema uprosječenim vrijednostima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjem na dvije epruveta. Također, ponovno se može primijetiti kako numerički modeli s manjim brojem konačnih elemenata pokazuju veću vrijednost istezljivosti jer je za potpuni lom u tim modelima potrebno postići potpunu



degradaciju konačnih elemenata koji obuhvaćaju veću površinu (što se može primijetiti na slici 49) za što je naravno potrebna veća energija.

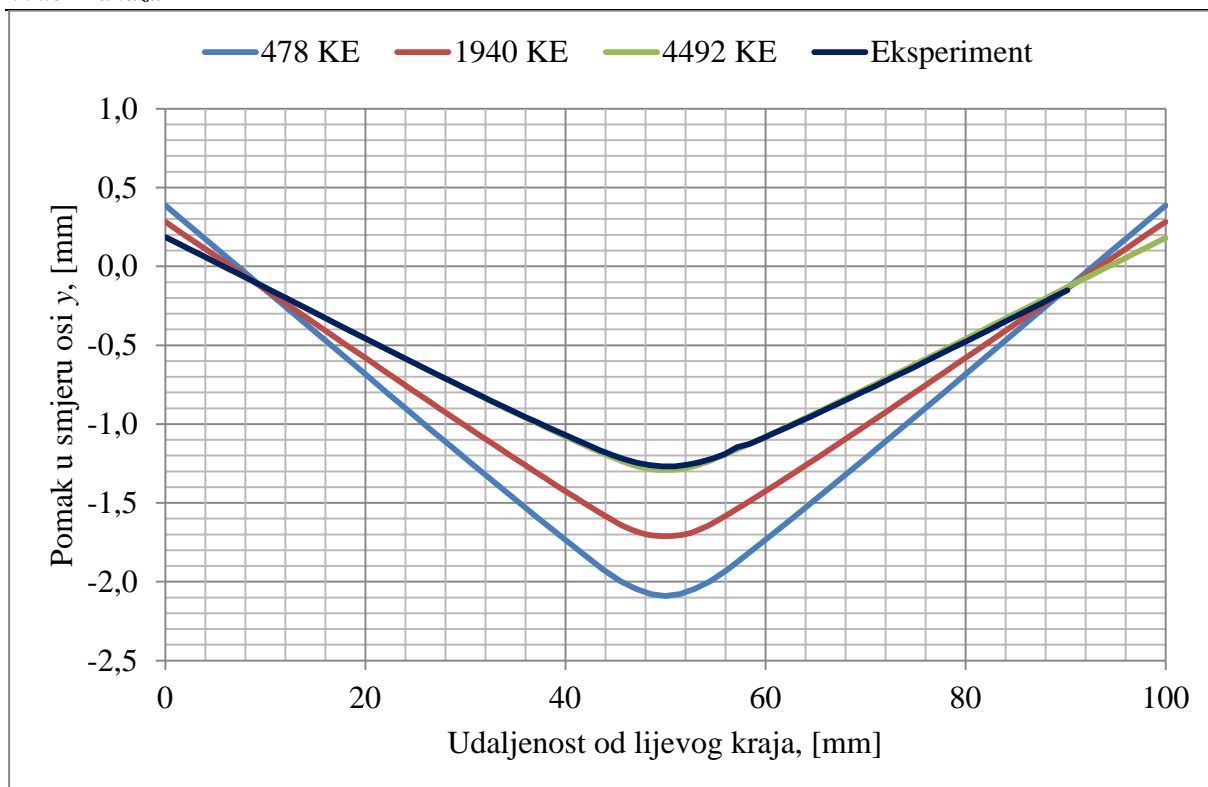


**Slika 56.** Usporedba rezultata numeričkog proračuna za tri različite diskretizacije s rezultatima eksperimentalnog ispitivanja na dvije epruvete pri brzini deformiranja 20 mm/s

#### 4.1.3. Usporedba rezultata ispitivanja savijanjem u tri točke brzinom 20 mm/s

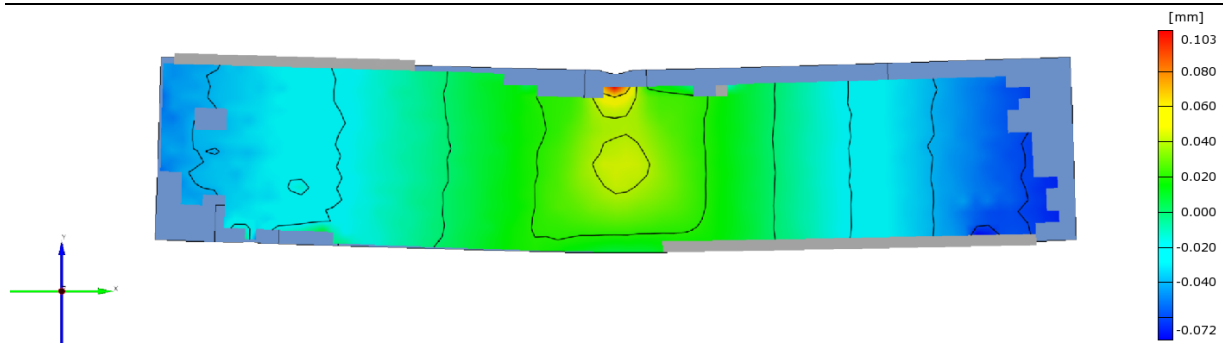
Na slici 57 prikazana je usporedba eksperimentalno određene i numerički izračunate raspodjele pomaka u smjeru osi  $y$  po horizontalnoj osi simetrije pri ispitivanju savijanjem u tri točke silom iznosa 20 000 N. Prikazani su rezultati numeričkog proračuna za tri različite diskretizacije opisane u poglavlju 3.7 te linija koja predstavlja prosječne vrijednosti rezultata eksperimenta kako je opisano u poglavlju 2.10.3.

Iz slike je vidljiva konvergencija numeričkih rezultata povećanjem broja konačnih elemenata prema eksperimentalnima, a numerički model diskretiziran s 4492 konačna elementa jako dobro opisuje raspodjelu pomaka dobivenu eksperimentom.



**Slika 57. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za raspodjelu pomaka u smjeru osi y po horizontalnoj osi simetrije za ispitivanje savijanjem u tri točke silom iznosa 20 000 N**

Kako se ipak ne može na temelju poklapanja rezultata na jednom presjeku zaključiti da numerički model dobro opisuje stvarno ponašanje epruvete napravljena je usporedba pomaka u smjeru osi y po cijeloj površini epruvete prikazana na slici 58. Takva usporedba napravljena je u programskom paketu SVIEW koji je dio već opisanog sustava ARAMIS. SVIEW uz rezultate koje je snimio ARAMIS prihvaća rezultate numeričkog proračuna u obliku \*.dynain datoteke. Kako su rezultati numeričkog proračuna u programskom paketu ABAQUS prikazani u obliku \*.odb datoteke, prije usporedbe potrebno je napraviti pretvorbu pomoću odb2dynain.py skripte. Nakon pripreme datoteka i učitavanja u SVIEW napravljeno je ručno podudaranje geometrije epruveta i izračunavanje razlika u pomacima.



**Slika 58.** Usporedba raspodjele pomaka u smjeru osi y dobivene eksperimentom i numeričkim proračunom za ispitivanje savijanjem u tri točke silom iznosa 20 000 N

Iz slike je vidljivo jako dobro poklapanje rezultata koji odstupaju najviše 0,103 mm na jako maloj površini, dok su na ostatku epruvete razlike još i manje. Iz svega toga, može se zaključiti kako numerički model opisan u poglavlju 3.7 jako dobro opisuje stvarno ponašanje epruvete.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu su provedena eksperimentalna ispitivanja i numeričko modeliranje procesa deformiranja do loma nodularnog lijeva oznake EN-GJS-400-18-LT. Cilj rada bio je izrada neizoternog elasto-plastičnog konstitutivnog modela koji bi povećao točnost numeričkih simulacija nosivih konstrukcija izrađenih od tog materijala.

U prvom dijelu eksperimentalnih ispitivanja provedena su kvazistatička vlačna ispitivanja pri brzinama deformiranja 0,1 mm/s i 0,2 mm/s na pet plosnatih epruveta. Za vrijeme ispitivanja pomaci su praćeni optičkim mjernim sustavom ARAMIS, a temperatura korištenjem termografske kamere. Iz rezultata je vidljivo jako dobro poklapanje mehaničkih svojstava ispitivanih epruveta, osim svojstva istežljivosti, tj. deformacije pri kojoj dolazi do loma. Eksperimentalno dobivena ovisnost inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji preračunata je u ovisnosti stvarnog naprezanja o stvarnoj i plastičnoj deformaciji. Iz podataka o temperaturi izračunate su vrijednosti funkcije disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju te se može zaključiti kako se ispitivanja provedena na ovim brzinama ne mogu smatrati adijabatskima, tj. da se znatan dio topline prenese na okolinu.

U drugom dijelu eksperimentalnih ispitivanja provedena su vlačna ispitivanja na dvije plosnate epruvete te dva ispitivanja savijanjem u tri točke pri brzini 20 mm/s. Za vrijeme ispitivanja ponovno su korišteni optički mjerni sustav ARAMIS te termografska kamera. Iz rezultata je vidljivo jako dobro poklapanje mehaničkih svojstava pri vlačnim ispitivanjima do loma. Ponovno su iz eksperimentalno dobivene ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji izračunate ovisnosti stvarnog naprezanja o stvarnoj i plastičnoj deformaciji. Iz podataka o temperaturi ponovno su izračunate vrijednosti funkcije disipacije mehaničkog rada u toplinsku energiju te se iz rezultata može zaključiti da su eksperimenti provedeni pri dovoljnoj velikoj brzini da se mogu smatrati adijabatskima, tj. zanemariv dio

topline prenese se na okolinu za vrijeme ispitivanja. Prikazana je i raspodjela pomaka u smjeru osi y po horizontalnoj liniji simetrije epruvete za savijanje u tri točke pri opterećenju silom iznosa 20 000 N dobivena mjerenjem u sustavu ARAMIS.

Prije same izrade numeričkih modela, numeričke metode verificirane su na jednostavnom primjeru membrane za koju su poznata analitička rješenja.

U prvom dijelu izrade numeričkog modela u programskom paketu ABAQUS modelirana je geometrija plosnate epruvete kojoj su dodijeljeni rubni uvjeti koji simuliraju vlačno ispitivanje. Potom su implementirani materijalni modeli definirani prethodnim eksperimentalnim ispitivanjima. Prikazana je usporedba rezultata ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji za tri različite diskretizacije i može se zaključiti kako sve tri mreže konačnih elemenata gotovo identično opisuju ponašanje materijala u području do vlačne čvrstoće, ali ukoliko se želi točno opisati područje oštećivanja i loma posebna pozornost se treba obratiti na diskretizaciju, jer povećanjem konačnih elemenata znatno raste energija, a samim time i sila, koja izaziva lom.

U drugom dijelu izrade numeričkog modela u programskom paketu ABAQUS modelirana je geometrija sklopa epruvete za ispitivanje savijanjem u tri točke i pripadnih valjaka te su dodijeljeni odgovarajući rubni uvjeti. Nakon implementacije materijalnog modela i izvršenja proračuna prikazani su deformirani oblici epruveta i usporedba dijagrama raspodjele pomaka u smjeru osi y po horizontalnoj osi simetrije epruvete za tri različite diskretizacije iz čega je vidljiva značajna ovisnost rezultata o samoj diskretizaciji.

U prvom dijelu usporedbe rezultata prikazana je usporedba dijagrama ovisnosti inženjerskog naprezanja o inženjerskoj deformaciji dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima i numeričkim proračunom. Iz usporedbe se može zaključiti kako povećanjem broja konačnih elemenata rezultati numeričkog proračuna konvergiraju prema eksperimentalnima te da se uz

pravilan izbor mreže konačnih elemenata može postići izvrsno poklapanje rezultata numeričkog proračuna s rezultatima eksperimenta.

U drugom dijelu usporedbe rezultata prikazana je usporedba dijagrama raspodjele pomaka u smjeru osi  $y$  po horizontalnoj osi simetrije epruvete dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima i numeričkim proračunom. Iz rezultata je ponovno vidljiva konvergencija rezultata numeričkog proračuna prema rezultatima eksperimenta povećanjem broja konačnih elemenata, a uz pravilan izbor mreže konačnih elemenata ponovno se postiže izvrsno poklapanje. U konačnici, u svrhu potpune verifikacije, prikazana je usporedba pomaka u smjeru osi  $y$  po cijeloj površini epruvete iz čega se, na osnovi malih razlika, može zaključiti kako razvijeni materijalni model jako dobro opisuje ponašanje stvarnog materijala.

## **ZAHVALE**

Zahvaljujem se svojim mentorima prof. dr. sc. Zdenku Tonkoviću i prof. dr. sc. Ivanki Boras na stručnom vođenju i potpori tijekom izrade ovog rada. Za provedbu eksperimentalnih ispitivanja ključnu ulogu imali su prof. dr. sc. Janoš Kodvanj i Martin Surjak, mag. ing. mech. za što im se zahvaljujem. Zahvaljujem se i prof. dr. sc. Lovri Krstulović-Opari koji je nesebično ustupio svoju opremu za provedbu ispitivanja koja inače ne bi bilo moguće provesti. Zahvaljujem se i dr. sc. Ivici Skozritu za utrošeno vrijeme i podršku. Veliko hvala kolegi Jošku Frančeskiju za pomoć pri obradi eksperimentalnih rezultata, kao i za ostale prijateljske savjete.

Posebno se želim zahvaliti svojoj djevojci na svoj pruženoj potpori.

Na kraju, zahvaljujem se svim nespomenutima, a koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom izrade ovog rada.

## LITERATURA

- [1] Čanžar, P., Tonković, Z., Kodvanj, J.: Microstructure influence on fatigue behaviour of nodular cast iron, *Materials Science and Engineering A*, 556, 88-99, 2012.
- [2] Costa, N., Machado, N., Silva, F. S.: Influence of graphite nodules geometrical features on fatigue life of high-strength Nodular cast iron, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17, 3, 352-362, 2008.
- [3] Costa, N., Machado, N., Silva, F. S.: A new method for prediction of nodular cast iron fatigue limit, *International Journal of Fatigue*, 32, 7, 988-995, 2010.
- [4] Iacoviello, F., Di Bartolomeo, O., Di Cocco, V., Piacente, V.: Damaging micromechanisms in ferritic-pearlitic ductile cast irons, *Materials Science and Engineering A*, 478, 1-2, 181-186, 2008.
- [5] Shirani, M., Härhegård, G., Morin, N.: Fatigue life prediction of components made of spheroidal graphite cast iron, *Procedia Engineering*, 2, 1, 1125-1130, 2010.
- [6] Hübner, P., Schlosser, H., Pusch, G., Biermann, H.: Load history effects in ductile cast iron for wind turbine components, *International Journal of Fatigue*, 29, 9-11, 1788-1796, 2007.
- [7] European standard EN 1563: Spheroidal graphite cast irons, 1997.
- [8] Vesenjāk, M., Krstulović-Opara, L., Ren, Z.: Characterization of irregular open-cell cellular structure with silicone pore filler, 32 (8), 1538-1544, 2013.
- [9] ARAMIS: User Manual – Software, GOM
- [10] Frančeski, J.: Algoritam za validaciju numeričkog modela primjenom metoda fotogrametrije i termografije, Rektorova nagrada, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [11] Multipurpose Dynamic Testing Systems, Walter Bai
- [12] Berković-Šubić, M.: Primjena infracrvene termografije kod mehaničkog ispitivanja materijala, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [13] ThermaCAM SC Series Infrared Cameras for Research and Development – Features/Specifications, FLIR
- [14] Ling, Y.: Uniaxial True Stress-Strain after Necking, *AMP Journal of Technology*, 5, 37-48, 1996.
- [15] Roylance, D.: Stress-strain curves, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001.



- [16] Fe-safe: Volume 1 – User Manual, Safe Technology Limited, 2008.
- [17] Pustaić, D., Cukor, I.: Teorija plastičnosti i viskoelastičnosti, Sažetak predavanja, Zagreb, 2009.
- [18] Marendić, P., Veljača, T., Krstulović-Opara, L., Domazet, Ž.: Uvod u termoelastičnu analizu naprezanja, Drugi susret Hrvatskog društva za mehaniku, Split, 2008.
- [19] Kapoor, R., Nemat-Nasser, S.: Determination of temperature rise during high strain rate deformation, *Mechanics of Materials*, 27, 1-12, 1998.
- [20] Sorić, J.: Metoda konačnih elemenata, Golden marketing-Tehnička knjiga Zagreb, 2004.
- [21] ABAQUS, Abaqus Software: Version 6.14, 2014.
- [22] ABAQUS, Analysis User's Manual, Volume IV: Elements
- [23] Alfirević, I.: Nauka o čvrstoći, ITP Tehnička knjiga d. d. Zagreb, 1995.
- [24] ABAQUS, Analysis User's Manual, Volume III: Materials
- [25] Hooputra, H., Gese, H., Dell, H., Werner, H.: A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminium extrusions, *International Journal of Crashworthiness*, 9, 5, 449-463, 2004.
- [26] Hillerborg, A., Modeer M., Petersson, P. E.: Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, *Cement and Concrete Research*, 6, 773-782, 1976.
- [27] ABAQUS, Analysis User's Manual, Volume II: Analysis
- [28] ABAQUS, Verification Manual
- [29] Čanžar, P.: Eksperimentalno i numeričko modeliranje zamornog ponašanja nodularnog lijeva, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [30] <http://www.ductile.org/>
- [31] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, IV izdanje, FSB, Zagreb, 2007.

## **NASLOV: Numeričko i eksperimentalno modeliranje mehanizama termoplastičnosti i oštećenja u nodularnom lijevu**

### **SAŽETAK**

Zbog izražene duktilnosti i dinamičke čvrstoće, nodularni lijev je često upotrebljavan materijal u nosivim konstrukcijama. U radu su provedena eksperimentalna i numerička ispitivanja elastoplastičnog ponašanja i oštećivanja nodularnog lijeva oznake EN-GJS-400-18-LT. Provedena su kvazistatička i dinamička vlačna ispitivanja na plosnatim epruvetama te ispitivanja savijanjem u tri točke. Za vrijeme ispitivanja raspodjele pomaka i temperatura mjerene su optičkim mjernim sustavom ARAMIS 4M te infracrvenom termografskom kamerom. Na osnovu rezultata eksperimentalnih mjerenja razvijen je neizotermni elastoplastični konstitutivni materijalni model s oštećivanjem. Konstitutivni model implementiran je u numeričke modele deformiranja i oštećenja epruveta opisanih dvodimenzionalnim konačnim elementima za opisivanje ravninskog stanja naprezanja. Pri numeričkom modeliranju korištene su mreže s različitim brojem konačnih elemenata kako bi se pokazala konvergencija rezultata. Razvijeni konstitutivni model verificiran je usporedbom rezultata numeričkih proračuna s eksperimentima.

**Ključne riječi:** *nodularni lijev, ARAMIS, termografija, metoda konačnih elemenata*

**TITLE: Numerical and Experimental Modelling of Thermoplastic Damage Mechanisms  
in Nodular Cast Iron**

**SUMMARY**

Due to the high ductility and fatigue strength, the ductile or nodular cast iron is widely used for many structural applications. This paper presents an experimental and numerical investigation of the dynamic elastoplastic damage behaviour of the nodular cast iron grade EN-GJS-400-18-LT. The experimental procedure includes quasistatic and dynamic tensile tests at different strain rates on flat specimens, as well as three point bending tests. During the experiment the displacement and temperature distributions on the specimens surface are measured by optical measuring system ARAMIS 4M and infrared thermography. Non-isothermal elastoplastic damage constitutive model is developed based on experimental measurements. Thereafter, constitutive model is implemented in numerical models of deformation and failure process of the specimens meshed with two-dimensional plane stress finite elements. Different mesh densities were used for specimens in order to show convergence of results. Developed constitutive model is verified by comparison of the numerical results with experimental.

**Key words:** *ductile iron, ARAMIS, thermography, finite elements method*