Statičko vlačno ispitivanje pri sniženim temperaturama

Bebek, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:106771

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

Iva Bebek

Zagreb, 2021.

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Željko Alar, izv. prof

Studentica:

Iva Bebek

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studija i pomoću navedene literature.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Željku Alaru i asistentu Danielu Pustičkom, dipl. ing. na svoj pruženoj pomoći, znanju i savjetima tijekom pisanja i izrade ovog završnog rada. Također se zahvaljujem osoblju Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava na pomoći u provođenju eksperimentalnog dijela rada.

Neizmjerno hvala mojoj majci Julijani i ocu Radovanu na daru života. Bez vaše ljubavi, podrške i otvorenosti životu ja sad ne bi bila tu gdje jesam. Posebno hvala mojim sekama Anamariji i Marti, braći Anti, Ivanu, Josipu i Luki koji su me uveseljavali u teškim danima. Hvala mojoj baki koja je ustrajno molila za svaki moj ispit, a vjerujem da će i za ove koje tek dolaze.

Veliko hvala svim mojim prijateljima, rodbini i kolegama koji su bili uz mene cijelo vrijeme studiranja, pomagali mi i bodrili me da ustrajem i borim se kad je bilo najteže.

Jedno veliko hvala i mom dečku koji mi je bio potpora cijelo ovo vrijeme uz izjavu „Prsten tek nakon obrane!“ 😁

A najviše hvala dragome Bogu koji me jedini može istinski razumjeti. Hvala na svemu što sam prošla jer me to učinilo boljom, snažnijom i odlučnijom osobom. Veselim se svemu što me iščekuje u budućnosti.

Iva Bebek

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: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **IVA BEBEK** Mat. br.: 0035208136

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

Naslov rada na engleskom jeziku: **Tensile testing at low temperatures**

Opis zadatka:

U eksploataciji materijali su često izloženi sniženim temperaturama i njihovo ponašanje u takvim uvjetima se znatno mijenja u odnosu na sobnu temperaturu. Statičko vlačno ispitivanje metalnih materijala pri sniženoj temperaturi je definirano normom HRN EN ISO 6892-3:2015.
U radu je potrebno:

1. Opisati razvoj statičkog vlačnog ispitivanja pri sniženim temperaturama.
2. Opisati metode vlačnog ispitivanja pri sniženim temperaturama
3. Prema literaturi odrediti utjecajne faktore na rezultate ispitivanja.
4. Eksperimentalno provesti ispitivanje čelika na različitim sniženim temperaturama.
5. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:
Željko Alar
Izv.prof.dr.sc. Željko Alar

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predvideni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA V

POPIS OZNAKA VI

SAŽETAK VII

SUMMARY VIII

1. UVOD 1

2. OPĆENITO O STATIČKOM VLAČNOM ISPITIVANJU 3

2.1. Kvalitativni dijagram naprezanje-istezanje ($\sigma - \varepsilon$) i mehanička svojstva 3

2.2. Oprema pri ispitivanju 5

2.2.1. Ekstanzometar 6

2.2.2. Ispitni uzorak (epruveta) 9

2.2.3. Kidalica ..... .11

3. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE PRI SNIŽENIM TEMPERATURAMA 13

3.1. Razlozi primjene 13

3.2. Osnovne skupine čelika za rad pri niskim temperaturama 13

3.3. Utjecaju snižene temperature na mehanička svojstva 14

3.4. Ohlađivanje epruvete 19

3.4.1. Hlađenje pomoću komora za ohlađivanje 20

3.4.2. Hlađenje pomoću tekućeg helija i dušika 21

4. EKSPERIMENTALNI DIO 23

4.1. Plan ispitivanja 23

4.2. Oprema za ispitivanje 24

4.3. Proces hlađenja epruvete 28

4.4. Rezultati dobiveni nakon ispitivanja 29

4.4.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa A 29

4.4.2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa B 32

4.4.3. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa C 35
4.4.4. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa D 38

5. ANALIZA REZULTATA 42

6. ZAKLJUČAK 49

LITERATURA 51

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Dijagram naprezanja (σ) – istezanja (ε) [2] 3
Slika 2.2. Nasadni ekstenzometar [4] 6
Slika 2.3. Automatski ekstenzometar [5] 7
Slika 2.4. Laserski ekstenzometar [6] 8
Slika 2.5. Video ekstenzometar [7] 8
Slika 2.6. Epruveta kružnog presjeka [2] 9
Slika 2.7. Epruveta pravokutnog presjeka [2] 10
Slika 2.8. Nepravilno i pravilno pozicioniranje epruvete [8] 11
Slika 2.9. Konstrukcijska shema kidalice [5] 12
Slika 3.1. Utjecaj snižene temperature na opće konstrukcijske čelike [10] 14
Slika 3.2. Utjecaj snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja općeg konstrukcijskog čelika S235JR [2] 15
Slika 3.3. Promjena istezljivosti (*A*) i granica razvlačenja (*Re*) u odnosu na snižavanje temperature za tehnički čisti materijal sa BCC rešetkom i Nikal s FCC rešetkom [11] 16
Slika 3.4. Utjecaj snižene temperature na granicu razvlačenja [2] 16
Slika 3.5. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka na -40 °C [12] 17
Slika 3.6. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka u etanolu na -78 °C [12] 18
Slika 3.7. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka u tekućem dušiku na -196 °C [12] 18
Slika 3.8. Komora za ohlađivanje ugrađena na kidalicu [5] 21
Slika 3.9. Shematski prikaz kriostata za statičko vlačno ispitivanje u tekućem heliju [12]..... 22
Slika 4.1. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje na sniženim temperaturama 24
Slika 4.2. Hidraulična kidalica WPM EU 40 MOD 25
Slika 4.3. Računalo s Tire Test programom spojenim na kidalicu 26
Slika 4.4. Nasadni ekstenzometar [16] 26
Slika 4.5. Iskra termomer 21 [5] 27
Slika 4.6. Fluke 568 IR Thermometer 27
Slika 4.7. Hlađenje pomoću suhog leda i alkohola 28
Slika 4.8. Spremnik za tekući dušik 29
Slika 4.9. Epruveta hlađena u tekućem dušiku 29
Slika 4.10. Dijagrami sila-produljenje grupa A 30, 31
Slika 4.11. Dijagrami sila-produljenje grupa B 32, 33, 34
Slika 4.12. Dijagrami sila-produljenje grupa C 35, 36, 37

Slika 4.13. Dijagrami sila-produljenje grupa D 38, 39, 40
Slika 5.1. Uzorci nakon ispitivanja 42, 43
Slika 5.2. Promjeri uzoraka 43
Slika 5.3. Oštećenja na ispitnom uzorku 43
Slika 5.4. Promjena početnog presjeka tijela ispitnog uzorka 44
Slika 5.5. Histogram hrapavosti 45
Slika 5.6. Histogram vlačne čvrstoće 45
Slika 5.7. Histogram gornje granice razvlačenja 46
Slika 5.8. Histogram donje granice razvlačenja 46
Slika 5.9. Histogram istezljivosti 47
Slika 5.10. Histogram rasipanja rezultata za grupu B 47
Slika 5.11. Histogram standardne devijacije za grupu A 48
Slika 5.12. Područje tečenja materijala 48

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Oblici i dimenzije epruveta različitih po početnoj mjernoj duljini [2]……10
Tablica 3.1. Oznake temperature epruveta, ispitivanja i vrijeme ohlađivanja [17]..... 19
Tablica 3.2. Dopuštena odstupanja ovisno o temperaturi ispitivanja [17]..... 20
Tablica 4.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa A.....32
Tablica 4.2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa B.....34
Tablica 4.3. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa C.....37
Tablica 4.4. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa D..... 40
Tablica 4.5. Srednje vrijednosti grupa A, B, C i D 41
Tablica 5.1. Hrapavost uzorka 44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	istezljivost
a_0	mm	debljina pravokutnog uzorka
b_0	mm	širina pravokutnog uzorka
d_0	mm	početni promjer epruvete
E	N/mm^2	modul elastičnosti
F_m	N	maksimalna sila
L_0	mm	početna mjerna duljina epruvete
L_c	mm	ispitna duljina epruvete
L_t	mm	ukupna duljina epruvete
R_e	N/mm^2	granica razvlačenja
R_{eH}	N/mm^2	gornja vrijednost granice razvlačenja
R_{eL}	N/mm^2	donja vrijednost granice razvlačenja
R_k	N/mm^2	konačno naprezanje
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm^2	konvencionalna granica razvlačenja
S_0	mm^2	početna površina presjeka epruvete
T	℃	definirana temperatura ispitivanja
T_i	℃	naznačena temperatura ili izmjerena temperatura na površini epruvete
T_s	min	vrijeme ohlađivanja
Z	%	suženje (kontrakcija)
Σ	N/mm^2	naprezanje
ε	mm/mm	istezanje
s	-	standardna devijacija

SAŽETAK

U radu je ukratko opisana metoda statičkog vlačnog ispitivanja materijala, a pri tome je opširnije opisana i metoda statičkog vlačnog ispitivanja pri sniženim temperaturama sukladno normom HRN EN ISO 6892-3:2015. Ovom normom se na sniženim temperaturama određuju osnovna mehanička svojstva materijala. Dan je pregled osnovne skupine čelika za rad pri niskim temperaturama i opreme potrebne za takvo ispitivanje. U eksperimentalnom dijelu iz literaturnih izvora proučeni su i određeni faktori utjecaja na rezultate ispitivanja. Provedeno je ispitivanje čelika te analiza rezultata primjenom stečenog znanja. Ispitivanje se provodilo na četiri različite temperature (sobnoj temperaturi, 0 °C, -20 °C, -60 °C) te se usporedili rezultati.

Ključne riječi: statičko vlačno ispitivanje, snižene temperature, čelik

SUMMARY

This work shortly describes static tensile testing method of material, with focus on the static tensile testing method at low temperatures according to the HRN EN ISO 6892-3:2015 standards. This standard is used to determine basic mechanical features of the materials at low temperatures. The work provides overview of the basic steel groups for working at low temperatures and equipment required for such examinations. In the experimental part, impact factors on the examination results were studied and determined from the literature sources. Steel examination and the analysis of the results was conducted by applying acquired knowledge. Research was conducted on four different temperatures (room temperature, 0 °C, -20 °C, -60 °C) and the results were compared.

Keywords: static tensile testing, low temperatures, steel

1. UVOD

Kroz povijest metal je bio jedan od značajnijih materijala u ljudskim resursima, tijekom cjelokupnog razvoja strojarskih materijala. Značaj razvoja strojarskih materijala u današnje doba je vrlo velik, jer od njih ovise sve strojarske konstrukcije, proizvodnja, energetika te automatizacija. Metalni materijali najviše se upotrebljavaju u tehničkoj praksi zbog povoljnih mehaničkih, tehnoloških, fizikalnih, kemijskih i drugih svojstava. Prema tehnološkim karakteristikama određuje se područje i način primjene pojedinog materijala u različitim postupcima obrade i spajanja poput zavarivanja, rezanja, lijevanja, kovanja ili kaljenja [1].

Mehanička svojstva su temeljna svojstva u strojarstvu, a to su: čvrstoća, granica razvlačenja, istezljivost, žilavost, tvrdoća i sl. 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 potrebno je uzeti u obzir sve vrste kemijskih utjecaja i mehaničkih opterećenja kojima će promatrani dio biti podvrgnut. Cilj izbora materijala je taj da u traženom vremenskom periodu materijalu ne dođe do pojave pukotina i lomova zatim plastične odnosno trajne deformacije koja bi onemogućila daljnji rad ili prouzročila potencijalnu havariju, te da ispuni sve ostale eksploatacijske uvjete. Mehaničko svojstvo materijala predstavlja mjerljivu veličinu materijala, koja se može brojčano odrediti pomoću normiranih metoda ispitivanja [1-2].

Opća podjela mehaničkih svojstava i uvjeta ispitivanja je:

a) Prema načinu djelovanja opterećenja: vlak, tlak, uvijanje (torzija), savijanje i smicanje.

b) Prema brzini djelovanja opterećenja: statičko i dinamičko (udarno ili promjenljivo).

c) Prema temperaturi ispitivanja na: sobnoj (23 ± 5^0C), povišenoj i sniženoj temperaturi.

d) Prema trajanju djelovanja opterećenja na: kratkotrajna i dugotrajna.

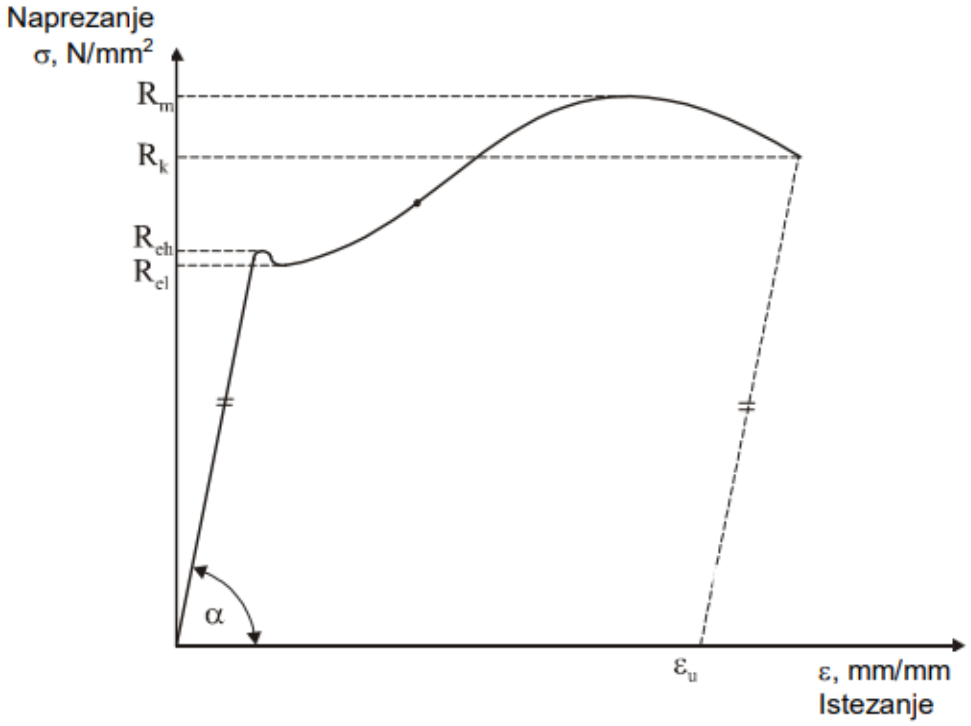
Za određivanje osnovnih mehaničkih svojstava poput granice razvlačenja, modula elastičnosti i vlačne čvrstoće se primjenjuje statičko-vlačno ispitivanje. Vlačno ispitivanje je postupak ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na kidalici, kojim se utvrđuju glavna svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala, ali i njihovu deformabilnost. Temperatura eksploatacije iznimno je bitna zato što prilikom njene promjene dolazi i do promjena mehaničkih svojstava materijala. Uobičajena temperatura ispitivanja je sobna temperatura (oko 20 °C) i na njoj se bilježe rezultati. Tokom upotrebe materijala gdje se razvijaju povišene i visoke temperature ili su okolišni uvjeti pri povišenim temperaturama od iznimne važnosti je imitiranje tih temperatura prilikom ispitivanja. Na isti način kako su bitne povišene i visoke temperature jednako su bitne i snižene temperature koje se javljaju prilikom eksploatacije materijala u ekstremnim temperaturnim područjima zemlje poput Grenlanda, Sibira itd. [2].

2. OPĆENITO O STATIČKOM VLAČNOM ISPITIVANJU

2.1. Kvalitativni dijagram naprezanje-istezanje ($\sigma - \varepsilon$) i mehanička svojstva

Statičko vlačno ispitivanje jedno je od osnovnih ispitivanja za određivanje mehaničkih svojstava metalnih 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, HRN EN ISO 6892 2:2018 za ispitivanja pri povišenim temperaturama, te HRN EN ISO 6892-3:2015 za ispitivanje pri niskim temperaturama i HRN EN ISO 6892-4:2015 za ispitivanja u tekućem heliju. Provođenjem ispitivanja mogu se dobiti sljedeća mehanička svojstva: istezljivost (A), ukupno produljenje epruvete (ε_u), modul elastičnosti (E), granica razvlačenja (R_e), gornja granica razvlačenja (R_{eH}), donja granica razvlačenja (R_{eL}), konačno naprezanje (R_k) i vlačna čvrstoća (R_m). Navedena naprezanja se računaju pomoću odgovarajućih sila koje se jednostavno očitavaju na mjernim uređajima tijekom mjerenja [2-3].

Na slici 2.1. prikazan je "inženjerski" ili konvencionalni" dijagram naprezanje (σ) - istezanje (ε) za konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju.



Slika 2.1. Dijagram naprezanja (σ) - istezanja (ε) [2]

Gornja granica razvlačenja (R_{eH}) predstavlja omjer sile pri gornjoj granici razvlačenja (F_{eH}) i površine početnog presjeka ispitne epruvete (S_o), a računa se prema izrazu (2.1.):

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_o}, \quad \left[\frac{N}{mm^2}\right] \tag{2.1.}$$

Gornja granica razvlačenja (R_{eH}) predstavlja vrijednost naprezanja prije prvog smanjenja sile. Vrijednosti granice razvlačenja koje su propisane u tehničkim uvjetima isporuke materijala (obično kao minimalne vrijednosti), predstavljaju gornju granicu razvlačenja (R_{eH}) [1].

Dok donja granica razvlačenja (R_{eL}) predstavlja omjer sile pri donjoj granici razvlačenja (F_{eL}) i površine početnog presjeka ispitne epruvete (S_o), a računa se prema izrazu (2.2.):

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_o}, \quad \left[\frac{N}{mm^2}\right] \tag{2.2.}$$

Donja granica razvlačenja (R_{eL}) je najmanje naprezanje tijekom tečenja materijala [1].

Granice razvlačenja nam daju informaciju kada elastična deformacija materijala prelazi u plastično (trajno) područje.

Konačno naprezanje (R_k) je omjer sila loma (F_k) pri kojoj je došlo do pucanja epruvete i površine početnog poprečnog presjeka (S_o), računa se prema izrazu (2.3.):

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \quad \left[\frac{N}{mm^2}\right] \tag{2.3.}$$

Konačno naprezanje (R_k) je definirano kao naprezanja koje je dovelo do loma ispitnog uzorka [2].

Vlačna čvrstoća (R_m) je omjer maksimalne sile (F_m) pri ispitivanju i površine početnog poprečnog presjeka ispitne epruvete (S_o), te se računa prema izrazu (2.4.):

$$R_m = \frac{F_m}{S_o}, \quad \left[\frac{N}{mm^2}\right] \tag{2.4.}$$

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 [2].

Istezljivost (*A*) predstavlja relativno produljenje materijala u uzdužnom smjeru u odnosu na početnu mjernu duljinu ispitnog uzorka, računa se prema izrazu (2.5.):

$$A = \varepsilon_{\mathrm{u}} * 100, \quad [\%] \tag{2.5.}$$

Statičkim vlačnim pokusom utvrđuje se i ukupno produljenje epruvete tj. ukupno istezanje (ε_{u}), te se računa prema izrazu (2.6.):

$$\varepsilon_{\mathrm{u}} = \frac{\Delta L_{\mathrm{u}}}{L_{\mathrm{o}}}, \qquad \left[\frac{\mathrm{mm}}{\mathrm{mm}}\right] \tag{2.6.}$$

Modul elastičnosti (*E*) predstavlja omjer naprezanja (σ) i istezanja (ε) izazvanog naprezanjem u području elastičnih deformacija materijala, računa se prema izrazu (2.7.):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \qquad \left[\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}^2}\right] \tag{2.7.}$$

U σ-ε dijagramu modul elastičnosti je nagib tzv. Hookeovog pravca sa završetkom u točki R_{eH}. On ovisi o jačini veza unutar strukture materijala [1].

Kako se epruveta prilikom statičkog vlačnog pokusa istovremeno produljuje i sužava veličina koja karakterizira deformabilnost materijala u smjeru poprečnom na djelovanje opterećenja naziva se kontrakcijom (*Z*), a računa se prema izrazu (2.8.).

$$Z = \frac{S_{\mathrm{o}} - S_{\mathrm{u}}}{S_{\mathrm{o}}} * 100, \quad [\%] \tag{2.8.}$$

Kontrakcija (*Z*) predstavlja relativno suženje ploštine presjeka epruvete u odnosu na ploštinu početnog presjeka [2].

2.2. Oprema pri ispitivanju

Oprema potrebna pri ispitivanju sastoji se od nekoliko dijelova od koji su: ekstenzometar (ukoliko postoji potreba za mjerenjem produljenja), ispitni uzorak (epruveta), kidalica, te određeni mediji ili dodatni dijelovi opreme ukoliko se ispitivanja provode pri povišenim ili sniženim temperaturama (npr. indukcijska peć za grijanje ispitnih uzoraka ili tekući dušik za hlađenje) [2].

2.2.1. Ekstenzometri

Ekstenzometrija je znanstvena disciplina koja uključuje mjerenje i analizu promjene duljine epruvete prilikom statičkog vlačnog ispitivanja. Uređaji korišteni za takva mjerenja zovu se ekstenzometri. Podliježu normi HRN EN ISO 9513:2012 unutar koje je opisan postupak umjeravanja i odabira vrste ekstenzometra za jednoosna ispitivanja. Klasifikacija unutar norme podijeljena je po klasama točnosti. Prema tome postoje Klase 1 koji ima maksimalno dozvoljeno odstupanje rezultata od 1%, zatim Klase 2 koji ima dozvoljeno odstupanje od 2% itd. Osnovna podjela je na kontaktne i beskontaktne, kontaktni se najčešće primjenjuju prilikom ispitivanja metalnih materijala zbog opasnosti od utjecaja na epruvete izrađene od krhkijih materijala, a beskontaktni se najčešće primjenjuju kod krhkih epruveta ili u slučajevima u kojima energija loma epruvete može oštetiti mjerni uređaj [1].

- Vrste kontaktnih ekstenzometara

Nasadni kontaktni ekstenzometri koriste se za metalne uzorke, i uzorke od čvrstih polimera. U direktnom su kontaktu sa epruvetom preko vrhova kratkih i krutih kontaktnih štapića. Utjecaj operatera je velik prilikom postavljanja ekstenzometra na epruvetu, i tijekom svakog ispitivanja postoji opasnost od oštećenja uređaja. Na slici 2.2. je prikazan primjer nasadnog ekstenzometra.



Slika 2.2. Nasadni ekstenzometar [4]

Automatski kontaktni ekstenzometar kontakt ostvaruju pomoću gornjeg i donjeg prihvata epruvete u obliku škarica. Kod njega je vrlo mali utjecaj operatera prilikom instaliranja i ispitivanja za razliko od nasadni. Stezanje prihvata za epruvetu vrši se

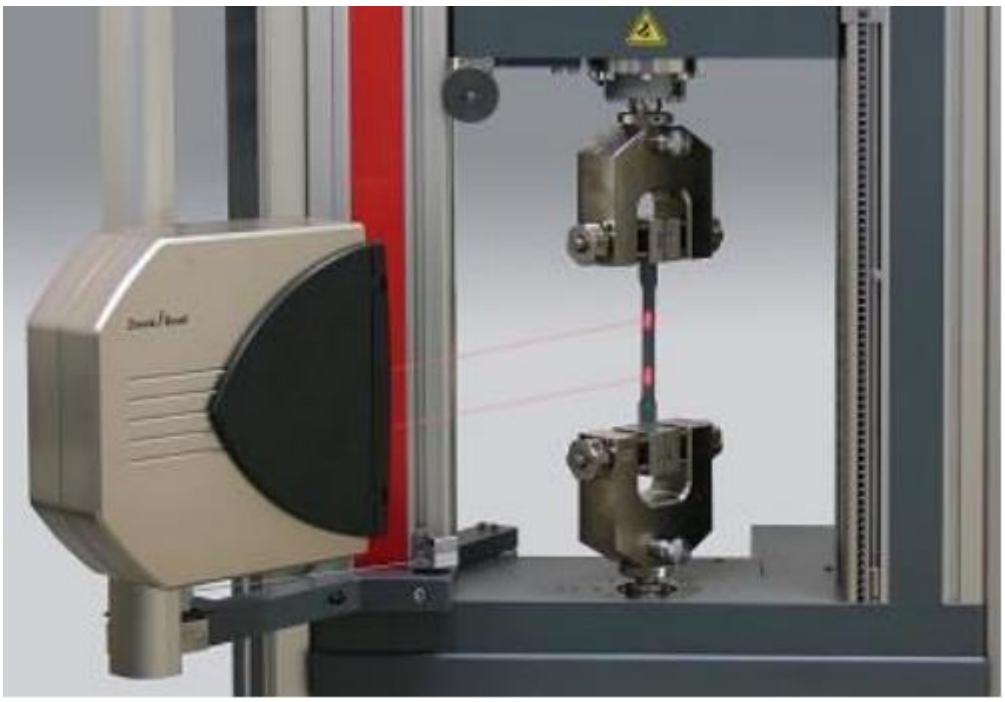
automatski. Mogućnost utjecaja na svojstva epruvete je također manja nego kod nasadnih ekstenzometara. Na slici 2.3. prikazan je primjer automatskog ekstenzometra.



Slika 2.3. Automatski ekstenzometar [5]

- Vrste beskontaktnih ekstenzometara

Laserski ekstenzometar radi na principu okretanja rotacijskog deflektora koji osigurava skeniranje velikom brzinom mjerenja površine laserskom zrakom. Pogodni su 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. Ovakvi ekstenzometri su vrlo precizni, a točnost im je između ±0,001 mm do ±0,04 mm. Na slici 2.4. prikazan je primjer laserskog ekstenzometra.



Slika 2.4. Laserski ekstenzometar [6]

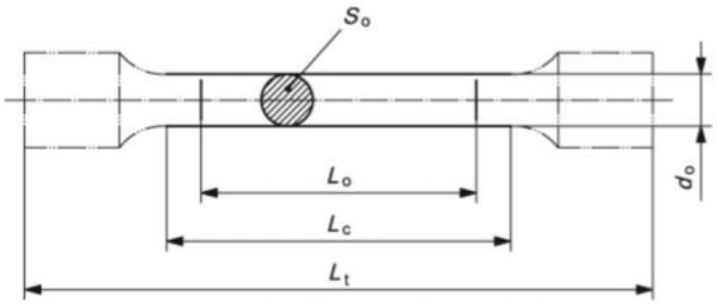
Video ekstenzometar je poseban oblik optičkog ekstenzometra. Prednost video ekstenzometra je u tome što istodobno mjeri aksijalno produljenje i poprečno suženje. Video ekstenzometar se nalazi na samom mjestu mjerenja, pa na njega primjerice ne utječe temperatura u uređaju za ispitivanje. Beskontaktni je uređaj, stoga svojom masom ne utječe na rezultate mjerenja. Ovisno o udaljenosti od mjesta mjerenja, ima dovoljno veliku rezoluciju da može snimati i najmanja produljenja. Problem kod ove vrste ekstenzometara je potreba za označavanjem epruvete i vidljivost. Primjer video ekstenzometar je prikazan na slici 2.5.



Slika 2.5. Video ekstenzometar [7]

2.2.2. Ispitni uzorak (eprueta)

Cilj ispitivanja materijala je određivanje njegove prikladnosti za korištenje u određenim uvjetima. Uz sve informacije o mjernom uređaju, postupku ispitivanja, načinu prikazivanja rezultata, informacije o stanju u kojem se ispituje, veliku važnost zauzimaju ispitni uzorci (epruvete). 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. Epruvete koje su strojno obrađene izrađuju se uz obilno hlađenje kako ne bi došlo do promijene strukture unutar materijala. Također, površina epruvete mora biti glatka bez ogrebotina i tragova obrade. Normirani oblici ispitnih uzoraka mogu biti okruglog, četvrtastog i rijetko nekih drugih presjeka (prikazano slikama 2.6. i 2.7.). Uz razliku u presjeku epruvete dijelimo ih i po početnoj mjernoj duljini (L_o) na duge i kratke (umnožak korijena površine poprečnog presjeka (S_o) i koeficijenta za dobivanje željene početne mjerne duljine, prikazano u tablici 2.1.) [1-2].



Slika 2.6. Epruveta kružnog presjeka [2]

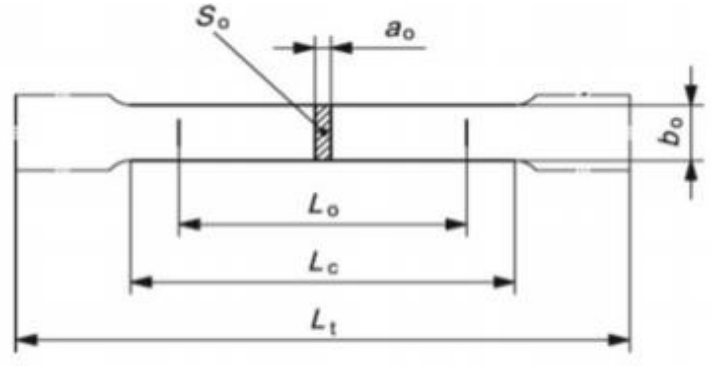
Gdje je: d_o - početni promjer epruvete, mm

S_o - početna površina presjeka epruvete, mm²

L_o - početna mjerna duljina epruvete, mm

L_c - ispitna duljina epruvete, mm

L_t - ukupna duljina epruvete, mm



Slika 2.7. Epruveta pravokutnog presjeka [2]

a_o - debljina pravokutnog uzorka, mm

b_o - širina pravokutnog uzorka, mm

Osim što je određeno radi li se o okruglom ili četvrtastom poprečnom presjeku, važno je specificirati i duljinu epruvete .

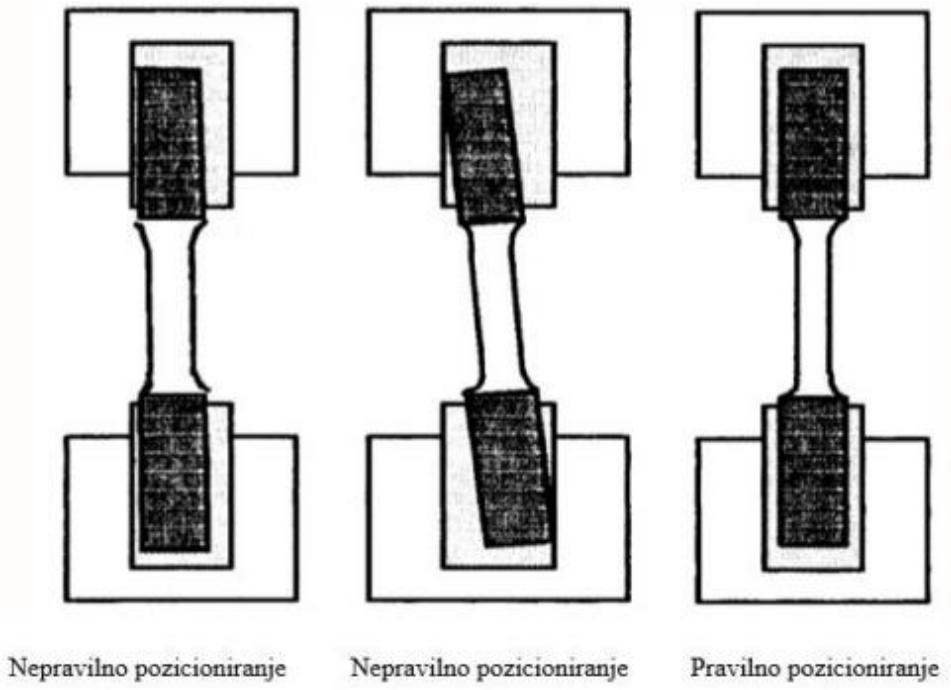
Tablica 2.1. Oblici i dimenzije epruveta različitih po početnoj mjernoj duljini [2]

Tip ispitnog uzorka	Početna mjerna duljina L_o [mm]
Duga epruveta	$11,3*\sqrt{S_o}$
Kratka epruveta	$5,56*\sqrt{S_o}$

Za prihvat epruvete prije ispitivanja koriste se čeljusti u kidalici. Prilikom postavljanja epruvete u stezne čeljusti kidalice, izrazito je važno postaviti je pravilno. Prvo stezna čeljust mora prianjati uz glavu epruvete, a drugo 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, zbog čega dolazi do nemjerodavnih rezultata prilikom ispitivanja. Jedan od načina rješavanja tog problema je korištenje epruveta s navojnom glavom što poboljšava pozicioniranje, ali uključuje i mane kao što su nekonzistentnost prilikom izrade navoja, rezanje toka silnica u epruveti itd. [8].

Na slici 2.8. prikazano je pravilno i nepravilno pozicioniranje epruvete. Na prvoj slici

je prikazana neusklađenost epruvete i stezne čeljusti, zbog istrošenosti steznih čeljusti. Don na drugoj slici je prikazano pogrešno postavljanje u steznu čeljust što može dovesti do savijanja i dovesti do velikih odstupanja u mjerenju. Na poravnanje mogu utjecati nosivi okvir uređaja za ispitivanje, svi korišteni držači, sam uzorak, ali i ispitivač svojom ne pažnjom. Na trećoj slici je prikazano pravilno pozicioniranje epruvete.



Slika 2.8. Nepravilno i pravilno pozicioniranje epruveta [8]

2.2.3. Kidalica

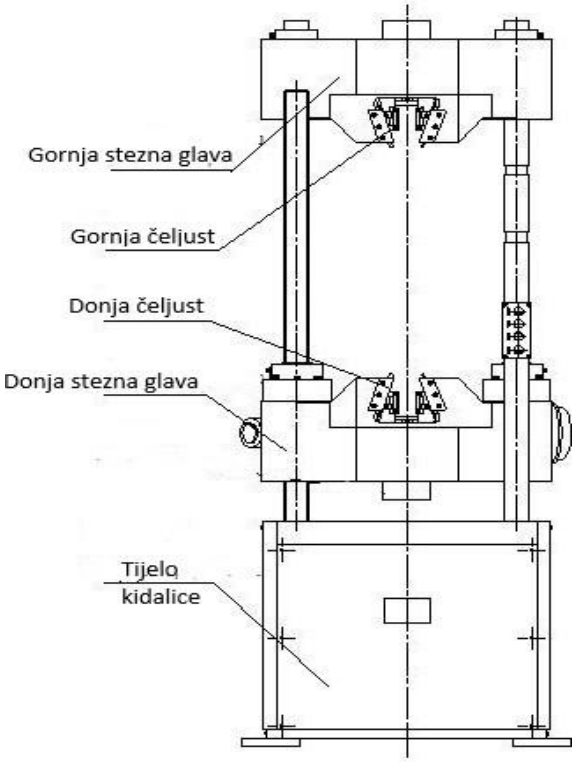
Kidalica je osnovni dio opreme za provođenje statičkog vlačnog ispitivanja. Također se smatra i univerzalnim uređajem za ispitivanja, zbog toga se ne mora nužno koristiti za statičko vlačno ispitivanje nego i za druga statička ispitivanja npr. tlačna. Prilikom statičkog vlačnog ispitivanja epruveta (ispitni uzorak) se podvrgava postepenom povećanju jednoosnog opterećenja sve dok ne dođe do loma epruvete.

Ovisno o području primjene i vrsti ispitivanih uzoraka te potrebnim naprezanjima, kidalice mogu imati različite vrste pogona i biti različitih konstukcija. Za primjenu manjih sila može se koristiti mehanički pogon, dok je prilikom primjene većih sila potreban hidraulički pogon. Nosiva konstrukcija 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 ispitivanja, mora zadovoljiti normu ISO 7500:1-2018 u kojoj je sadržan sustav umjeravanja kidalica za provođenje statičkog vlačnog ispitivanja, unutar koje je opisan sustav umjeravanja kidalica za statičko vlačno ispitivanje. Umjeravanje se sastoji od generalne provjere testnog uređaja, baždarenja mjerne sile i potvrde o funkcionalnosti uređaja i njegovih svojstava [1].

Slika 2.9. prikazuje kontrukcijsku shemu kidalice sa naznačenim dijelovima uređaja.



Slika 2.9. Konstrukcijska shema kidalice [5]

3. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE PRI SNIŽENIM TEMPERATURAMA

3.1. Razlozi primjene

Statičko vlačno ispitivanje pri sniženim temperaturama provodi se tako da epruvetu koja ima određenu vrijednost snižene temperature opteretimo jednoosnim vlačnim naprezanjem s vrlo malom promjenom brzine čime simuliramo statičko naprezanje. Statička vlačna ispitivanja pri sniženim temperaturama definirana su za temperaturno područje od 10 °C do -196 °C normom HRN EN ISO 6892-3:2015, te od -196 °C do -269 °C normom HRN EN ISO 6892-4:2015 [2].

Rezultati ispitivanja su važni prilikom izbora materijala za određene konstrukcijske zadatke pri sniženim temperaturama. Prilikom izrade specifikacija pojedinih materijala spominju se njegova vlačna svojstva kako bi osigurala kvalitetu. Ispitivanja se također provode za vrijeme razvoja novih materijala i procesa, kako bi ih se usporedilo sa drugim materijalima i procesima. Uz sve navedeno vrlo bitno je i predviđanje ponašanja materijala u uvjetima statičkog vlačnog naprezanja pri sniženim temperaturama, a u tome nam pomaže uvid u elastično područje i čvrstoću materijala [9].

Tijekom statičkog vlačnog ispitivanja pri sniženim temperaturama koriste se ispitni uzorci (epruvete) kao i kod statičkog vlačnog ispitivanja na sobnoj temperaturi opisani u poglavlju 2.2.2. ovog rada. Također se koriste kidalice, identične onima za statičko vlačno ispitivanje na sobnoj temperaturi navedene u poglavlju 2.2.3. ovog rada.

3.2. Osnovne skupine čelika za rad pri niskim temperaturama

Razlikujemo tri osnovne skupine čelika:

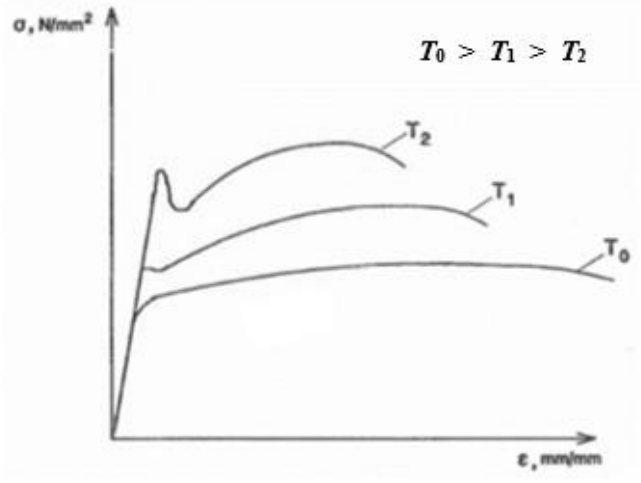
a) Niskolegirani (mikrolegirani) sitnozrnati čelici u normalizarnom stanju se primjenjuju do -50 °C. Imaju nižu prijelaznu temperaturu kao posljedicu sitnog zrna te više čistoće od klasičnih konstrukcijskih čelika.
b) Čelici legirani s Ni (1,5...9 %Ni) za poboljšavanje se primjenjuju u temperaturnom području od -85 do -200 °C. Nikal pospješuje stvaranje sitnog zrna i žilavog Fe-Ni martenzita nakon kaljenja što kao posljedicu ima povećanje žilavosti pri niskim temperaturama. Skloni pojavi krhkosti nakon popuštanja.

c) Cr-Ni i CR-Ni-N (Nb, Ti), Cr-Ni-Mo-N i Cr-Mn-Ni-N austenitni čelici koji i blizu apsolutne nule imaju dovoljnu žilavost. Glavni problem kod ovih čelika je nedovoljno istražena mikrostrukturna transformacija austenita u tzv. deformacijski ε-martenzit pri niskim temperaturama. Sniženjem temperature dolazi do znatnih smanjenja dimenzija što može uzrokovati naprezanja viša od granice razvlačenja tj. izazvati hladno očvrrsnuće.

Kod ovih navedenih skupina čelika maseni udio ugljika treba biti što manji jer se na taj način ostvaruje niža prijelazna temperatura. Neki primjeri primjene ovih čelika jesu: spremnici tekućih plinova pod tlakom, cjevovodi za tekuće plinove, uređaji u tehnici hlađenja itd. [9].

3.3. Utjecaj snižene temperature na mehanička svojstva

Među vanjskim utjecajima koji djeluju na mehanička svojstva spada također i temperatura okoline. Utjecaj snižene temperature osobito je znakovit pri ispitivanju udarnog rada loma, ali je primjetan i u uvjetima statičkog opterećenja pri statičkom vlačnom ispitivanju. Kako bi se utvrdio utjecaj snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa epruvetu treba kontinuirano tokom ispitivanja ohlađivati u odgovarajućoj komori. Slika 3.1. prikazuje utjecaj snižavanja temperature na rezultate ispitivanja u σ-ε dijagramu za konstrukcijske čelike [10].

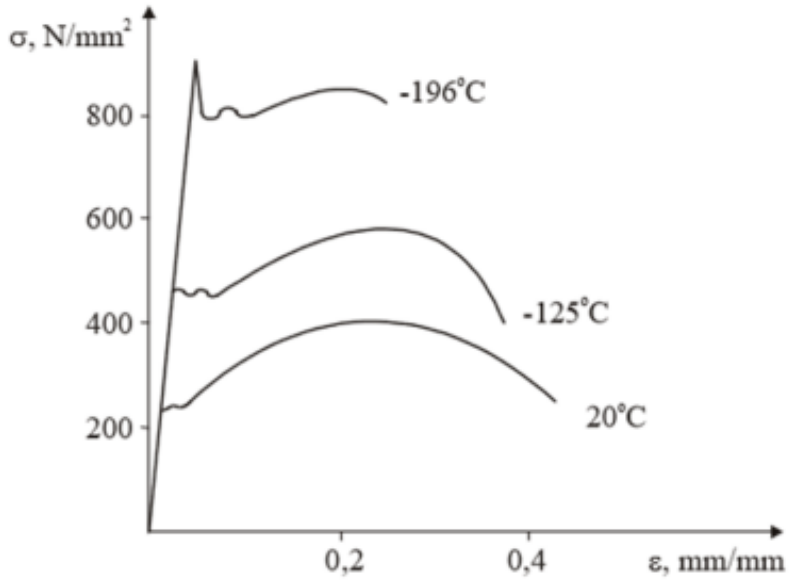


Slika 3.1. Utjecaj snižene temperature na opće konstrukcijske čelike [10]

Krivulja T_0 predstavlja sobnu temperaturu, dok temperature T_1 i T_2 snižene temperature uz relaciju:

$$T_0 > T_1 > T_2$$

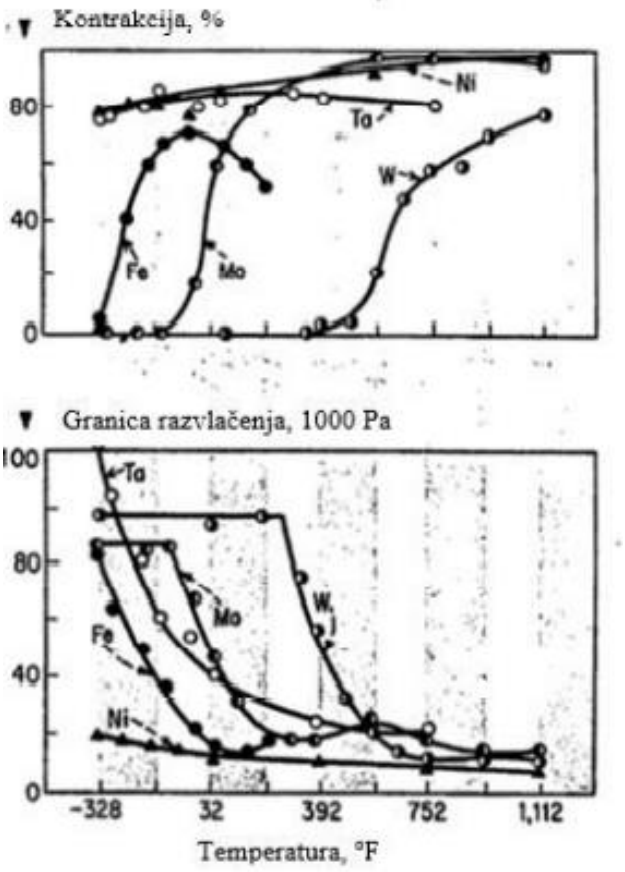
Konkretan primjer utjecaja snižene temperature možemo primijeniti kod čelika S235JR na slici 3.2.



Slika 3.2. Utjecaj snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja općeg konstrukcijskog čelika S235JR [2]

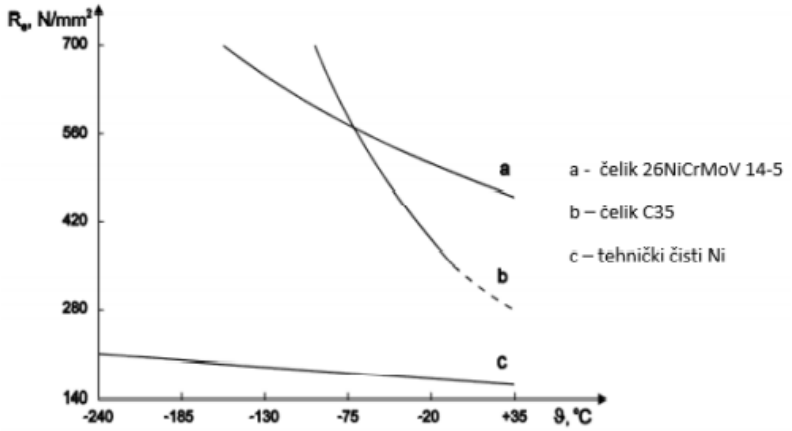
Iz dijagrama za opće konstrukcijske čelike zaključujemo kako sa sniženjem temperature vrijednost istezljivost (A) zajedno sa relativnim produljenjem (ε_u) smanjuje, a vlačna čvrstoća (R_m) raste, dok komponente granice razvlačenja gornja (R_{eH}) i donja (R_{eL}) postaju izraženije. Vrijednost modula elastičnosti (E) se ne mijenja na što ukazuje nepromijenjeni nagib Hookeovog pravca za sve temperature ispitivanja.

Iz slike 3.3. dobivamo uvid u ponašanje istezljivosti (A) te granice razvlačenja (R_e) tehnički čistih materijala sa BCC i Nikal s FCC rešetkom prilikom snižavanja temperature.



Slika 3.3. Promjena istezljivosti (*A*) (gornja slika) i granice razvlačenja (R_e) (donja slika) u odnosu na snižavanje temperature za tehnički čiste materijale sa BCC rešetkom i Nikal s FCC rešetkom [11]

Skloniji promjeni mehaničkih svojstava na sniženim temperaturama su legure sa BCC (prostorno centriranom kubičnom) rešetkom (svi čelici osim austenitnih) u odnosu na legure sa FCC (plošno centriranom kubičnom) rešetkom. Promjenu granice razvlačenja kod materijala sa FCC i BCC kristalnom rešetkom prikazana je na slici 3.4. [2].



Slika 3.4. Utjecaj snižene temperature na granicu razvlačenja [2]

Veličina uzorka tj. promjer uzorka ima značajan utjecaj na brzinu ohlađivanja. Povećanjem promjere povećava se i masa te se jezgra hladi znatno sporije od površine što dovodi do nedovoljne prokaljenosti dijela.

Primjeri krivulja ohlađivanja čelika u ovisnosti o dimenzijama i temperaturi ispitnog uzorka: $A =$ 5mm - debljina uzorka

$B =$ 15mm - debljina uzorka

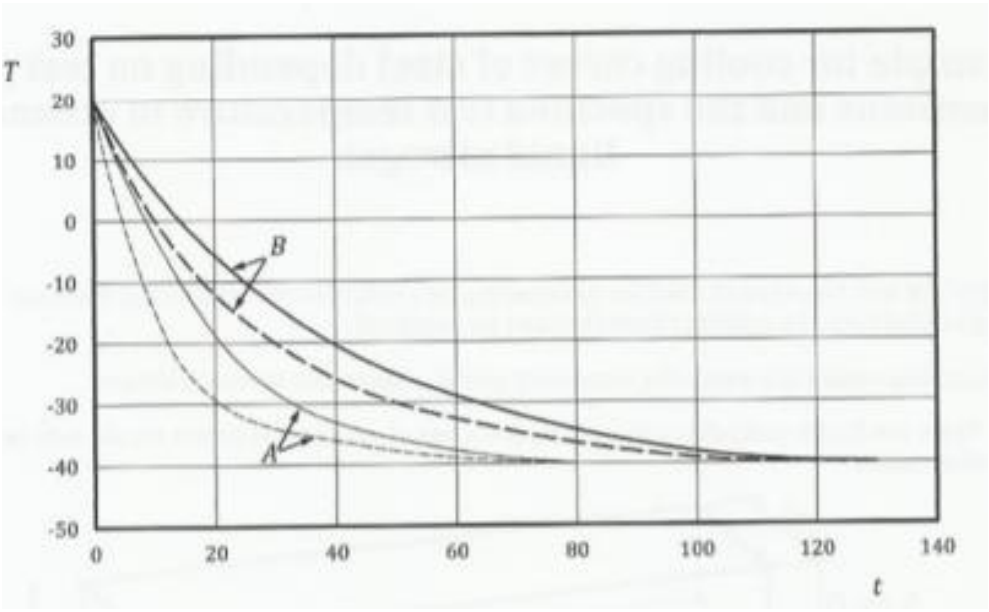
T, °C - temperatura

t, s - vrijeme

---- površina ispitnog uzorka,

___ jezgra ispitnog uzorka

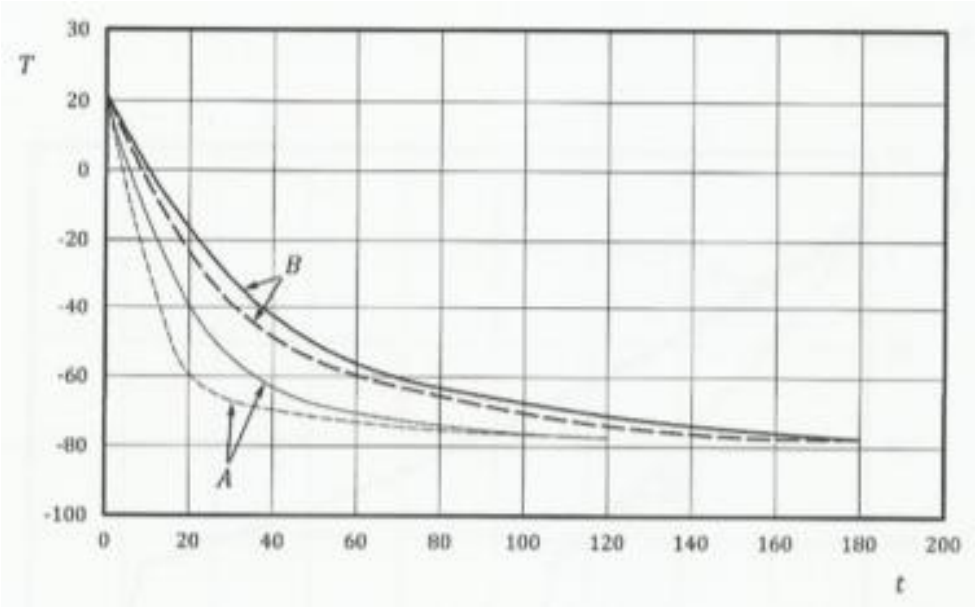
Iz slike 3.5. vidljivo je kako ohlađivanje na temperaturu od -40 °C uvelike ovisi o debljini uzorka, ali je i drastična razlika krivulja hlađenja površine i jezgre uzorka.
Na slici je prikazan uzorak B (15mm) koji se sporije hlad nego uzorak A (5mm), ali je vidljivo kako kod tanjeg uzorka dolazi do velike razlike u brzini hlađenja i temperaturi površine i jezgre tijekom hlađenja. Dok deblji uzorak se usporedno hladi površina i jezgra.



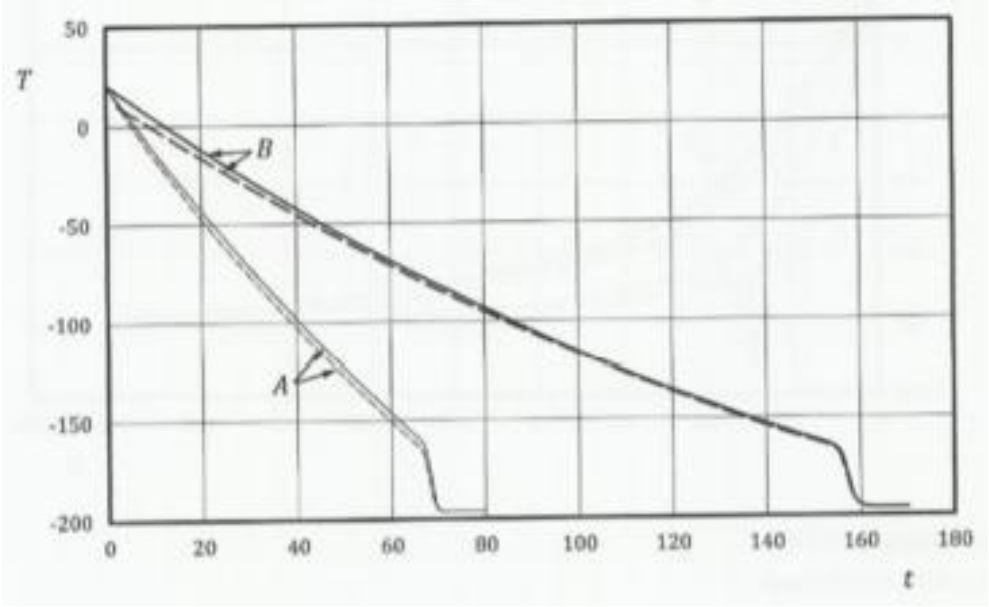
Slika 3.5. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka na -40 °C [12]

Slike 3.6. i 3.7. prikazuju manju razliku između temperature na površini i u jezgri uzorka tijekom smanjivanja temperature.

Na slikama 3.6. i 3.7. vidimo da snižavanjem temperature dovodimo da skoro usporednog hlađena površine i jezgre. S tim da vidimo na slici 3.6. kako i dalje kod tanjih uzoraka postoji razlika u brzini hlađenja i temperaturi površine i jezgre tijekom hlađenja. Na slici 3.7. je vidljivo kako jako niske temperatura je dovela do skoro iste brzine hlađenja površine i jezgre.



Slika 3.6. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka u etanolu na -78 °C [12]



Slika 3.7. Krivulje ohlađivanja ispitnog uzorka u tekućem dušiku na -196 °C [12]

Krivulje prikazane slikama 3.5., 3.6. i 3.7. prikazuju ohlađivanje ispitnih uzoraka sa sobne temperature sve do temperature ispitivanja. Krivulje ohlađivanja uzoraka ovise o

debljinama uzoraka, a temperature su mjerene na površini ispitnog uzorka i u jezgri uzorka. Eksperimentalnim putem krivulje su utvrđivane i one nam mogu dati okvirne podatke o vremenu hlađenja ispitnih uzoraka od čelika na određene temperature. Kada se koriste mediji za ohlađivanje u plinovitom, a ne tekućem obliku vremena ohlađivanja mogu biti puno duža [12].

3.4. Ohlađivanje epruvete

Glavni zahtjev sredstva za ohlađivanje epruvete je taj što mora biti sposoban ohladiti epruvetu na definiranu temperaturu (*T*), odnosno na temperaturu ispitivanja. Tablica 3.1. pokazuje dodatne oznake bitne za ovaj dio rada [13].

Tablica 3.1. Oznake temperatura epruveta, ispitivanja i vrijeme ohlađivanja [17]

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
T	°C	definirana temperatura ispitivanja
T_i	°C	naznačena temperatura ili izmjerena temperatura na površini epruvete
t_s	min	vrijeme ohlađivanja

Statička vlačna ispitivanja pri sniženim temperaturama najčešće se provode u plinovitim ili tekućim sredstvima. Sredstvo za ohlađivanje ima velik utjecaj na vrijeme ohlađivanja i na prijenos topline tijekom ispitivanja (izotermički, adijabatski). Također postoji mogućnost da utječe i na rezultate ispitivanja [13].

Ovisno o definiranoj temperaturi ispitivanja normom su određena maksimalna dopuštena odstupanja po duljini ispitnog uzorka, tj. razlika između T i Ti . što je prikazano u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Dopuštena odstupanja ovisno o temperaturama ispitivanja [17]

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

Podjela sredstava za ohlađivanje su sljedeća:

- Komora za ohlađivanje
- Ekspanzija stlačenih plinova (npr. CO_2, N_2)
- Uranjanje u tekući dušik ili tekući helij

3.4.1. Hlađenje pomoću komora za ohlađivanje

Komore za ohlađivanje epruveta su različitih dimenzija ovisno o proizvođaču. Postoje dvije tehnike ohlađivanja epruveta unutar komore. Pomoću tekućeg dušika (LN_2), a vrijednosti temperatura koje se njime postižu variraju od sobne temperature do -150 ℃. Druga opcija je pomoću tekućeg ugljikovog dioksida (CO_2) vrijednosti temperatura kreću se od sobne temperature pa do -70 ℃. Medij za ohlađivanje se prska po komori pokraj ventilatora koji osigurava njegovu jednoliku distribuciju unutar komore. Kontroler temperature regulirati će protok tekućine kroz zavojnu cijev unutar komore, prilikom dosezanja željene temperature. Kod korištenja tekućeg dušika komora mora sadržavati ventil za stabiliziranje tlaka koji prilikom dosezanja vrijednosti tlaka od 3 bar otpušta višak tlaka iz komore. Također sastoji i od ispušnog ventila koji odvodi otpadne plinove na zato predviđena mjesta. Najbitniji zahtjev na izradu i dizajn komora je uz postizanje određene temperature i mogućnost korištenja svih vrsta ekstenzometara (kontaktnih i bezkontaktnih) [12].

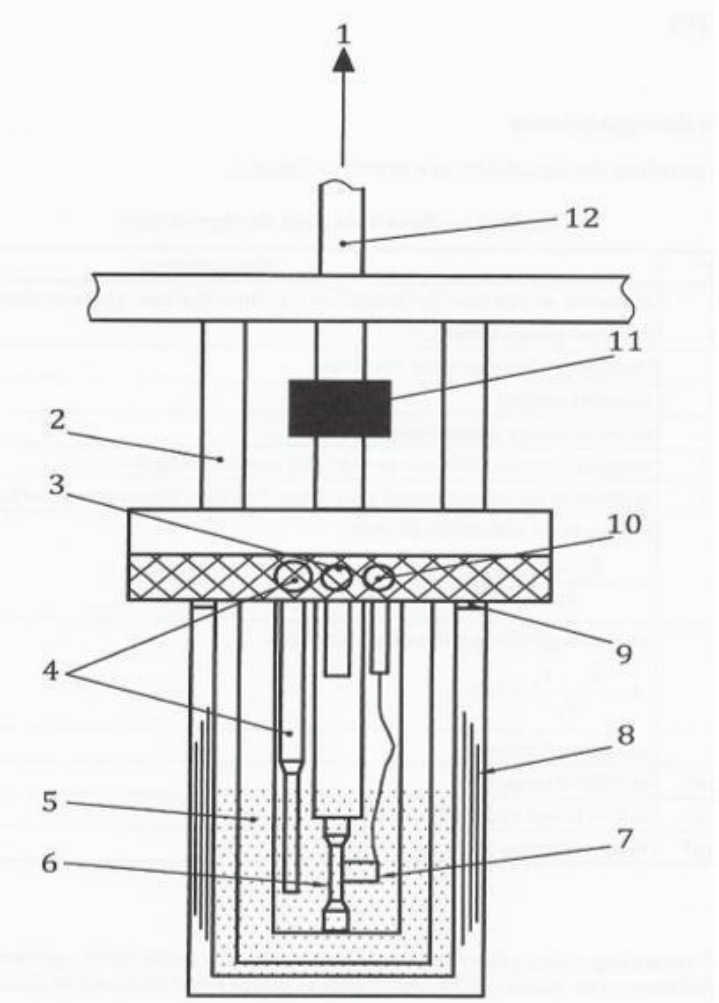
Slika 3.8. prikazuje komoru za ohlađivanje za statičko vlačno ispitivanje na sniženim temperaturama montiranu na kidalicu iza koje se nalazi spremnik sa sredstvom za ohlađivanje.



Slika 3.8. Komora za ohlađivanje ugrađena na kidalicu [5]

3.4.2. Hlađenje pomoću tekućeg helija i dušika

Ispitivanje se može provoditi i u tekućem vodiku (H) sa istom opremom. Najbitnije je epruvetu držati potpuno uronjenu u medij tijekom cijelog ispitivanja kao i kod tekućeg helija. Norma HRN EN ISO 6892-4:2015 definira statičko vlačno ispitivanje na temperaturama ispod -196 ℃ sve do -269 ℃. Tijekom testa epruveta se nalazi u kriostatu (laboratorijski toplinski izolirani uređaj koji služi za postizanje i održavanje vrlo niskih temperatura) potpuno uronjena u tekući helij (LHe) na nominalnoj brzini ispitivanja. Ispitivanje se provodi do loma radi utvrđivanja mehaničkih svojstava materijala. Tekući helij nalazi se u tzv. Dewarovoj posudi (izolacijska posuda najčešće od stakla unutar koje je vakuum). Ispitivanja su kratkotrajna zbog izdržljivosti posude, a ako su ispitivanja dužeg trajanja može se primijeniti kriostat napravljen od dvije Dewarove posude (jedna u drugoj). Mehaničke pumpe osiguravaju vakuum za vrijeme ispitivanja. Shematski prikaz kriostata prikazan je slikom 3.9. zajedno sa svim objašnjenim dijelovima [14].



Slika 3.9. Shematski prikaz kriostata za statičko vlačno ispitivanje u tekućem heliju [12]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio se sastoji od provedenih ispitivanja i analize dobivenih rezultata. Cilj eksperimentalnog dijela rada je analizirati povezanost mehaničkih svojstava dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem pri različitim sniženim temperaturama. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Ispitivano je po pet epruveta na četiri različite temperature.

4.1. Plan ispitivanja

U sklopu rada provedeno je statičko vlačno ispitivanje pri različitim temperaturama (sobnoj (20 °C), nula (0 °C) i pri dvije snižene (-20 °C i -60 °C)). Tijekom statičkog vlačnog ispitivanja dobivani su podatci o mehaničkim svojstvima pojedinih materijala na konkretnim temperaturama, dobiveni praćenjem deformacije na ekstenzometru. Na temelju dobivenih rezultata donesen je zaključak o utjecaju sniženih temperatura na promatrana mehanička svojstva.

Plan ispitivanja određen je u nekoliko koraka:

1. Odabir epruveta i njihova obrada (u dogovoru s jednom tvrtkom iz Zagreba)
2. Ohlađivanje epruveta
3. Statičko vlačno ispitivanje
4. Analiza rezultata

Odabir i izrada ispitnih uzoraka je provedena s jednom tvrtkom iz Zagreba koja je željela verificirati svoj postupak izrade uzoraka te svoja ispitivanja na određenim temperaturama.
Ispitivanja su provedena nekonvencionalnom metodom. Ispitni uzorci su se hladili pomoću odgovarajućih smjesa za snižavanje temperature (smjesa suhog leda i alkohola ili tekući dušik), u odstupanju ±5 °C.

Korištene su proporcionalno duge epruvete okruglog poprečnog presjeka. Dimenzije i oblik epruveta za statičko vlačno ispitivanje na sniženim temperaturama određen je normom HRN EN ISO 6892-1:2016. Epruvete kakve su korištene tijekom ispitivanja prikazane su na slici 4.1.



Slika 4.1. Epruveta za statičko vlačno ispitivanje na sniženim temperaturama

4.2. Oprema za ispitivanje

Statička vlačna ispitivanja pri sniženim temperaturama provedena su na univerzalnoj kidalici u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Na slici 4.2. prikazana je kidalica WPM. Tijekom ispitivanja rezultati su grafički zabilježeni na računalo s TireTest programom spojenim na kidalicu, koje je prikazano na slici 4.3.



Slika 4.2. Hidraulična kidalica WPM EU 40 MOD

Podatci o hidrauličkoj kidalici prikazanoj na slici 4.2.:

- Proizvođač: VEB WPM, Njemačka
- Tip: hidraulička
- Model: EU 40 MOD
- Mjerno područje: 0-400 kN
- Serijski broj: 990.06/83/85
- Klasa 1 (sukladno normi HRN EN ISO 7500-1:2018).



Slika 4.3. Računalo s TireTest programom spojenim na kidalicu

Produljenje do granice razvlačenja mjereno je nasadnim ekstenzometrom MFA 2 koji je prikazan na slici 4.4.



Slika 4.4. Nasadni ekstenzometar [16]

Podatci o nasadnom ekstenzometru prikazanom na slici 4.4.:

- Proizvođač: Mess&Feinwerktechnik, Njemačka
- Model: MFA 2
- Razmaknutost ticala: 50 mm
- Hod: 2 mm
- Serijski broj:012872
- Klasa 1 (sukladno normi HRN EN ISO 9153:2012).

Za potrebe kontrole temperature korištena su dva termometra prikazana slikama 4.5. i 4.6.:

- Iskra termomer 21 prikazan na slici 4.5.



Slika 4.5. Iskra termomer 21 [5]

Podatci o Iskri termomeru 21 prikazanog na slici 4.5.:

- Proizvođač: Iskra, Slovenija
- Model: Termomer 21
- Mjerno područje: (-220) – (+800) °C
- Odziv: 2 min

- Fluke 568 IR Thermometer prikazan na slici 4.6.



Slika 4.6. Fluke 568 IR Thermometer

Podatci o Fluke 568 IR Thermometer prikazanog na slici 4.6.:

- Proizvođač: Fluke Corporation, SAD
- Model: Fluke 568 IR Thermometer
- Rezolucija: 0,1 °C
- Mjerno područje: (-40) - (+800) °C
- Odziv: 7 s

4.3. Proces hlađenja epruvete

Proces hlađenja nije u skladu s normom pošto je provedeno ispitivanje u istim uvjetima koji se provode pri usporednim ispitivanjima u tvrtci koja je željela usporedbu rezultata.

Epruvete su hlađene 30 minuta u smjesi suhog leda i alkohola kako bi se postigle temperature od 0 °C i -20 °C. Zbog vremena potrebnog za uklanjanje epruvete iz smjese, te postavljanja na kidalicu, epruvete koje su ohlađivane na -20 °C temperatura smjese suhog leda i alkohola je iznosila -25 °C. Tijekom vremena postavljanja u kidalicu epruveta je postigla vrijednost od -20 °C što je kontrolirano termometrom. Slika 4.7. prikazuje primjer ohlađivanja epruveta pomoću smjese suhog leda i alkohola.



Slika 4.7. Hlađenje pomoću suhog leda i alkohola

Epruveta hlađena u tekućem dušiku (-196 °C) koji se nalazio u spremniku prikazanim na slici 4.8., postigla je temperaturu od -60 °C. Kada je epruveta izvađena iz tekućeg dušika pratila se temperatura i prilikom postizanja vrijednosti od -65 °C postavljena je u prihvatima kidalice za početak ispitivanja. Na slici 4.9. je prikazana epruveta nakon što je izvađena iz tekućeg dušika i ostavljena na sobnoj temperaturi.



Slika 4.8. Spremnik za tekući dušik



Slika 4.9. Epruveta hlađena u tekućem dušiku

Prilikom postavljanja ispitnog uzorka na kidalicu pri samom ispitivanju bilo je potrebno oko 30 sekundi. Postoji i gubitak površinske temperature koji je bio oko 6 °C, mjereno uređajem Fluke. Moguće su oscilacije pri ispitivanju zbog toga što je temperatura u komori za hlađenje pri ispitivanju bila je u granicama ±5 °C. Ispitivanje nije bilo moguće provesti sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO 6892-3:2015 zbog narednih provjera, te velikog odziva što također stvara veliku nesigurnost mjerenja temperature. Zaključuje se da će se ta odstupanja odraziti i na sve ostale mjerne rezultate.

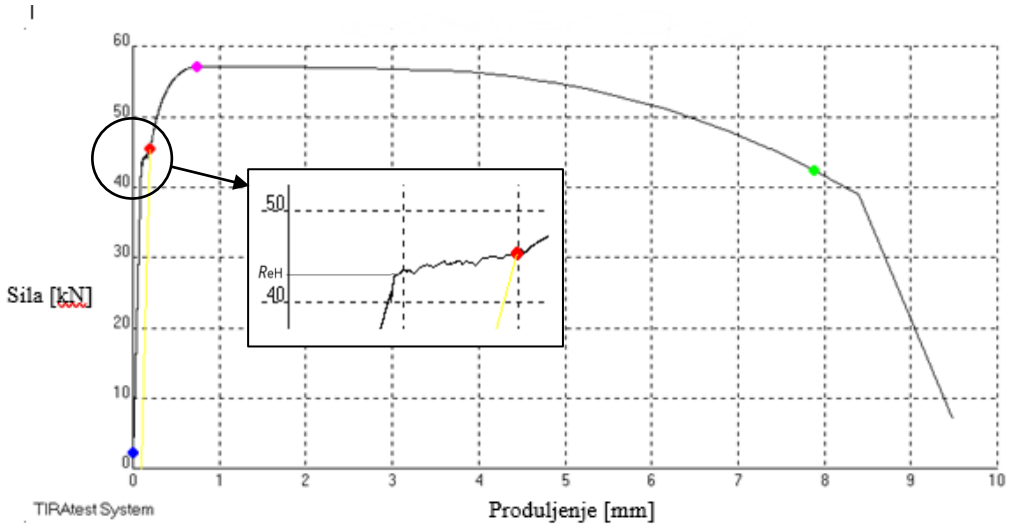
4.4. Rezultati dobiveni nakon ispitivanja

Rezultati ispitivanja dani su kroz tablice i dijagrame sila-produljenje zabilježenim Tire Test programom na računalu. Uz vrijednosti mehaničkih svojstava materijala mjereno je i vrijeme koje je potrebno da dođe do loma epruvete. Ispitivanja na sobnoj temperaturi su označena grupom A, na 0 °C s grupom B, na -20 °C označena grupom C, na -60 °C grupom D.

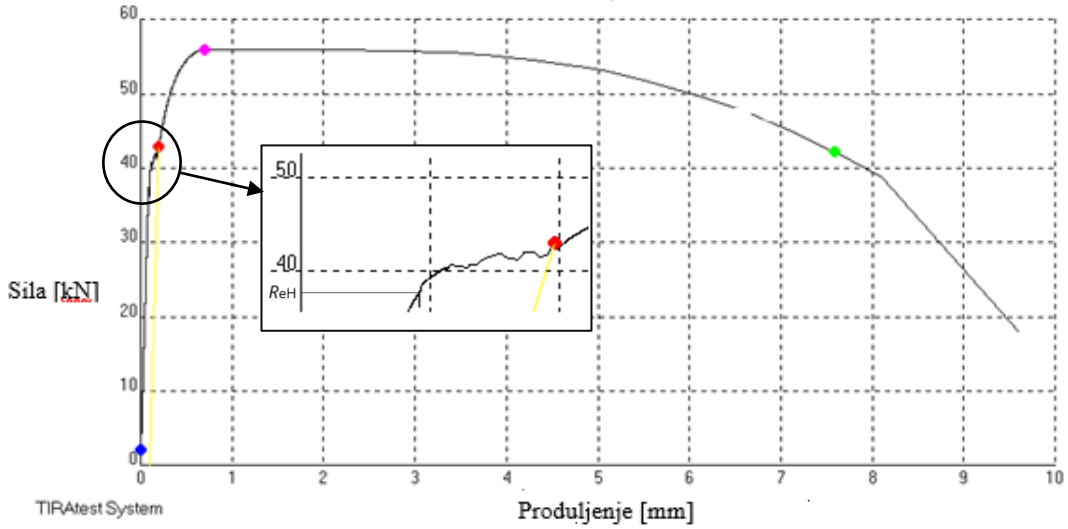
4.4.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa A

Rezultati ispitivanja pri sobnoj temperaturi (oko 20 °C) prikazani su kroz dijagrame (slika 4.10.) i tablicu 4.1. u ovisnosti o brzini ispitivanja. U tablici 4.1. su također određene srednje vrijednosti mehaničkih svojstava koje će se analizirati. Na slici 4.10.

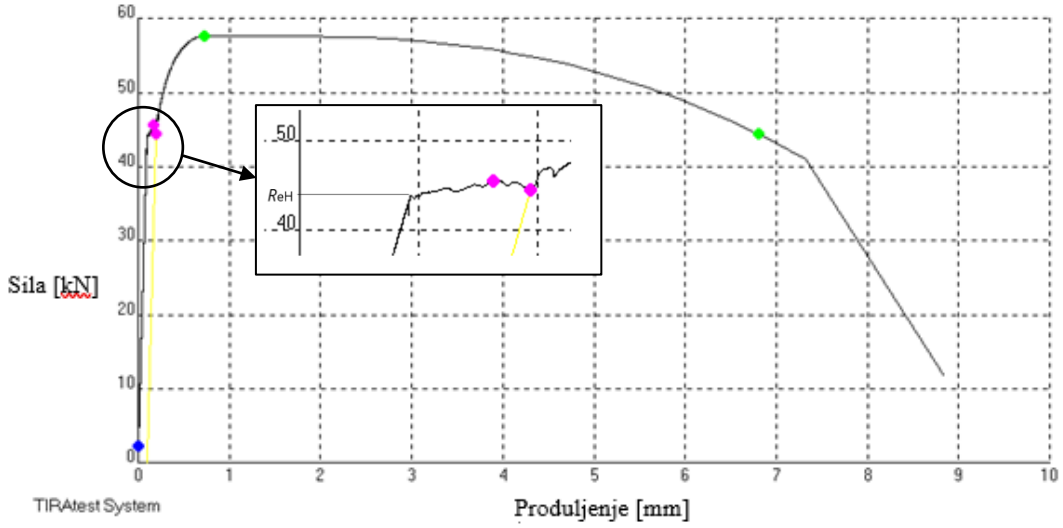
dani su dijagrami sila-produljenje dobiveni softwerskim paketom TireTest na pet epruveta pri različitim brzinama ispitivanja.



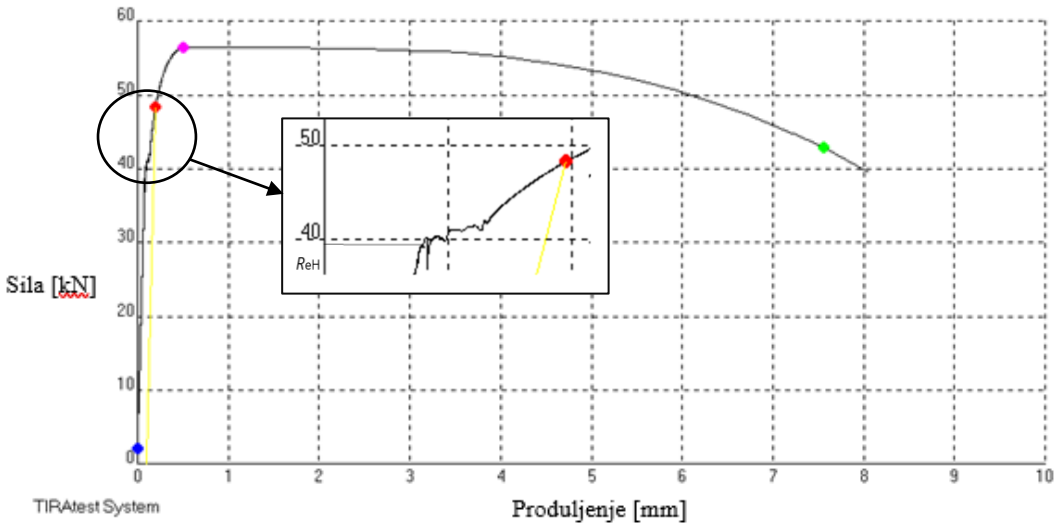
a)



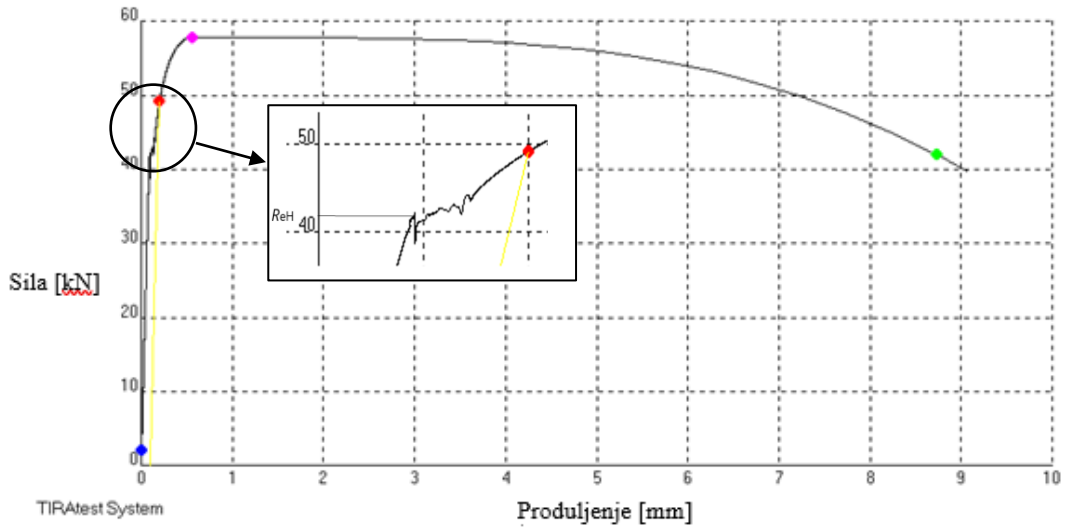
b)



c)



d)



e)

Slika 4.10. Dijagrami sila-produljenje grupa A

a) uzorak 1

b) uzorak 2

c) uzorak 3

d) uzorak 4

e) uzorak 5

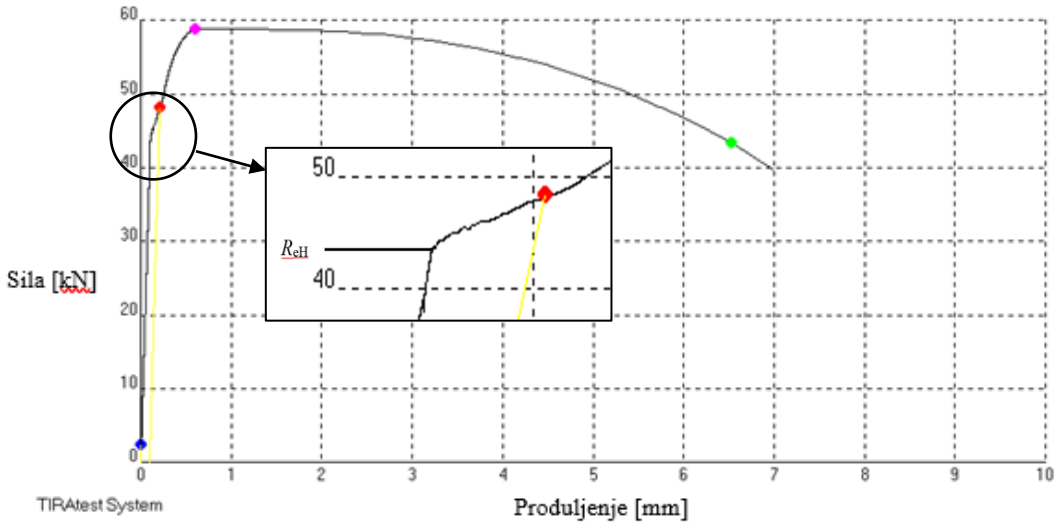
U tablicama 4.1. prikazane su vrijednosti mehaničkih svojstava.

Tablica 4.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa A

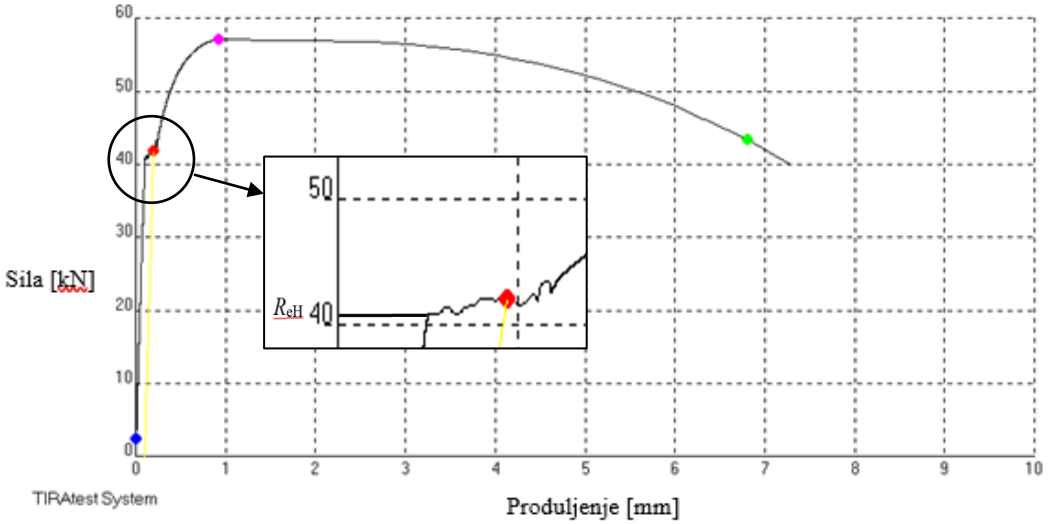
Broj epruvete	Vrijeme ispitivanja [min]	R_{eH} [N/mm²]	R_{eL} [N/mm²]	R_m [N/mm²]	F_m [kN]	F_k [kN]	A [%]
A1	2,48	368,68	365,87	504,75	57,09	42,40	16,5
A2	2,33	345,76	342,28	494,60	55,94	42,22	15,9
A3	2,48	371,22	369,69	509,80	57,66	44,36	14,5
A4	2,51	341,51	337,86	498,82	56,42	42,79	15,9
A5	3,00	358,06	350,68	511,53	57,85	41,98	17,8
Σ A	2,55	357,05	353,28	503,90			16,2
stand. devijacija		11,88	12,60	7,18			1,07

4.4.2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa B

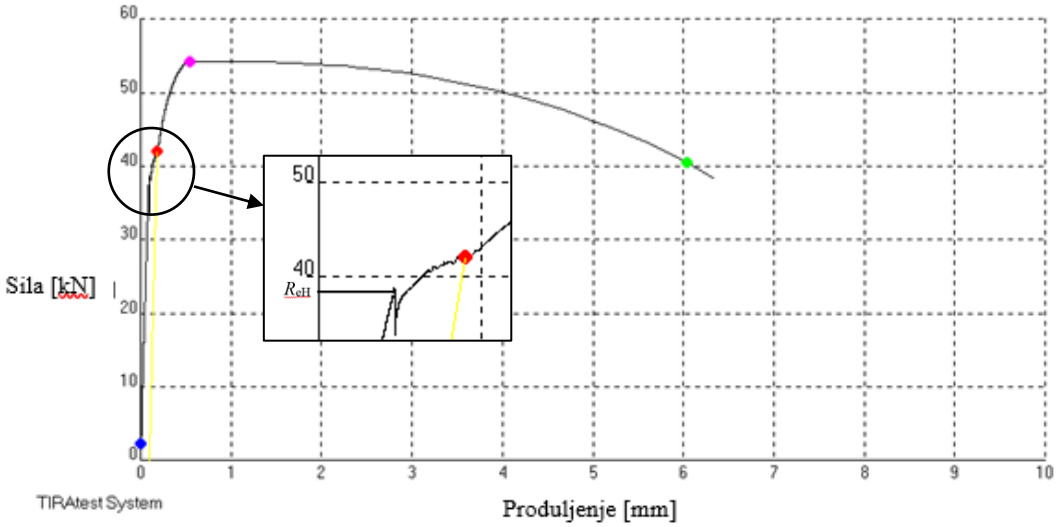
Rezultati ispitivanja pri temperaturi od 0 °C prikazani su u tablici 4.2. Na slici 4.11. prikazani su dijagrami sila-produljenje dobiveni softwerskim paketom TireTest na pet epruveta pri različitim vremenima ispitivanja.



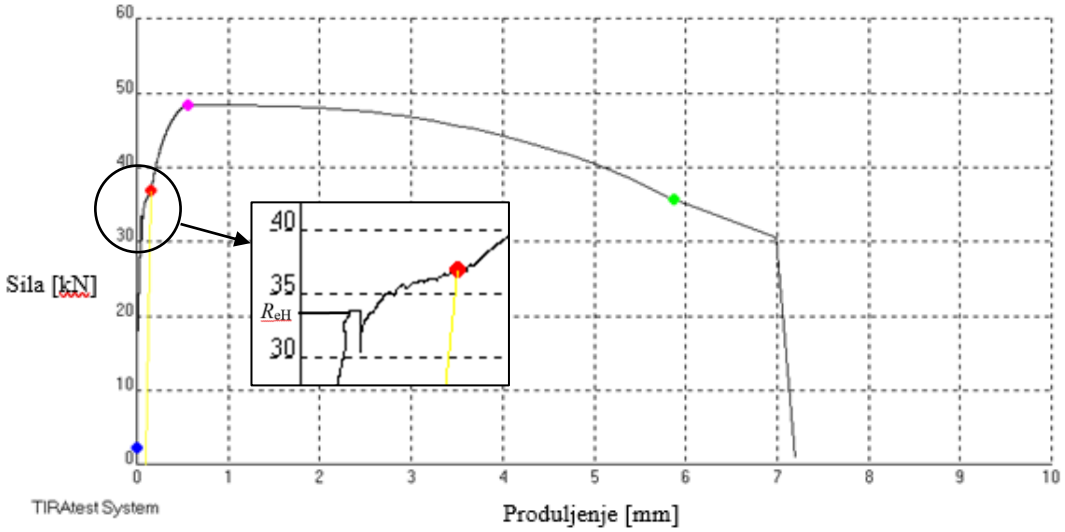
a)


Sila [kN]
Produljenje [mm]
TIRAtest System
ReH
50
40

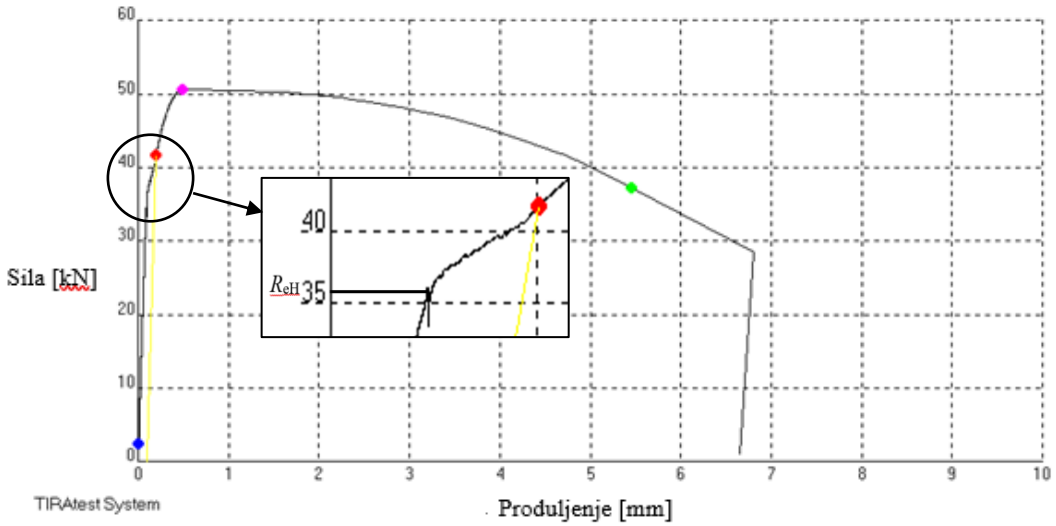
b)


Sila [kN]
Produljenje [mm]
TIRAtest System
ReH
50
40

c)


Sila [kN]
Produljenje [mm]
TIRAtest System
ReH
40
35
30

d)



e)

Slika 4.11. Dijagrami sila-produljenje grupa B

a) uzorak 1

b) uzorak 2

c) uzorak 3

d) uzorak 4

e) uzorak 5

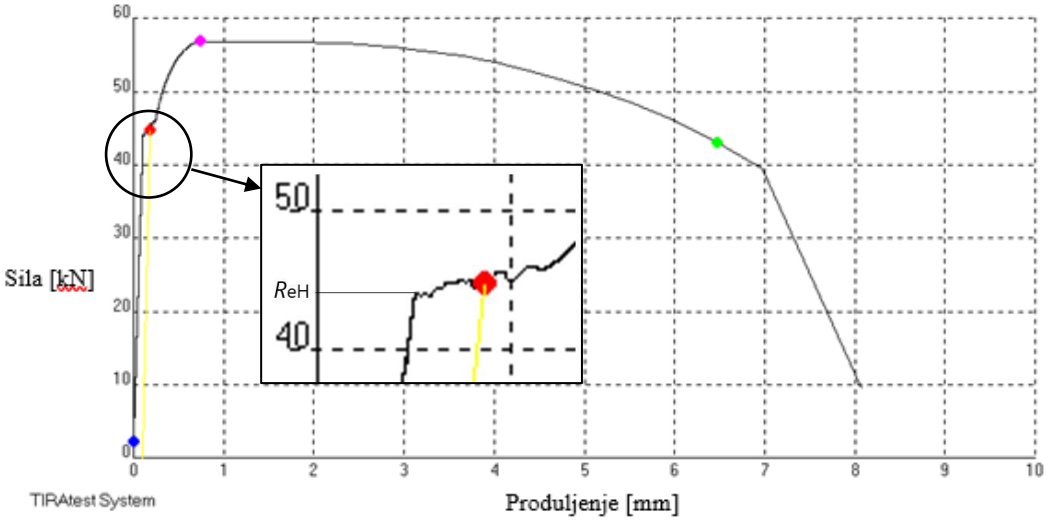
U tablici 4.2. su dane vrijednosti mehaničkih svojstava.

Tablica 4.2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa B

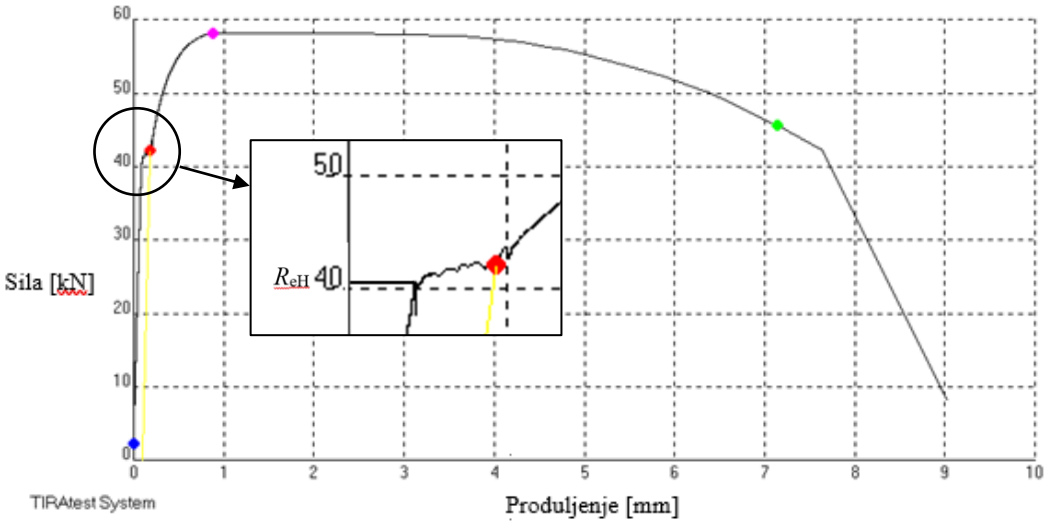
Broj epruvete	Vrijeme ispitivanja [min]	R_{eH} [N/mm²]	R_{eL} [N/mm²]	R_m [N/mm²]	F_m [kN]	F_k [kN]	A [%]
B1	2,51	371,65	369,86	519,78	58,79	43,34	14
B2	2,43	353,31	345,42	504,26	57,03	43,33	14,5
B3	2,52	327,42	302,21	479,72	54,25	40,45	12,7
B4	2,38	297,71	294,82	427,54	48,35	35,61	14
B5	2,44	310,10	304,67	446,71	50,52	37,21	13,7
Σ B	2,46	332,04	323,40	475,60	53,79	39,99	13,8
stand. devijacija		27,21	29,19	34,45			0,60

4.4.3. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa C

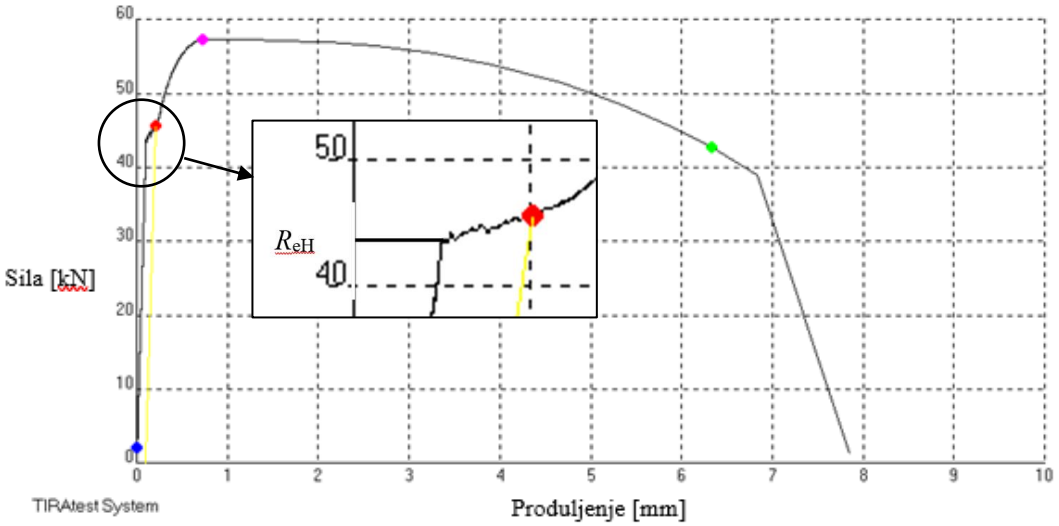
Rezultati ispitivanja pri temperaturi od - 20 °C prikazani su u tablicu 4.3. Na slici 4.12. prikazani su dijagrami sila-produljenje dobiveni softwerskim paketom TireTest na pet epruveta pri različitim vremenima ispitivanja. Uzorci su se hladili pomoću suhog leda i alkohola.



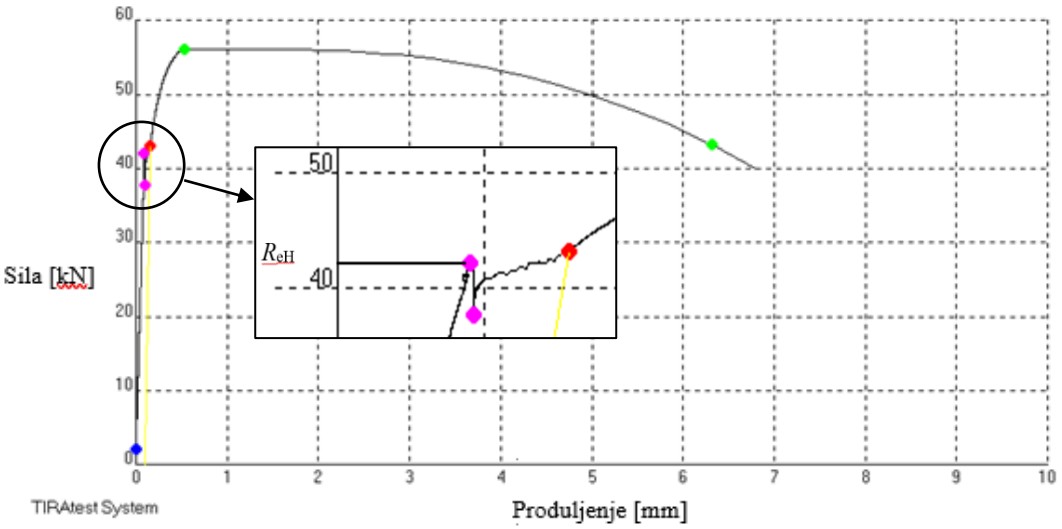
a)



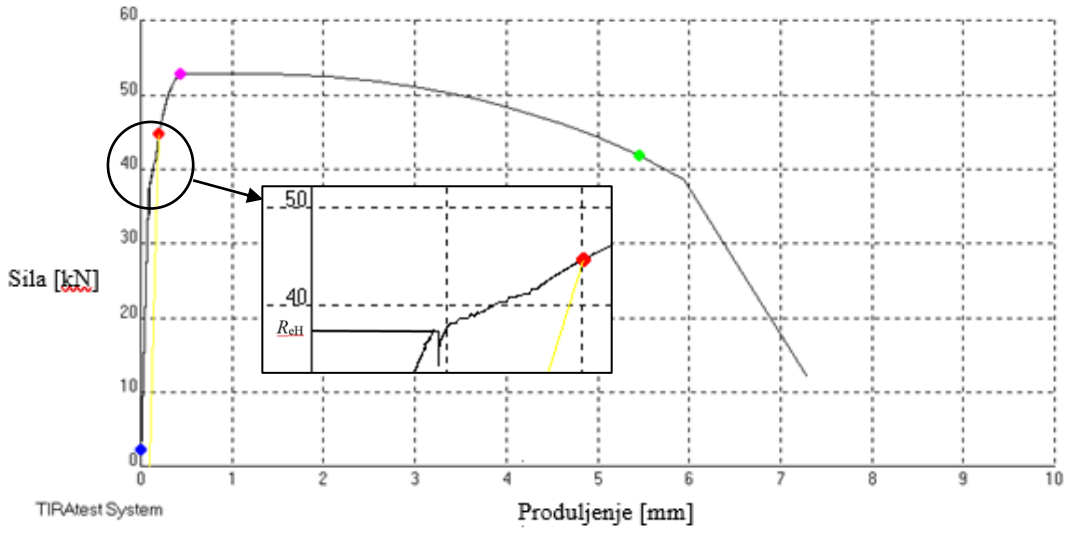
b)


Sila [kN]
Produljenje [mm]
TIRAtest System
ReH
50
40

c)


Sila [kN]
Produljenje [mm]
TIRAtest System
ReH
50
40

d)



e)

Slika 4.12. Dijagrami sila-produljenje grupa C

a) uzorak 1

b) uzorak 2

c) uzorak 3

d) uzorak 4

e) uzorak 5

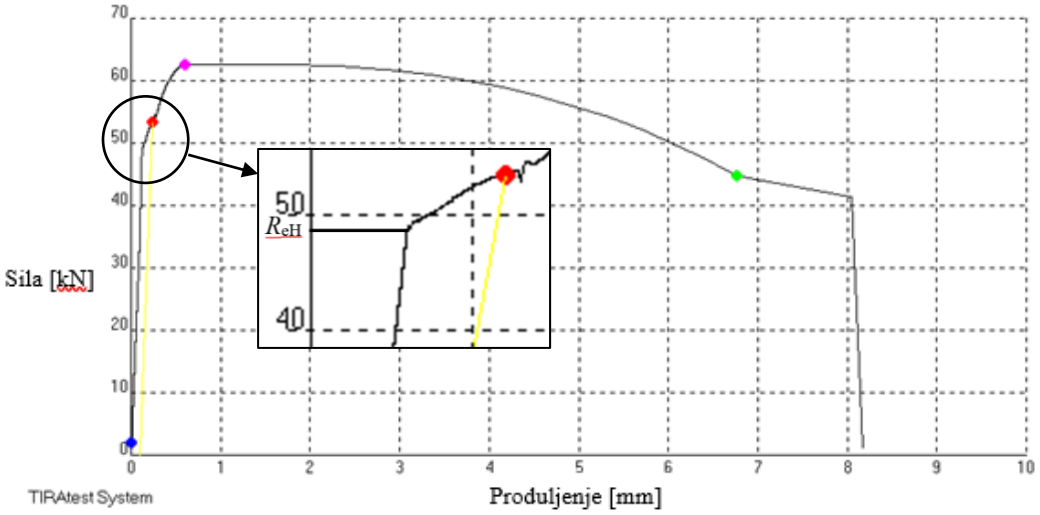
U tablici 4.3. prikazane su vrijednosti mehaničkih svojstava.

Tablica 4.3. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa C

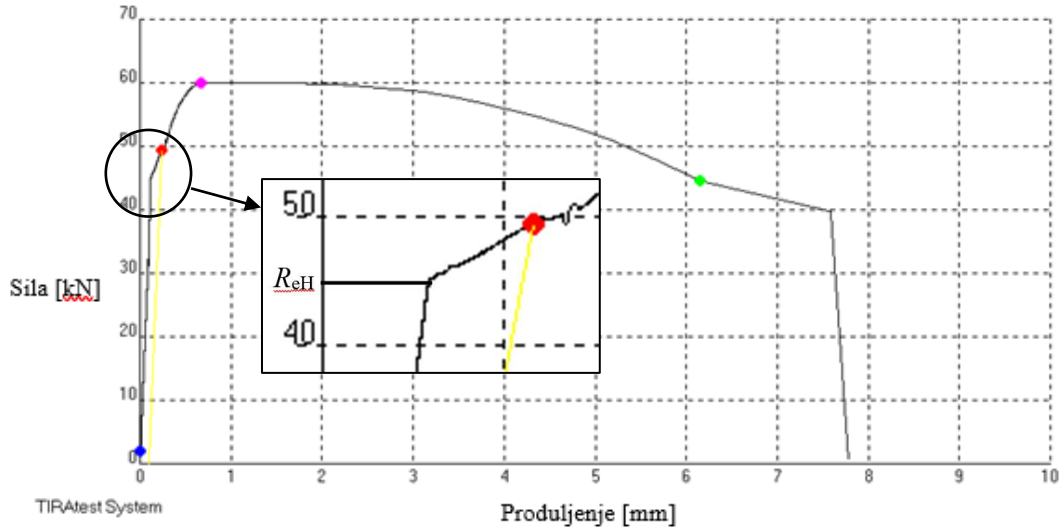
Broj epruvete	Vrijeme ispitivanja [min]	R_{eH} [N/mm²]	R_{eL} [N/mm²]	R_m [N/mm²]	F_m [kN]	F_k [kN]	A [%]
C1	2,44	378,27	373,34	502,54	56,84	43,02	13,9
C2	2,54	352,04	342,87	513,81	58,11	45,62	15,2
C3	2,50	382,26	378,61	506,30	57,26	42,66	13,8
C4	2,52	338,71	319,61	496,15	56,11	43,23	13,8
C5	2,40	332,17	323,68	467,12	52,83	41,77	12
Σ C	2,48	356,69	347,62	497,18	56,23	43,26	13,5
stand. devijacija		20,32	24,50	16,08			1,02

4.4.4. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa D

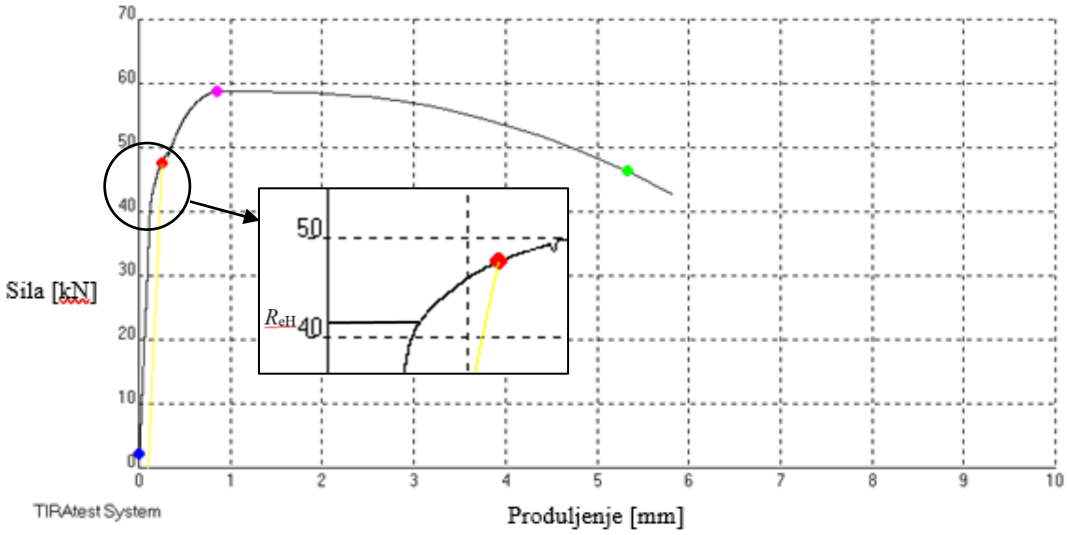
Rezultati ispitivanja pri temperaturi od - 60 °C prikazati su u tablicu 4.4. Na slici 4.13. prikazani su dijagrami sila-produljenje dobiveni softwerskim paketom TireTest na pet epruveta pri različitim vremenima ispitivanja. Uzorci su se hladili pomoću tekućeg dušika.



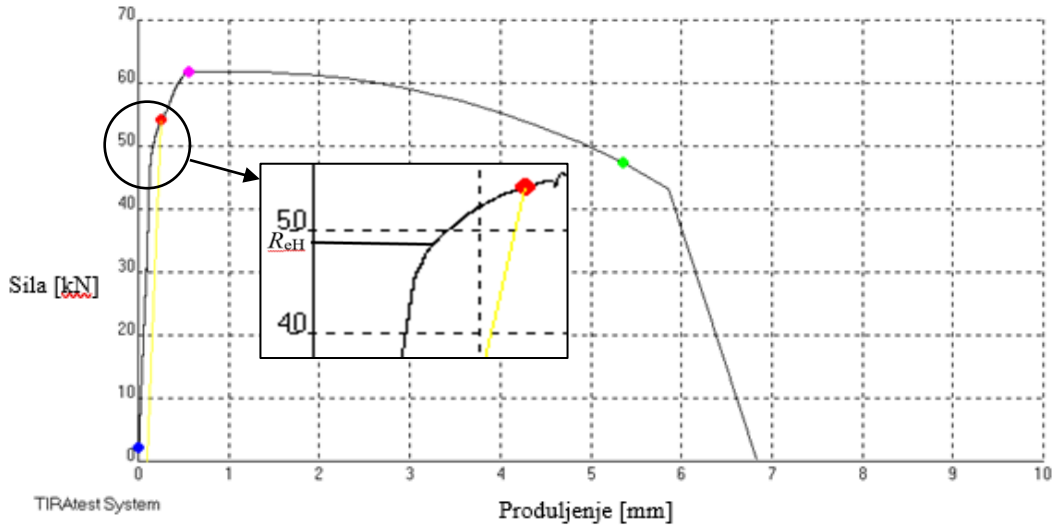
a)



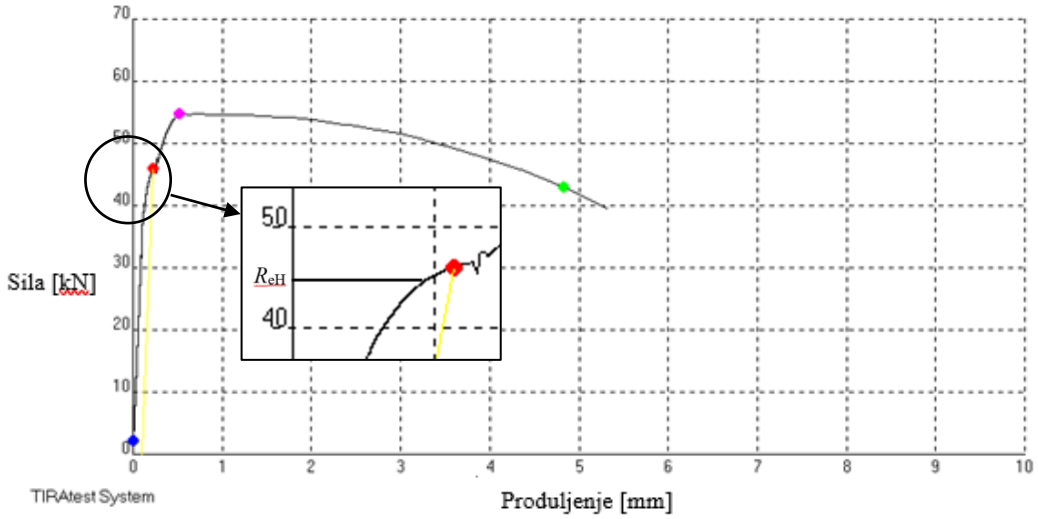
b)


Sila [kN]
Produljenje [mm]
TIRAtest System
50
40
ReH

c)


Sila [kN]
Produljenje [mm]
TIRAtest System
50
40
ReH

d)



e)

Slika 4.13. Dijagrami sila-produljenje grupa D

a) uzorak 1

b) uzorak 2

c) uzorak 3

d) uzorak 4

e) uzorak 5

U tablici 4.4. prikazane su vrijednosti mehaničkih svojstava.

Tablica 4.4. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja grupa D

Broj epruvete	Vrijeme ispitivanja [min]	R_{eH} [N/mm²]	R_{eL} [N/mm²]	R_m [N/mm²]	F_m [kN]	F_k [kN]	A [%]
D1	3,00	417,32	411,97	554,35	62,70	44,74	16
D2	3,00	390,66	384,13	530,83	60,04	44,57	15
D3	2,51	347,54	340,75	498,90	56,42	44,10	11,6
D4	3,04	399,75	400,17	519,55	58,76	46,41	11,7
D5	2,50	386,59	384,21	547,13	61,88	47,43	10,5
Σ D	2,81	388,37	384,24	530,15	59,96	45,45	13
stand. devijacija		22,99	24,14	19,82			2,14

U tablici 4.5. prikazana je usporedba rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava za sve grupe uzoraka

Tablica 4.5. Srednje vrijednosti grupa A, B, C i D

Grupa	R_{eH} [N/mm²]	R_{eL} [N/mm²]	R_m [N/mm²]	A [%]
A	357,05	353,28	503,90	16,2
B	332,04	323,40	475,60	13,8
C	356,69	347,62	497,18	13,5
D	388,37	384,24	530,15	13

5. ANALIZA REZULTATA

Analiza rezultata provedena je na temelju provedenih ispitivanja. Statičko vlačno ispitivanje metalnih materijala pri radu u eksploatacijskim uvjetima na sniženim temperaturama od velike je važnosti zbog davanja informacija o mehaničkim svojstvima materijala. Na rezultate ispitivanja utječe veći broj čimbenika, a neki od njih su: okolišni uvjeti, rukovanje (znanje, iskustvo), mjerna oprema (vrsta, tip), ispitni uzorci (obrada, vrsta materijala), obrada podataka (zaokruživanje, interpolacija), software (pogreška). Cilj rada je utvrditi kako snižena temperatura utječe mehanička svojstva materijala pri sniženim temperaturama a sporedno će se vidjeti koji još čimbenici tijekom ispitivanja utječu na same rezultate ispitivanja.

Za svaki materijal potrebno je analizirati vlačnu čvrstoću, gornju i donju granicu razvlačenja te istezljivost. Teorijske vrijednosti dobivene iz literature nalažu rast vlačne čvrstoće i granice razvlačenja, te pad istezljivosti.

Prilikom analize rezultata uspoređivane su vrijednosti donje i gornje granice razvlačenja te vlačna čvrstoća i istezljivosti u odnosu na snižavanje temperature. Analizom mjesta loma vidljivo je da su uzorci pucali uglavnom na prvoj trećini duljine, što je prikazano na slici 5.1.



a) **b)**



c) **d)**

Slika 5.1. Uzorci nakon ispitivanja

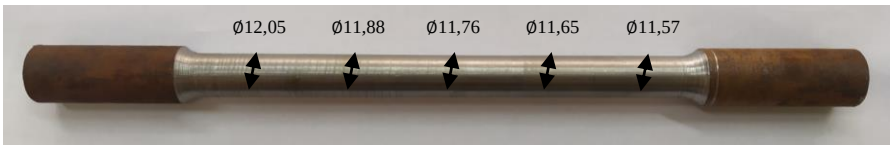
a) grupa A

b) grupa B

c) grupa C

d) grupa D

Lom ispitnih uzoraka izvan srednje trećine tijela ukazuje da prilikom izvođenja statičkog vlačnog ispitivanja nije sve provedeno po pravilima struke ili da izrada ispitnih uzoraka nije bila kvalitetno provedena. Mjerenjem je uočeno veliko odstupanje promjera tijela ispitnog uzorka što se može vidjeti i na slici 5.2. na kojoj je prikazan rezervni ispitni uzorak, s izmjerenim vrijednostima promjera na pet pozicija ispitnog uzorka. Zatim je prikazana uvećana slika 5.3. ispitnog uzorka te su vidljiva risevi na tijelu ispitnog uzorka koji su nastali tijekom



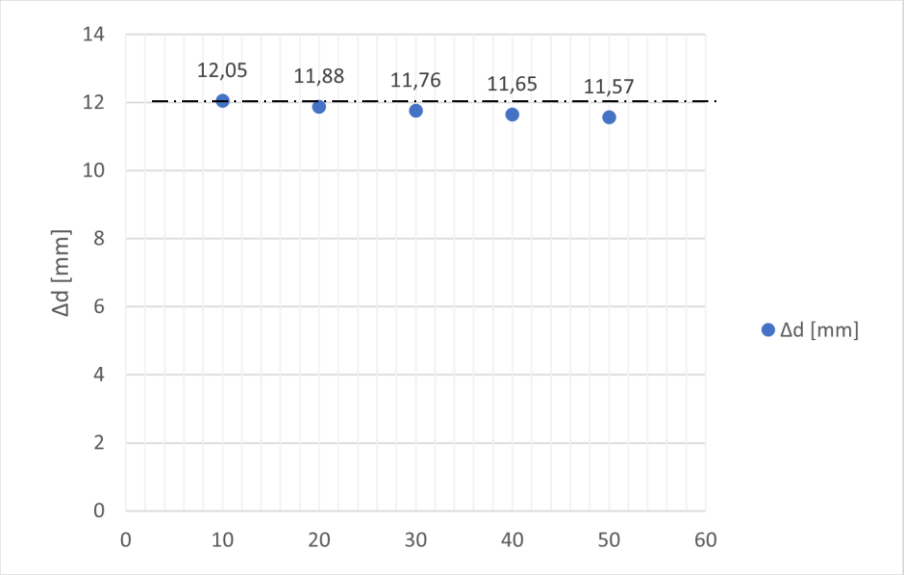
Slika 5.2. Promjeri uzorka



Slika 5.3. Oštećenja na ispitnom uzorku

Ovi risevi mogu uzrokovati zarezna djelovanja koja također utječu na rezultat statičkog vlačnog ispitivanja. Zbog toga je provedeno mjerenje hrapavosti površine tijela ispitnog uzorka a rezultati su prikazani u tablici 5.1.

Slici 5.4. grafički prikazuje promjenu početnog promjera tijela ispitnog uzorka (Δd [mm]).



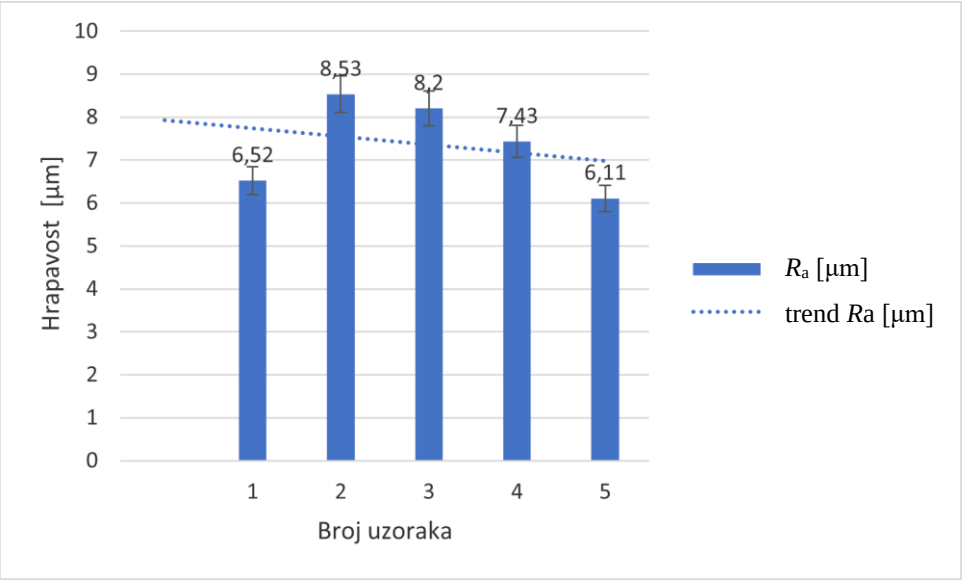
Slika 5.4. Promjena početnog presjeka tijela ispitnog uzorka

U tablici 5.1. je prikazana hrapavost (R_a) uzorka iz koje je jasno vidljivo da izrađeni ispitni uzorci ne ispunjavaju zahtijevane kriterije stanja površine sukladno normi HRN EN ISO 6892-1:2018.

Tablica 5.1. Hrapavost uzorka

Broj uzorka	1	2	3	4	5
R_a [μm]	6,52	8,53	8,20	7,43	6,11

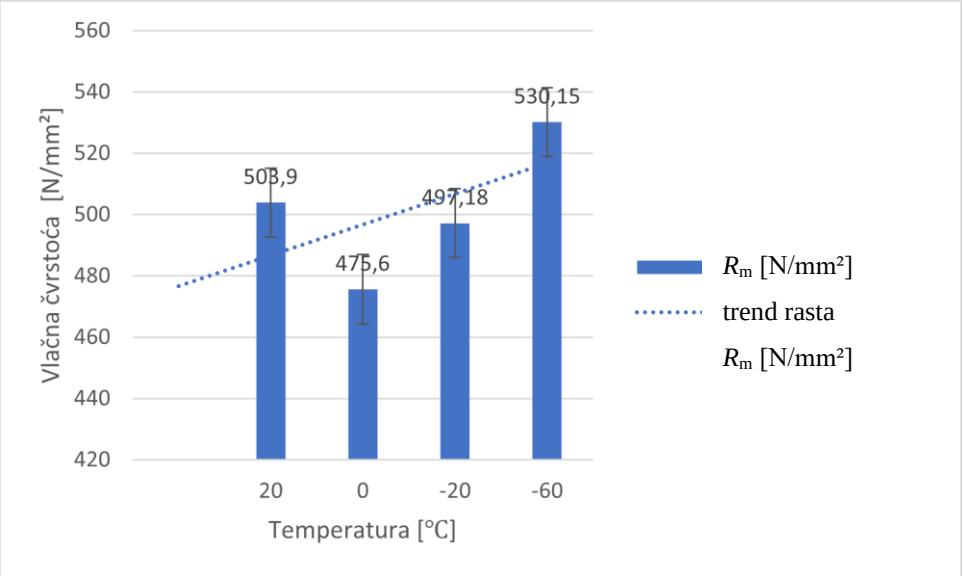
Na slici 5.5. je dijagramski prikazana hrapavost jednog uzorka i uočeno je kako je hrapavost veća u srednjem dijelu ispitnog uzorka.



Slika 5.5. Histogram hrapavosti

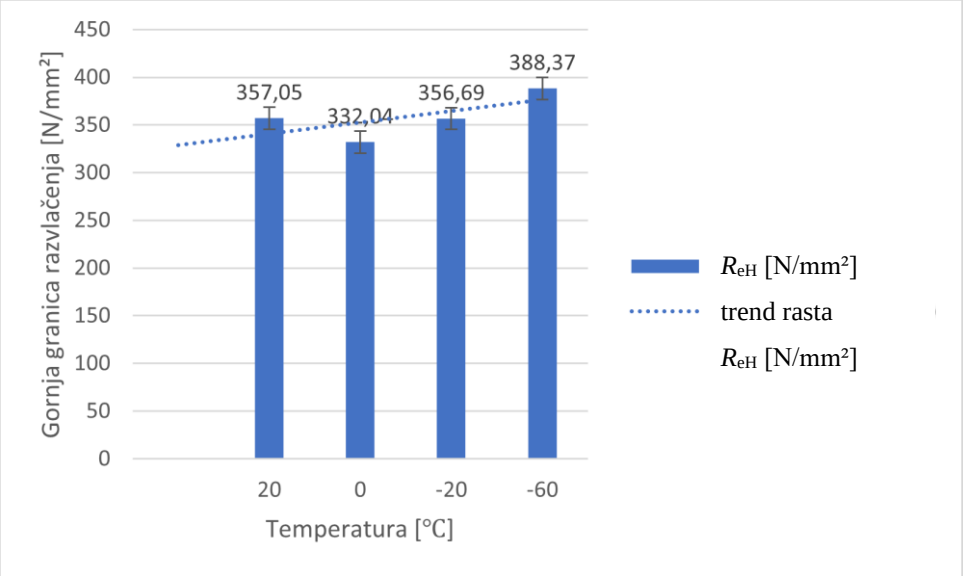
Histogramima na slikama 5.6., 5.7., 5.8. i 5.9. se pokazao trend porasta ili pada analiziranih vrijednosti mehaničkih svojstava na određenim temperaturama ispitivanja. Isprekidana linija na histogramima predstavlja tendenciju razvoja rezultata.

Iz histograma usporednih vrijednosti vlačne čvrstoće prikazanog slikom 5.6. zaključeno je da prilikom snižavanja temperature otpornost materijala postaje veća. Iz histograma vlačne čvrstoće prikazanog slikom 5.6. zaključeno je da prilikom snižavanja temperature vrijednosti vlačne čvrstoće čelika rastu.



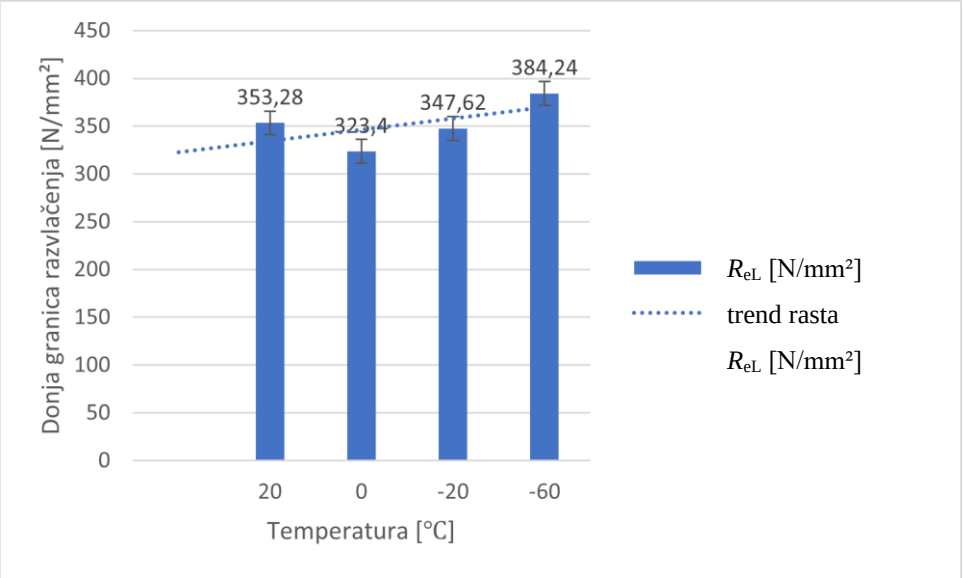
Slika 5.6. Histogram vlačne čvrstoće

Zaključujući prema dobivenim rezultatima ispitivanja prikazanih slikom 5.7. blago rastu vrijednosti gornje granice razvlačenja tijekom snižavanja temperature.



Slika 5.7. Histogram gornje granice razvlačenja

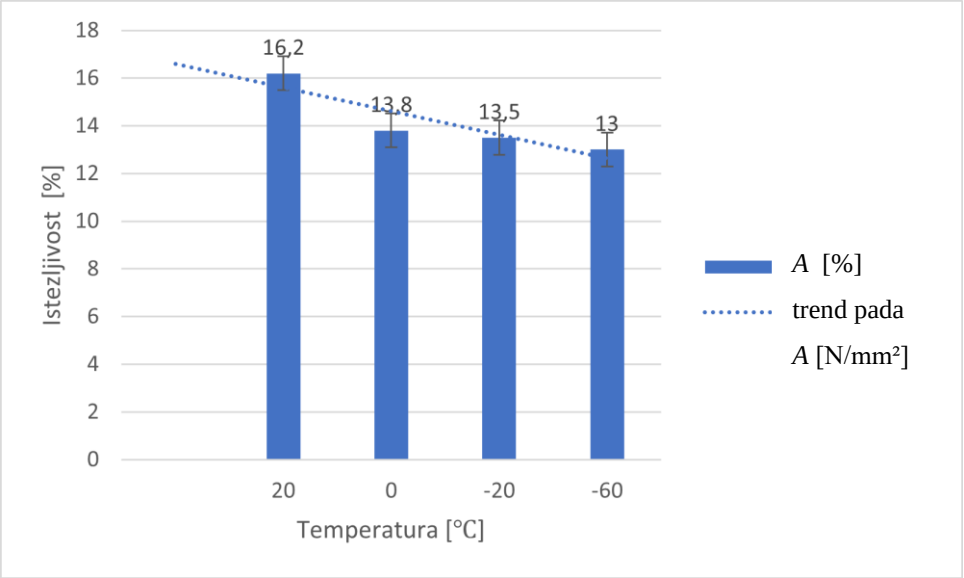
Prema dobivenim rezultatima ispitivanja može se uočiti blagi rast vrijednosti donje granice razvlačenja tijekom snižavanja temperature što je prikazano na slici 5.8



Slika 5.8. Histogram donje granice razvlačenja

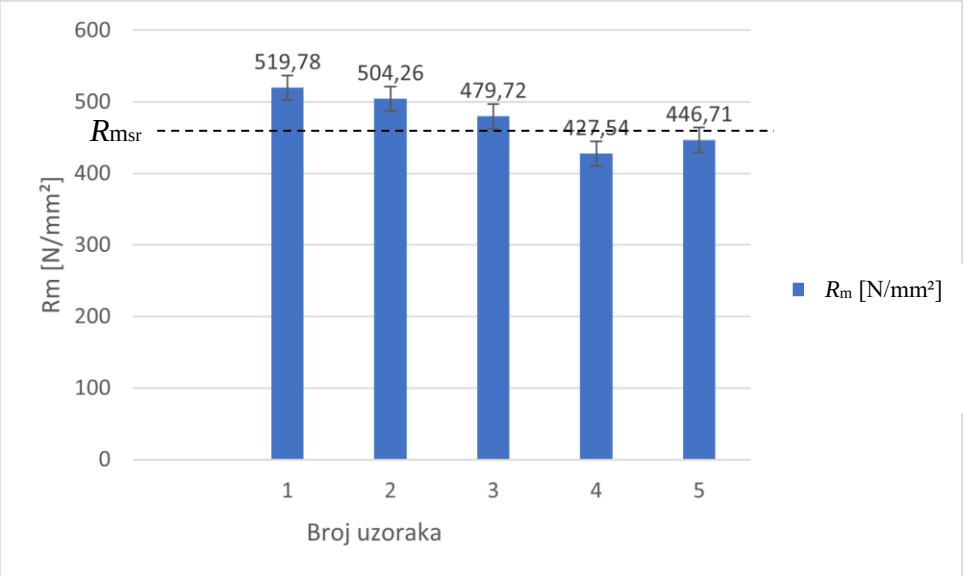
Prema dobivenim rezultatima ispitivanja prikazanih slikom 5.9. zaključuje se da blago

pada vrijednost istezljivosti tijekom snižavanja temperature.



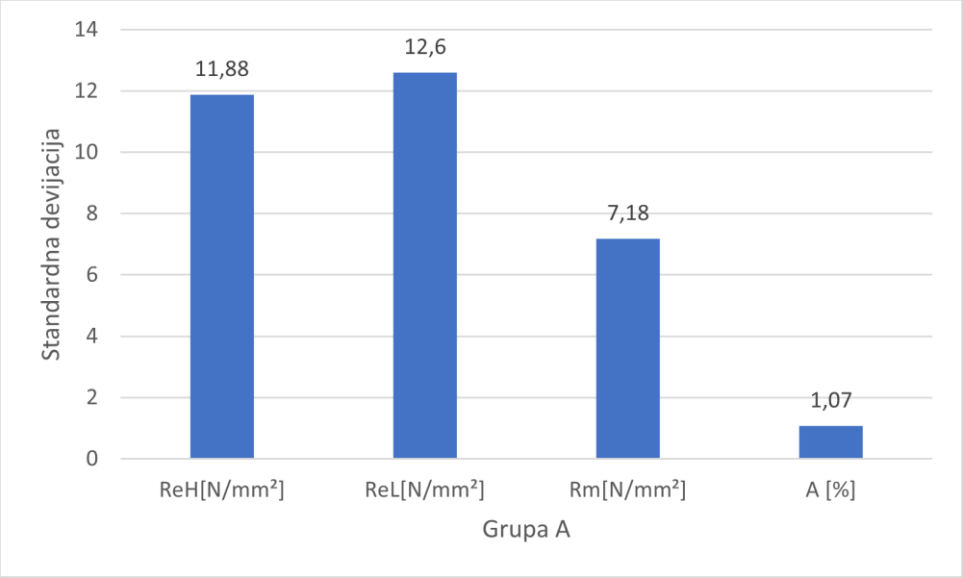
Slika 5.9. Histogram istezljivosti

Na slici 5.10. je prikazano rasipanje rezultata prilikom mjerenja vlačne čvrstoće.



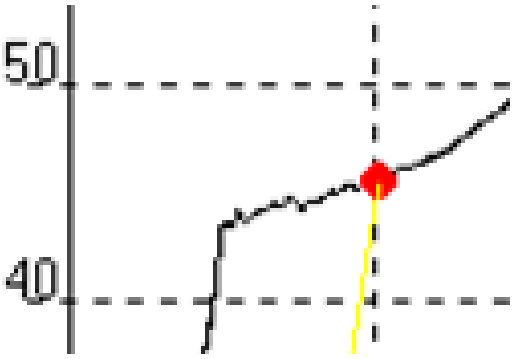
Slika 5.10. Histogram rasipanja rezultata za grupu B

Ovo se može primijetiti kod svih grupa ispitnih uzoraka. Na slici 5.11. je prikazano standardno odstupanje (devijacija) za svaku veličinu i za svaku grupu ispitivanja.



Slika 5.11. Histogrami standardni devijacija za grupu A

Iz histograma na slici je vidljivo da je najveće odstupanje kod određivanja donje granice razvlačenja. No, kada se pogleda dijagram kidanja (slika 5.12.) u području početka plastičnog razvlačenja uzorka uočava se da sila i u tom dijelu ima trend rasta što nam onemogućava točno određivanje donje granice razvlačenja. Ova pojava se posebno odražava kod nižih temperatura ispitivanja što se donekle može pripisati smanjenju plastičnosti materijala uslijed snižavanja temperature. Za analizu ove pojave trebalo bi provesti dodatna ispitivanja ali na uzorcima koji su izrađeni sukladno kriterijima norme HRN EN ISO 6892-1:2018.



Slika 5.12. Područje tečenja materijala

6. ZAKLJUČAK

Sukladno međunarodnim normama koje reguliraju provođenje mehaničkih ispitivanja u radu je opisano statičko vlačno ispitivanje pri sobnoj i sniženim temperaturama. Materijali u eksploataciji su često izloženi radu pri sniženim temperaturama kao što su npr. petrokemija i naftna industrija, građevina, strojarstvo, automobilska industrija, itd. Primjena je najčešća u strojarstvu odnosno znanosti o materijalima. S velikom preciznošću i točnošću moraju se odrediti mehanička svojstva materijala zbog odgovornosti koje će nositi u određenim proračunima.

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

- Snižena temperatura ima značajan utjecaj na mehanička svojstva metalnih materijala. Iz rezultata ispitivanja je vidljivo da sva mehanička svojstva mijenjaju svoje vrijednosti snižavanjem temperature, stoga je potpuno jasno da pri primjeni materijala u uvjetima sniženih temperatura ovo treba imati uzeti u obzir pri proračunima i dimenzioniranju konstrukcija ili strojnih dijelova.
- Snižavanjem temperature povećavaju se vlačna čvrstoća, gornja i donja granice razvlačenja dok se istezljivost smanjuje. Općenito, možemo reći da snižavanjem temperature dolazi do porasta čvrstoće materijala ali i opadanja deformabilnosti.
- Kvaliteta obrade ispitnih uzoraka (površine tijela) ima značajan utjecaj na rezultate ispitivanja što je vidljivo u radu jer su ti utjecaji još izraženiji pri nižim temperaturama nego na sobnim. Sva zarezna djelovanja utječu na rezultate ispitivanja.
- Odstupanjem od oblika ispitnog uzorka može dovesti do loma izvan srednje trećine tijela ispitnog uzorka, što značajno utječe na sve rezultate ispitivanja a pogotovo na istezljivost materijala. Stoga je potrebno prije ispitivanja provesti detaljnu analizu dimenzija uzorka na više mjesta i to evidentirati zapisima.

Ispitivanje mehaničkih svojstava sukladno normi HRN EN ISO 6892-3:2015 je složen proces u kojem ima jako puno utjecajnih faktora koji izazivaju određene nesigurnosti. Neki od

značajnijih utjecajnih faktora su:

- čistoća i jednoličnost kemijskog sastava ispitnih uzoraka
- način postavljanje uzorka u prihvatne naprave kidalice te njihov izbor
- postizanje i održavanje određene snižene temperature
- utjecaj snižene temperature na dodatnu opremu pri ispitivanju (ekstenzometar)
- brzina ispitivanja, itd.

LITERATURA

[1] Franz, M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.

[2] Franz M.; Ćorić D.: Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.

[3] Hrvatski zavod za norme; Engleska verzija norme HRN EN ISO 6892-1:2016

[4] https://www.testresources.net/images/accessories/sensors/e3442-axial-extensometer-1.jpg (pristupljeno srp. 15, 2020)

[5] Šojat A.: Statičko vlačno ispitivanje pri sniženim temperaturama, završni rad, Zagreb, 2019.

[6] http://vtsnis.edu.rs/wpcontent/plugins/vtspredmeti/uploads/Odredjivanje%20modula%20elasticnosti.jelena.pdf (pristupljeno ruj. 10, 2020)

[7] https://www.ametektest.com/learningzone/library/articles/a-users-guide-to-videoextensometers (pristupljeno sij. 01, 2021)

[8] https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05106G_Sample_BuyNow.pdf/b4838889-d1dc-4bf5-a8bd-d6771fa36bf8 (pristupljeno sij. 09, 2021)

[9] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: Svojstva i primjena materijala / Filetin, Tomislav (ur.) Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

[10] Ivušić V.; Franz M.; Španiček Đ.; Ćurković L.: Materijali 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

[11] Hurlich A.: Low temperature metals, Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators, 1968.

[12] Hrvatski zavod za norme; Engleska verzija norme HRN EN ISO 6892-3:2015

[13] Kraut, B.: „Strojarski priručnik“, Tehnička knjiga Zagreb, 1988.

[14] Hrvatski zavod za norme; Engleska verzija norme HRN EN ISO 6892-4:2015

[15] Mahenić L.: Metode određivane Youngovog modula elastičnosti metalnih materijala, završni rad, Zagreb, 2018.

[16] Jokić D.: Procjena mjerne nesigurnosti rezultata statičkog vlačnog ispitivanja, diplomski rad, Zagreb, 2016.

[17] Hrvatski zavod za norme; Engleska verzija norme HRN EN ISO 6892-2:2018