

Mehanička svojstva brodograđevnog čelika pri niskim temperaturama

Ljubičić, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2010

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:235:741188>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Petar Ljubičić

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj

Doc. Dr. sc. Boris Ljubenkov

Petar Ljubičić

Zagreb, 2010.

Sažetak rada

U ovom radu ispitana su mehanička svojstva austenitnog čelika AISI 316L, koji se koristi za izradu tankova LNG brodova. Temperatura ukapljenog prirodnog plina pri prijevozu iznosi -165°C , pa se na brodove postavljaju visoki zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava materijala strukturnih skladišnih prostora, kao i nestrukturnih tankova pri niskim temperaturama.

Mehanička svojstva materijala zauzimanju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, a u ovom radu su statičkim vlačnim pokusom provedena ispitivanja brodograđevnog čelika pri niskim temperaturama, koje su postignute u komorama za temperiranje uzoraka, prema normama i *Pravilima* Hrvatskog registra brodova. Ispitivanja mehaničkih svojstava provedena su na temperaturama 22°C , -40°C , -80°C i -165°C , te su određene iznosi modula elastičnosti E , konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$, vlačne čvrstoće R_m , deformacija ε_m i istežljivosti A za svaku definiranu temperaturu. U radu je dan kratki opis brodova za prijevoz ukapljenog prirodnog plina, opisan je statički vlačni pokus te rad kidalice i laserskog ekstenzometra.

Ključne riječi: mehanička svojstva materijala, statički vlačni pokus, niske temperature, laserski ekstenzometar

Keywords: mechanical properties, tensile test, low temperature, laser speckle extensometers

Summary

In this paper are examined mechanical properties of austenitic steel AISI 316L, which used for tanks of LNG ships. The temperature of liquefied natural gas in transport is -165°C , and that is why high requirements, in terms of mechanical properties of tank materials at low temperatures, must be set on ships.

Mechanical properties of materials are especially rated among order physical and chemical material properties, and this paper discusses the mechanical properties of austenitic steel, which are examined by implementing static tensile tests, at low temperature that were reached in the temperes samples chambers, following norms and rules of the Croatian Register of Shipping. Testing of mechanical properties were performed at temperatures 22°C , -40°C , -80°C and -165°C , and values of elasticity modulus E , conventional strech border $R_{p0,2}$, yield strength R_m , deformation ε_m and elongation A for aech defined temperatures were determined. It also shortly describes types of ships for liquefied natural gas transport, tensile test, work testing machine for tensile test and laser speckle extensometers.

Keywords: mechanical properties, tensile test, low temperature, laser speckle extensometers

Sadržaj

| | |
|---|-----|
| Popis oznaka..... | ii |
| Popis slika..... | iii |
| Popis tablica | iv |
| 1. Uvod..... | 1 |
| 1.1. Hipoteza rada..... | 3 |
| 2. Prijevoz ukapljenog plina morem..... | 4 |
| 2.1. Značajke ukapljenog plina..... | 4 |
| 2.2. Brodovi za prijevoz ukapljenog plina..... | 6 |
| 2.3. Usporedba značajki sfernog i membranskog tipa spremnika | 13 |
| 3. Općenito o zahtjevima i propisima za brodove za prijevoz ukapljenog plina..... | 14 |
| 3.1. Opći zahtjevi Hrvatskog registra brodova | 15 |
| 3.2. Opseg nadzora | 16 |
| 3.3. Materijali za izradu tankova | 18 |
| 3.4. Austenitni nehrđajući čelik | 19 |
| 4. Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala..... | 20 |
| 4.1. Statički vlačni pokus..... | 21 |
| 4.2. Statički vlačni pokus pri sniženim temperaturama | 27 |
| 4.3. Epruvete za ispitivanje..... | 28 |
| 5. Provedba eksperimenta..... | 30 |
| 5.1. Ispitni uređaji i oprema | 30 |
| 5.2. Laserski ekstenzometar..... | 31 |
| 5.3. Postupak ispitivanja..... | 36 |
| 6. Rezultati ispitivanja..... | 38 |
| 6.1. Ispitivanje na sobnoj temperaturi (22°C)..... | 39 |
| 6.2. Ispitivanje na temperaturi -40°C..... | 40 |
| 6.3. Ispitivanje na temperaturi -80°C..... | 41 |
| 6.4. Ispitivanje na temperaturi -165°C..... | 42 |
| 6.5. Skupni dijagram ispitivanja | 43 |
| 6.6. Dijagrami ovisnosti mehaničkih svojstava o temperaturi..... | 44 |
| 7. Zaključak | 47 |
| 8. Literatura | 49 |

Popis oznaka

| | | |
|-----------------|----------------------|--|
| A | [%] | - istezljivost, postotna deformacija nakon kidanja |
| d_0 | [mm] | - promjer vrata epruvete |
| d_1 | [mm] | - promjer glave epruvete |
| d_m | [mm] | - pomak na master kameri |
| d_s | [mm] | - pomak na slave kameri |
| E | [N/mm ²] | - modul elastičnosti |
| F_e | [N] | - sila tečenja (razvlačenja) |
| F_k | [N] | - kritična sila |
| F_m | [N] | - maksimalna sila |
| l | [mm] | - ukupna duljina epruvete |
| L_0 | [mm] | - početna mjerna duljina epruvete |
| l_0 | [mm] | - duljina mjernog područja epruvete |
| L_c | [mm] | - duljina uskog paralelnog dijela epruvete |
| L_u | [mm] | - konačna mjerna duljina epruvete |
| r | [mm] | - polumjer zaobljenja epruvete |
| R_e | [N/mm ²] | - granica razvlačenja |
| R_k | [N/mm ²] | - konačno naprezanje |
| R_m | [N/mm ²] | - vlačna čvrstoća |
| $R_{p0,2}$ | [N/mm ²] | - granica razvlačenja |
| S_0 | [mm ²] | - površina poprečnog presjeka epruvete |
| T | [°C] | - temperatura |
| ΔL | [mm] | - produljenje |
| ΔL_u | [mm] | - produljenje nakon kidanja |
| ε | [mm/mm] | - deformacija, istezanje |
| ε_k | [mm/mm] | - postotna deformacija nakon kidanja |
| ε_m | [mm/mm] | - neproporcionalna postotna deformacija pri najvećem opterećenju |
| ε_u | [mm/mm] | - istezanje nakon kidanja |
| σ | [N/mm ²] | - naprezanje |

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 2.1 LNG brod s membranskim spremnicima | 8 |
| Slika 2.2 Shematski prikaz konstrukcije membranskog tanka | 9 |
| Slika 2.3 LNG brod sa sfernim tankovima..... | 12 |
| Slika 2.4 Shematski prikaz strukture LNG broda sa sfernim spremnicima | 12 |
| Slika 3.1 Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika | 19 |
| Slika 4.1 Dijagram sila - produljenje..... | 22 |
| Slika 4.2 Dijagram naprezanje - istežanje | 23 |
| Slika 4.3 Konvencionalna granica razvlačenja..... | 24 |
| Slika 4.4 Dijagram naprezanje – istežanje za različite materijale | 26 |
| Slika 4.5 Utjecaj snižene temperature na granicu razvlačenja općeg konstrukcijskog čelika.. | 27 |
| Slika 4.6 Karakteristične veličine okrugle epruvete..... | 28 |
| Slika 5.1 Statička kidalica Messphysik Beta 50-5 | 30 |
| Slika 5.2 Kamere s laserima montirane na nosaču | 31 |
| Slika 5.3 Lasersko svjetlo na površini epruvete | 32 |
| Slika 5.4 Disperzija laserske zrake pri udaru na optički hrapavu površinu..... | 32 |
| Slika 5.5 Speckle uzorak na okrugloj epruveti | 33 |
| Slika 5.6 Shematski prikaz dijelova sustava Laser Speckle ekstenzometra | 33 |
| Slika 5.7 Prikaz grafičkog sučelja za vrijeme rada laserskog ekstenzometra | 35 |
| Slika 5.8 Epruveta učvršćena u navojne šipke | 36 |
| Slika 5.9 Uređaj za regulaciju temperature | 37 |
| Slika 5.10 Parametri u prozoru Specimen | 37 |
| Slika 6.1 Karakteristične veličine $\sigma - \varepsilon$ dijagrama..... | 38 |
| Slika 6.2 Dijagram mjerenja na sobnoj temperaturi..... | 39 |
| Slika 6.3 Dijagram mjerenja na -40°C | 40 |
| Slika 6.4 Dijagram mjerenja na -80°C | 41 |
| Slika 6.5 Dijagram mjerenja na -165°C | 42 |
| Slika 6.6 Skupni dijagram mjerenja | 43 |
| Slika 6.7 Ovisnost vlačne čvrstoće o temperaturi | 44 |
| Slika 6.8 Ovisnost konvencionalne granice razvlačenja o temperaturi..... | 45 |
| Slika 6.9 Ovisnost istežljivosti o temperaturi..... | 45 |
| Slika 6.10 Ovisnost modula elastičnosti o temperaturi | 46 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 2.1 Udio pojedinih sastojaka u prirodnom plinu | 4 |
| Tablica 2.2 Osnovna fizikalna svojstva najčešćih ukapljenih plinova | 5 |
| Tablica 3.1 Čelici primjenjivi za niske temperature..... | 18 |
| Tablica 3.2 Kemijski sastav nehrđajućeg austenitnog čelika AISI 316L (X2CrNiMo)..... | 19 |
| Tablica 3.3 Mehanička svojstva nehrđajućeg austenitnog čelika AISI 316L, pri 20°C..... | 19 |
| Tablica 4.1 Iznos modula elastičnosti za neke materijale i njihove legure | 26 |
| Tablica 4.2 Preporučene dimenzije epruveta prema Registru | 28 |
| Tablica 4.3 Dimenzije za izradu epruveta | 29 |
| Tablica 4.4 Promjeri i površine poprečnih presjeka epruveta | 29 |
| Tablica 6.1 Rezultati ispitivanja za epruvete na sobnoj temperaturi..... | 39 |
| Tablica 6.2 Rezultati ispitivanja za epruvete pri temperaturi –40°C..... | 40 |
| Tablica 6.3 Rezultati ispitivanja za epruvete pri temperaturi –80°C..... | 41 |
| Tablica 6.4 Rezultati ispitivanja za epruvete pri temperaturi –165°C..... | 42 |
| Tablica 6.5 Rezultati ispitivanja za karakteristične epruvete za svaku temperaturu ispitivanja | 43 |

Zahvaljujem mentorima prof. dr. sc. Janošu Kodvanju i prof. dr. sc. Borisu Ljubenkovu na podršci, dobrim smjernicama i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada

Zahvaljujem asistentu dr. sc. Anti Bakiću na pomoći i korisnim savjetima prilikom pripreme i provedbe ispitivanja , kao i cijelom osoblju Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, obitelji i prijateljima na razumijevanju i potpori tijekom studija

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem tijekom dosadašnjeg školovanja, navedenom literaturom i opremom Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku

1. Uvod

Stalan razvoj svjetskog gospodarstva izravno utječe na rast potrebe za različitim vrstama energije. Među njima, plinovi predstavljaju značajan i ekološki vrlo prihvatljiv izvor energije, te su jedan od najvažnijih energenata današnjice. Pri tome se jednako misli na ukapljene petrolejske plinove (Liquefied Petroleum Gas, LPG), kao što su etan, propan, butan i njihova mješavina etilen, te ukapljeni prirodni plin (Liquefied Natural Gas, LNG) koji je po svom sastavu uglavnom metan.

Prirodni plin, poput nafte, pronalazi se i crpi diljem svijeta na poljima koja sadrže plin ili istovremeno i plin i naftu. Pronalazi se u poroznim dijelovima zemljine kore na velikim nalazištima u Perzijskom zaljevu, zemljama bivšeg Sovjetskog saveza, jugoistočne Azije, južne i sjeverne Amerike i Europe, te se na tim nalazištima i ukapljuje.

Zahvaljujući porastu interesa u svijetu za prirodni plin kao zamjenu za naftu diljem svijeta transportira se cjevovodima ili ukapljen u spremnicima brodova za prijevoz prirodnog (LNG) ili petrolejskih plinova (LPG). Transport prirodnog ukapljenog plina brodom počeo je 50-tih godina uz ostvarenu iznimnu pouzdanost i sigurnost jer do današnjih dana još nije bilo slučajeva prijavljenog pucanja ili propuštanja tankova. Prilikom prijevoza plina u spremnicima brodova, plin se prevozi u ukapljenom stanju, jer se gustoća plina povećava snižavanjem temperature, pa se uz isti kapacitet spremnika može prevesti veća količina.

Temperatura ukapljenog prirodnog plina pri prijevozu iznosi do -165°C , pa se na brodove za prijevoz ukapljenog plina postavljaju visoki zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava, čvrstoće konstrukcije, izvedbe zavarenih spojeva te izolacije skladišta.

Posljednjih godina isporuka ukapljenog plina morskim putem je postala veoma privlačna zahvaljujući porastu interesa u svijetu za prirodni plin kao zamjenu za naftu i u svijetu se sve više znanstvenih istraživanja radi za ovakve tipove brodova.

U drugom poglavlju prikazane su značajke ukapljenog prirodnog plina, te su prikazani tipovi brodova za prijevoz ukapljenog prirodnog plina, s različitim konceptom teretnih tankova, sa svojim prednostima i nedostacima, te vrstama čelika koji se koriste za gradnju strukturnih tankova LNG brodova.

U trećem poglavlju rada dati su zahtjevi i pravila za brodove za prijevoz ukapljenog plina, koji se primjenjuju na materijale i proizvode, za ugradnju ili opremanje broda i ostalih konstrukcija i instalacija. Ta pravila obuhvaćaju zahtjeve glede proizvodnje, svojstava i

ispitivanja materijala i proizvoda. Također je dat pregled prihvatljivih materijala koji se mogu primijeniti za ovako niske temperature, zadržavajući pri tome svoja svojstva, posebice istežljivost.

U četvrtom poglavlju rada dane su osnove statičkog vlačnog pokusa, kojim se ispituju osnovna mehanička svojstva materijala, a poseban naglasak je na statički vlačni pokus na niskim temperaturama. Ispitivanja se provode na standardnim mjernim uzorcima – epruvetama, koje su također opisane u ovom poglavlju.

U petom poglavlju rada opisana je sama provedba eksperimenta, te uređaji kojim se provodi statički vlačni pokus i određuju mehanička svojstva materijala. Pri ispitivanju je potrebno koristiti precizne mjerne uređaje i instrumente, koji ne utječu na rezultate. Ti uređaji su također opisani u ovom poglavlju, kao i uređaji kojima se mogu postići niske temperature, pošto se radi o ispitivanju na niskim temperaturama.

U šestom poglavlju dani su rezultati mjerenja, a sljedeće, zadnje poglavlje je zaključak.

1.1. Hipoteza rada

Mehanička svojstva metalnih materijala ovise o temperaturi ako se ispitivanja provode na ekstremno visokim ili niskim temperaturama. Pretpostavlja se da niske temperature ispod -80°C znatno utječu na svojstva materijala kao što su vlačna čvrstoća R_m , granica tečenja R_e , konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$, istezljivost A i modul elastičnosti E .

Tako se pretpostavlja da je taj utjecaj najveći kod vlačne čvrstoće R_m , granice tečenja R_e i istezljivosti A , dok bi promjena modula elastičnosti E i konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ trebala biti manje izražena pri ekstremno niskim temperaturama.

2. Prijevoz ukapljenog plina morem

2.1. Značajke ukapljenog plina

Prirodni ukapljeni plin primarno je mješavina ugljikovodika, pretežno metana, sa malim primjesama etana, propana, butana i drugih sastojaka, a tipičan udio tih sastojaka prikazan je u tablici 2.1 [1]:

Tablica 2.1 Udio pojedinih sastojaka u prirodnom plinu

| Plin | Oznaka | Udio [%] |
|--------|--------------------------------|-------------|
| Dušik | N ₂ | 0,05 – 1,5 |
| Metan | CH ₄ | 85 – 94 |
| Etan | C ₂ H ₆ | 1,4 – 4,0 |
| Propan | C ₃ H ₈ | 1,0 – 1,5 |
| Butan | C ₄ H ₁₀ | 0,1 – 0,2 |
| Pentan | C ₅ H ₁₂ | 0,00 – 0,01 |

Agregatno stanje plina ovisi o dva parametra: temperaturi i tlaku. Tipičan $p - v$ dijagram sastoji se od izotermnih krivulja koje razdvajaju područja u kojima će plin biti u plinovitom, ukapljenom ili prijelaznom (istodobno plinovitom i ukapljenom) stanju.

Da bi se povećala učinkovitost transporta plinova, oni se moraju nalaziti u tekućem stanju, a to se postiže na tri načina

- povećanjem tlaka (stlačivanjem) uz ambijentalnu temperaturu,
- smanjenjem temperature (rashlađivanjem) uz zadržavanje atmosferskog tlaka,
- kombinacijom dvaju prethodnih načina.

Od svih plinova koji se u praksi transportiraju u ukapljenom stanju, metan tj. prirodni plin pri atmosferskom tlaku ima najnižu temperaturu ukapljivanja od -163°C . Neki od plinova poput butana i vinil-klorida ukapljuju se čak pri temperaturi od $-13,7^{\circ}\text{C}$, što je vidljivo u tablici 2.2.

Tablica 2.2 Osnovna fizikalna svojstva najčešćih ukapljenih plinova

| Naziv | Temperatura ukapljivanja, [°C] | Gustoća ukapljenog plina, [kg/m ³] | Tlak plinovitog stanja, pri temperaturi 45°C, [MPa] |
|----------------|--------------------------------|--|---|
| Amonijak | -33,4 | 681 | 1,78 |
| Butadien | -5 | 650 | 0,51 |
| Butan norm. | -0,5 | 601 | 0,43 |
| Butan iso | -11,7 | 595 | 0,52 |
| Klorin | -34,6 | 1557 | 0,126 |
| Etan | -89 | 546,7 | 5,4 |
| Etilen | -103,7 | 570 | 4,24 pri 0°C |
| Metan (LNG) | -163 | 425 | 4,21 pri -86°C |
| Propan | -42,1 | 583 | 1,57 |
| Propilen | -47 | 606 | 1,87 |
| Vinil - klorid | -13,7 | 965 | 0,68 |

Iznad tzv. kritične temperature (temperatura isparavanja), povećanjem tlaka plin se ne može dovesti u ukapljeno stanje, te je kritična temperatura specifična značajka pojedinog plina. Plinovi kojima je kritična temperatura viša od temperature okoline mogu se ukapljiti povećanjem tlaka, dok plinove kod kojih to nije slučaj treba rashladiti ispod kritične temperature. Specifična gustoća ukapljenog plina iznosi od 425 kg/m³ (metan) do 965 kg/m³ (vinil-klorid), a za petrolejske plinove je oko 600 kg/m³, što je vidljivo u tablici 2.2.

Prirodni plin kao kapljevina zauzima otprilike 600 puta manji volumen nego u plinovitom stanju pri atmosferskom tlaku. Zbog toga brodovi za prijevoz ukapljenog plina imaju veliki kapacitet u odnosu na vlastitu težinu.

2.2. Brodovi za prijevoz ukapljenog plina

Prvi korak u transportiranju prirodnog ukapljenog plina započet je već početkom 50-tih godina, no stvarni prijevoz započeo je tek između 1960-65. godine, prvo s brodom Methan Pioneer kapaciteta 5000 m³, a kasnije s Methan Princes i Methan progress, kapaciteta 27000 m³. Ovi brodovi bili su opremljeni samostalnim sfernim skladišnim sustavom.

Za vrijeme razvojnog perioda bilo je mnogo prijedloga i ideja, na temelju kojih su koncepti skladišnog sustava bili podijeljeni u brojne kategorije. Razlika između tih kategorija temeljila se na raznim faktorima poput skladišne temperature proizvoda, tlaka isparavanja ukapljenog plina, međudjelovanja spoja brodske strukture i skladišnog tanka.

Mnogi tipovi skladišnih prostora koji su se razvijali tijekom zadnjih desetljeća, bili su svrstavani u grupe po imenima određenim od strane klasifikacijskih društava i državnih vlasti. Sustavi su se pregrupirali nekoliko puta u skladu s razvojem tehnologije, no najnoviju i najrašireniju podjelu ustvrdila je Međunarodna pomorska organizacija (IMO) „*International Maritime Organisation*“.

Postoje dvije osnovne vrste spremnike na brodovima za prijevoz ukapljenog plina:

- **strukturni**
- **nestrukturni.**

Strukturni spremnici u cijelosti ili djelomično sudjeluju u čvrstoći broda, dok nestrukturni spremnici ne sudjeluju u čvrstoći broda.

Spremnike je moguće podijeliti u sljedeće osnovne kategorije

1. integralni, koji su sastavni dio brodske strukture i izravno sudjeluju u čvrstoći trupa,
2. membranski, kod kojih se nenosiva membrana u potpunosti oslanja na izolaciju,
3. polu-membranski, kod kojih se membrana djelomično oslanja na izolaciju,
4. nezavisni spremnici, dijele se na još tri podtipa,
 - Tip A (ima potpunu sekundarnu membranu)
 - Tip B (ima djelomičnu sekundarnu membranu)
 - Tip C (ne zahtjeva sekundarnu membranu)

Membranom se smatra oplata tanka koja je kod tipa C dovoljna da zadrži nepropusnost i očuva integritet tanka, stoga nikakva sekundarna dodatna membrana nije potrebna, za razliku od tipa A koji zahtjeva dodatno ojačanje.

Ova podjela zadržala se u kodeksu "*International Code for the Construction and Equipement of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC)*" i pravilima klasifikacijskih društava. Ipak, od 70-tih godina brodovi s integralnim i polu-membranskim spremnicima, kao i brodovi sa spremnicima s unutarnjom izolacijom, ne proizvode se zbog visoke cijene gradnje.

Pojedine vrste spremnika tzv. sekundarna barijera dijeli od ostatka brodske strukture. Njena je svrha zadržati i spriječiti curenje izvan spremnika u brodski prostor za period od najmanje 15 dana, kako bi brod u potpunoj sigurnosti doplovio do odredišta.

Za membranske, polumembranske i nezavisne spremnike tipa A zahtjeva se potpuna sekundarna barijera, koja mora moći zadržati ukupnu količinu ukapljenog plina. Tip B nezavisnih spremnika može imati djelomičnu sekundarnu barijeru, jer se pretpostavlja da curenje tereta ne može biti značajno, dok tip C ne treba imati sekundarnu barijeru.

Integralni spremnici

Integralni spremnici sastavni su dio strukture broskog trupa, te su podvrgnuti jednakom opterećenju i istim naprezanjima. Projektni tlak uobičajeno ne prelazi vrijednost od 0.25 bara. Pojačavanjem strukture moguće je vrijednost tlaka povećati do najviše 0.7 bara. Integralni spremnici koriste se za terete kojima temperatura hlapljenja nije niža od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Polu-membranski spremnici

Polu-membranski spremnici su nesamostojeći spremnici načinjeni tako da se jednim svojim dijelom putem izolacije oslanjaju na brodsku strukturu, a drugim, zaobljenim dijelovima povezuju ove prve i ujedno preuzimaju eventualne toplinske deformacije, odnosno stezanje i širenje spremnika. I kod ovih spremnika projektni tlak uobičajeno ne prelazi vrijednost od 0.25 bara. Ojačavanjem strukture i izolacije, moguće je vrijednost projektnog tlaka povećati na najviše 0.7 bara.

Membranski spremnici

Membranski spremnici sadrže tanku membranu koja se preko sloja izolacije oslanja na brodsku strukturu (slika 2.1). Membrana mora biti građena tako da toplinske i druge deformacije ne uzrokuju u njoj dodatna naprezanja. Projektni tlak uobičajeno ne prelazi vrijednost od 0.25 bara. Ojačavanjem strukture i izolacije, moguće je vrijednost projektnog tlaka povećati na najviše 0.7 bara. U posebnim okolnostima moguće je membrane izvesti tako da čine sastavni dio izolacije. Debljina membrane ni u kojem slučaju ne prelazi 10 mm.

LNG brod s membranskim tipom tankova omogućava

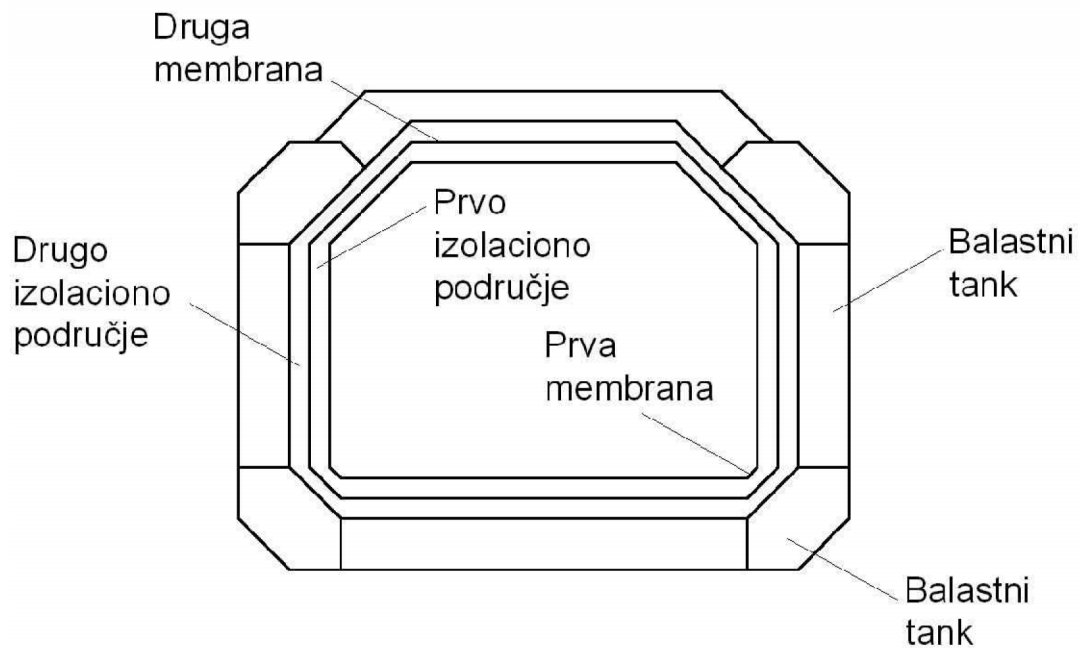
- izuzetnu otpornost na sudare na moru zbog svoje dvostruke oplata,
- teretni tankovi zaštićeni su na jedinstven način od opasnosti pojave vatre na palubi, dvostrukom palubom s balastnim odjeljcima,
- donji dio teretnog tanka zaštićen je od rizika nasukavanja specijalno strukturiranim kontinuiranim dvodnom,
- izvrsna mogućnost manevriranja pri jakom vjetru, što omogućuje pristajanje bez potrebne asistencije, jer je utjecaj bočnog vjetra vrlo mali, što nije slučaj kod brodova sa sfernim tipom spremnika.



Slika 2.1 LNG brod s membranskim spremnicima

Brod najčešće ima četiri spremnika, velikih volumena koji su ograničeni dimenzijama trupa broda, tj. širinom broda i poprečnim pregradama, a obloženi su izolacijom te prilagođeni vrsti tereta (ukapljenom plinu temperature $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Na slici 2.2. prikazan je smještaj teretnog spremnika u trupu broda pri čemu je vidljivo da su granice teretnog spremnika formirane unutrašnjim trupom, dvodnom, bokovima i palubom te da za razliku od sfernog tipa spremnika nema praznog, neiskorištenog prostora u strukturi unutrašnjeg dijela trupa što dokazuje boju iskoristivost broda.



Slika 2.2 Shematski prikaz konstrukcije membranskog tanka

Na tržištu se mogu pronaći dva proizvođača za izradu ovog tipa tanka

- GT-N°96 po licenci Gaz Transporta,
- Mark III po licenci Technigaza.

Ova dva modela međusobno se razlikuju u izvedbi izolacije tanka dok im je osnovni građevni materijal isti.

Nezavisni ili samonosivi spremnici

Nezavisni spremnici su u potpunosti samonosivi spremnici. Ne čine sastavni dio brodskog trupa i ne sudjeluju u čvrstoći trupa.

Mogu se podijeliti u tri kategorije

1. Tip A, koji se projektira u cijelosti prema pravilima klasifikacijskog društva, bez preciznog određivanja polja naprezanja,
2. Tip B, kod kojeg se projekt zasniva na točnijim proračunima, modelskim i drugim ispitivanjima, u cilju preciznog određivanja vrijednosti naprezanja i vjerojatnosti pojave i širenja pukotine,
3. Tip C, koji spada u posude pod tlakom i koji mora zadovoljiti kriterije čvrstoće.

Nezavisni spremnici - tip A

Nezavisni spremnici tipa A najčešće su prizmatičnog poprečnog presjeka i sastavljeni od ravninskih strukturnih elemenata. Svojem oblikom prate oblik skladišnog prostora, odnosno brodskog trupa i stoga maksimalno popunjavaju postojeći prostor. Tlak u njima iznosi najviše 0.7 bara, odnosno u prosjeku 0.25 bara, te se ukapljeni plin u takvim spremnicima prevozi potpuno ohlađen i pri tlaku tek nešto višim od atmosferskog.

Spremnici moraju biti izgrađeni od čelika koji zadržava dobra mehanička svojstva (žilavost) na vrlo niskim temperaturama. Spremnike valja izolirati od okoline kako bi se smanjila količina energije potrebna za održavanje tereta na zadanoj temperaturi. Kao izolacija koristi se poliuretan, poliester ili polistiren, kojima se ujedno nastoji spriječiti pojava kondenzata koji može uzrokovati koroziju. Između spremnika i oslonaca, koji čine dio brodskog trupa, izolaciju čini tvrdo drvo ("azoke" ili "iroko") ili pak naročiti laminati koji podnose visoka tlačna naprezanja. Ta struktura mora nositi spremnik i ujedno dopustiti relativno pomicanje spremnika i oslonaca kod elastičnih toplinskih deformacija. Kapacitet brodova s ovakvim spremnicima je stalno u porastu i sve češće je veći od 100000 m³. Njima se ekonomično i na velike udaljenosti prevoze petrolejski plinovi, amonijak, vinil-klorid i dr.

Nezavisni spremnici – tip B

Nezavisni spremnici tipa B često su sfernog ili "bilobe" oblika, kapaciteta od 2000 do 8000 m³, a najviše 30000 m³, a mogu biti i prizmatičnog oblika. Temperatura ukapljenog plina u njima kreće se od –10 do –104 °C, a tlak od 3 do 8 bara.

Zbog umjerenog tlaka u spremnicima oni su većih dimenzija i svojim oblikom povoljnije prate oblik brodskih skladišta. U "bilobe" izvedbi, spremnici se sužuju prema pramcu broda radi boljeg iskorištenja prostora. U brod "Gaz Nordzee" ugrađen je "trilobe" spremnik i to je jedan od najvećih LPG brodova.

Zbog relativno velikih dimenzija, naprezanja u spremnicima tipa B mogu doseći visoke vrijednosti stoga ih je pri projektiranju potrebno točnije odrediti.

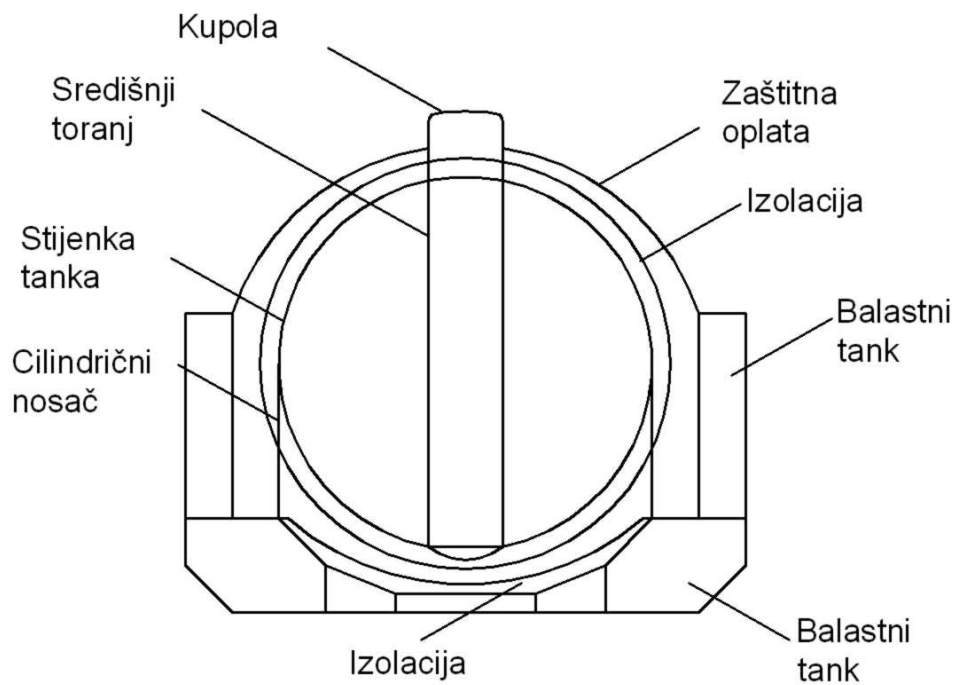
Nezavisni spremnici – tip C

Nezavisni spremnici tipa C na suvremenim brodovima su cilindričnog ili sfernog oblika. Na slici 2.3 prikazan je brod sa sfernim spremnikom, dok je na slici 2.4 shematski prikaz strukture LNG broda sa sfernim spremnikom. Tlak u spremnicima može doseći 18 bara i mora se održavati bez obzira na uvjete plovidbe. Kapacitet spremnika je najčešće od 1000 do 3000, najviše do 5000 m³. U takvim spremnicima prevoze se petrolejski plinovi i amonijak pri temperaturi okoline. Brodovi stoga ne moraju sadržati uređaj za ukapljivanje isparenog plina niti uređaje za hlađenje spremnika.

Spremnici su neovisni o strukturi broda, a trup broda i spremnici tijekom službe moraju se deformirati na način da međusobno ne uzrokuju nedopuštena naprezanja. Brodovi s ovakvim spremnicima odlikuju se jednostavnom konstrukcijom. Grade se u brodogradilištima u Europi i Japanu, od čelika povišene čvrstoće s granicom tečenja od oko 360 MPa, odnosno 500 MPa. U ovom drugom slučaju oplatu spremnika moguće je stanjiti, ali po cijenu primjene zahtjevnijeg postupka zavarivanja i uklanjanja zaostalih naprezanja toplinskom obradom.



Slika 2.3 LNG brod sa sfernim tankovima



Slika 2.4 Shematski prikaz strukture LNG broda sa sfernim spremnicima

U radu je prikazana podjela tipova tankova za prijevoz ukapljenog plina, a danas na tržištu vladaju dva najčešća modela teretnih tankova koji se uglavnom nude i naftnim kompanijama i brodogradilištima, a to su

- Membranski tip tanka, model GT-N°96 po licenci Gaz Transporta,
- Sferni tip tanka, Tip B po licenci Moss Maritime a.s.

2.3. Usporedba značajki sfernog i membranskog tipa spremnika

Zbog činjenice da je kod membranskog tipa LNG broda volumen tanka definiran dimenzijom trupa i širinom dvostruke oplata, a kod sfernog tipa LNG broda standardnim dimenzijama tanka, membranski tip broda ima bolju iskoristivost volumena trupa, što znači da taj tip broda za isti koncept tankova ima manje dimenzije.

Membranski tankovi omogućuju bolju iskoristivost volumena trupa broda, budući da kod njih nema praznog prostora između tanka i unutrašnje oplata trupa, kao što je to slučaj kod sfernih tankova. Usporedbom visine dvaju različitih teretnih tankova, može se reći da su membranski tankovi niži, pa je težište tog tipa za pune tankove niže nego kod sfernog tipa LNG broda.

Ono što sferni tip broda na prvi pogled čine prepoznatljivim su velike kupole tankova koje prodiru kroz gornju palubu čineći tako strukturu ovog broda robusnijom zbog velikih otvora. Zbog visine kupola koje se uzdižu i do 15 m iznad gornje palube, ovaj tip broda ima veću lateralnu površinu u odnosu na membranski tip, što mu stvara i veći otpor zraka u plovidbi, a značajno utječe i na upravljivost broda. Uslijed povećanja visine broda, povisuje se i težište što izravno utječe na stabilnost. Zbog sfernih tankova koji strše visoko kroz gornju palubu, uvelike je ograničeno vidno polje u svim smjerovima, a tu vidljivost s komandnog mosta dodatno pogoršava i oprema koja je postavljena na palubu.

Budući da membranski tip broda gornju palubu ima potpuno ravnu, omogućen je lakši smještaj sistema cjevovoda i pumpi za teretne tankove, bolje održavanje opreme te njenu antikoroziivnu zaštitu za vrijeme eksploatacije broda.

Ono što daje prednost sfernog tipa tanka u odnosu na membranski, je veća fleksibilnost za različita stanja krcanja. Zbog svog karakterističnog oblika, ovi tankovi smanjuju utjecaj slobodne površine tereta, zbog čega se javljaju niža naprezanja za različite razine utovara tereta, nego što je to slučaj kod membranskog tipa tankova.

Kako sferni tankovi ne ispunjavaju čitav unutrašnji prostor trupa broda, u slučaju pojave puknuća ili eventualnog curenja tereta iz tanka, osoblje se može zavući u prostor između oplata teretnog tanka i unutrašnjosti trupa broda, te tako obaviti direktnu vizualnu kontrolu oštećenja i lakše obaviti popravak za vrijeme eksploatacije broda nego što je to moguće kod membranskog tipa tankova.

Upravo zbog istog razloga što teretni tankovi ne ispunjavaju čitav prostor unutrašnjeg trupa broda, teretni tankovi su ne osjetljiviji na eventualne sudare i mogućnost nasukavanja broda.

3. Općenito o zahtjevima i propisima za brodove za prijevoz ukapljenog plina

S obzirom na značajke plinova koji se prevoze kao brodski teret, pri projektiranju i eksploataciji broda prisutni su određeni rizici kao što su:

- Visoki tlakovi
- Niske temperature (do -163 °C)
- Zapaljivost i eksplozivnost
- Toksičnost
- Korozivnost

Godine 1973. IMO „*International Maritime Organization*“ je izdala u svijetu primjenljivo pravilo, takozvani *IGC Code* „*International Code for Construction and Equipment of Ships carrying Liquefied Gases in Bulk*“ sada uvršten u SOLAS „*International Convention for the Safety of Life at Sea*“ *Chapter VII, part C*, a odnosi se na projektne i konstrukcijske standarde primjenjive za ove brodove da bi se smanjio rizik za sami brod, posadu i svakako očuvala okolina, a pravila se odnose na sljedeće aspekte:

- sposobnost broda za preživljavanje,
- opći plan i smještaj tankova na brodu,
- projekt teretnih tankova,
- sistem cjevovoda na brodu,
- materijal za konstrukciju tankova i opreme,
- ventilacijski sustav teretnih tankova,
- sustav za regulaciju tlaka i kontrolu temperature,
- električne instalacije te protupožarni sustav na brodu,
- zaštita posade broda,
- ograničenja u razinama krcanja teretnih tankova,
- korištenje tereta kao pogonskog goriva („boil-off rate“),
- zahtjevi koje mora zadovoljavati oprema za rukovanje teretom.

Općenito, pravila se primjenjuje na one brodove koji prevoze ukapljeni plin čiji tlak isparavanja prelazi 2.8 bara apsolutno pri temperaturi 37.8 °C. Samo brodovi s nuklearnom propulzijom podliježu strožim sigurnosnim kriterijima.

Uglavnom su sve države prihvatile ovo pravilo bez dodatnih zahtjeva. Američka obalna straža također je usvojila ovo pravilo za brodove pod stranom zastavom koji uplovljavaju u njihove vode, ali uz dodatne zahtjeve:

1. upotreba materijala koji će blokirati napredovanje pukotine,
2. faktor sigurnosti za tankove Tipa C,
3. sustav za regulaciju tlaka i kontrolu kvalitete,
4. raspored temperaturnog gradijenta po strukturi tanka i unutrašnje oplata da bi se izvršio pravilan odabir konstrukcijskog materijala.

Da bi se slobodno moglo ploviti, brod za prijevoz prirodnog ukapljenog plina mora zadovoljiti sva pravila koja uključuju važne zahtjeve vezane za izgradnju:

- *International Gas Carrier Code „IGC Code“ – SOLAS Chapter VII, Part C,*
- Posebna pravila određena od strane *Registra,*
- Četiri specijalna zahtjeva postavljena od strane *Američke obalne straže.*

3.1. Opći zahtjevi Hrvatskog registra brodova

Ovaj dio pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova se primjenjuje na materijale i proizvode, predviđene za ugradnju, popravak ili opremanje brodova, priobalnih instalacija i ostalih konstrukcija i instalacija koje se izrađuju po *Pravilima* i pod nadzorom HRVATSKOG REGISTRA BRODOVA (*Registar*).

Zahtjevima ovih pravila moraju udovoljiti materijali i proizvodi koji su:

1. Pod klasifikacijskim nadzorom *Registra*, odnosno podliježu svim onim radnjama nadzora koje se temelje na *Pravilima* za tehnički nadzor pomorskih brodova, i na *Pravilima* za klasifikaciju pomorskih brodova.
2. Pod certifikacijom, odnosno nadzorom u svrhu izdavanja certifikata i svjedodžbi svih vrsta, kao što su:
 - Materijali i uređaji za brodove koji ne spadaju pod klasu (npr. dijelovi za teretni uređaj),
 - Materijali i uređaji koji ne spadaju pod klasu, a odnose se na brodove (npr. kontejneri).
3. Pod konvencijskim nadzorom registra, odnosno podliježu svim onim radnjama nadzora koje se temelje na nacionalnim ili međunarodnim pravilima, konvencijama, kodeksima i preporukama koji su na snazi, zajedno odgovarajućim protokolima.

U ova *Pravila* uključeni su valjani usklađeni zahtjevi, preporuke i upute Međunarodnog udruženja klasifikacijskog društva (IACS) „*International Association of Classification Societies*“, valjani ISO-standardi i europske norme EN te HRN EN, kao valjani DIN i ASTM standardi za materijale i metode ispitivanja za koje nisu još predviđeni unificirani zahtjevi IACS-a, ISO – standardi ili EN, odnosno HRN EN.

Ako posebne okolnosti zahtijevaju, *Registar* može nametnuti veći opseg zahtjeva, od zahtjeva predviđenih u ovim *Pravilima* glede proizvodnje, svojstava i ispitivanja materijala i proizvoda, koji nastanu na temelju suvremenih istraživanja praktičkih iskustava, a pridržava pravo i odstupanja od ovih *Pravila*, ako smatra da je tehnički opravdano.

3.2. Opseg nadzora

Zahtjevi za nadzor kod proizvođača, kao i zahtjevi u vezi s tehničkom dokumentacijom materijala i proizvoda, sadržani su u *Pravilima*, kao i zahtjevi za odobrenje ispitnih stanica, laboratorija i institucija.

Svi proizvedeni materijali za dijelove i konstrukcije koji podliježu nadzoru *Registra*, te postupci proizvodnje trebaju biti odobreni od *Registra*.

Na poluproizvodima za dijelove i konstrukcije koja podliježu nadzoru *Registra* moraju se obaviti kontrolna ispitivanja u skladu s ovim dijelom *Pravila*, kojima ujedno moraju udovoljavati i materijali. Kontrola kakvoće materijala obavlja se kod proizvođača ili kod ispitne institucije koju je odobrio *Registar*, te je uvijek treba obaviti nakon konačne tehnološke obrade. Proizvođač mora uvesti takav sustav praćenja, koji će omogućiti identifikaciju proizvoda nakon svake faze proizvodnog procesa, odnosno da se nakon svake faze proizvodnog procesa može utvrditi pripadnost proizvoda talini, odnosno pripadnost svakog uzorka odgovarajućem poluproizvodu ili određenoj skupini. Označavanje uzoraka ili poluproizvoda koje treba ispitati, obavljaju se redovito u nazočnosti eksperta *Registra*.

Proizvođač mora prije ispitivanja kakvoće materijala ekspertu *Registra* predložiti najmanje sljedeću dokumentaciju:

1. Količinu, tip proizvoda, dimenzije, vrsta materijala, stanje isporuke i težinu,
2. Naziv (ime) kupca, zajedno s brojem ugovora i brojem naloga rada,
3. Broj novogradnje, ili ime broda (ako je poznato),
4. Primjenu (namjenu) ako je potrebno.

Ispitivanja za prihvata materijala redovito se obavljaju u pogonima u nazočnosti eksperta. Za tu svrhu proizvođač mora omogućiti ekspertu pristup svim proizvodnim odjelima i odjelima za ispitivanje, i treba mu učiniti dostupnim sve izvještaje i podatke koji se odnose na kontrolu kakvoće, da bi se olakšalo provođenje kontrole. Ekspert ima pravo biti nazočan svim fazama postupka proizvodnje, ali pri tome njegova nazočnost ne smije utjecati na tijek proizvodnje. Za ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava treba primjenjivati metode, uzorke i epruvete propisne u sljedećem poglavlju, a ispitivanja koja nisu navedena mogu se obaviti u skladu s nacionalnim ili međunarodnim normama, ako nije drukčije dogovoreno. Zahtjeve i rezultate ispitivanja treba navoditi u SI mjernim jedinicama.

Materijali koji su izrađeni pod nadzorom *Registra*, nakon svih ispitivanja i pregleda označavaju se pod odgovarajućim oznakama *Registra*. Prije označavanja oznakom *Registra* materijali i proizvodi moraju biti označeni tvorničkim oznakama, koje moraju sadržavati:

1. Kategoriju ili oznaku materijala,
2. Brojčanu ili drugu oznaku koja omogućava identifikaciju materijala ili proizvoda,
3. Tvornički znak,
4. Datum završnog ispitivanja, te broj potvrde *Registra* (za svaki proizvod ili poluproizvod).

3.3. Materijali za izradu tankova

S obzirom na vrstu tereta koju prevoze ovi brodovi i na radnu temperaturu u teretnim tankovima, važno je naročitu pažnju posvetiti odabiru materijala za izradu tanka i odabrati isključivo one materijale koji dobro podnose niske temperature zadržavajući pri tom svoju istezljivost. Naravno, pri tom treba voditi računa o materijalu okolne strukture tanka jer curenjem tekućine iz tanka ili isparavanjem plina, okolna struktura teretnog tanka također je na udaru niskih temperatura. Kemijski sastav mora biti u skladu s vrijednostima iz priznatih normi ili specifikacijama materijala odobrenim od *Registra*. Mehanička svojstva, propisana u priznatim normama ili u odobrenim specifikacijama materijala, treba potvrditi tijekom ispitivanja.

Ako materijali u daljnjoj preradbi podliježu zavarivanju, bez naknadne toplinske obradbe mogu se upotrebljavati samo one kategorije čelika, koje su korozijski otporne u takvom stanju, kao npr. čelici stabilizirani s Ti, ili Nb, ili pak čelici sa sadržajem ugljika $C \leq 0,03 \%$.

U ovu svrhu, kako je navedeno u tablici 3.1 mogu se primijeniti finozrnati konstrukcijski čelici s nazivnom granicom tečenja do 355 N/mm^2 za temperaturu do -45°C , dok se za niže temperature koristiti niklom legirani čelici u skladu s DIN 17280. Za prijevoz ukapljenog plina prihvatljivi su austenitni čelici u skladu s DIN 17440, koji u uvjetima isporuke moraju biti otporni na međukristalnu koroziju.

Tablica 3.1 Čelici primjenjivi za niske temperature

| Kategorija | Norma/oznaka robe | Najniža proračunska temperatura [°C] |
|--|---|--------------------------------------|
| Finozrnati konstrukcijski čelici s nazivnom granicom razvlačenja do 355 N/mm^2 | Npr. Prema DIN 17102 | $-45^{1)}$ |
| Niklom legirani čelici koji sadrže: | Čelici prema DIN 17280 | |
| 0,5% Ni | 13 Mn Ni 6 3 | -55 |
| 1,5% Ni | 14 Ni Mn 6 | $-60^{2)}$ |
| 3,5% Ni | 10 Ni 14 | $-90^{2)}$ |
| 5% Ni | 12 Ni 19 | $-105^{2)3)}$ |
| 9% Ni | X 8 Ni 9 | -165 |
| Austenitni čelici | Npr. Prema DIN 17440 (AISI 304 L) 1.4404 (AISI 316 L) 1.4541 (AISI 321) 1.4306 1.4550 (AISI 347) | -165 |

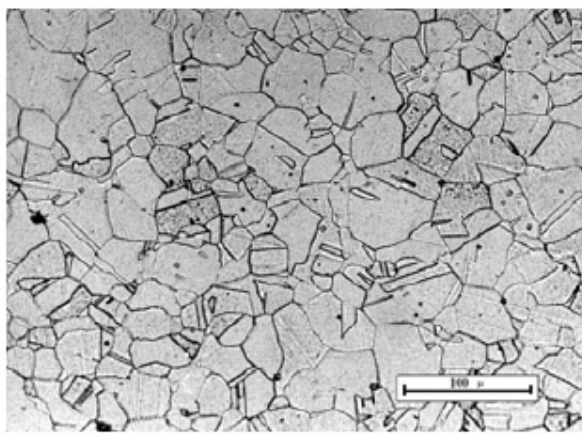
1) *Registar* pridržava pravo odobriti i niže proračunske temperature (najviše -55°C), ako su odgovarajuća svojstva iskazana tijekom ispitivanja za odobrenje.
2) Za čelike koji sadrže 1,5%, 3,5% i 5% nikla može se odobriti niža proračunska temperatura, ako su čelici poboljšani. U tim slučajevima temperature ispitivanja posebno određuje *Registar*.
3) Čelik sa sadržajem 5% nikla može se odobriti za najnižu proračunsku temperaturu od -165°C , ako je taj čelik legiran s npr. Cri ili Mo, i ako bude podvrgnut trostrukoj toplinskoj obradbi (npr. X7 NiMo6 prema DIN 17280).

3.4. Austenitni nehrđajući čelik

Za ispitivanje odabran je nehrđajući čelik austenitne strukture oznake AISI 316L (X2CrNiMo) ili (Č1.4404) (slika 3.1). Austenitni nehrđajući čelici su obično CrNi čelici s malim postotkom ugljika koji se kreće u granicama od 0.03 do 0.12%, udio Cr kreće se od 12 do 25%, dok se udio Ni kreće od 8 do 25%. Nikal (Ni) koji je ujedno i γ - geni element, a također i stabilizirajući element za austenit, povećava područje austenita (snižavajući temperaturu transformacije) i gotovo potpuno eliminira ferit iz željezo – krom – ugljik (FeCrC) legura. Ako je sadržaj ugljika u čeliku ispod granice od 0.03% tada ne dolazi do formiranja karbida i takav čelik posjeduje potpuno austenitnu strukturu na sobnoj temperaturi, a imaju veliku otpornost na udarce pri niskim temperaturama iz razloga što nemaju tranzicijsku temperaturu.

Kemijski sastav te mehanička svojstva nehrđajućeg austenitnog čelika 316L na sobnoj temperaturi dani su u tablicama 3.2 i 3.3.

Austenitni nehrđajući čelici s FCC rešetkom imaju odličnu duktilnost, kovnost i otpornost na koroziju te su postojani pri visokim, ali i niskim temperaturama. Ovaj čelik je teško obrađivati obradom skidanja strugotine.



Slika 3.1 Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika

Tablica 3.2 Kemijski sastav nehrđajućeg austenitnog čelika AISI 316L (X2CrNiMo)

| C, ≤[%] | Si, ≤[%] | Mn, ≤[%] | P, ≤[%] | S, ≤[%] | Cr, [%] | Ni, [%] | Mo, [%] | N, ≤[%] |
|---------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,03 | 1,0 | 2,0 | 0,045 | 0,03 | 16-18 | 10-14 | 2-2,5 | 0,1 |

Tablica 3.3 Mehanička svojstva nehrđajućeg austenitnog čelika AISI 316L, pri 20°C

| Tvrdoća [HB] | R _{p0,2} [N/mm ²] | R _m [N/mm ²] | Istezljivost, A [%] |
|--------------|--|-------------------------------------|---------------------|
| ≤ 205 | 460 | 600-720 | 40 |

4. Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala

Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, budući da se na osnovu njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. Ona su, kao i sva ostala svojstva materijala, posljedica strukturnog stanja materijala, koje se dobiva obradom materijala određenog sastava određenim tehnološkim postupkom.

Najvažniji pojmovi koji se koriste kod ispitivanja mehaničkih svojstava materijala su:

Uzorak - proizvod (npr. limovi ili cijevi) odabran iz određene ispitne količine ili ispitne skupine, sa svrhom, da se iz njega izrade epruvete za ispitivanje.

Ispitna količina/ispitna skupina - dio isporučene količine na koja se odnose rezultati ispitivanja. Pojam se može primijeniti npr. na specifični broj proizvoda istih dimenzija, proizvoda različitih dimenzija proizvedenih od jedne taline, ili valjane duljine materijala.

Epruveta za ispitivanje – komad uzet iz uzorka za ispitivanje, koji u obrađenom ili neobrađenom stanju ima propisane dimenzije i koji podliježe propisanom ispitivanju.

Svi proizvodi podliježu ispitivanju rastezanjem, kod limova, toplo valjanih traka i širokih traka širine ≥ 600 mm epruvete se uzimaju poprečno na smjer valjanja. Za sve ostale vrste proizvoda epruvete se mogu uzimati poprečno na smjer, ili paralelno sa smjerom valjanja.

Broj epruveta određuje se na sljedeći način:

- a) limovi i ploče: jedna epruveta s jednog kraja od svake valjane duljine. Ako je valjana duljina dulja od 7 m, uzima se po jedna epruveta s oba kraja,
- b) limovi odrezani od toplo valjanih širokih traka, koji se ne podvrgavaju pojedinačnoj toplinskoj obradbi: po jedna epruveta od svakog vanjskog i unutarnjeg kraja koluta i od polovine trake,
- c) svi ostali proizvodi: jedna epruveta po ispitnoj skupini, koja ne smije biti teža od 15 t.

U tom slučaju ispitna skupina se smatra skupom proizvoda istog oblika, kojoj razlika u debljini ne smije biti veća od 5 mm, koji su proizvedeni od iste taline i koji se toplinski obrađuju u istom proizvodnom ciklusu.

Rastezna čvrstoća kod epruveta uzetih od krajeva "glave" i "pete" valjanog lima ne smije se nakon ispitivanja razlikovati za više od:

- za valjane duljine ≤ 10 m: 60 N/mm^2 ,
- za valjane duljine > 10 m: 70 N/mm^2 .

Uzorci za ispitivanje moraju biti odrezani na točno određenim mjestima te se mogu uzeti samo nakon završetka svih mehaničkih i/ili toplinskih obradbi koje se primjenjuju na proizvod prije isporuke. Iznimno toplinska obrada (npr. žarenje za smanjenje unutarnjih naprezanja), može se zanemariti. Ako u izuzetnim slučajevima uzorci za ispitivanje ne mogu ostati pripojeni uz proizvod do kraja tehnološkog procesa proizvodnje, npr. ako se proizvodi obrađuju na završne dimenzije prije žarenja, onda oni moraju biti podvrgnuti istim mehaničkim i toplinskim obradama kao i proizvod.

Ako su uzorci uzeti iz materijala plinskim rezanjem ili odsijecanjem, potrebno je predvidjeti odgovarajući rub, koji se mora odstraniti prilikom završne obrade.

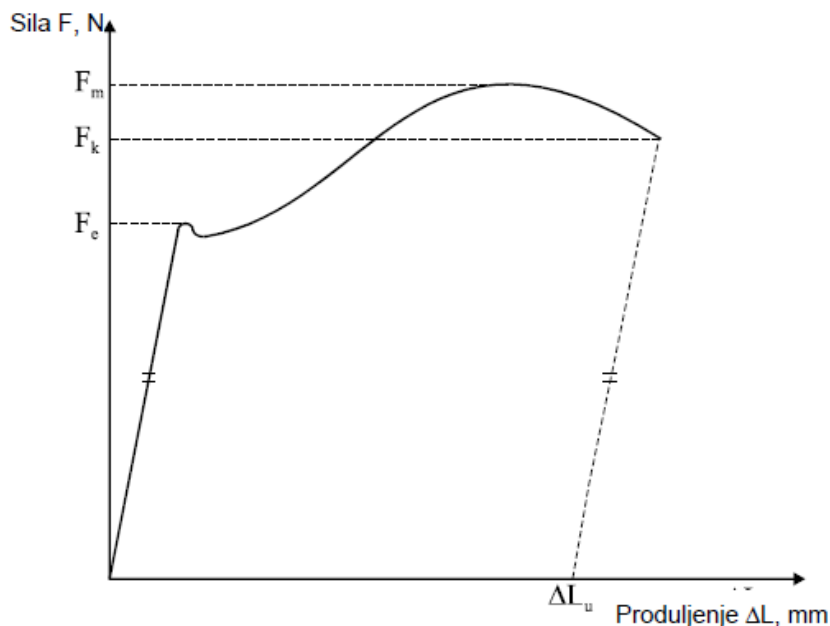
4.1. Statički vlačni pokus

Elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja ispituje se statičkim vlačnim pokusom. Ovim ispitivanjem utvrđuju se ujedno osnovna mehanička svojstva materijala, kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, itd.

Ispitivanje se provodi na uređajima koje se nazivaju kidalice ili univerzalne ispitivalice, na kojima se epruvete kontinuirano vlačno opterećuju do loma. Opterećenje se kod kidalice ostvaruje hidraulički ili mehanički. Za preciznije mjerenje produljenja (npr. utvrđivanje $R_{p0.01}$ ili modula elastičnosti) na epruvete se učvršćuju ekstenzometri koji rade na mehaničkom, optičkom ili elektronskom principu.

Statički vlačni postupak provodi se, ovisno o obliku poluproizvoda odnosno debljini stjenke, s epruvetama okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. Budući da se ovim ispitivanjem mehaničkih svojstava koje karakteriziraju čvrstoću materijala utvrđuju i neka svojstva kojima se opisuje deformabilnost materijala.

Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje epruvete, te se na pisaču kidalice za vrijeme statičkog vlačnog pokusa crta dijagram „sila – produljenje“. Primjer dijagrama za konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1 Dijagram sila - produljenje

U prvom dijelu dijagrama „sila – produljenje“ odnos sile i produljenja je linearan te takva linearna ovisnost vrijedi sve do dostizanja F_e – sile razvlačenja ili tečenja. Nakon dostizanja te sile epruveta se nastavlja produljivati uz mali pad sile. Za daljnje rastezanje materijala potrebno je opet povećanje sile. U tom dijelu statičkog vlačnog pokusa više ne postoji linearna ovisnost između prirasta sile i produljenja. Opterećenje se povećava sve do dostignuća F_m – maksimalne sile, nakon koje se epruveta nastavlja produljivati uz smanjenje potrebne sile zbog lokaliziranog intenzivnog smanjenja površine poprečnog presjeka. Konačno pri vrijednosti F_k – konačne sile dolazi do loma epruvete. Sastavi li se puknuta epruveta te izmjeri razmak točaka koji je prije ispitivanja iznosio L_0 (početna mjerna duljina), dobiva se konačna mjerna duljina L_u , te produljenje, koje iznosi:

$$\Delta L = L_u - L_0$$

Iznos sila pri statičkom vlačnom pokusu ne daju pravi uvid u mehaničku otpornost materijala ukoliko se ne uzme u obzir površina poprečnog presjeka epruvete, odnosno ukoliko se umjesto sile F ne uvede naprezanje σ , koje se određuje izrazom

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

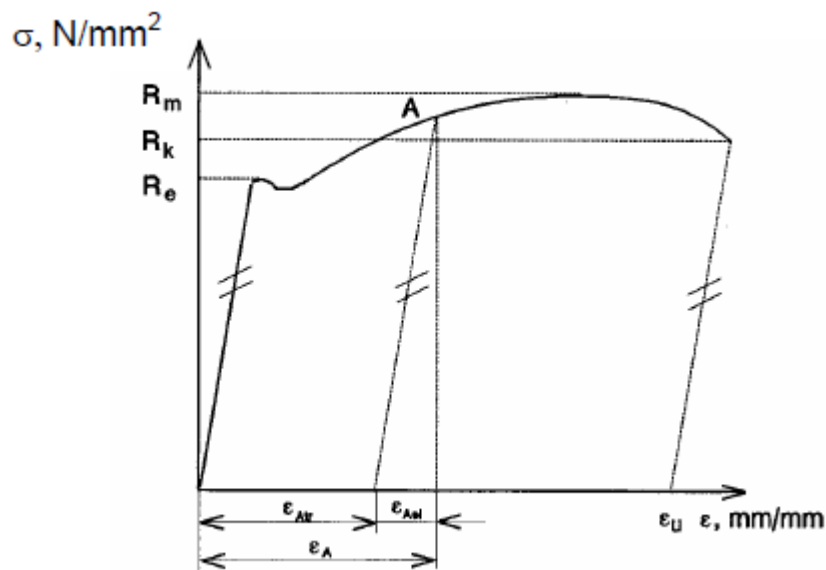
Ukoliko se produljenje ΔL podijeli s početnom mjernom duljinom L_0 dobiva se relativno produljenje ili istežanje ε prema izrazu

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}.$$

Istežanje se može izraziti i u postocima

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100.$$

Na taj način se iz dijagrama „sila – produljenje“ dobiva dijagram „naprežanje – istežanje“ ($\sigma - \varepsilon$), koji je za konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju prikazan na slici 4.2.



Slika 4.2 Dijagram naprežanje - istežanje

Dijagram ($\sigma - \varepsilon$) je kvalitativno jednak dijagramu $F - \Delta L$ budući da se svi iznosi sile dijele s istom vrijednošću (S_0), a sve vrijednosti produljenja s vrijednošću L_0 . Zbog toga i dijagram ($\sigma - \varepsilon$) počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hooke-ovim pravcem. U tom području naprežanja materijal je deformiran isključivo elastično što znači da u slučaju rasterećenja ($\sigma = 0$) trajna deformacija je jednaka nuli, odnosno razmak mjernih točaka na epruveti jednak je L_0 . Nakon što naprežanje u materijalu dostigne vrijednost R_e – granica razvlačenja, nastupa tečenje bez povećanja naprežanja.

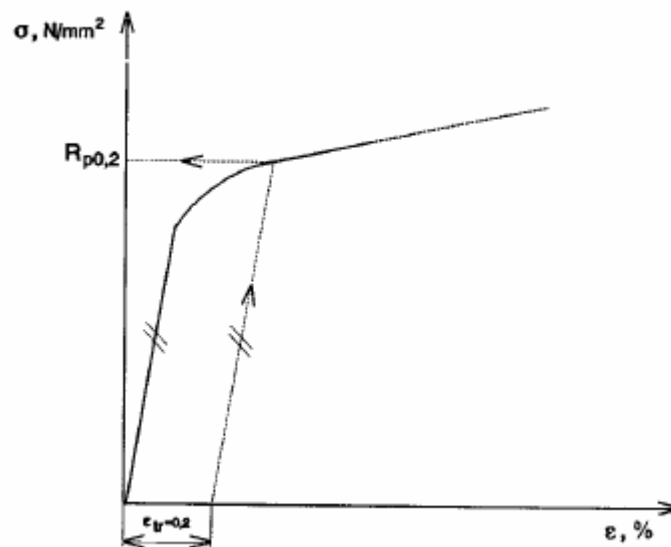
Granica razvlačenja je po definiciji jednaka

$$R_e = \frac{F_e}{S_o}$$

Granica razvlačenja jest ono naprezanje prema kojem se uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnih dijelova i dijelova uređaja.

Naprezanja veća od granice razvlačenja R_e izazivaju osim elastične i plastičnu (trajnu) deformaciju epruvete. Pri naprezanju σ_a ukupno istežanje iznosi ε_a . Nakon rasterećenja elastično naprezanje ε_{ael} iščezava, a ostaje plastično ili trajno naprezanje ε_{apl} .

Kod materijala koji imaju kontinuirani prijelaz iz područja elastičnih u područje plastičnih deformacija utvrđuje se *konvencionalna granica razvlačenja*. To je ono naprezanje koje će nakon rasterećenja ostaviti u materijalu određenu plastičnu deformaciju (slika 4.3).



Slika 4.3 Konvencionalna granica razvlačenja

Kod konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,01}$, u materijalu nakon rasterećenja ostaje plastična deformacija od 0,01%, dok kod konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$, plastična deformacija iznosi 0,2%. Za razliku od standardnog statičkog vlačnog postupka za određivanje $R_{p0,2}$ potreban je dodatni uređaj – ekstenzometar (precizni mjerač produljenja) koji se učvršćuje na epruvetu te za pojedine vrijednosti sile F mjeri produljenje ΔL . Na osnovu izračunatih vrijednosti σ i ε (izražen u %) grafički se određuje $R_{p0,2}$.

Naprezanje kod maksimalne sile naziva se *vlačna ili rastezna čvrstoća* R_m i jednaka je omjeru maksimalne sile i površine poprečnog presjeka

$$R_m = \frac{F_m}{S_o}.$$

Nakon dostignutog naprezanja R_m deformacija epruvete nije jednolika po čitavom ispitnom dijelu, već se lokalizira na jednom mjestu. Naprezanje kod kojeg dolazi do loma epruvete zove se *konačno naprezanje* R_k koje je jednako

$$R_k = \frac{F_k}{S_o}.$$

Vrijednost istezanja nakon kidanja, određuje se prema izrazu

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_o}{L_o}.$$

Ukoliko se vrijednost ε_u izrazi u postotcima naziva se *istezljivost* materijala A , te je definirana izrazom

$$A = \varepsilon_u \cdot 100.$$

Linearni dio dijagrama $\sigma - \varepsilon$, koji je karakteriziran izrazom

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

naziva se „Hooke-ovim zakonom“ i vrijedi samo u elastičnom području.

Konstanta E se naziva *modulom elastičnosti ili Young-ovim modulom* te predstavlja svojstvo materijala ovisno direktno o čvrstoći veze između atoma u kristalnoj rešetci ili amorfnoj strukturi. Što je ta veza jača veći je i modul elastičnosti. Zbog toga najveći modul elastičnosti ima dijamantna struktura. „Hooke-ov zakon“ se može napisati i na drugi način izrazom

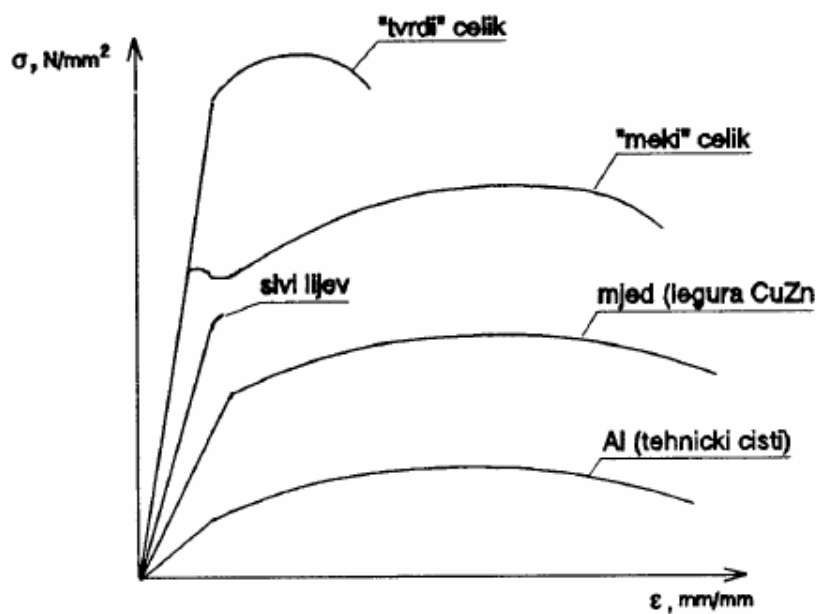
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}.$$

U tablici 4.1 dane su vrijednosti modula elastičnosti za neke konstrukcijske materijale.

Tablica 4.1 Iznos modula elastičnosti za neke materijale i njihove legure

| Materijal | Modul elastičnosti, [N/mm ²] |
|----------------|--|
| Čelik | 210000 |
| Sivi lijev | 110000-160000 |
| Cu i Cu legure | 105000 |
| Al i Al legure | 70000 |

Posljedice ovakvih modula elastičnosti biti će i različiti nagibi Hooke-ovog pravca u dijagramima ($\sigma - \varepsilon$) za različite materijale. Kvalitativni dijagrami „naprezanje – istezanje“ ($\sigma - \varepsilon$) koji se najviše koriste u strojogradnji prikazani su na slici 4.4.

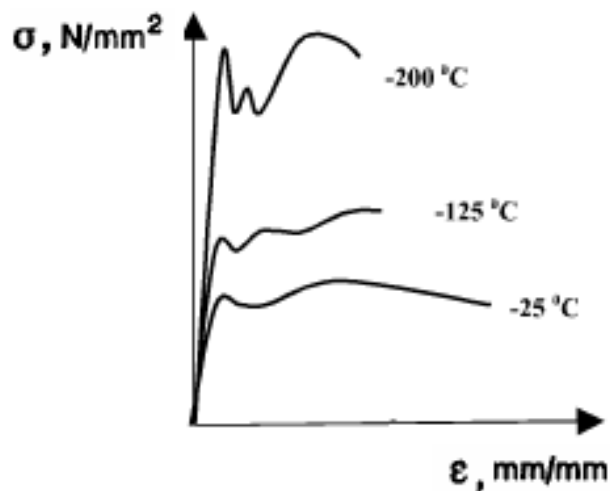


Slika 4.4 Dijagram naprezanje – istezanje za različite materijale

4.2. Statički vlačni pokus pri sniženim temperaturama

Sukladno eksploatacijskim uvjetima, ispitivanje mehaničkih svojstava se provodi i kod sniženih ili povišenih temperatura. Sniženje ili povišenje temperature utječe na strukturno stanje materijala (npr. na čvrstoću veze između atoma ili na difuziju). Radi toga se promjena temperature mora očitovat i na ona mehanička svojstva koja se određuju statičkim vlačnim ispitivanjem. Da bi se utvrdio utjecaj snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa epruvetu treba kontinuirano tijekom ispitivanja hladiti u odgovarajućoj komori.

Utjecaj snižene temperature na mehanička svojstva mnogo je znakovitiji kod legura s BCC rešetkom (svi čelici osim austenitnih) nego kod legura s FCC rešetkom.



Slika 4.5 Utjecaj snižene temperature na granicu razvlačenja općeg konstrukcijskog čelika

Kako je prikazano na slici 4.5, sniženjem temperature ispitivanja granica razvlačenja R_e i vlačna čvrstoća R_m rastu, granica razvlačenja R_e postaje jače izražena, dok se istezljivost A smanjuje. Vrijednost modula elastičnosti se ne mijenja, na što ukazuje nepromijenjeni nagib Hooke-ova pravca za sve temperature ispitivanja.

4.3. Epruvete za ispitivanje

Sve epruvete trebaju se obraditi na propisane dimenzije, prema zahtjevima *Registra* te pri uzimanju uzoraka za ispitivanje ili epruveta za ispitivanje treba nastojati izbjeći deformacije materijala. Ako se epruvete za ispitivanje režu toplinskim postupkom ili piljenjem s uzorka, treba predvidjeti dovoljan dodatak, koji se kasnije odstranjuje strojnom obradom.

Epruvete mogu biti okruglog ili plosnatog oblika, a prednost se obično daje proporcionalnim okruglim epruvetama, ali ako to nije moguće moraju se upotrijebiti plosnate epruvete.

Za specificiranje ispitnih epruveta primjenjuju se sljedeće oznake (slika 4.6):

d_0 - promjer vrata epruvete

d_1 - promjer glave

h - duljina glave

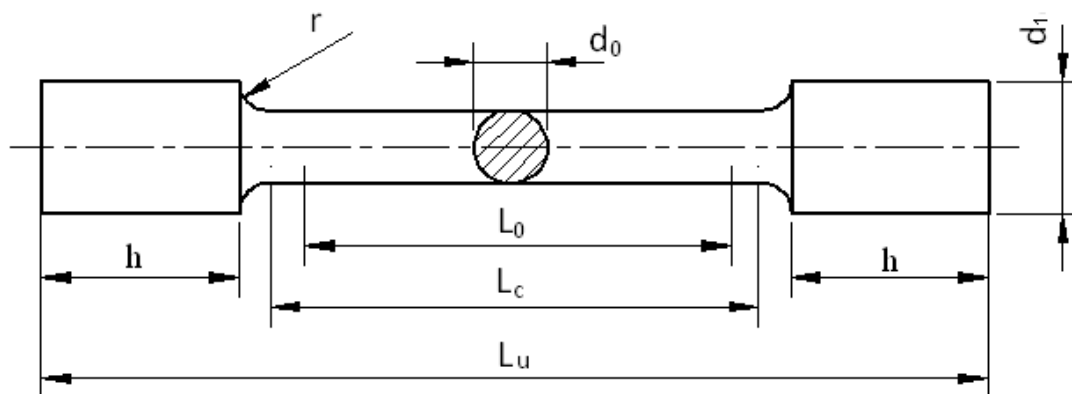
L_0 - početna mjerna duljina

L_c - duljina ispitnog dijela

L_u - ukupna duljina epruvete

S_0 - početna površina presjeka

r - prijelazni polumjer



Slika 4.6 Karakteristične veličine okrugle epruvete

Prvenstveno treba primjenjivati kratke proporcionalne epruvete, s početnom mjernom duljinom od $L_0=5,65\sqrt{S_0}$, jer se zahtjevi za veličinom produljenja u *Pravilima Registra* odnose na tu mjernu duljinu. Preporučene vrijednosti proporcionalnih okruglih epruveta prema *Registru* dane su u tablici 4.2.

Tablica 4.2 Preporučene dimenzije epruveta prema *Registru*

| Veličina | d_0 | L_0 | L_c | r |
|----------------|-------|-------|-------|-----|
| Dimenzije [mm] | 14 | 70 | 85 | 10 |

Pošto ispitni uređaj na kojem su vršena ispitivanja može postići maksimalnu silu od $F = 50$ kN smanjen je promjer epruvete, prema zahtjevima *Registra*. U tablici 4.3 dane su dimenzije po kojima su izrađene epruvete.

Tablica 4.3 Dimenzije za izradu epruveta

| Veličina | d_0 | d_1 | L_0 | L_c | L_u | r | h |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|
| Dimenzije [mm] | 8 | 12 | 40 | 48 | 115 | 10 | 30 |

Prije eksperimenta epruvete su izmjerene te su određene sve dimenzije relevantne za ispitivanje statičkim vlačnim pokusom. Pomičnom mjerkom su određene širine vrata i debljine epruveta jer je njima definirana površina poprečnog presjeka epruvete koja je uz silu opterećenja najbitnija veličina za određivanje naprezanja. U tablici 4.4 dane su dimenzije promjera epruveta te površina poprečnih presjeka. Promjeri vrata epruvete na svakoj pojedinoj epruveti mjereni su na šest različitih mjesta te je uzeta prosječna vrijednost.

Tablica 4.4 Promjeri i površine poprečnih presjeka epruveta

| Br. | Oznaka epruvete | Promjer d_0 [mm] | Površina S_0 [mm ²] |
|-----|-----------------|--------------------|-----------------------------------|
| 1 | E_1_sobna | 7,980 | 50,014 |
| 2 | E_2_sobna | 7,955 | 49,701 |
| 3 | E_3_sobna | 8,197 | 52,771 |
| 4 | E_4_M40 | 7,995 | 50,202 |
| 5 | E_5_M40 | 7,970 | 49,889 |
| 6 | E_6_M40 | 7,983 | 50,052 |
| 7 | E_7_M80 | 7,880 | 48,768 |
| 8 | E_8_M80 | 7,930 | 49,389 |
| 9 | E_9_M80 | 7,950 | 49,639 |
| 10 | E_10_M165 | 8,018 | 50,492 |
| 11 | E_11_M165 | 6,855 | 36,906 |
| 12 | E_12_M165 | 6,851 | 36,863 |

5. Provedba eksperimenta

5.1. Ispitni uređaji i oprema

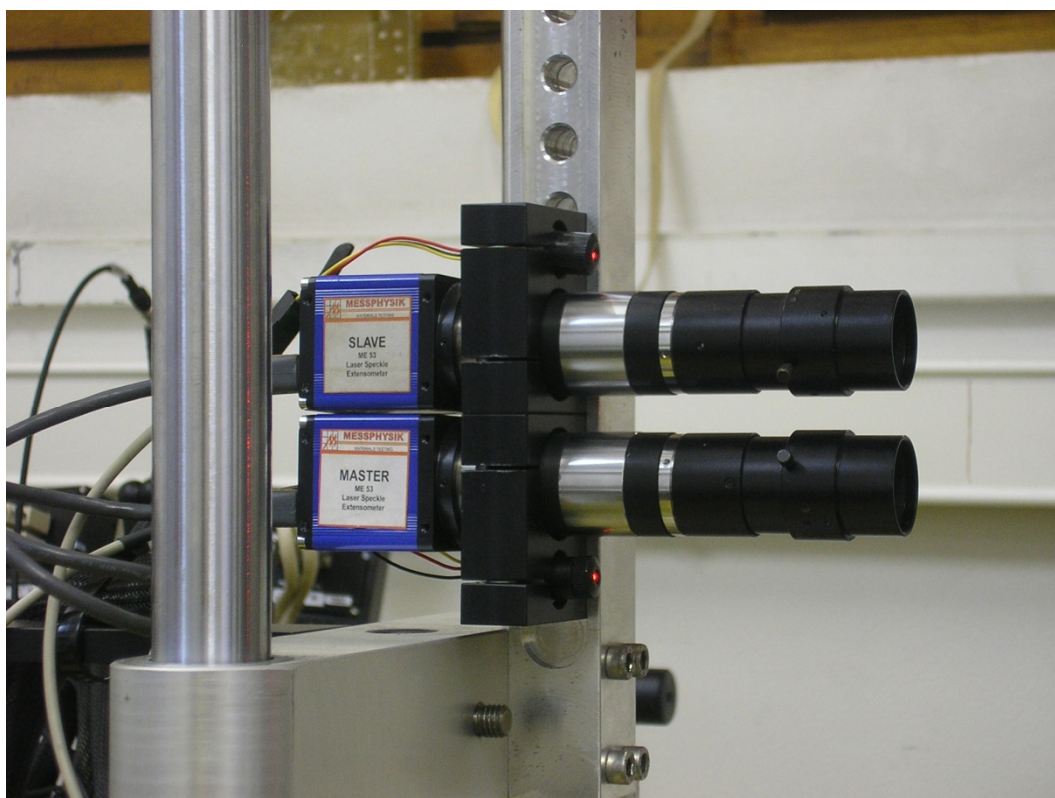
Ispitivanja su provedena na statičkoj kidalici Messphysik Beta 50-5 s maksimalnom silom opterećenja od 50 kN (slika 5.1). Pomak čeljusti kidalice ostvaruje se pomoću dva vretena. Prije ispitivanja u programskom sučelju kidalice podešavaju se svi potrebni parametri poput brzine ispitivanja, presjeka, dimenzija epruvete, vrsta ispitivanja. Epruvete su ispitivane na četiri temperature i to: 22°C – sobna temperatura, - 40°C, - 80°C, - 165°C, za svaku temperaturu provedena su po tri ispitivanja.



Slika 5.1 Statička kidalica Messphysik Beta 50-5

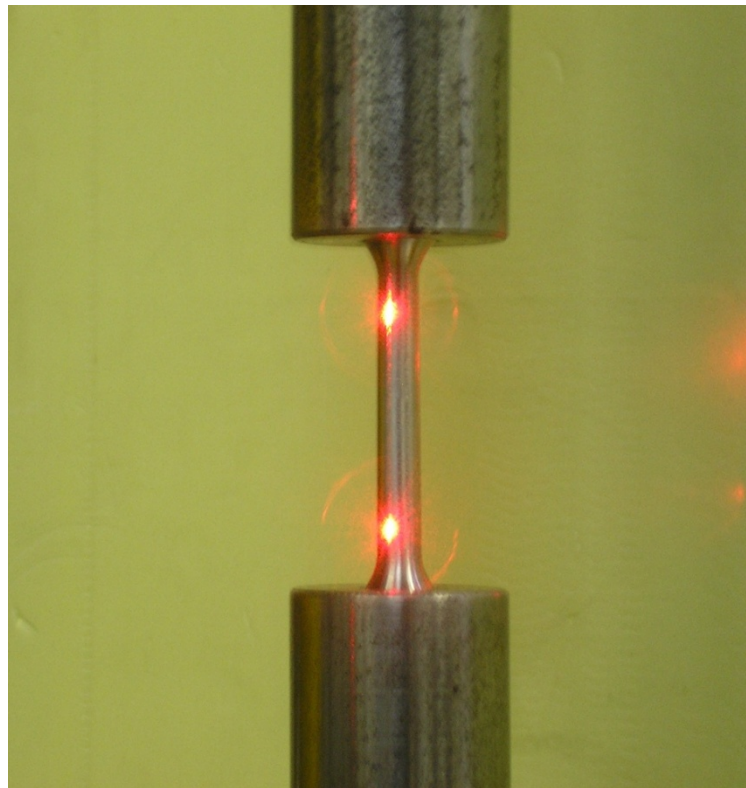
5.2. Laserski ekstenzometar

Pri određivanju mehaničkih svojstava materijala potrebno je koristiti precizne mjerne uređaje i instrumente. Naprezanje i istezanje su dva glavna parametra iz kojih se računa većina mehaničkih svojstava tijekom jednoosnog testiranja. Naprezanje je dobiveno namještanjem mjernog uzorka u čeljusti i opterećivanjem pomoću kalibrirane mjerne doze, dok se istezanje mjeri pomoću ekstenzometara. Deformacija epruvete izračunava se iz mjerenja relativnog pomaka dviju odabranih točaka na epruveti. Postoji više vrsta ekstenzometara, od običnih elektrootpornih mjernih traka preko mehaničkih, zrcalnih i dr. od kojih svi imaju specifične prednosti i nedostatke. Razvojem digitalnih kamera visoke razlučivosti i brzog prijenosa podataka, u kombinaciji sa snažnim algoritmima za analizu slike, nastala je nova generacija ekstenzometara gdje se ističu dva osnovna tipa: videoekstenzometar (*videoextensometer*) i laserski ekstenzometar (*laser speckle extensometer*). U ovom radu deformacije materijala mjerene su laserskim ekstenzometrom (slika 5.2). Prednost ovakvog uređaja je što mjerenje nije ograničeno obzirom na produljenje epruvete, nije potrebno nanositi nikakve markera na epruvete te se može mjeriti kroz staklo komore za temperiranje što je ovdje jako bitno.



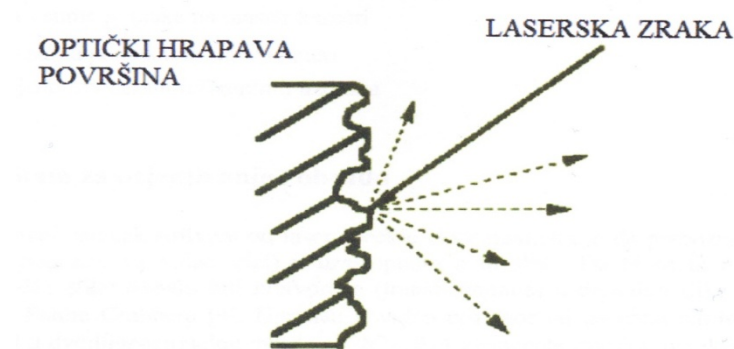
Slika 5.2 Kamere s laserima montirane na nosaču

Na slici 5.2 vidljivo je da se sustav sastoji od dvije kamere i dvije laser diode snage 3mW crvenog snopa (valne duljine 657 nm). Međusobni razmak kamera definira početni razmak mjernih točaka na epruveti, u ovom slučaju on iznosi 40 mm. Za vrijeme rada laserskog ekstenzometra, koherentno lasersko svjetlo obasjava površinu epruvete dok kamera snima refleksiju s površine (slika 5.3).



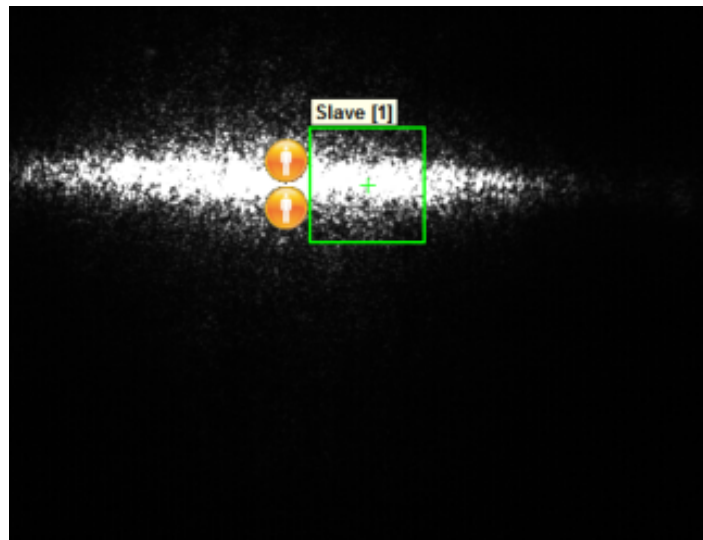
Slika 5.3 Lasersko svjetlo na površini epruvete

Kad optički hrapava površina bude pogođena koherentnom laserskom zrakom, svjetlo biva disperzirano u mnogo različitih smjerova (slika 5.4).



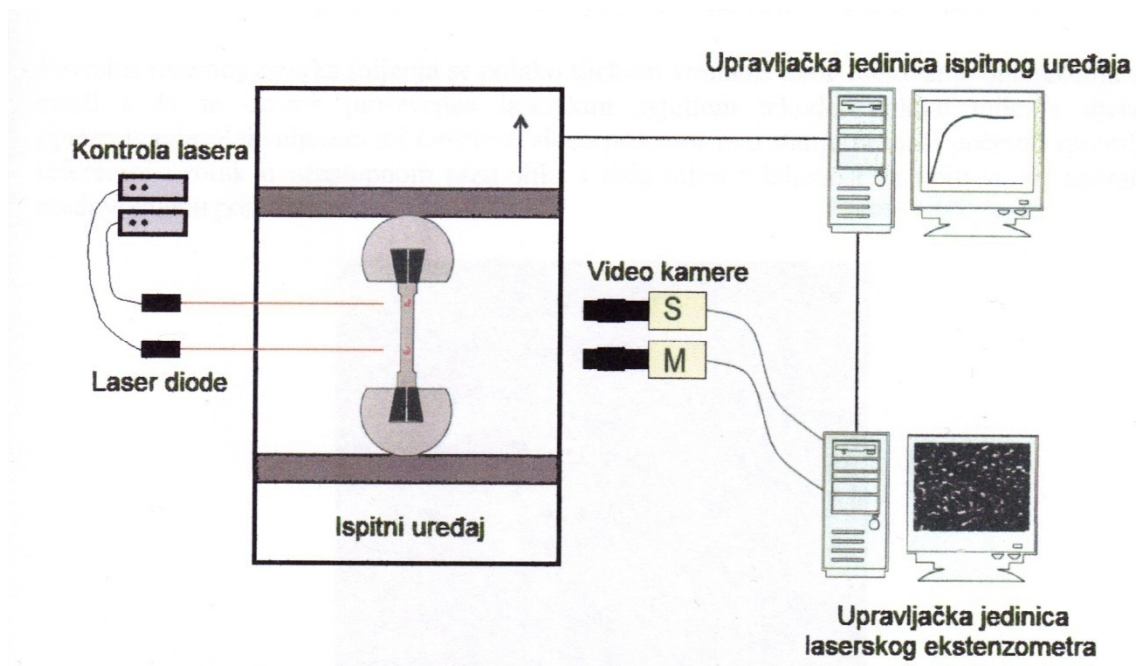
Slika 5.4 Disperzija laserske zrake pri udaru na optički hrapavu površinu

Zbog hrapavosti površine dolazi do pojave interferencije zraka svjetlosti, te se na slici vidi zrnata struktura nasumično osvijetljenih piksela (eng. *laser speckle effect*). Svaka promatrana grupa piksela (*faseta*) ima jedinstveni uzorak, poput otiska prsta, čija je putanja po slici u korelaciji s razvlačenjem materijala (slika 5.5).



Slika 5.5 Speckle uzorak na okrugloj epruveti

Shematski prikaz kompletnog sustava i njegova povezanost s ispitnim uređajem prikazan je na slici 5.6.



Slika 5.6 Shematski prikaz dijelova sustava Laser Speckle ekstenzometra

Površina mjernog uzorka mijenja se polako tijekom vremena zbog djelovanja opterećenja, a to znači i da se uzorak dobiven laserskim svjetlom također mijenja tijekom opterećivanja. Zahvaljujući toj činjenici video procesor je u stanju pronaći početno spremljen referentni uzorak u uzastopnom nizu slika i tada mjeri udaljenost za koju se taj uzorak u međuvremenu pomakao.

Primjenjujući tu proceduru iterativno od slike do slike u stvarnom vremenu, može se mjeriti istežanje unutar vidnog područja ovih dvaju kamera.

Istežanje se određuje prema izrazu:

$$\varepsilon = \frac{\sum ds - \sum dm}{l_0}$$

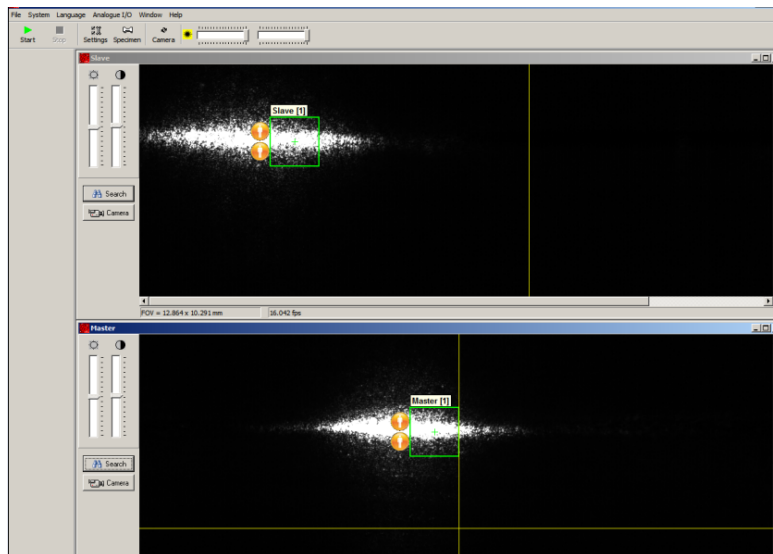
gdje je:

$\sum dm$ – zbroj pomaka na master kameri,

$\sum ds$ – zbroj pomaka na slave kameri,

l_0 – udaljenost početnih referentnih uzoraka.

Osnovni zadatak software od laser spackle ekstenzometra je da prepozna kompleksni uzorak (područje na slici) u uzastopnom nizu slika. Da bi se to ostvarilo prvo analogne video slike trebaju biti pretvorene (transformirane) u digitalne slike posredstvom takozvanog Frame Grabbera. Ugrađen u video procesor taj poseban hardware pretvara video signal u dvodimenzionalnu matricu 1280x1024 elementa (točaka, pixela), svjetloće 256 nijansi sive boje (od bijele do crne) sve s frekvencijom od 25 slika u sekundi. Za određivanje pomaka nije potrebno, ni moguće, a niti praktično analizirati kompletnu video sliku u stvarnom vremenu, već je dovoljno odabrati područje slike (promjenjive pozicije i veličine) koje će se analizirati (slika 5.7). Ta područja također funkcioniraju kao virtualni markeri između kojih se mjeri istežanje, te obuhvaća računanje pomaka tih markera od slike do slike.



Slika 5.7 Prikaz grafičkog sučelja za vrijeme rada laserskog ekstenzometra

5.3. Postupak ispitivanja

Eksperimenti su provedeni s već opisanom mjernom opremom i softwaerom. Zbog malog prostora za rad s epruvetama u komori za hlađenje klasične čeljusti za prihvat epruvete nisu pogodne. Umjesto toga korištene su navojne šipke prikazane slikom 5.8, u koje se epruveta učvršćuje navojem. Epruveta se najprije učvršćuje u gornju, pa zatim u donju navojnu šipku, koja je učvršćena za nepomični stol ispitnog uređaja. Pošto se ispitivanje izvodi na temperaturama od -40 , -80 i -165°C , epruvete su hlađene na željenu temperaturu na kojoj se drže dva sata da bi se ravnomjerno ohladile. Da se izbjegne prednaprezanje epruvete, gornja navojna šipka se tek nakon hlađenja učvršćuje za ispitni uređaj, pinom.



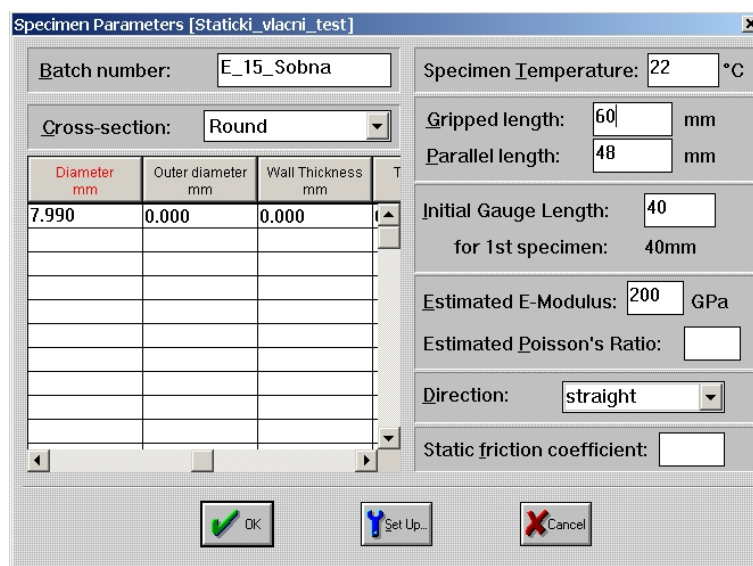
Slika 5.8 Epruveta učvršćena u navojne šipke

Za hlađenje epruveta upotrebljavan je tekući dušik. Željena temperatura u komori regulirana je uređajem za regulaciju, također od proizvođača Messphysik, prikazan na slici 5.9. Uređaj za regulaciju temperature na sebi ima zaslon na kojem je vidljiva trenutna temperatura u komori, izmjerena pomoću senzora (na slici prikazana zelenom bojom), te željena temperatura na koju se epruveta želi ohladiti, tj. temperatura na kojoj se namjerava provesti ispitivanje (na slici prikazana crvenom bojom). Ta temperatura se podešava prije samog hlađenja.



Slika 5.9 Uređaj za regulaciju temperature

Prije samog ispitivanja još je potrebno unijeti podatke o mjernom uzorku tj. epruveti, koji se unose u prozoru „specimen“, što je vidljivo na slici 5.10.



Slika 5.10 Parametri u prozoru Specimen

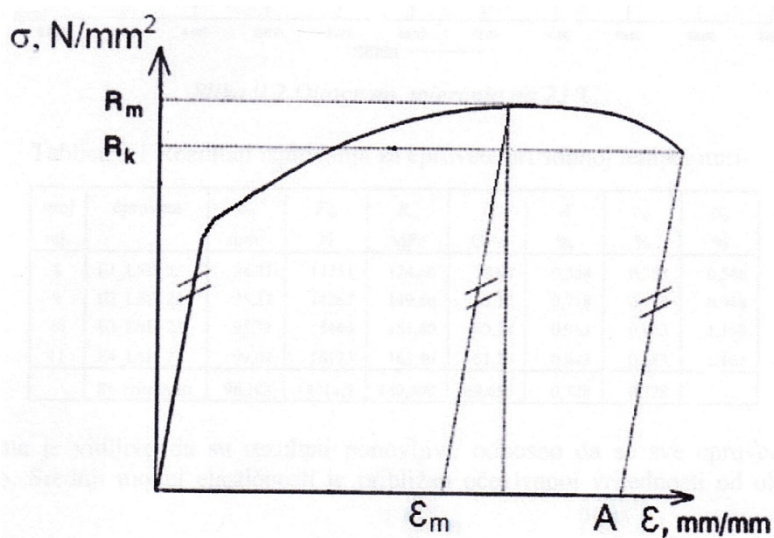
6. Rezultati ispitivanja

U ovom poglavlju dani su rezultati svih ispitivanja i prikazani su pripadajući dijagrami. Ispitivanja su se provodila na 22°C - sobna temperatura, -40°C, -80°C i -165°C, te su za svaku definiranu temperaturu ispitane po tri epruvete. Nakon rezultata svih mjerenja dan je preklopljeni dijagram s krivuljama ispitivanja karakterističnih epruveta za svaku temperaturu kako bi se vizualno mogli usporediti rezultati. Na kraju su dani dijagrami koji pokazuju ovisnost nekih mehaničkih svojstava o temperaturi. Iz tih dijagrama i dobivenih rezultata moguće je zaključiti o ponašanju materijala na niskim temperaturama.

Svi dijagrami su prikazani u istom mjerilu kako bi se rezultati mogli uspoređivati vizualno i kvalitativno. Uz sva ispitivanja dana je tablica u kojoj se nalaze dobivene vrijednosti traženih veličina, te za svako ispitivanje će biti izračunata i u tablici prikazana srednja vrijednost dobivenih traženih vrijednosti R_m , deformacije ε_m , istezljivost A te modul elastičnosti E . Definicija očitanih podataka može se vidjeti na slici 6.1.

U tablicama su prikazane sljedeće veličine:

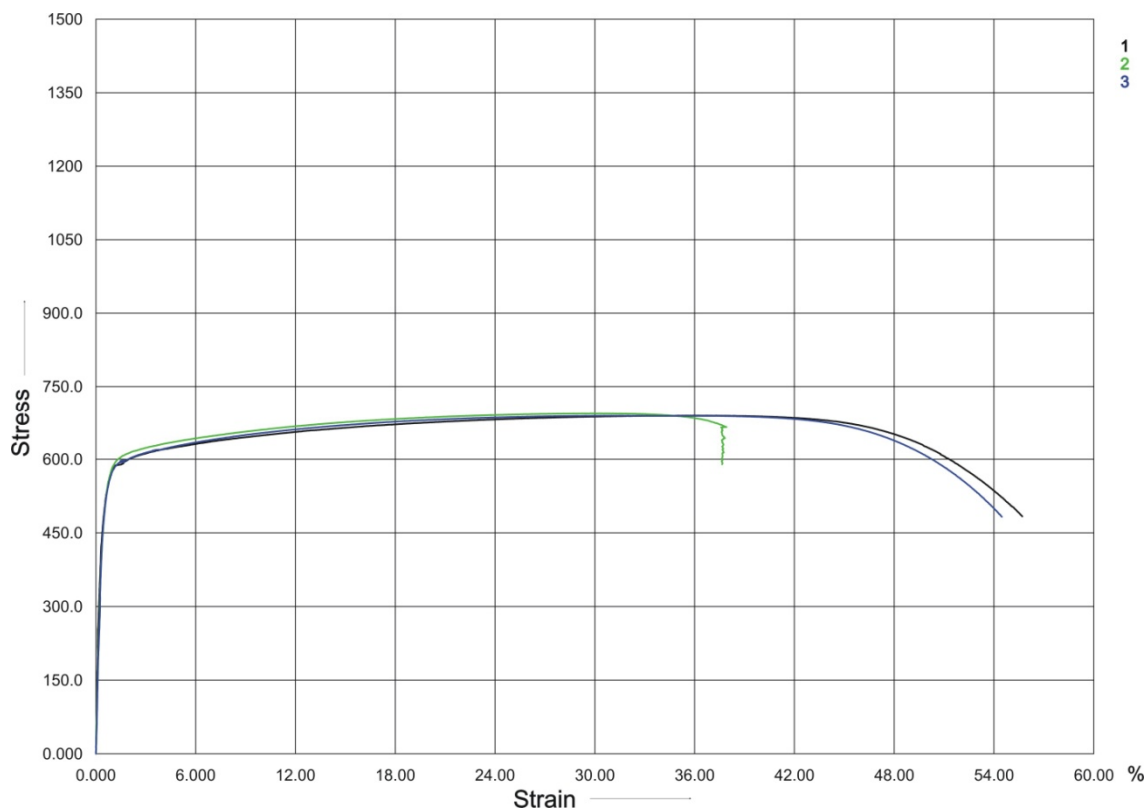
- d_0 - promjer vrata epruvete,
- S_0 - površina porečnog presjeka,
- E - modul elastičnosti,
- $R_{p0,2}$ - konvencionalna granica razvlačenja od 0,2%,
- R_m - vlačna čvrstoća,
- ε_m - neproporcionalna postotna deformacija pri najvećem opterećenju,
- A - istezljivost.



Slika 6.1 Karakteristične veličine $\sigma - \varepsilon$ dijagrama

6.1. Ispitivanje na sobnoj temperaturi (22°C)

Rezultati ispitivanja na sobnoj temperaturi prikazani su dijagramom $\sigma - \varepsilon$ na slici 6.2 i tablicom 6.1. Uočava se malo rasipanje rezultata odnosno dobro poklapanje krivulja. Materijal nema izraženu granicu razvlačenja te se odabire konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$, čiji je postupak objašnjen u poglavlju 4.1.



Slika 6.2 Dijagram mjerenja na sobnoj temperaturi

Tablica 6.1 Rezultati ispitivanja za epruvete na sobnoj temperaturi

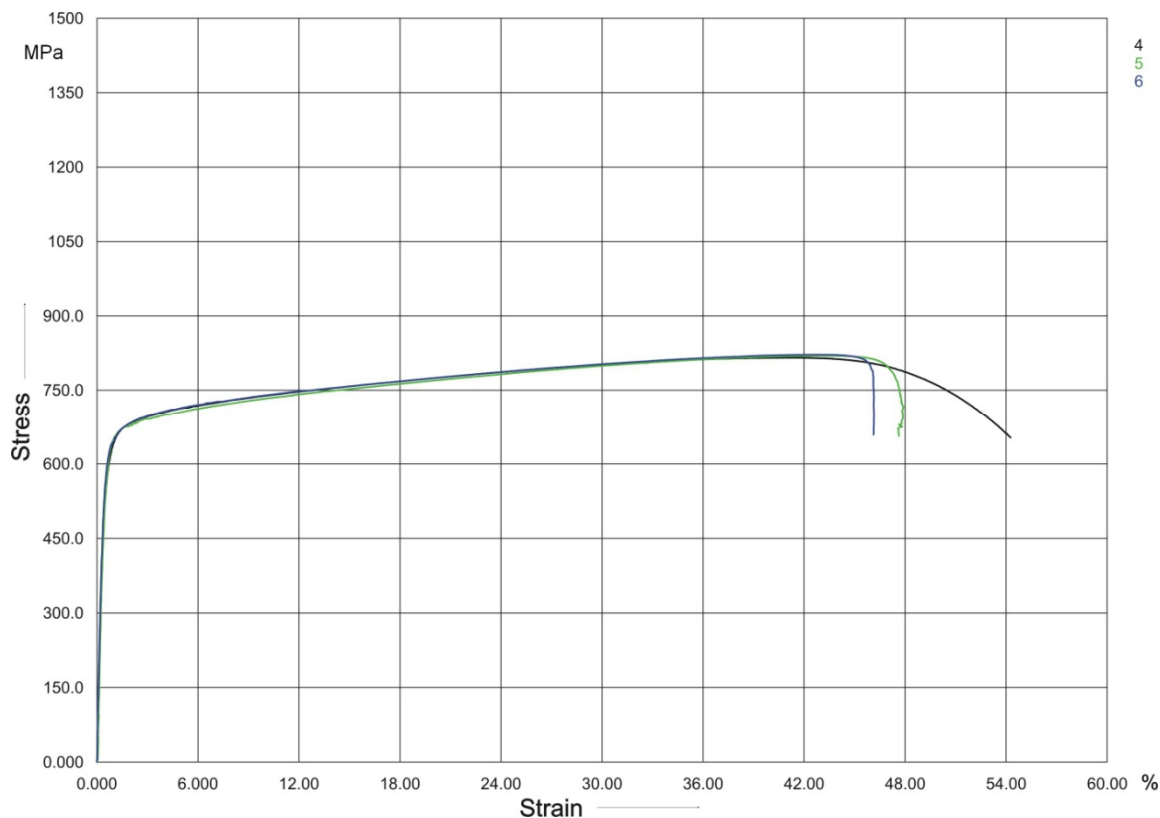
| broj mj. | oznaka epruvete | d mm | S_0 mm ² | E MPa | $R_{p0,2}$ MPa | R_m MPa | ε_m % | A % |
|----------|------------------|--------|-----------------------|---------|----------------|-----------|-------------------|---------|
| 1 | E_1_sobna | 7,980 | 50,014 | 204,4 | 485,4 | 688,9 | 35,79 | 55,44 |
| 2 | E_2_sobna | 7,955 | 49,701 | 199,4 | 499,8 | 693,4 | (29,82) | (37,24) |
| 3 | E_3_sobna | 8,197 | 52,771 | 192 | 496,7 | 688,8 | 30,52 | 54,16 |
| | Sred. vrijednost | 8,044 | 50,082 | 198,6 | 494,0 | 690,4 | 32,04 | 54,80 |

Kod ispitivanja epruvete *E_2_sobna* došlo je do nastanka vrata epruvete točno na mjestu laserskog svijetla, istežanje se nije moglo točno očitati, što je na slici 6.2 vidljivo prekidom dijagrama. Za izračun srednje vrijednost istežanja A i deformacije ε_m nisu uzete u obzir vrijednosti spomenute epruvete nego ostale dvije.

Kako je vidljivo u tablici 6.1, vrijednosti E , $R_{p0,2}$ i R_m imaju približno jednake vrijednosti, a na dijagramu $\sigma - \varepsilon$ je vidljivo da se rezultati ponašaju ujednačeno (slika 6.2).

6.2. Ispitivanje na temperaturi -40°C

Rezultati ispitivanja na temperaturi -40°C prikazani su dijagramom $\sigma - \varepsilon$ na slici 6.3 i tablicom 6.2.



Slika 6.3 Dijagram mjerenja na -40°C

Tablica 6.2 Rezultati ispitivanja za epruvete pri temperaturi -40°C

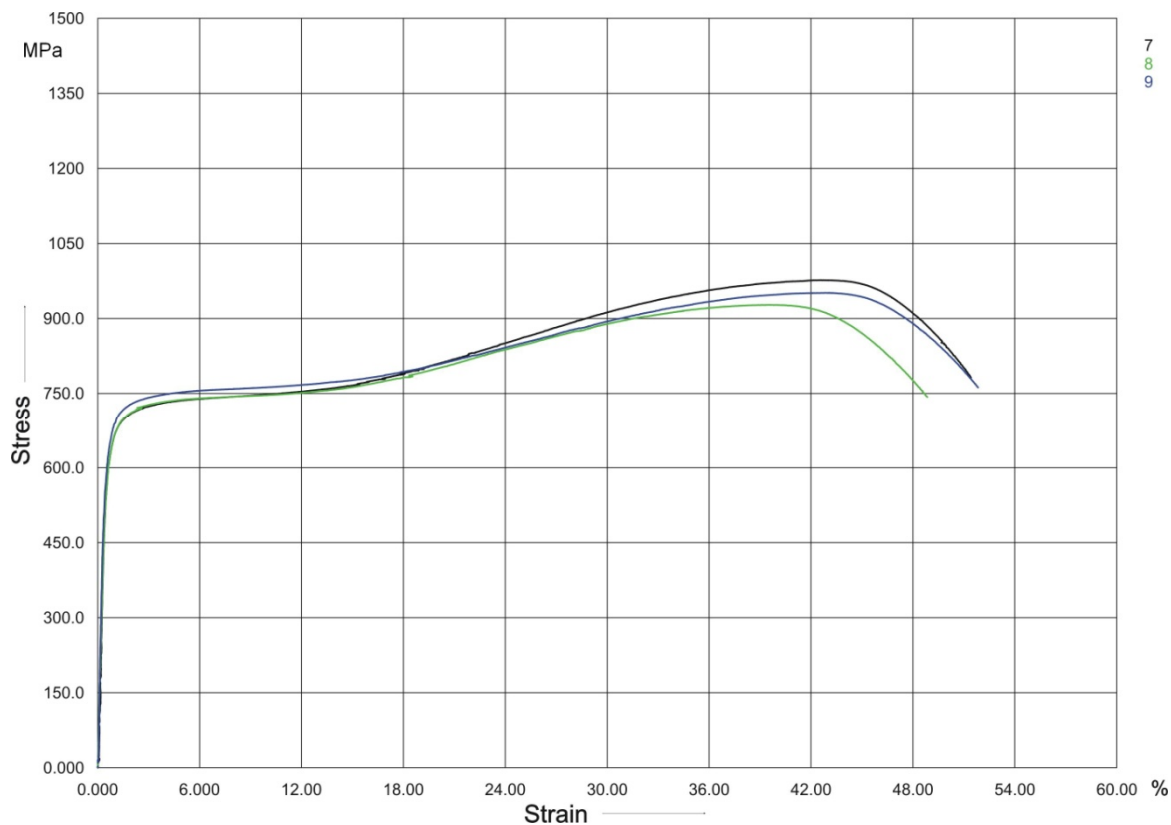
| broj mj. | oznaka epruvete | d mm | S_0 mm ² | E MPa | $R_{p0,2}$ MPa | R_m MPa | ε_m % | A % |
|----------|------------------|-----------|--------------------------|------------|-------------------|--------------|----------------------|----------|
| 4 | E_4_M40 | 7,995 | 50,202 | 198,5 | 568,5 | 815,9 | 40,30 | 53,82 |
| 5 | E_5_M40 | 7,970 | 49,889 | 203,6 | 543,7 | 819,8 | 42,85 | (47,26) |
| 6 | E_6_M40 | 7,983 | 50,052 | 197,5 | 578,8 | 821,9 | 42,26 | (45,74) |
| | Sred. vrijednost | 7,983 | 50,048 | 199,8 | 560,3 | 819,2 | 41,80 | 53,82 |

Kod ispitivanja na temperaturi -40°C, do pojave vrata na mjestu laserskog svjetla došlo je kod ispitivanja dvije epruvete i to kod epruvete E_5_M40 i E_6_M40 , što je utjecalo na rezultate istezanja A , (u dijagramu 6.3 vidljiv prekid).

Iz dijagrama (slika 6.3) i tablice rezultata 6.2 vidljivo je da vrijednosti modula elastičnosti E , konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$, vlačne čvrstoće R_m i deformacije ε_m imaju približno jednake vrijednosti. Pretpostavlja se da bi i iznosi istezljivosti A imali vrijednosti kao i epruveta E_4_M40 , čija je vrijednost ujedno i uzeta kao srednja vrijednost za istezljivost.

6.3. Ispitivanje na temperaturi -80°C

Rezultati ispitivanja na temperaturi -80°C prikazani su dijagramom $\sigma - \varepsilon$ na slici 6.4 i tablicom 6.3.



Slika 6.4 Dijagram mjerenja na -80°C

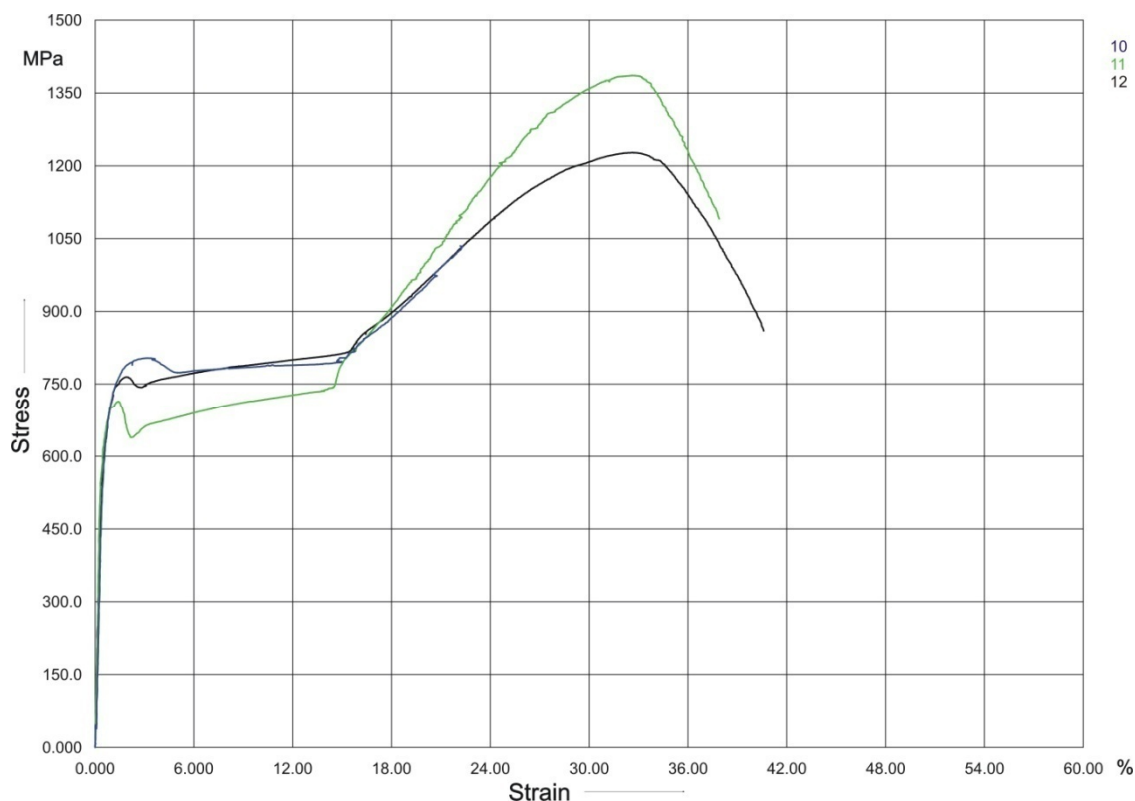
Tablica 6.3 Rezultati ispitivanja za epruvete pri temperaturi -80°C

| broj mj. | oznaka epruvete | d mm | S_0 mm ² | E MPa | $R_{p0,2}$ MPa | R_m MPa | ε_m % | A % |
|----------|------------------|--------|-----------------------|---------|----------------|-----------|-------------------|-------|
| 7 | E_7_M80 | 7,880 | 48,768 | 195,2 | 572,6 | 976,7 | 42,14 | 50,94 |
| 8 | E_8_M80 | 7,930 | 49,389 | 203,6 | 561,8 | 927,2 | 39,14 | 48,41 |
| 9 | E_9_M80 | 7,950 | 49,639 | 212,1 | 580 | 951,3 | 42,34 | 51,46 |
| | Sred. vrijednost | 7,920 | 49,265 | 203,6 | 571,5 | 951,7 | 41,21 | 50,27 |

Iz dijagrama i dobivenih rezultata vidljivo je da iako dolazi do sitnog rasipanja u području plastičnih deformacija epruvete se ponašaju približno isto. Sve epruvete imaju približno jednake vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ i modula elastičnosti E , dok su kod epruvete E_8_M80 vidljiva odstupanja vrijednosti vlačne čvrstoće R_m , istezljivosti A i deformacija ε_m .

6.4. Ispitivanje na temperaturi -165°C

Ispitivanje na temperaturi -165°C provedeno je na tri epruvete. Pri ispitivanju epruvete *E_10_M165* koja je imala promjer vrata 8 mm, na ispitnom uređaju postignuta je maksimalna sila od $F=50\text{ kN}$, a da epruveta nije pukla. Zbog toga je promjer vrata epruveta za sljedeća dva ispitivanja na ovoj temperaturi smanjen na $d_0=7\text{ mm}$.



Slika 6.5 Dijagram mjerenja na -165°C

Tablica 6.4 Rezultati ispitivanja za epruvete pri temperaturi -165°C

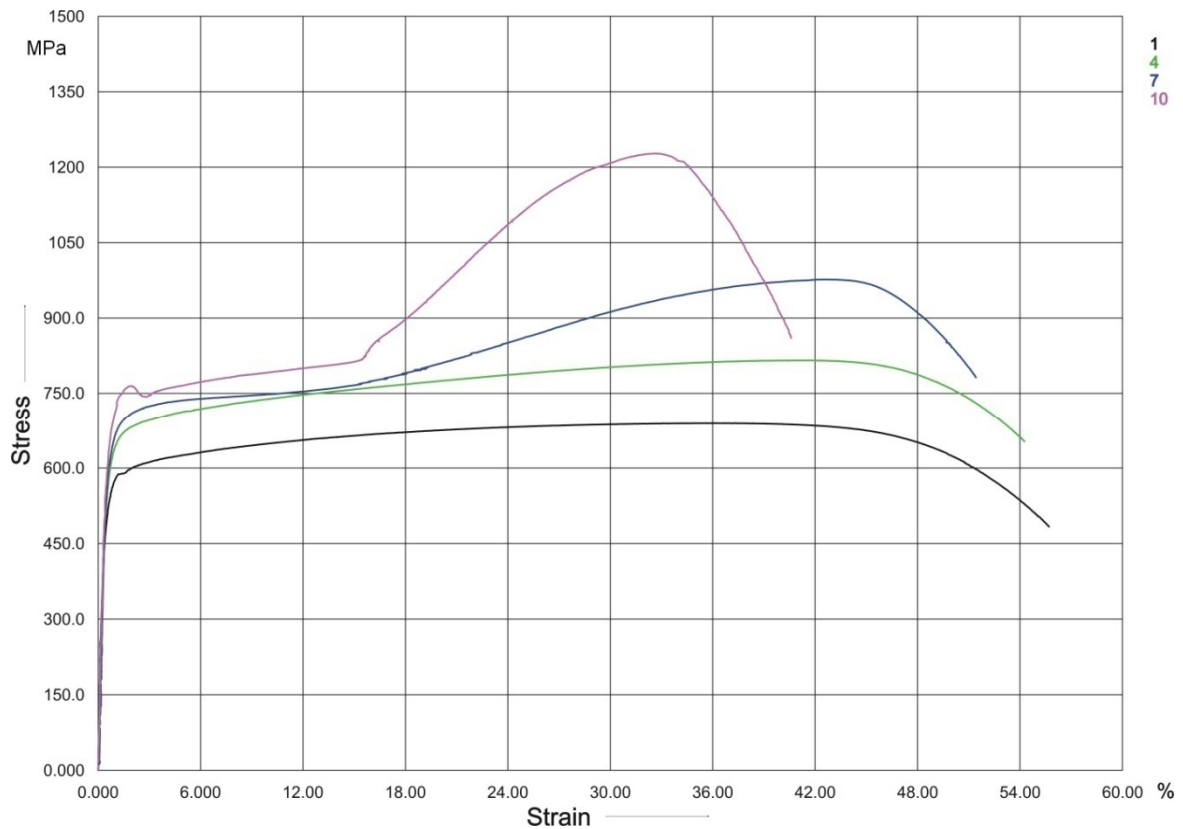
| broj mj. | oznaka epruvete | d mm | S_0 mm ² | E MPa | $R_{p0,2}$ MPa | R_m MPa | ε_m % | A % |
|----------|------------------|--------|-----------------------|---------|----------------|-----------|-------------------|---------|
| 10 | E_10_M165 | 8,018 | 50,492 | 200,5 | 592,1 | (1035) | (21,53) | (21,53) |
| 11 | E_11_M165 | 6,855 | 36,906 | 198 | 650,2 | 1386,2 | 31,68 | 37,18 |
| 12 | E_12_M165 | 6,851 | 36,86 | 203,2 | 603,4 | 1227,7 | 31,91 | 40,10 |
| | Sred. vrijednost | 6,853 | 36,883 | 200,6 | 571,5 | 1306,9 | 31,795 | 38,64 |

Kako je vidljivo na dijagramima na slici 6.5, dolazi do rasipanja rezultata više nego u prethodnim dijagramima, što može biti utjecaj niskih temperatura na kojima su provedena ova ispitivanja, a može biti i tehničke naravi, odnosno moguće je da epruvete nisu bile identično protemperirane. U tablici rezultata 6.4 se može vidjeti da vrijednosti modula elastičnosti E i konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ za sve tri epruvete imaju približno iste vrijednosti. Kod epruveta *E_11_M165* i *E_12_M165* za iznose vlačne čvrstoće R_m , istezljivosti A i

deformacije ε_m , iako dolazi do rasipanja rezultata, može se reći da imaju približno iste vrijednosti. Budući da epruveta E_{10_M165} tijekom ispitivanja nije pukla njene vrijednosti nisu uzete u obzir kod izračunavanja srednjih vrijednosti veličina R_m , ε_m i A (vrijednosti u zagradama u tablici 6.4).

6.5. Skupni dijagram ispitivanja

Rezultati ispitivanja za karakteristične epruvete za svaku temperaturu ispitivanja prikazani su dijagramom $\sigma - \varepsilon$ na slici 6.6 i u tablici 6.5.



Slika 6.6 Skupni dijagram mjerenja

Tablica 6.5 Rezultati ispitivanja za karakteristične epruvete za svaku temperaturu ispitivanja

| broj mj. | oznaka epruvete | d mm | S_0 mm ² | E MPa | $R_{p0,2}$ MPa | R_m MPa | ε_m % | A % |
|----------|-----------------|--------|-----------------------|---------|----------------|-----------|-------------------|-------|
| 1 | E_1_sobna | 7,980 | 50,014 | 204,4 | 485,4 | 688,9 | 35,79 | 55,44 |
| 4 | E_4_M40 | 7,995 | 50,202 | 198,5 | 568,5 | 815,9 | 40,30 | 53,82 |
| 7 | E_7_M80 | 7,880 | 48,768 | 195,2 | 572,6 | 976,7 | 42,14 | 50,94 |
| 10 | E_10_M165 | 6,851 | 36,863 | 203,2 | 603,4 | 1227,7 | 31,68 | 37,18 |

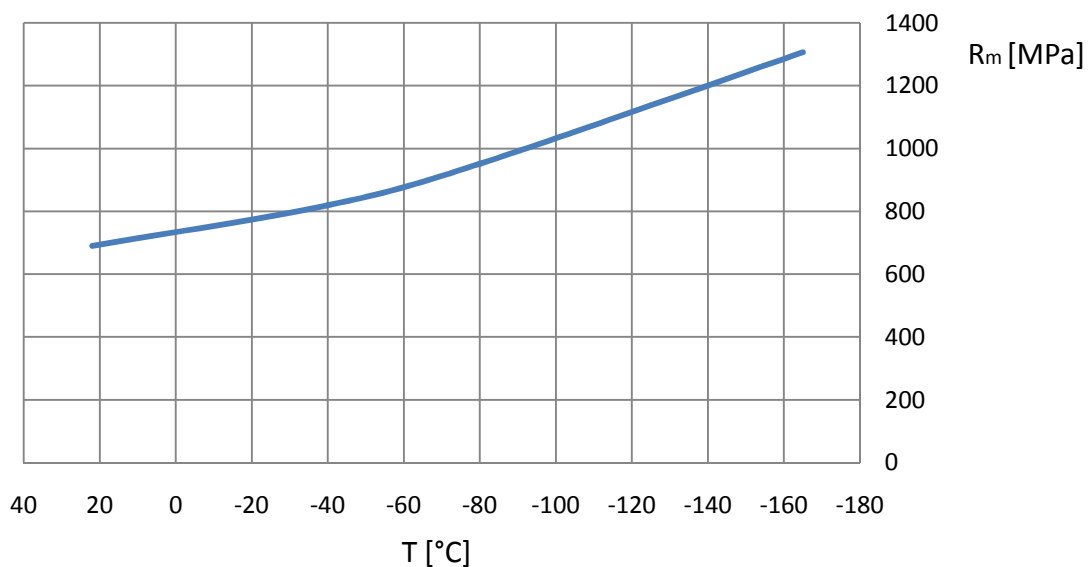
Za skupni dijagram ispitivanja uzeta je po jedna karakteristična epruveta za svaku ispitnu temperaturu. Kako je vidljivo na dijagramu na slici 6.6 i u tablici 6.5, sniženjem temperature

ispitivanja granica razvlačenja R_e i vlačna čvrstoća R_m rastu, granica razvlačenja postaje sve jače izražena, dok se istežljivost A i deformacija ε_m smanjuju. Vrijednosti modula elastičnosti E imaju približno jednake vrijednosti unatoč promjeni temperature. Na slici 6.6 vidljivo je da svi dijagrami za sve četiri temperature ispitivanja imaju isti nagib Hookovog pravca, što pokazuje da modul elastičnosti E ne ovisi o promjeni temperature.

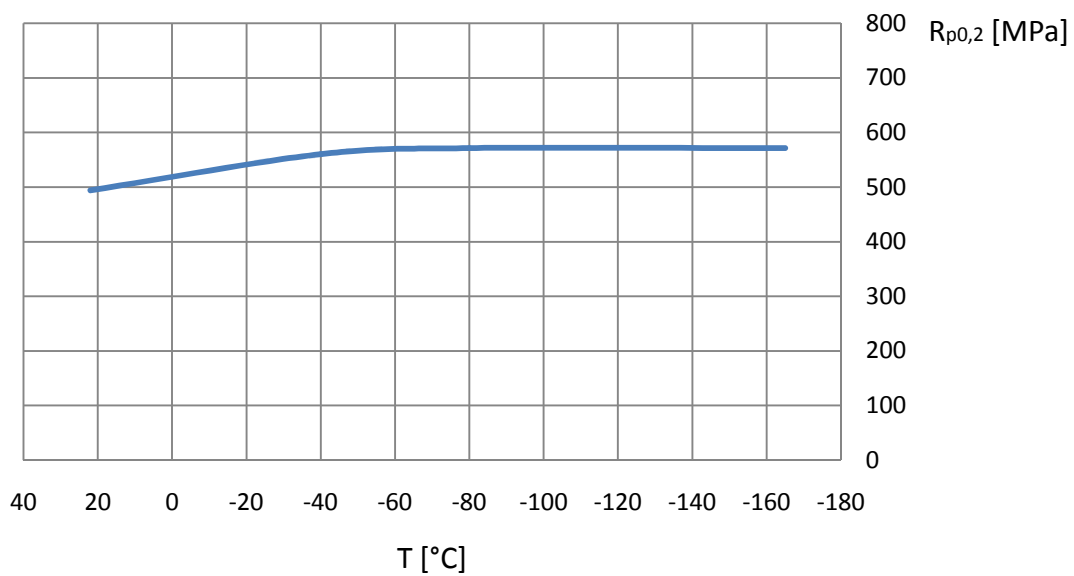
6.6. Dijagrami ovisnosti mehaničkih svojstava o temperaturi

Pomoću srednjih vrijednosti mehaničkih svojstava vlačne čvrstoće R_m , konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$, istežljivosti A i modula elastičnosti E na različitim temperaturama napravljeni su dijagrami koji nam pokazuju promjene tih veličina u ovisnosti o temperaturi.

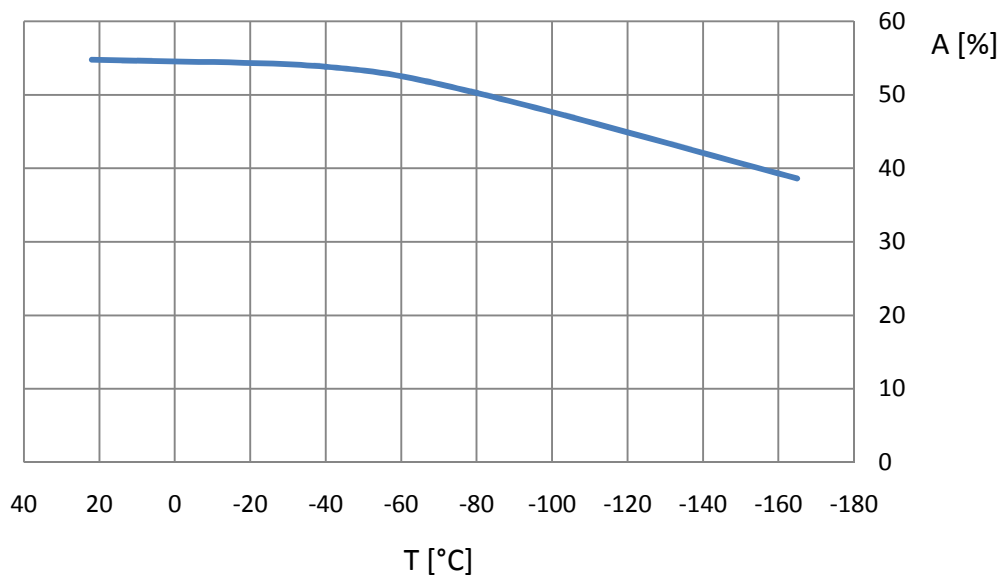
Dijagrami su prikazani na slikama 6.7 do 6.10.



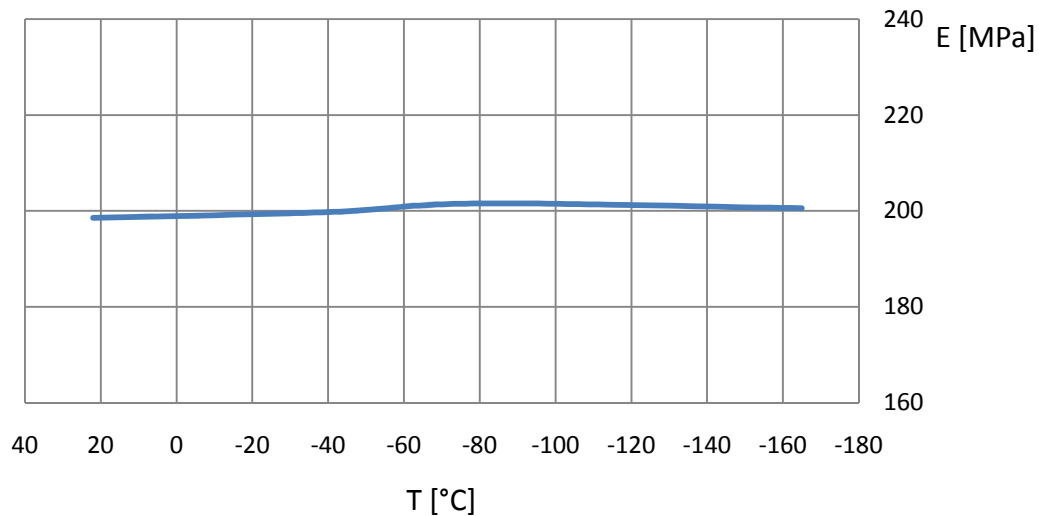
Slika 6.7 Ovisnost vlačne čvrstoće o temperaturi



Slika 6.8 Ovisnost konvencionalne granice razvlačenja o temperaturi



Slika 6.9 Ovisnost istezljivosti o temperaturi



Slika 6.10 Ovisnost modula elastičnosti o temperaturi

Iz dijagrama na slici 6.7 pokazuje ovisnost vlačne čvrstoće R_m o temperaturi T , vidljivo je da vlačna čvrstoća R_m sniženjem temperature, lagano raste od sobne do temperature -40°C , nagon čega taj porast postaje izraženiji.

Iz dijagrama na slici 6.8 vidljivo je da konvencionalna granica razvlačenja također ovisi o temperaturi, tako da snižavanjem temperature konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$ raste, na intervalu od sobne do temperature -80°C . Pošto je pri ispitivanju na temperaturi -165°C , došlo do rasipanja rezultata, u dijagramu nema rasta vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja na intervalu od -80°C do -165°C , te je za daljnje razmatranje potrebno izvršiti dodatna ispitivanja u tom intervalu temperatura.

Prema očekivanjima, sniženjem temperature pada istežljivost A , što se može vidjeti iz dijagrama na slici 6.9. Istežljivost A lagano opada na intervalu od sobne do temperature -80°C , nakon čega taj pad postaje izraženiji. Za daljnja razmatranja potrebno je provesti dodatna ispitivanja, pogotovo u intervalu temperatura od -80°C do -165°C , isto kao i za definiranje konvencionalne granice razvlačenja u tom intervalu temperatura.

Na slici 6.10 dijagramom je prikazana ovisnost modula elastičnosti E o temperaturi i može se zaključiti da je utjecaj temperature na modul elastičnosti E zanemariv.

7. Zaključak

S obzirom na vrstu tereta koju prevoze LNG brodovi i na radnu temperaturu u teretnim tankovima, na materijale za izradu tankova se postavljaju visoki zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava. Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, budući da se na osnovu njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. Ona su, kao i sva ostala svojstva materijala, posljedica strukturnog stanja materijala, koje se dobiva obradom materijala određenog sastava određenim tehnološkim postupkom.

U radu je pokazano da se s postojećom opremom u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku može provesti statički vlačni pokus na temperaturi -165°C .

Cilj ovog rada bio je eksperimentalno odrediti mehanička svojstva austenitnog čelika AISI 316L, koji se koristi za gradnju strukturnih tankova LNG brodova, na temperaturama 22°C , -40°C , -80°C i -165°C . Ispitivanjima su određene vrijednosti modula elastičnosti E , konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$, vlačne čvrstoće R_m , deformacija ε_m i istežljivosti A za svaku definiranu temperaturu.

Iz dobivenih rezultata i dijagrama vidljivo je kako niske temperature utječu na mehanička svojstva materijala. Rezultati pokazuju da austenitni čelik AISI 316L ima najmanje vrijednosti vlačne čvrstoće R_m na sobnoj temperaturi, dok najveću čvrstoću ima na temperaturi od -165°C . Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$ također raste s snižavanjem temperature i granica razvlačenja postaje sve izraženija. Istežljivost A je na sobnoj temperaturi najveća te iznosi čak 55%, na temperaturi od -80°C iznosi 50% da bi na temperaturi od -165°C imala vrijednost od 37%. Modul elastičnosti E ima neznatne promjene vrijednosti te se može reći da za ispitani materijal ne ovisi o temperaturi.

Sukladno očekivanjima ponašanja austenitnog čelika AISI 316L, eksperimentima je potvrđena hipoteza rada, da smanjenjem temperature granica razvlačenja R_e i vlačna čvrstoća R_m rastu, granica razvlačenja R_e postaje jače izražena, dok se deformacija ε_m i istežljivost A smanjuju, a modul elastičnosti ima neznatne promjene vrijednosti, te se može reći da je utjecaj temperature zanemariv.

Provedeni eksperimenti također pokazuju da se laserski ekstenzometar može koristiti za beskontaktno mjerenje deformacija i određivanje mehaničkih svojstava materijala pri niskim temperaturama.

8. Literatura

- [1] Bronzan B: LNG, Energetika marketing Zagreb, 1999.
- [2] Hrvatski registar brodova: Pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova, Dio 25-Metalni materijali, 2005.
- [3] Čagalj A., Arapović D., Vukasović G.: Brodovi za prijevoz ukapljenog plina, Sorta, 2002.
- [4] Keretić D., Mesić D.: Primjena čelika u održavanju sustava za proizvodnju i transport plina, Zbornik radova, Opatija, 2003., str. 179 – 193.
- [5] Franz M: Mehanička svojstva materijala, Sveučilište u Zagrebu, 1998.
- [6] Norma DIN EN 50125:2004 Testing of metallic materials – Tensile testing.
- [7] Laser Speckle Extensometer Version 2.22.0.0, Manual, Messphysik Materials Testing.