Statičko vlačno ispitivanje pri povišenim temperaturama

Jakovljević, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:010190

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mislav Jakovljević

Zagreb, 2019.

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Dr. sc. Željko Alar, izv. profesor

Student:
Mislav Jakovljević

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Željku Alaru na ukazanom strpljenju, savjetima i pomoći tijekom izrade ovoga rada. Također se zahvaljujem osoblju Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava, i osoblju laboratorija TPK Zavoda na pomoći u provođenju eksperimentalnog dijela rada. Posebno sam zahvalan mojoj obitelji i prijateljima na svim oblicima pomoći i podrške tijekom studiranja i pisanja rada.

Mislav Jakovljević

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MISLAV JAKOVLJEVIĆ** Mat. br.: **0035202858**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Statičko vlačno ispitivanje pri povišenim temperaturama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Tensile testing at elevated temperature**

Opis zadatka:

U eksploataciji materijali su često izloženi povišenim temperaturama i njihovo ponašanje u takvim uvjetima se znatno mijenja u odnosno na sobnu temperaturu. Statičko vlačno ispitivanje metalnih materijala pri povišenoj temperaturi je definirano novim izdanjem norme HRN EN ISO 6892-2:2018.
U radu je potrebno:

1. Opisati metodu ispitivanja pri povišenim temperaturama.
2. Opisati izmjene donošene u novom izdanju norme HRN EN ISO 6892-2:2018 u odnosu na prethodno izdanje.
3. Prema literaturi odrediti utjecajne faktore na rezultate ispitivanja.
4. Eksperimentalno provesti ispitivanje čelika na različitim povišenim temperaturama.
5. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

Zadatak zadan:
6. svibnja 2019.

Rok predaje rada:
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Dr.sc. Željko Alar, izv.prof.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ:

SADRŽAJ: IV
POPIS SLIKA: V
POPIS TABLICA: VII
POPIS OZNAKA: VIII
SAŽETAK: IX
SUMMARY: X
1 UVOD 1
2 UTJECAJ POVIŠENE TEMPERATURE NA MEHANIČKA SVOJSTVA 2
2.1 Razlozi primjene 2
2.2 Promjena mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama 2
2.3 Kvalitativni σ - ε dijagram (dijagram naprezanje – istezanje) 6
3 NORMA HRN EN ISO 6892-2:2018 8
3.1 Općenito 8
3.2 Statičko vlačno ispitivanje 8
3.3 Ispitivanje pri povišenim temperaturama 17
4 EKSPERIMENTALNI DIO RADA 21
4.1 Plan ispitivanja 21
4.2 Rezultati mjerenja 28
5 ANALIZA REZULTATA 36
6 ZAKLJUČAK 40
7 LITERATURA 42
8 PRILOZI 43

POPIS SLIKA:

Slika 1: Promjenna mehanickih svojstava s povišenjem temperature [2] 3
Slika 2: Brzina puzanja u ovisnosti o temperature [2] 3
Slika 3: Smanjenje dinamičke izdržljivosti u ovisnosti u temperature [2] 4
Slika 4: Kvalitativni σ - ε dijagram [3] 6
Slika 5: Utjecaj povišene temperature na mehanička svojstva [3] 7
Slika 6: Konstrukcijska shema kidalice [5] 10
Slika 7: Karakteristične dimenzije okrugle epruvete [3] 11
Slika 8: Pravilno i nepravilno pozicioniranje epruvete [5] 12
Slika 9: Nasadni ekstenzometar [6] 14
Slika 10: Automatski kontaktni ekstenzometar [7] 14
Slika 11: VIdeoekstenzometar [8] 15
Slika 12: Laserski ekstenzometar [9] 16
Slika 13: Kidalica EU 40 MOD[5] 22
Slika 14: Kidalica sa montiranom pećі 23
Slika 15: Upravljačka konzola pećі 24
Slika 16. Kidalica tijekom izmjene epruveta 25
Slika 17: Narezani M16 navoj 26
Slika 18: Skraćena duljina "glave" epruvete 26
Slika 19: Indentec tvrdomjer 27
Slika 20: Dijagram sila - produljenje uzorak 1 28
Slika 21: Dijagram sila - produljenje uzorak 2 29
Slika 22: Dijagram sila - produljenje uzorak 3 29
Slika 23: Dijagram sila - produljenje uzorak 4 30
Slika 24: Dijagram sila - produljenje uzorak 5 30
Slika 25: Dijagram sila - produljenje pri 200℃ uzorak 1 31
Slika 26: Dijagram sila - produljenje pri 200℃ uzorak 2 32
Slika 27: Dijagram sila - produljenje pri 200℃ uzorak 3 32
Slika 28: Dijagram sila - produljene pri 400℃ uzorak 1 33
Slika 29: Dijagram sila - produljenje pri 400℃ uzorak 2 33

Slika 30: Dijagram sila - produljenje pri 400℃ uzorak 3 34
Slika 31: Iznosi vlačne čvrstoće pri sobnoj temperaturi 36
Slika 32: Iznosi vlačne čvrstoće pri 200℃ stupnjeva 37
Slika 33: Iznosi vlačne čvrstoće pri 400℃ stupnjeva 37
Slika 34: Pad prosječnih vrijednosti vlačne čvrstoće 38
Slika 35: Povećanje istezljivosti s povišenjem temperature 39

POPIS TABLICA:

Tablica 1: Određivanje duljine epruvete [3] 11
Tablica 2: Referentne veličine ispitivanja pri povišenim temperaturama [10] 17
Tablica 3: Dopuštena odstupanja ovisno o temperaturi ispitivanja [10] 17
Tablica 4: Kemijski sastav čelika 50CrV4 [11] 21
Tablica 5: Rezultati mjerenja uzroka 1 28
Tablica 6: Rezultati mjerenja uzorak 2 29
Tablica 7: Rezultati mjerenja uzorak 3 29
Tablica 8: Rezultati mjerenja uzorak 4 30
Tablica 9: Rezultati mjerenja uzorak 5 30
Tablica 10: Rezultati mjerenja pri 200℃ uzorak 1 31
Tablica 11: Rezultati mjerenja pri 200℃ uzorak 2 32
Tablica 12: Rezultati mjerenja pri 200℃ uzorak 3 32
Tablica 13: Rezultati mjerenja pri 400℃ uzorak 1 33
Tablica 14: Rezultati mjerenja pri 400℃ uzorak 2 33
Tablica 15: Rezultati mjerenja pri 400℃ uzorak 3 34
Tablica 16: Rezultati mjerenja tvrdoće 35

POPIS OZNAKA:

Oznaka	Jedinica	Opis
σ	N/mm2	naprezanje
ε	mm/mm	istezanje
R_m	N/mm2	vlačna čvrstoća
R_e	N/mm2	granica razvlačenja
R_{eL}	N/mm2	donja vrijednost granice razvlačenja
R_{eH}	N/mm2	gornja vrijednost granice razvlačenja
$R_{p0,2}$	N/mm2	konvencionalna granica razvlačenja
R_k	N/mm2	konačno naprezanje
E	N/mm2	modul elastičnosti
A	%	istezljivost
d_0	mm	početni promjer epruvete
S_0	mm2	početna površina presjeka epruvete
L_0	mm	početna mjerna duljina epruvete
L_c	mm	ispitna duljina epruvete
L_t	mm	ukupna duljina epruvete
T	℃	definirana temperatura ispitivanja
T_i	℃	naznačena temperatura ili izmjerena temperatura na površini epruvete
t_s	min	vrijeme ugrijavanja
Z	%	suženje (kontrakcija)
F_m	N	maksimalna sila

SAŽETAK:

U ovom završnom radu opisane su metode statičkog vlačnog ispitivanja čelika pri sobnoj i povišenim tempraturama definirane normama HRN EN ISO 6892-1:2016 i HRN EN ISO 6892-2:2018. Navedene su izmjene donešene u posljednjem izdanju norme HRN EN ISO 6892-2:2018. Dan je pregled ispitne opreme i aparature te normirani zahtjevi. Eksperimentalni dio rada sastoji se od statičkog vlačnog ispitivanja čelika na sobnoj temperaturi i dvije povišene temperature (200˚C i 400˚C). Dobiveni rezultati su analizirani, utjecajni faktori na rezultate određeni su prema literaturi i donešeni su zaključci.

Ključne riječi: statičko vlačno ispitivanje, povišene temperature, čelik

SUMMARY:

This paper describes tensile testing methods for steel at room and elevated temperatures as defined by HRN EN ISO 6892-1:2016 and HRN EN ISO 6892-2:2018. Changes made in the latest edition of HRN EN ISO 6892-2:2018 are stated. An overview of test equipment and apparatus and standardized requirements are given. The experimental part consists of tensile testing of steel at room temperature and two elevated temperatures (200˚C and 400˚C). Obtained results were analyzed, result influencing factors were determined according to literature and conclusions were reached.

Keywords: tensile testing, elevated temperatures, steel

1 UVOD

Svi tehnički materijali razlikuju se po svojim svojstvima. Pojedina svojstva imaju svoje prednosti i nedostatke u primjeni. Materijali se međusobno razlikuju po fizičkim i kemijskim svojstvima poput gustoće, toplinske vodljivosti, korozijske postojanosti, otpornosti na trošenje, talištu ili modula elastičnosti. Ovisno o fizikalno-kemijskim svojstvima materijali posjeduju različite tehnološke karakteristike. Prema tehnološkim karakteristikama se određuje područje i način primjene pojedinog materijala u različitim postupcima obrade i spajanja, poput zavarivanja, rezanja, lijevanja, kovanja ili kaljenja.

Mehanička svojstva materijala su izrazito važna u primjeni jer se na temelju njih definira mehanička otpornost materijala. Izrazito su važna prilikom dimenzioniranja različitih konstrukcijskih i strojnih dijelova. Pri izboru materijala važno je uzeti u obzir sve vrste mehaničkih opterećenja i kemijskih utjecaja kojima će promatrani dio biti podvrgnut. Cilj izbora materijala je taj da materijal izdrži sve eksploatacijske uvjete te u traženom vremenskom periodu ne dođe do pojave pukotina i lomova te plastične odnosno trajne deformacije koja bi onemogućila daljnji rad ili prouzročila potencijalnu havariju.

Za određivanje osnovnih mehaničkih svojstava poput granice razvlačenja, modula elastičnosti i vlačne čvrstoće se primjenjuje statičko-vlačno ispitivanje. Ispitivanje se provodi na uređajima koji se nazivaju kidalice. Statičkim-vlačnim ispitivanjem se određuje elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja. Tijekom ispitivanja kontinuirano se mjere sila i produljenje epruvete te se izmjereni podatci grafički zabilježavaju u dijagramu „sila – produljenje“ iz kojih se kasnije očitavaju potrebni podatci. [1]

Zbog mogućih povišenih temperatura u eksploataciji potrebno je provesti ispitivanje pri povišenim temperaturama. Povišene temperature u eksploataciji pojavljuju se u energetskim postrojenjima, kod motora s unutarnjim izgaranjem, parnih turbina, kotlogradnji itd. Takvi uvjeti često mogu uzrokovati havariju. Za prevenciju oštećenja i havarija važno je poznavanje mehaničkih svojstava pri povišenim i visokim radnim temperaturama, kao i izbor odgovarajućeg materijala.

2 UTJECAJ POVIŠENE TEMPERATURE NA MEHANIČKA SVOJSTVA

2.1 Razlozi primjene

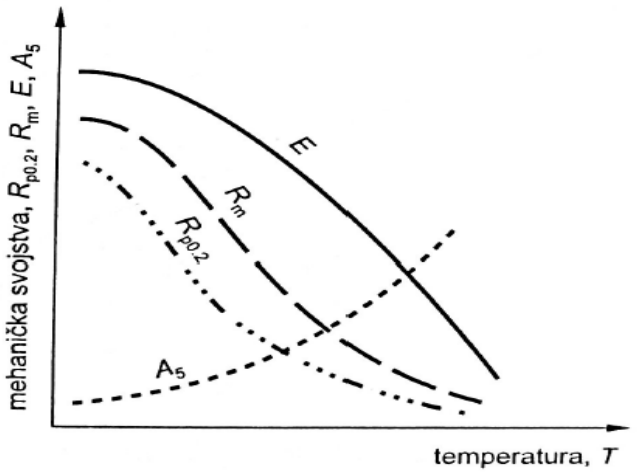
U pojedinim područjima strojarstva i industrije eksploatacijski uvjeti mogu utjecati na mehanička svojstva, zbog čega su ponekad potrebne prilagodbe i modifikacije osnovnih materijala. Različite temperature, povišene ili snižene, značajno utječu na mehanička svojstva. Zbog toga se u takvim uvjetima koriste metali i legure prilagođenih kemijskih sastava koji osiguravaju tražena svojstva. Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala koji će u eksploataciji biti izloženi povišenim temperaturama (energetska postrojenja, kotlogradnja, motori s unutarnjim izgaranjem, turbine itd.) vrši se statičkim vlačnim pokusom pri povišenim temperaturama. Zbog relativno visokog tališta u odnosu na druge česte konstrukcijske materijale poput aluminija, bakra i njihovih legura, te bolje mehaničke otpornosti za primjenu pri povišenim temperaturama se u praksi najviše koriste čelici.[2]

2.2 Promjena mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama

Promjena mehaničkih svojstava se veže uz promjenu sposobnosti za difuziju. Smanjena sposobnost za difuziju pri sniženim temperaturama povećava čvrstoću, dok povećana sposobnost difuzuije pri povišenim radnim temperaturama smanjuje otpornost a povećava rastezljivost. Radne temperature u eksploataciji dijelimo na niske, povišene te visoke. Pri sniženim temperaturama dolazi do smanjenja deformabilnosti, a povećanja otpornosti materijala. Pri povišenima dolazi do manjih promjena ali i dalje ne uzrokuju značajne probleme. Visoke radne temperature mogu uzrokovati velike probleme jer pri temperaturama od približno $0{,}3*T_t$ dolazi do pojave puzanja materijala tijekom dužeg vremenskog perioda. S obzirom na dug očekivani radni vijek pojedinih dijelova i materijala, osim mehaničke otpornosti ponekad se zahtjeva i kemijska postojanost na određene medije koji su prisutni u radnim uvjetima npr. vatra ili plin.

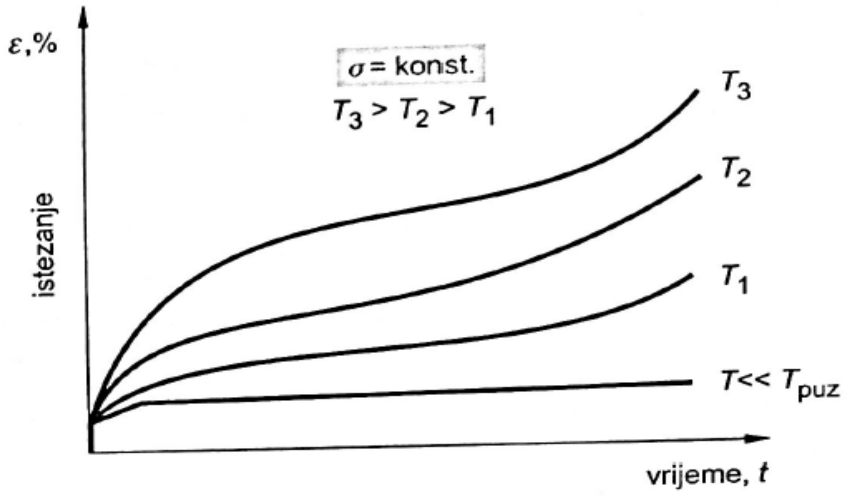
Očekivane promjene mehaničkih svojstava pri povišenim i visokim temperaturama su:

1) Sniženje granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i modula elastičnosti uz porast istezljivosti, suženja poprečnog presjeka i žilavosti (slika 1.)



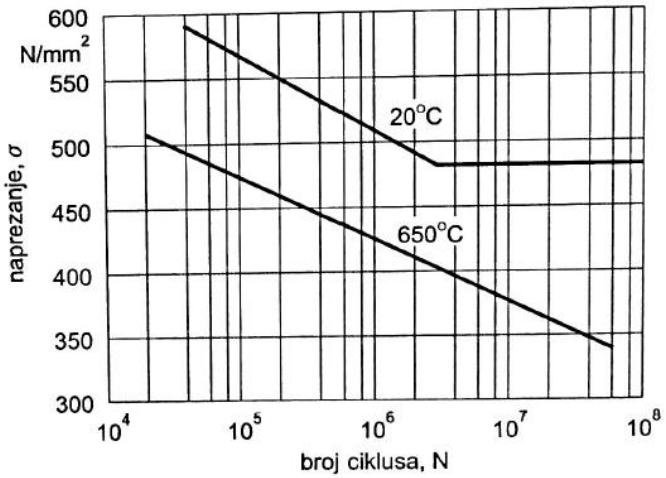
Slika 1: Promjenna mehanickih svojstava s povišenjem temperature [2]

2) Pojava puzanja pri povišenim temperaturama uz dugotrajno pristustvo statičkog opterećenja. Viša temperatura uz konstantno opterećenje povećava brzinu puzanja.Veće naprezanje uz konstantnu temperaturu također povećava brzinu puzanja te skraćuje vrijeme do pojave loma. Različiti materijali i metali međusobno pokazuju različite razine otpornosti na puzanje. Ovisnost brzine puzanja o temperaturi prikazana je na slici 2.



Slika 2: Brzina puzanja u ovisnosti o temperature [2]

3) Smanjenje dinamičke izdržljivosti – povišenjem temperature dolazi do smanjenja ili potpunog nestanka dinamičke izdržljivosti, što se očituje pojavom loma pri određenom broju promjena opterećenja. Smanjenje dinamičke izdržljivosti prikazano je dijagramom na slici 3.



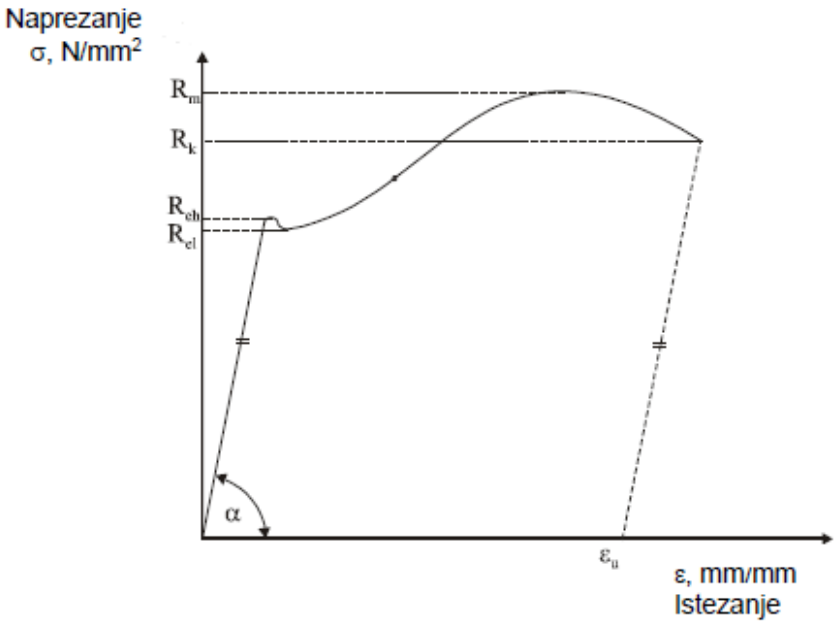
Slika 3: Smanjenje dinamičke izdržljivosti u ovisnosti u temperature [2]

Prilikom izbora materijala i proračuna za dimenzioniranje strojnih dijelova koji su izloženi povišenim temperaturama posebno su važna slijedeća svojstva:

- $R_{p0,2/U}$ – vrijednost konvencionalne granice razvlačenja pri radnoj temperaturi;
- $R_{m/U}$ – vrijednost vlačne čvrstoće pri radnoj temperaturi;
- E_U – vrijednost modula elastičnosti pri radnoj temperaturi;
- A_U – vrijednost istezljivosti pri radnoj temperaturi
- $R_{p1/t/U}$ – vrijednost granice puzanja pri radnoj temperaturi za definirano vrijeme ispitivanja 1 000, 10 000, 100 000 sati. Ovo naprezanje pri definiranoj temperaturi i definiranom trajanju uzrokuje trajnu deformaciju od 1%.
- $R_{DVM/U}$ – granica puzanja po DVM pri definiranoj temperaturi
- $R_{m/t/U}$ – vrijednost statičke izdržljivosti pri definiranoj temperaturi za određeno vrijeme djelovanja opterećenja – 10 000, 100 000 ili 200 000 sati. Ovo naprezanje koje nakon definiranog vremena pri nekoj definiranoj temperaturi uzrokuje lom.

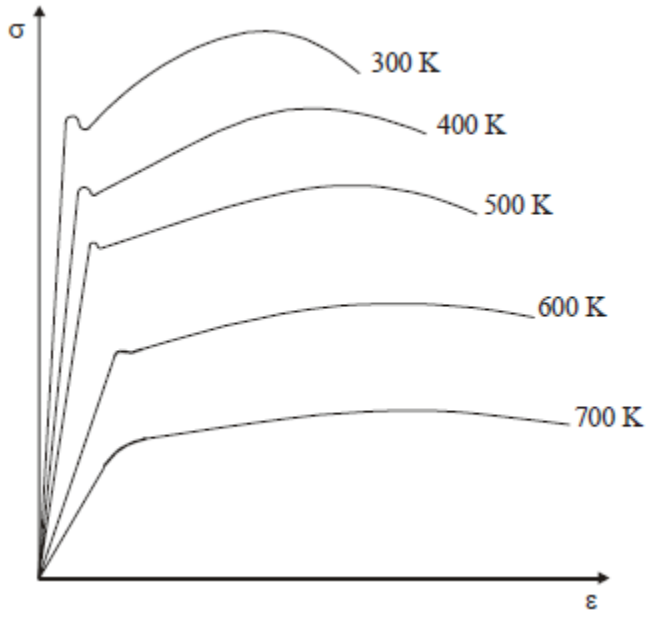
2.3 Kvalitativni σ - ε dijagram (dijagram naprezanje – istezanje)

Kvalitativni dijagram naprezanje – istezanje grafički je prikaz podataka dobivenih tijekom izvođenja statičkog vlačnog pokusa na kidalicama. Produljenje izmjereno pomoću ekstenzometra se preračunava u produljenje (ε, mm/mm), dok se iz narinutog opterećenja izračunava naprezanje (σ, N/mm^2). Očitavanjem pojedinih vrijednosti specifičnih promatranih točaka na krivulji dobivaju se numeričke vrijednosti traženih svojstava. Veličine naznačene na dijagramu (slika 4.) predstavljaju vlačnu čvrstoću (R_m), kritično opterećenje (R_k) te gornju (R_{eH}) i donju (R_{eL}) granicu razvlačenja.



Slika 4: Kvalitativni σ - ε dijagram [3]

Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, visoke i povišene temperature utječu na mehanička svojstva materijala. Promjenom mehaničkih svojstava mijenja se i izgled kvalitativnog σ – ε dijagrama, kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5: Utjecaj povišene temperature na mehanička svojstva [3]

3 NORMA HRN EN ISO 6892-2:2018

3.1 Općenito

HRN EN ISO 6892 međunarodna je norma, prihvaćena i u Hrvatskoj kao službena norma za statičko vlačno ispitivanje metala. Sastoji se od četiri dijela, koji su dodani ili revidirani različitih godina a opisuju vlačno ispitivnje pri sobnim temperaturama, povišenim temperaturama, sniženim temperaturama te ekstremno sniženim. Treći i četvrti dio norme prvi put su objavljeni 2015. godine, dok su prva dva dijela već više puta revidirana i objavljena. Najopsežnije promjene između izdanja 2009. i 2016. godine napravljene su na prvom dijelu norme koji je vezan za vlačno ispitivanje pri sbonim temperaturama. Drugi dio, vezan za ispitivanje pri povišenim temperaturama manje je promijenjen između dva izdanja 2011. i 2018. godine.

3.2 Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje jedno je od osnovnih ispitivanja za određivanje mehaničkih svojstava metalni i nemetalnih materijala. Ispitivanje se odvija primjenom jednoosnog vlačnog naprezanja uz relativno male brzine. Parametri ispitivanja metalnih materijala regulirani su normom HRN EN ISO 6892-1:2016 za ispitivanja pri sobnoj temperaturi te HRN EN ISO 6892-2:2018 za ispitivanja pri povišenim temperaturama, čija usporedba je tema ovoga rada. Provođenjem ispitivanja mogu se dobiti sljedeća mehanička svojstva: vlačna čvrstoća (R_m), granica razvlačenja (R_e), modul elastičnosti (E), istezljivost (A), ukupno produljenje epruvete(ε_u) i konačno naprezanje (R_k). Navedena naprezanja se računaju pomoću odgovarajućih sila koje se jednostavno očitavaju na mjernim uređajima tijekom mjerenja. [4]

R_m (vlačna čvrstoća) je omjer maksimalne sile (F_m) pri ispitivanju i površine početnog poprečnog presjeka ispitne epruvete (S_o), te se računa sukladno izrazu (1):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, [\mathrm{N/mm^2}] \quad (1)$$

F_m predstavlja maksimalnu postignutu silu, dok R_m ne predstavlja maksimalno postignuto opterećenje jer se u izračunu koristi početna površina presjeka a ne stvarna.

R_k (konačno narezanje) je omjer kritične sile (F_k) pri kojoj je došlo do pucanja epruvete i površine početnog poprečnog presjeka epruvete (S_o), računa se prema izrazu (2):

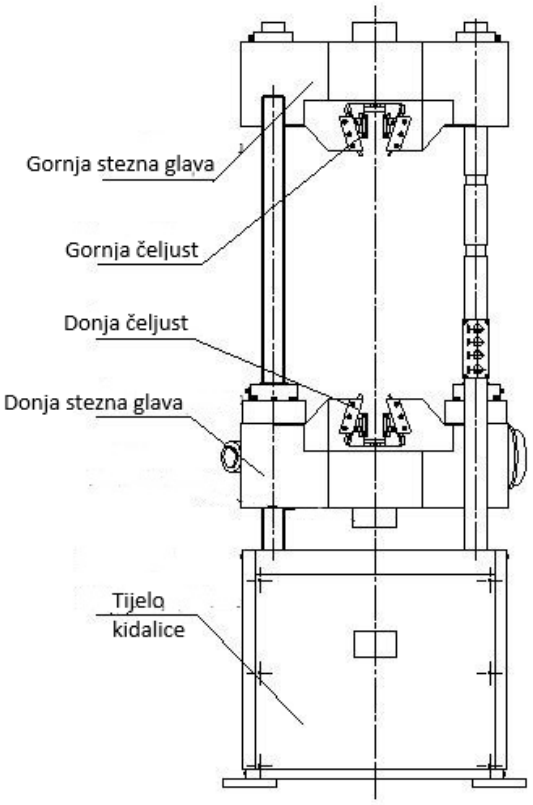
$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, [\mathrm{N/mm^2}] \quad (2)$$

Konačno naprezanje (R_m) je definirano kao naprezanja koje je dovelo do loma ispitnog uzorka.

Oprema potrebna za provođenje ispitivanja sastoji se od nekoliko osnovnih dijelova koji su: kidalica, ispitni uzorak (epruveta), ekstenzometar (ukoliko postoji potreba za mjerenjem produljenja), te određeni mediji ili dodatni dijelovi opreme ukoliko se ispitivanja provode pri povišenim ili sniženim temperaturama (npr. tekući dušik za hlađenje ili indukcijska peć za grijanje ispitnih uzoraka). U sljedećih nekoliko točaka detaljnije su objašnjena svojstva i primjerna navedene opreme:

1. Kidalica:

Kidalica je osnovni uređaj za provođenje statičkog vlačnog ispitivanja. Također se smatra i univerzalnim uređajem za ispitivanja što znači da je moguće provoditi i druge vrste ispitivanja, poput tlačnih. Ovisno o području primjene i vrsti ispitivanih uzoraka te potrebnim naprezanjima, kidalice mogu biti različitih konstukcija i imati različite vrste pogona. Mehanički pogon se koristi na kidalicama sa manjim opterećenjima, dok je za veća opterećenja potreban hidraulički pogon. Tijelo kidalice se sastoji od postolja sa dva stabilna stupa koji služe kao vodilice za stezne glave, dok se unutar steznih glava nalaze stezne čeljusti koje osiguravaju pravilan prihvat ispitnog uzorka. Da bi kidalica mogla koristiti u znanstveno-istraživačke svrhe, mora zadovoljiti normu ISO 7500:1-2018 u kojoj je sadržan sustav ovjeravanja kidalica za provođenje statičkog vlačnog ispitivanja. Proces ovjeravanja se sastoji od generalne provjere ispitnog uređaja, potvrde o funkcionalnosti stroja i njegovih svojstava te baždarenja mjerne sile. Slika 6. prikazuje kontrukcijsku shemu kidalice sa naznačenim dijelovima stroja.



Slika 6: Konstrukcijska shema kidalice [5]

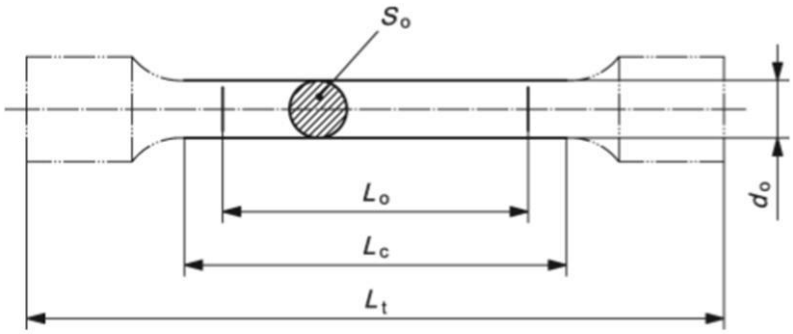
2. Ispitni uzorak (epruveta):

Cilj ispitivanja materijala je određivanje njegove prikladnosti za korištenje u određenim uvjetima. Zbog toga, ispitni uzorak mora reprezentativno prikazivati materijal i njegova svojstva prilikom ispitivanja. Uzorci moraju proći iste korake i vrste obrade kako bi im svojstva bila što bliža stvarnom materijalu, zbog čega je proces uzorkovanja i izrade ispitnih epruveta izrazito važan te treba biti pažljivo i dobro obavljen. Ako se radi o materijalu koji je oblikovan deformiranjem, posebna važnost se posvećuje tome da os uzorka bude poravnata sa smjerom valjanja materijala ili gnječenja zrna, jer ovisno o tome svojstva materijala i uzorka drastično variraju. Postoji više standardiziranih dimenzija i oblika ispitnih uzoraka,okrugog ili četvrtastog presjeka, te duga ili kratka (umnožak korijena površine poprečnog presjeka i koeficijenta za dobivanje željene početne mjerne duljine, prikazano u tablici 1.).

Tablica 1: Određivanje duljine epruvete [3]

Tip ispitnog uzorka (epruvete)	Početna mjerna duljina L_o [mm]
Duga epruveta	$11{,}3*\sqrt{S_0}$
Kratka epruveta	$5{,}65*\sqrt{S_0}$

Osim duljine važno je specificirati i oblik epruvete, tj. radi li se o okruglom ili četvrtastom poprečnom presjeku. Na slici 7. prikazane su karakteristične dimenzije za okruglu epruvetu.



Slika 7: Karakteristične dimenzije okrugle epruvete [3]

d_0 – početni promjer epruvete, mm

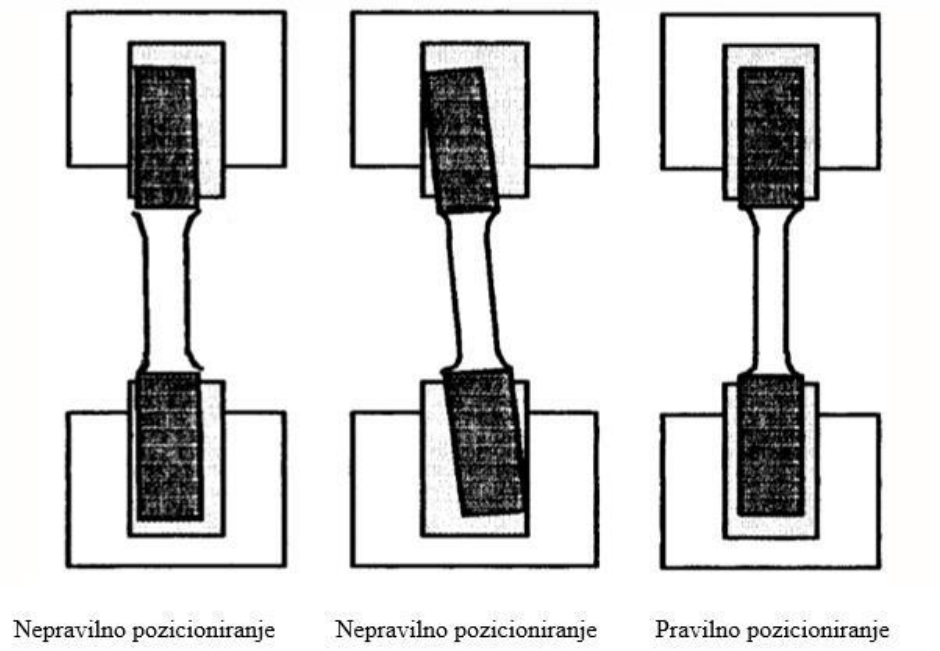
S_0 – početna površina poprečnog presjeka epruvete, mm^2

L_0 – početna mjerna duljina epruvete, mm

L_c – ispitna duljina epruvete, mm

L_t – ukupna duljina epruvete, mm

Prilikom postavljanja epruvete u stezne čeljusti kidalice, izrazito je važno pravilno postavljanje (slika 8.). Stezna čeljust mora prijanjati uz glavu epruvete, a spoj mora moći izdržati potrebne sile prilikom ispitivanja bez pojave oštećenja. U idealnom slučaju čeljust i glava epruvete su jednakih dimenzija, s obzirom da je u praksi to gotovo nemoguće postići uvijek postoji opasnost od zakretanja epruvete prilikom ispitivanja što nepovoljno utječe na rezultate ispitivanja.



Slika 8: Pravilno i nepravilno pozicioniranje epruvete [5]

3. Ekstenzometar

Znanstvena disciplina koja uključuje mjerenje i analizu promjene duljine ispitnog uzorka tijekom statičkog vlačnog ispitivanja naziva ekstenzometrija. Naprave korištene za takva mjerenja zovu se ekstenzometri.

Unutar norme HRN EN ISO 9513:2012 opisan je postupak umjerevanja i odabira vrste ekstenzometra za jednoosna ispitivanja. Klasifikacija unutar norme podijeljena je po klasama točnosti. Ekstenzometar Klase 1 ima maksimalno dozvoljeno odstupanje rezultata od 1%, ekstenzometar Klase 2 ima dozvoljeno odstupanje od 2% itd.

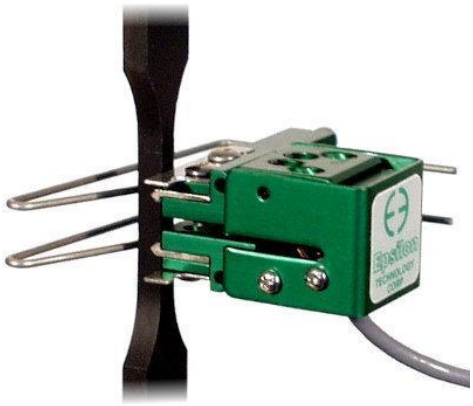
Osnovna podjela ekstenzometara:

- Kontaktni – najčešće se primjenjuju prilikom ispitivanja metalnih materijala zbog opasnosti od utjecaja na epruvete izrađene od krhkijih materijala.
- Beskontaktni – najčešće se primjenjuju kod krhkih epruveta ili u slučajevima u kojima energija loma epruvete može oštetiti mjerni uređaj.

Dodatna podjela kontaktnih i beskontaktnih navedena je u nastavku.

Vrste kontaktnih ektenzometara:

- Nasadni – koriste se za metalne uzorke, i uzorke od čvrstih polimera. Preko vrhova krutih i kratkih štapićastih indentora su u direktnom kontaktu s epruvetom. Utjecaj operatera je velik prilikom postavljanja ekstenzometra na epruvetu, i tijekom svakog ispitivanja postoji opasnost od oštećenja uređaja (slika 9.).



Slika 9: Nasadni ekstenzometar [6]

- Automatski – kontakt se ostvaruje pomoću gornjeg i donjeg prihvata epruvete u obliku škarica. Stezanje prihvata za epruvetu izvršava se automatski, utjecaj operatera prilikom instalacije i ispitivanja je značajno manji nego kod nasadnih. Mogućnost utjecaja na svojstva epruvete je također manja nego kod nasadnih (slika 10.).



Slika 10: Automatski kontaktni ekstenzometar [7]

Vrste beskontaktnih ekstenzometara:

- Videoekstenzometar – postavljanje je jako važno. Mora biti postavljen tako da ima pregled cijele duljine epruvete. Ne utječu na uzorak, imaju mogućnost mjerenja u dvije osi (uzdužno i poprečno) i prikaz slike epruvete u bilo kojem trenutku ispitivanja. Problem kod ove vrste ekstenzometara je potreba za označavanjem epruvete i vidljivost (slika 11.).



Slika 11: VIdeoekstenzometar [8]

- Laserski ekstenzometar – najnovija vrste i najveća klasa točnosti. Pogodni za mjerenje i vrlo malih deformacija. Važno je paziti na odnos razlučivosti i vidnog polja. Nema potrebe za označavanjem epruveta ali su osjetljivi na protok zraka (slika 12.).



Slika 12: Laserski ekstenzometar [9]

3.3 Ispitivanje pri povišenim temperaturama

Ispitivanja pri povišenim temperaturama regulirana su normom HRN EN ISO 6892-2:2018. Normom je su definirani uvjet prema kojima se određuje radi li se o ispitivanju na sobnoj ili povišenoj temperaturi. "Ispitivanje je provedeno na temperaturi iznad 35℃, što znači na temperaturi višoj od sobne temperature specificiranoj u ISO 6892-1:2016." [10]. U okviru ovoga rada, provedeno je ispitivanje na 200℃ i 400℃. Za process provođenja pokusa relevantne su tri veličine navedene u tablici 2.

Tablica 2: Referentne veličine ispitivanja pri povišenim temperaturama [10]

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
T	℃	Definirana temp. ispitivanja
T_i	℃	Naznačena temp. ili izmjerena temp. na površini epruvete
t_s	℃	Vrijeme ugrijavanja

Ovisno o definiranoj temperaturi ispitivanja normom su određena maksimalna dopuštena odstupanja po duljini ispitnog uzorka, tj. razlika između T i T_i . što je prikazano u tablici 3.

Tablica 3: Dopuštena odstupanja ovisno o temperaturi ispitivanja [10]

Definirana temp. ispitivanja ℃	Dopušteno odstupanje između T_i i T ,℃	Maksimalno dopušteno variranje temperature po duljini epruvete,℃
$T \leq 600$	± 3	3
$600 < T \leq 800$	± 4	4
$800 < T \leq 1000$	± 5	5
$1000 < T \leq 1100$	± 6	6

Uređaj za mjerenje sile mora biti umjeren u skladu s normom ISO 7500-2:2006, Klase 1 ili bolje.

Ekstenzometar korišten tijekom ispitivanja treba biti u skadu sa normom ISO 9513:2012, Klase 1 ili bolje u relevantom području promatranja. Za uzorke sa većom istezljivosti može se koristiti ekstenzometar u skladu sa ISO 9513:2012 Klase 2. [10]

Epruvete za ispitivanje pri povišenim temperaturama jednake su epruvetama za ispitivanje pri sobnoj temperaturi.

Uređaj za grijanje mora biti odgovarajući kako bi ispitni uzorak mogao ugrijati do definirane ispitne temperature. Naznačene temperature T_i su mjerene na površini paralelno s dužinom ispitnog uzorka s primjenjenim korekcijama za bilo kakve poznate sistematske greške, ali se ne uzima u obzir bilo kakva nesigurnost aparature za mjerenje temperature. [10]

Ukoliko je početna mjerna duljina epruvete (L_0) manja od 50 mm, potrebno je postaviti jedan temperaturni senzor na svaki kraj epruvete. Ako je L_0 veća od 50 mm, treći senzor se postavlja na sredini uzorka. Broj temperaturnih senzora može biti i manji ako je položaj peći i uzorka takav da je iskustveno poznato da odstupanja u temperaturi ne prelaze granice definirane u tablici 3. Mjerni uređaj treba imati rezoluciju ≤ 1 ℃ i preciznost $\pm 0{,}004T$ ili ± 2 ℃. [10]

3.4 Izmjene u HRN EN ISO 6892-2:2016 [10]

U posljednjoj reviziji HRN EN ISO 6892-1:2016 norme napravljeno je više promjena. Nekolicina ih se odnosi na manje promjene u numeriranju i nazivima te podijeli poglavlja, bez promjena u njihovom sadržaju. Ostale promjene su značajnije jer su donešene određene nove podijele, objašnjenja i zahtjevi vezani za samo provođenje pokusa. Spomenute promjene navedene su u nastavku rada.

1) Dodatne informacije od metodama ispitivanja A i B

Uz ranija objašnjenja i pravila metode ispitivanja A i B u posljednjem izdanju norme dane se dodatne informacije o određivanju brzine ispitivanja. Kod metode A rečeno je da se brzina ispitivanja određuje nakon što je postignuto neko od traženih svojstava koja se ispituju. Dok se kod metode B brzina ispitivanja određuje unaprijed te ispitivanje traje do trenutka postizanja ispitivanog svojstva npr. $R_{p0,2}$.

2) Podjela A metode ispitivanja na A1 i A2

Podvrsta metode A u kojoj se kontrola brzine naprezanja vrši pomoću parametra $e_{Le,}$ na temelju podataka dobivenih izravno iz ekstenzomentra naziva se A1. Podvrsta gdje se brzina naprezanja kontrolira pomoću parametra e_{Lc} koji se dobiva množenjem zahtjevane brzine naprezanja i paralelne duljine naziva se A2.

3) Dodatak točke A.5

U točki A.5 dodanoj u posljednjem izdanju spominju se nove vrste prikaza različitih međunarodnih standarda i normi koji su kompatibilni s računalima.

4) Određivanje krutosti mjerne opreme

U „Dodatku F“ se prvi put napominje kako krutost mjerne opreme i uređaja može utjecati na rezultate ispitivanje. Navedeno je kako je potrebno tijekom provođenja ispitivanja u trenutku dostizanja proizvoljne točke interesa npr. $R_{p0,2}$ odrediti krutost mjerne opreme. Te na temelju rezultata o krutosti opreme prilagoditi parametre ispitivanja ukoliko rezultati nisu zadovoljavajući.

5) Novonastali „Dodatak G“

„Dodatak G“ posljednjem izdanju norme nije korekcija prijašnjeg, nego je dodan kao potpuno nov čime su promijenjena imena i redoslijed već postojećih (G je preimenovan u H, analogno i svi slijedeći postojeći dodatci). U izdanju norme iz 2016. godine u dodatku G se spominju i uspostavljaju pravila vezana za određivanje Young-ovog modula tj. modula elastičnosti (*E*) jednoosnim vlačnim ispitivanjem. Kako bi se ova metoda koristila za određivanje modula elastičnosti, ispitivani materijali moraju zadovoljiti dva osnovna kriterija:

- Utjecaji puzanja materijala moraju biti zanemarivi u referentnom području
- Dovoljna „ravna linija“ u elastičnom području materijala u ispitivanom području

Ukoliko materijal zadovoljava osnovne kriterije, pogodan je za ovu vrstu određivanja modula elastičnosti. U nastavku teksta detaljno su navedena pravila i zahtjevi za sve dijelove opreme te za samo provođenje eksperimenta. Određena je minimalna potrebna razina točnosti za svaki od dijelova (mjerač sile, ekstenzometar itd.), minimalna potrebna rezolucija pojedinih dijelova, oblik i dimenzije ispitnih uzoraka, način prihvata uzorka, brzina ispitivanja te svi ostali segmenti ispitivanja. Također su specificirane matematičke relacije, jednadžbe i različiti koeficijenti i faktori koje je potrebno primjenjivati za izračun različitih traženih podataka, određivanje mjerne nesigurnosti, procjene točnosti dobivenih rezultata te ponovljivosti i ispitivanja i rezultata.

4 EKSPERIMENTALNI DIO RADA

4.1 Plan ispitivanja

U sklopu ovoga rada provedeno je statičko vlačno ispitivanje pri sobnoj i dvije povišene temperature (200℃ i 400℃). Ispitivanja na sobnoj temperaturi provedena su u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a ispitivanja na povišenoj temperaturi su provedena u firmi TPK Zavod. Naknadno su provedena i mjerenja tvrdoće u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Na temelju dobivenih rezultata donešen je zaključak o utjecaju povišenih temperatura na promatrana mehanička svojstva. Tijekom statičkog vlačnog ispitivanja promatrane su sljedeće veličine: vlačna čvrstoća (R_m), maksimalna sila (F_m) i kritična sila pucanja epruvete (F_k). Ispitni uzorci izrađeni su od čelika za opruge oznake 50CrV4 čiji je kemijski sastav specificiran u tablici niže.

Tablica 4: Kemijski sastav čelika 50CrV4 [11]

Kem. element	C	Cr	Mn	V	Si	P	S	Fe
Udio, %	0,50 – 0,55	1,00 – 1,20	0,70 – 0,80	0,15 – 0,25	0,20 – 0,35	≤ 0,35	≤ 0,35	ostatak

Ispitivanje na sobnoj temperaturi provedeno je na pet epruveta, pri 200℃ na tri epruvete, i na 400℃ također na tri epruvete.

Ispitivanje tvrdoće provedeno je na uzorcima izrezanim iz tri ispitane epruvete, po jedna sa svake ispitne temperature. Na svakom uzorku je napravljeno pet mjerenja metodom HV5.

Oprema za ispitivanje:

Tijekom ispitivanja korištene su epruvete izrađene sukladno normi HRN EN ISO 6892-1:2016 od ranije navedenog materijala.

1) Ispitivanja pri sobnoj temperaturi:

Statičko vlačno ispitivanje pri sobnoj temperaturi provedeno je na univerzalnoj kidalici (slika 13.) u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Tijekom ispitivanja rezultati su grafički zabilježeni na računalo pomoću TireTest programskog paketa.



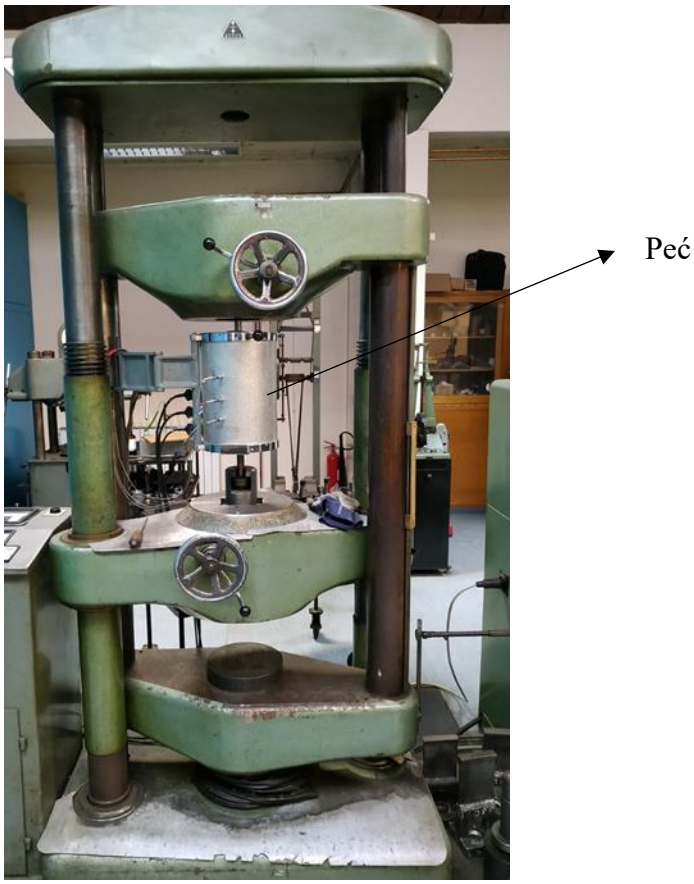
Slika 13: Kidalica EU 40 MOD[5]

Podatci o kidalici [5] prikazanoj na slici 13.:

- Proizvođač: WPM, Njemačka
- Model: EU 40 MOD
- Mjerno područje: 0 – 400 kN
- Serijski broj: 990.06/83/85
- Klasa 1, sukladno normi ISO 7500-1:2018

2) Ispitivanja pri povišenim temperaturama

Ispitivanja pri povišenim temperaturama su provedena u firmi TPK zavod. Korištena je kidalica prikazana na slici 14. na koju je bila montirana indukcijska peć (naznačeno na slici 14.)



Slika 14: Kidalica sa montiranom peći

Podatci o kidalici korištenoj za ispitivanja pri povišenim temperaturama (slika 14.):

- Proizvođač: WPM Leipzig, Njemačka
- Serijski broj: 283/14
- Radno područje: 0 – 35 MPa
- Klasa 3, sukladno normi ISO 7500-1:2018

Za ugrijavanje epruveta do određenih ispitnih temperatura korištena je indukcijska peć spojena na kidalicu. Peć u sebi sadrži tri zasebna grijača koji se pojedinačno reguliraju putem konzole, kako bi osigurali ravnomjernu jačinu grijanja po cijeloj dužini ispitnog uzorka. Na slici 15. prikazana je upravljačka ploča peći korištene za ispitivanja.



Slika 15: Upravljačka konzola peći

Nakon što je izveden statički vlačni pokus za jednu epruvetu (slika 16.), potrebno je ukloniti polomljeni uzorak. Peć se odmiče iz radnog područja kidalice kako bi se omogućilo pravilno umetanje i postavljanje idućeg uzorka. Nakon što je uzorak postavljen započinje režim ugrijavanja do temperature na kojoj će se provesti ispitivanje, te držanja na istoj kako bi se osigurala ravnomjerna ugrijanost i progrijanost uzorka. Ovisno o željenoj temperaturi ukupno trajanje postupka pripreme za statički vlačni pokus(zagrijavanje i držanje na željenoj temperaturi) traje i do nekoliko sati.



Slika 16. Kidalica tijekom izmjene epruveta

Zbog različite vrste čeljusti na kidalici bila je potrebna dodatna obrada ispitnih epruveta. Na "glavu" epruvete je narezan metrični navoj M16 te su "glave" epruveta skraćene. Postepena modifikacija epruveta je prikazana na slikama 17. i 18.



Slika 17: Narezani M16 navoj



Slika 18: Skraćena duljina "glave" epruvete

Ekstenzometar i uređaj za zapisivanje rezultata u grafičkom obliku bili su niže klase točnosti pa je očitavanje rezultata bilo neprecizno što je utjecalo na točnost dobivenih rezultata.

3) Mjerenje tvrdoće

Prilikom mjerenja tvrdoće korišteni su uzorci izrezani iz tri epruvete na kojima je provedeno statičko vlačno ispitivanje (po jedna sa sobne temperature, sa 200℃, i sa 400℃). Na svakom je napravljeno pet mjerenja metodom HV5, na tvrdomjeru prikazanom na slici 19.



Slika 19: Indentec tvrdomjer

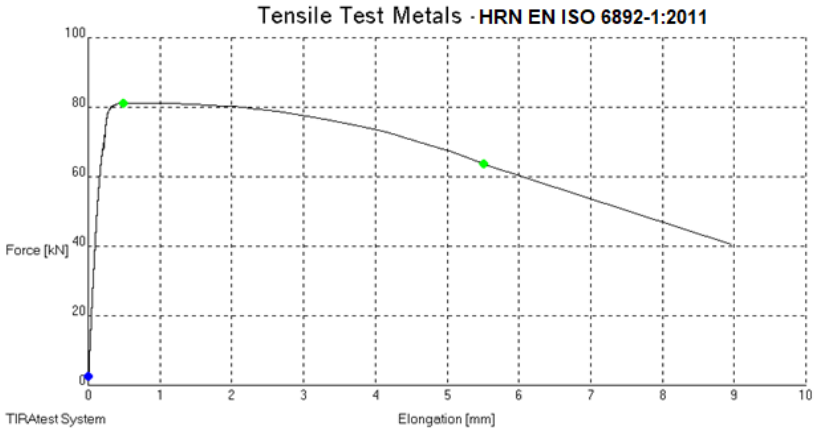
4.2 Rezultati mjerenja

Ispitivanja pri sobnoj temperaturi:

Uzorak 1:

Tablica 5: Rezultati mjerenja uzroka 1

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	718,05	81,21	63,73

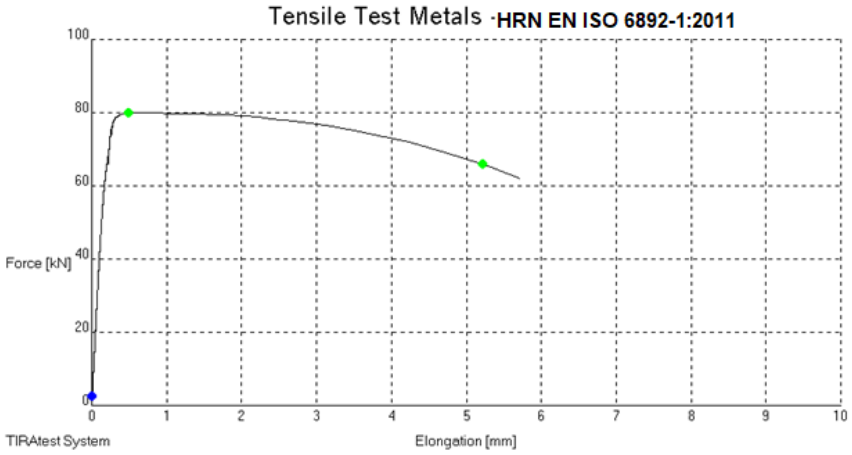


Slika 20: Dijagram sila - produljenje uzorak 1

Uzorak 2:

Tablica 6: Rezultati mjerenja uzorak 2

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	706,65	79,92	65,99

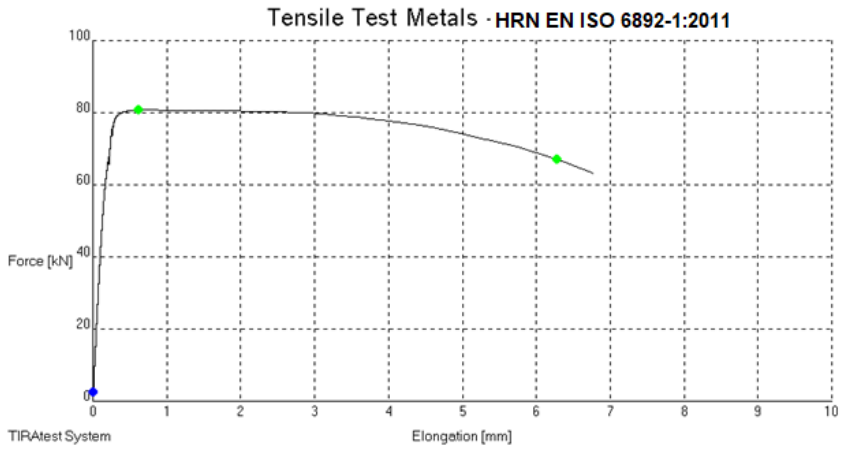


Slika 21: Dijagram sila - produljenje uzorak 2

Uzorak 3:

Tablica 7: Rezultati mjerenja uzorak 3

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	713,80	80,73	67,04

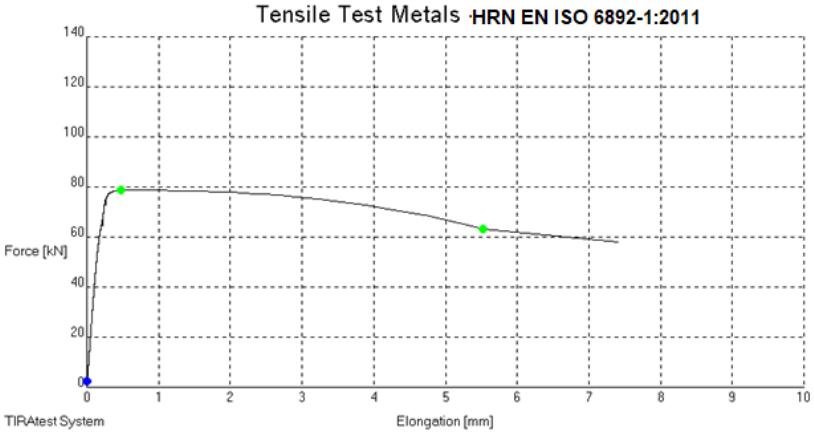


Slika 22: Dijagram sila - produljenje uzorak 3

Uzorak 4:

Tablica 8: Rezultati mjerenja uzorak 4

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	695,98	78,71	63,64

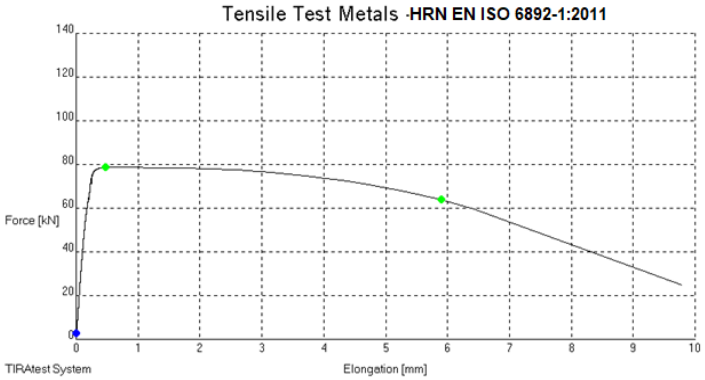


Slika 23: Dijagram sila - produljenje uzorak 4

Uzorak 5:

Tablica 9: Rezultati mjerenja uzorak 5

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	695,35	78,64	63,97



Slika 24: Dijagram sila - produljenje uzorak 5

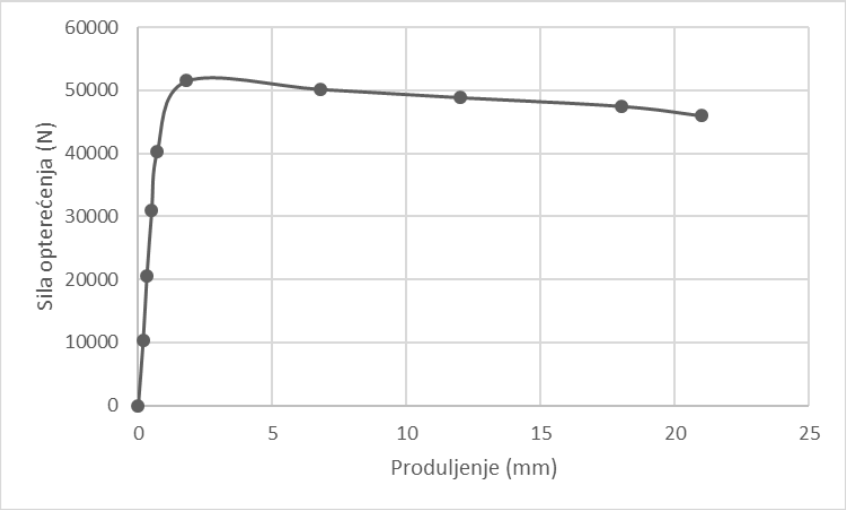
Ispitivanja pri povišenim temperaturama:

1)Rezultati ispitivanja na 200℃:

Uzorak 1:

Tablica 10: Rezultati mjerenja pri 200℃ uzorak 1

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	643,00	51,50	46,00

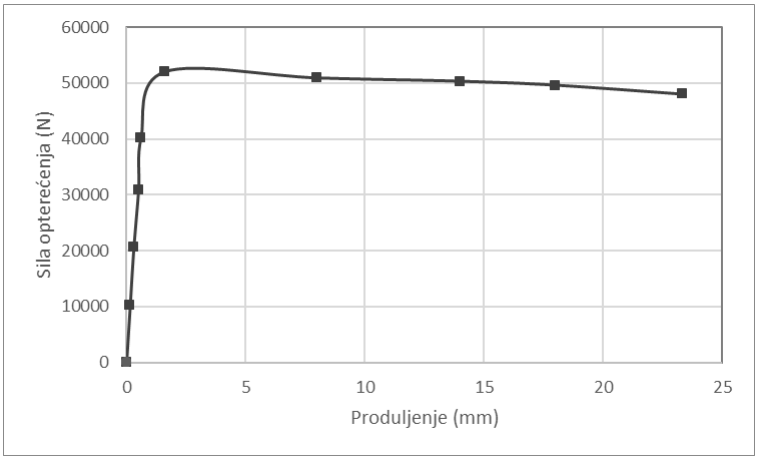


Slika 25: Dijagram sila - produljenje pri 200℃ uzorak 1

Uzorak 2:

Tablica 11: Rezultati mjerenja pri 200℃ uzorak 2

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	662,00	52,00	48,00

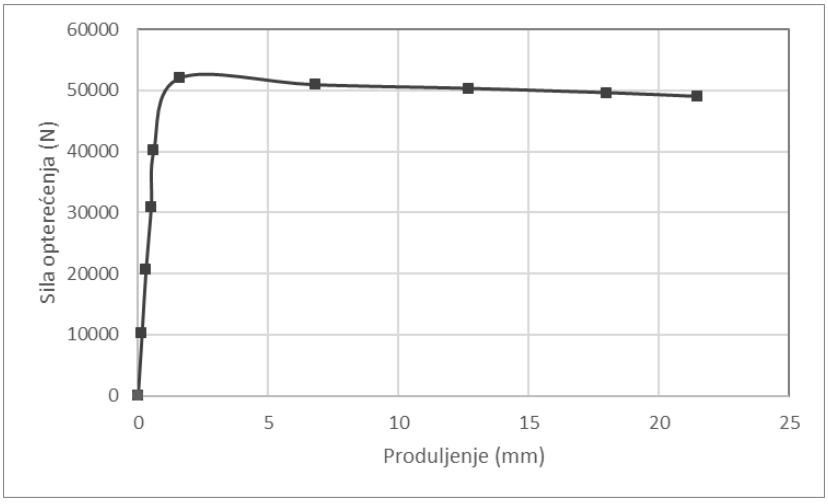


Slika 26: Dijagram sila - produljenje pri 200℃ uzorak 2

Uzorak 3:

Tablica 12: Rezultati mjerenja pri 200℃ uzorak 3

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	643,00	51,50	49,00



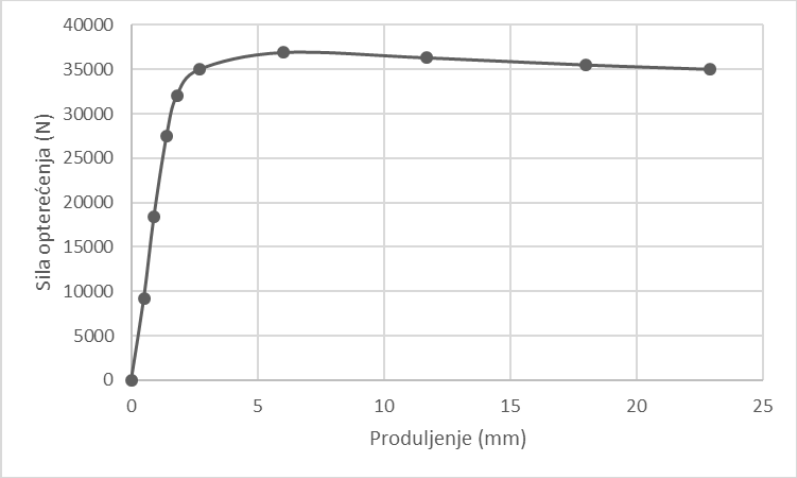
Slika 27: Dijagram sila - produljenje pri 200℃ uzorak 3

2) Ispitivanja pri 400℃:

Uzorak 1:

Tablica 13: Rezultati mjerenja pri 400℃ uzorak 1

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	470	36,90	35,00

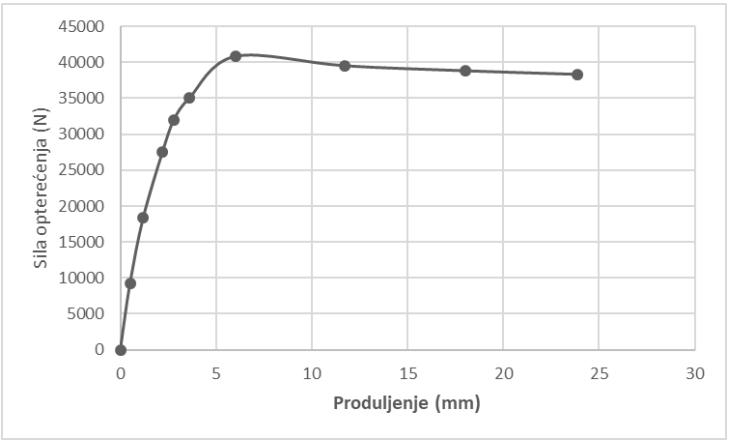


Slika 28: Dijagram sila - produljene pri 400℃ uzorak 1

Uzorak 2:

Tablica 14: Rezultati mjerenja pri 400℃ uzorak 2

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	520	40,80	38,30

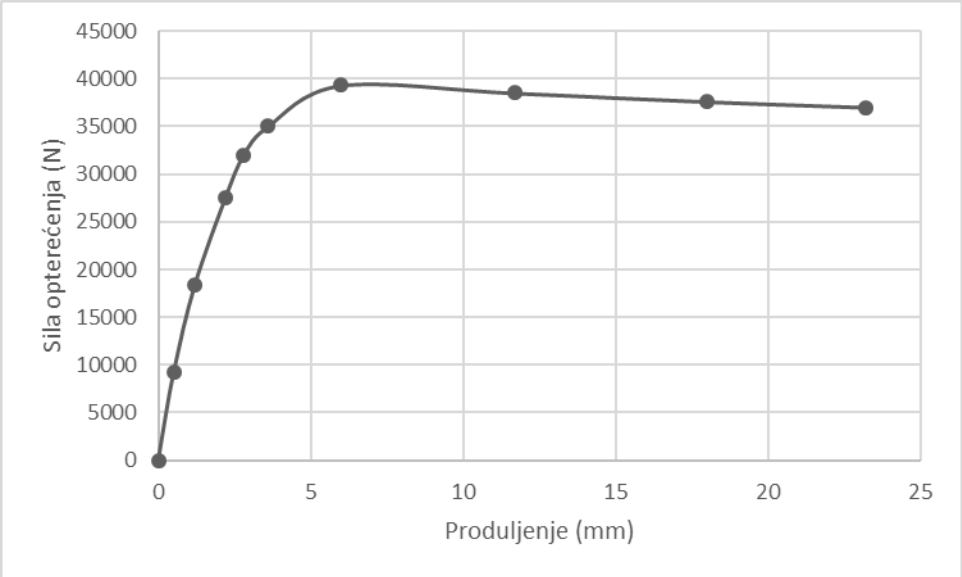


Slika 29: Dijagram sila - produljenje pri 400℃ uzorak 2

Uzorak 3:

Tablica 15: Rezultati mjerenja pri 400℃ uzorak 3

Ispitivana veličina:	R_m [N/mm^2]	F_m [kN]	F_k [kN]
Iznos:	500	39,30	37,00



Slika 30: Dijagram sila - produljenje pri 400℃ uzorak 3

Mjerenje tvrdoće:

Tablica 16: Rezultati mjerenja tvrdoće

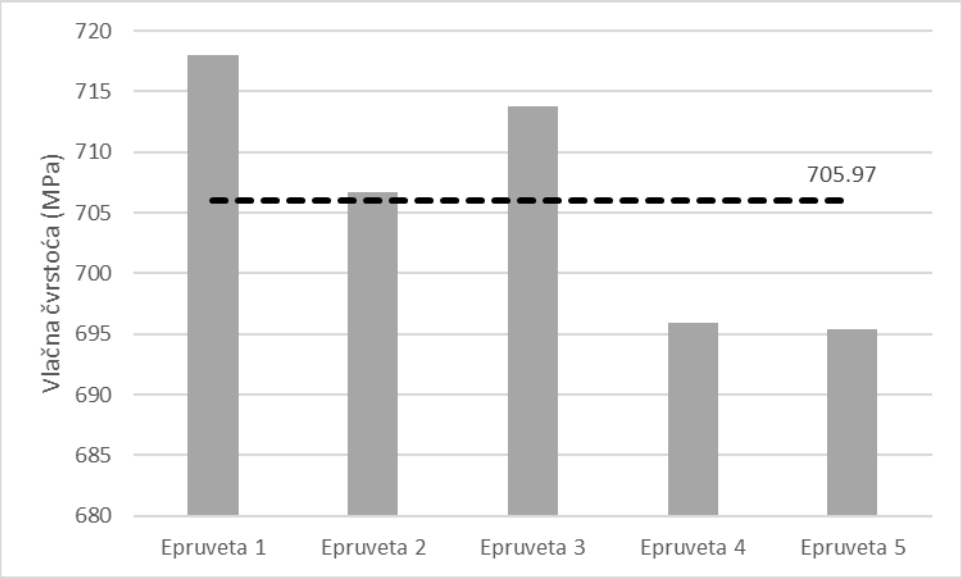
		HV5		
		Uzorak 1, HV	Uzorak 2, HV	Uzorak 3, HV
Mjerenje	1	240,3	252,5	248,7
	2	235,5	235,7	242,3
	3	239,2	238,9	252,4
	4	238,4	251,5	239,3
	5	251,2	240,3	244,8
Sr. vrijednost		240,9	243,8	245,5

U tablici 16. “Uzorak 1” izrezan je iz epruvete ispitane pri sobnoj temperature, “Uzorak 2” pri 200℃, “Uzorak 3” pri 400℃.

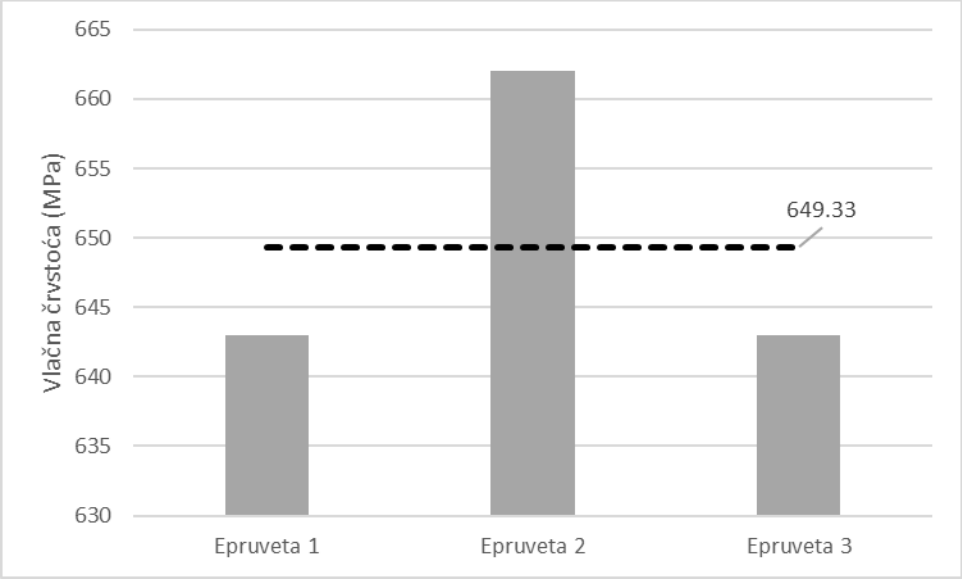
5 ANALIZA REZULTATA

Rezultati dobiveni provođenjem eksperimenata matematički su analizirani te grafički prikazani.

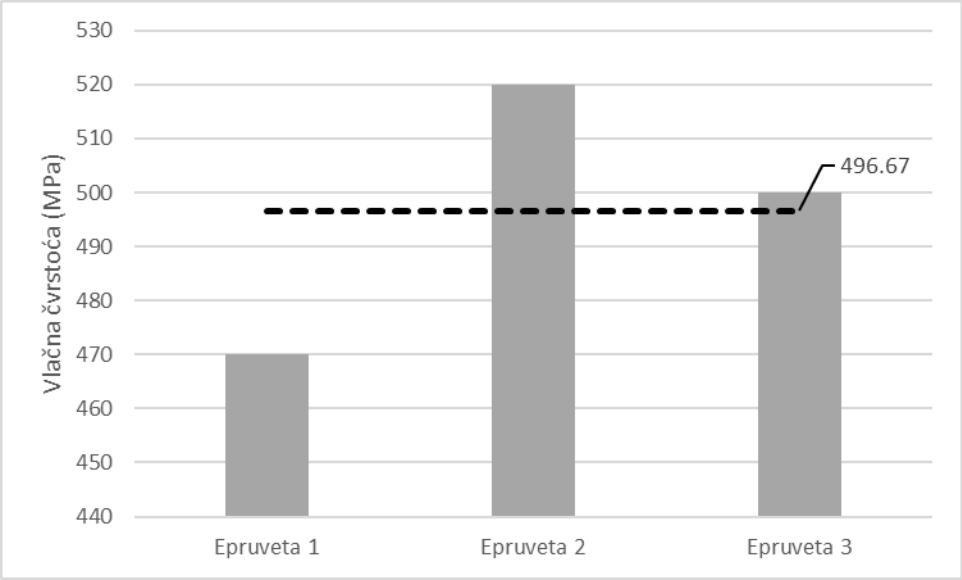
Stupičastim dijagramom (slika 31., 32., 33.)prikazane su izmjerene vrijednosti vlačne čvrstoće za pojedinu epruvetu te njihova prosječna vrijednost (iscrtkana linija)



Slika 31: Iznosi vlačne čvrstoće pri sobnoj temperaturi

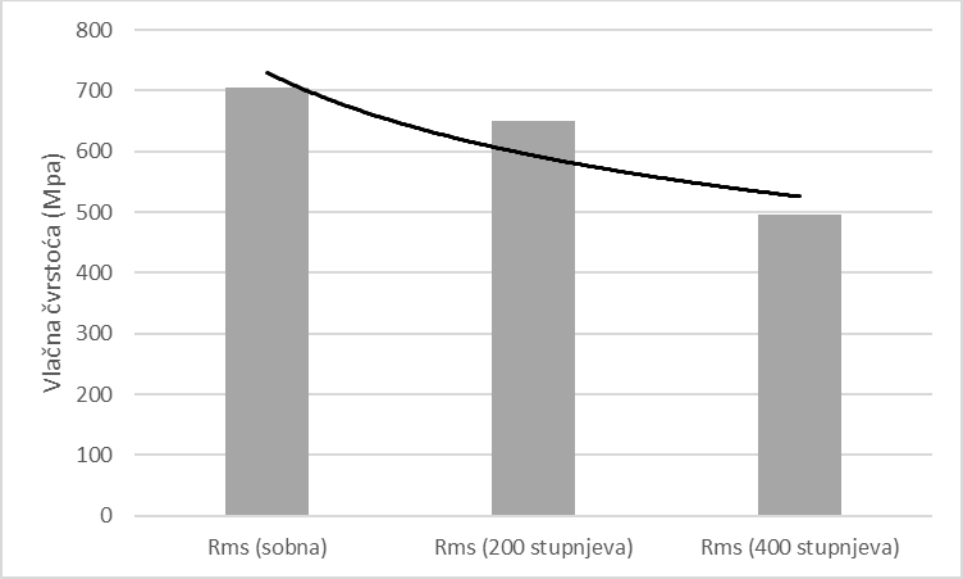


Slika 32: Iznosi vlačne čvrstoće pri 200℃ stupnjeva



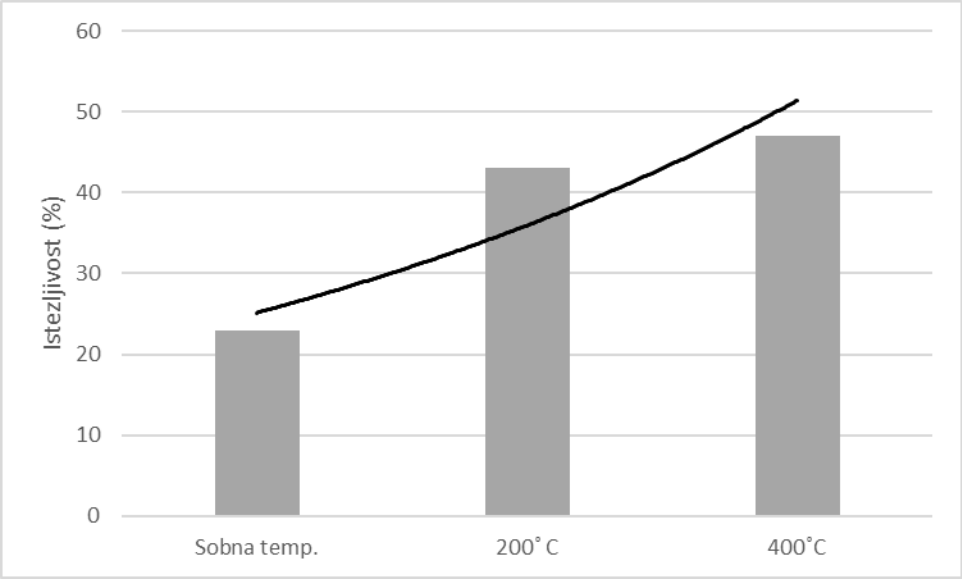
Slika 33: Iznosi vlačne čvrstoće pri 400℃ stupnjeva

Pri povišenim temperaturama dolazi do promjene mehaničkih svojtava i smanjenja vlačne čvrstoće, što je vidljivo iz vrijednosti dobivenih ispitivanjem. Na slici 34. nalaze se prosječne vrijednosti mjerenja vlačne čvrstoće pri sobnoj i dvije povišene temperature, te krivulja koja aproksimira pad vrijednosti.



Slika 34: Pad prosječnih vrijednosti vlačne čvrstoće

Povišenjem temperature dolazi i do povećanja istezljivosti. Istezljivost pri sobnoj temperaturi prema kataloškim podatcima iznosi 23% [12], dok je pri povišenim temperaturama izmjerena prilikom ispitivanja. Usporedba vrijednosti istezljivosti, te njihov rast prikazan je dijagramom na slici 35.



Slika 35: Povećanje istezljivosti s povišenjem temperature

6 ZAKLJUČAK

U ovom radu opisano je statičko vlačno ispitivanje pri sobnoj i povišenim temperaturama, a sukladno međunarodnim normama koje reguliraju provođenje ovih ispitivanja. Provedena su ispitivanja na sobnoj i na povišenim temperaturama, kako bi se pokazao utjecaj temperature na mehanička svojstva materijala. Zbog povoljnih mehaničkih svojstava, čelici se često koriste pri povišenim temperaturama (energetska postrojenja, kotlogradnja, motori s unutarnjim izgaranjem, turbine itd.). Mehanička svojstva se mijenjaju s porastom temperature, te je važno poznavari ponašanje odabranog materijala pri različitim povišenim temperaturama kako bi se izbjegla moguća oštećenja ili havarije.

Na temelju rezultata eksperimentalnog dijela ovoga rada i njihove analize donešeni su sljedeći zaključci:

- Povišenje temperature značajno utječe na mehanička svojstva. Ukoliko će materijal tijekom eksploatacije biti u uvjetima povišenih temperatura moraju biti poznata svojstva izmjerena pri toj temperaturi. Ne smiju se koristiti podatci dobiveni provođenjem eksperimenta na sobnoj temperaturi.
- Povećanjem temperature smanjuje se vlačna čvrstoća, Youngov modul elastičnosti, i granice ravlačenja koje porastom temperature postaju slabije izražene. Općenito možemo reći da se s porastom temperature smanjuje mehanička otpornost materijala.
- Porastom temperature dolazi do povećanja deformabilnosti materijala, pa stoga dolazi do povećanja svojstava kao što su istezljivost i deformabilnost.
- Posljednja verzija norme HRN EN ISO 6892-2:2018 je značajno pooštrila kriterije ispitivanja pri povišenim temperaturama. Eksperimentalna ispitivanja prikazana u ovom radu provedena su na opremi koja je starija i ne može ispuniti zahtjeve ove norme, i to se odrazilo na rezultate što se očituje kroz povećanu ponovljivost.

Određena odstupanja od norme HRN EN ISO 6892-2:2018 i brojni faktori tijekom provođenja eksperimenata su utjecali na rezultate, a ti značajniji faktori su:

  - čistoća kemijskog sastava ispitnih uzoraka
  - nepravilno postavljanje uzorka na kidalicu

- pogrešno očitanje sa mjernog uređaja
- točnost i rezolucija mjernih uređaja
- utjecaj povišene temperature na dodatnu mjernu opremu, itd.

Opći zaključak je da ispitivanje pri povišenim temperaturama zahtjeva kvalitetnu opremu, jako dobro poznavanje same metode te je dugotrajan proces.

7 LITERATURA

[1] Franz M. : “Mehanička svojstva materijala”

[2] Filetin T., Kovačiček F., Indof J. : “Svojstva i primjena materijala”

[3] Franz M., Ćorić D. : “Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala“

[4] HRN EN ISO 6892-1:2016

[5] Šojat A. : Završni rad “Statičko vlačno ispitivanje pri sniženim temperaturama”

[6] https://www.testresources.net/images/accessories/sensors/e3442-axial-extensometer-1.jpg

[7] https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_2014020.pdf

[8] https://www.ametektest.com/
media/ametektest/products/extensometers/extensometers_video_extensometer_ve1_210x360.jpg

[9] https://www.zwickroell.com/-/media/images/redaktions-bilder/08-extensometer/beruehrungslose-messsysteme/laserxtens/laserxtens-array/73191.png?w=620&hash=C0C2B1015633FABDA52F43213EB114534320760C

[10] HRN EN ISO 6892-2:2018

[11] https://venturasteels.com/50crv4-spring-steel/

[12] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6744

8 PRILOZI

I. CD-R disc