

(2.1+)

Mag. ing. stroj. Petar Ljubičić, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj, dipl. ing., Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

Doc. dr. sc. Boris Ljubenkov, dipl. ing., Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

MEHANIČKA SVOJSTVA NEHRĐAJUĆEG ČELIKA PRI NISKIM TEMPERATURAMA

Sažetak

Prijevoz ukapljenog plina brodovima ima sve značajniji udio u pomorskom prijevozu. Ukapljeni plin se prevozi u nestrukturim tankovima na -165°C te se na takve brodove postavljaju visoki zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava materijala.

U članku su uvodno prikazani tipovi brodova za prijevoz ukapljenog plina te su navedene značajke materijala za gradnju strukture skladišnih prostora. Nadalje, navedeni su zahtjevi Hrvatskog registra za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala na niskim temperaturama. Prikazana je oprema za ispitivanje, uzorak za testiranje te procedura ispitivanja. Uzorci su se ispitivali na 4 različite temperature od 0° do -165°C . Tokom ispitivanja za materijal su se određivali iznosi vlačne čvrstoće, deformacija, istezljivosti te modula elastičnosti. Zaključno su dana razmatranja o mehaničkim svojstvima materijala pri niskim temperaturama.

Ključne riječi: prijevoz ukapljenog plina, mehanička svojstva, nehrđajući čelik, niske temperature

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE STAINLESS STEEL AT SUB-ZERO TEMPERATURES

Summary

The transport of the liquefied gas by ships becomes more important in the maritime transport. The liquefied gas is transferred in the cargo tanks at -165°C . Mechanical characteristics of the materials for ship building are faced with high-level demands.

The paper, in introduction, presents types of ships for liquefied gas transport and materials for building a structure of the cargo tanks. Furthermore, requirements of the Croatian Register of Shipping for mechanical testing of the material are presented. The equipment, specimens and testing procedure are described. Specimens are tested on 4 different temperatures from 0° to -165°C . Values of the tensile strength, deformation, total uniform elongation, breaking elongation and modulus of elasticity are measured during each test. The conclusion contains remarks about mechanical characteristics of the stainless steel at sub-zero temperatures.

Key words: liquefied gas transport, mechanical characteristics, stainless steel and sub zero temperatures

1. Uvod

Stalan razvoj svjetskog gospodarstva zahtjeva veće potrebe za različitim vrstama energije. Među različitim energentima, plinovi predstavljaju značajan i ekološki vrlo prihvatljiv izvor energije. Razlikuju se dvije osnovne grupe plinova, a to su:

- Petrolejski plinovi kao što su etan, propan, butan i njihova mješavina etilen te
- Prirodni plin – najvećim dijelom je metan

Prirodni se plin, poput nafte pronalazi i crpi diljem svijeta na poljima koja sadrže plin i/ili naftu. Plin se nalazi u poroznim dijelovima zemljine kore na velikim nalazištima u Perzijskom zaljevu, zemljama bivšeg Sovjetskog saveza, jugoistočne Azije, južne i sjeverne Amerike i Europe [1].

Zahvaljujući porastu interesa u svijetu za prirodni plin kao zamjenu za naftu trebalo je riješiti način transporta. Plin se transportira cjevovodima ili u tankovima tereta brodova za prijevoz prirodnog (LNG) ili petrolejskih (LPG) plinova. Transport brodovima započeo je 50-tih godina uz ostvarenu iznimnu pouzdanost i sigurnost, jer do današnjih dana još nije bilo slučajeva pucanja ili popuštanja tankova. Plin se prevozi u ukapljenom stanju, jer se gustoća plina povećava snižavanjem temperature, pa se uz isti kapacitet spremnika može prevesti veća količina.

Agregatno stanje plina ovisi o 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. Tekuće stanje plina postiže se na tri moguća načina, a to su:

- Povećavanjem tlaka uz temperaturu okoline
- Smanjenjem temperature uz zadržavanje atmosferskog tlaka
- Kombinacijom dvaju prethodnih načina

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.

Također, brodovi za prijevoz ukapljenog plina su predmet istraživanja znanstvenih institucija i klasifikacijskih ustanova.

2. Brodovi za prijevoz ukapljenog plina

Ideja transporta prirodnog ukapljenog plina seže od 50-tih godina prošlog stoljeća dok se za stvarni početak takve vrste transporta uzima period od 1960. do 1965. godine kada su brodovima Methan Pioneer, Methan Princess i Methan Progress prevezene prve količine ukapljenog plina [2]. Vremenom su se razvile dvije osnovne vrste brodova za prijevoz ukapljenog plina, a to su:

- Brodovi sa sfernim spremnicima
- Brodovi sa membranskim tankovima tereta

Kod brodova sa sfernim spremnicima radi se o nestrukturnim tankovima prepoznatljivog izgleda prikazanog slikom 1 koji se montiraju na strukturu trupa. Slika 2 prikazuje poprečni presjek broda.

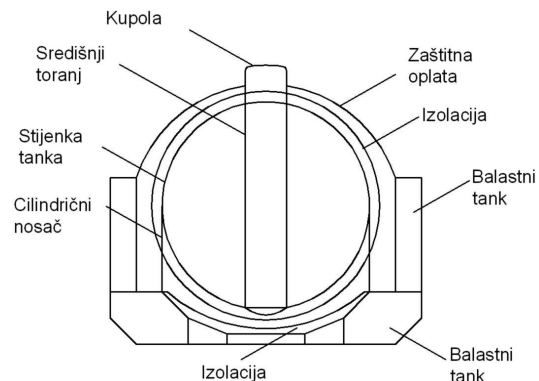
Brodovi sa membranskim spremnicima najčešće imaju 4 spremnika. Značajke takvog tipa broda za prijevoz ukapljenog plina su:

Dvostruka oplata kojom se štiti spremnik od sudara i havarije
Zaštita tankova tereta od požara na palubi dvostrukom oplatom
Donji dio tankova tereta zaštićen je od nasukavanja posebno dizajniranim
kontinuiranim dvodnom



Slika 1. LNG brod sa sfernim tankovima

Fig. 1 LNG ship with spherical tanks



Slika 2. Poprečni presjek broda sa sfernim tankovima

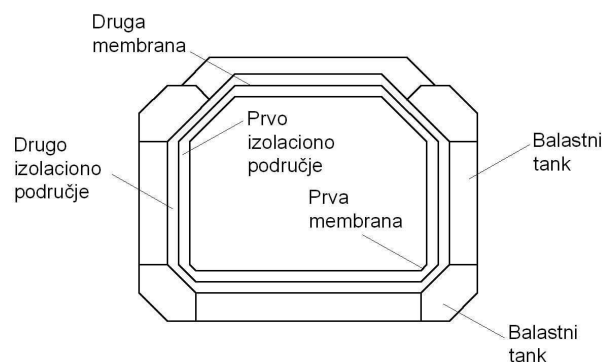
Fig. 2 Transverse section of the ship

Slikom 3 prikazan je brod za prijevoz ukapljenog plina sa membranskim tankovima tereta, a slikom 4 prikazan je njegov poprečni presjek.



Slika 3. LNG brod sa membranskim tankovima

Fig. 3 LNG ship with membrane tanks



Slika 4. Poprečni presjek broda sa membranskim tan.

Fig. 4 Transverse section of the ship

Usporedbom sfernog i membranskog tipa broda za prijevoz ukapljenog plina izdvaja se nekoliko bitnih značajki.

Kod membranskog tipa broda volumen tanka tereta definiran je dimenzijama trupa, a kod sfernog tipa broda standardnim dimenzijama sfernog tanka. Membranski tip broda ima bolju iskoristivost volumena trupa što znači da je taj koncept bolji jer za isti volumen tereta ima manje dimenzije. Veće dimenzije sfernog tipa broda imaju dodatne negativne posljedice. Jedna od njih je visina broda. Viši brod ima veću lateralnu površinu i više težište sistema te može imati problema sa stabilitetom i upravljivošću. Zbog sfernih tankova koji strše visoko iznad gornje palube uvelike je ograničeno vidno polje u svim smjerovima, a vidljivost s komandnog mosta dodatno pogoršava oprema postavljena na palubi.

Budući da je gornja paluba membranskog tipa broda potpuno ravna omogućeno je lakše postavljanje cjevovoda i pumpi tereta, jednostavnije je održavanje opreme i njena antikorozivna zaštita za vrijeme dok je brod u službi.

Prednost sfernog tipa broda je veća fleksibilnost za različita stanja krcanja. Zbog svog karakterističnog oblika, sferni tankovi smanjuju utjecaj slobodne površine tereta zbog čega se javljaju niža naprezanja za različite razine ukrcaja tereta nego što je to slučaj kod membranskog tipa broda.

Šta se tiče sigurnosti broda, sferni tankovi imaju prednost, jer ne ispunjavaju kompletan unutrašnji prostor skladišta, pa su sigurniji od eventualnih sudara i nasukavanja.

3. Zahtjevi Klasifikacijskih ustanova za brodove za prijevoz ukapljenog plina

Brodovi za prijevoz ukapljenog plina moraju za slobodnu plovidbu morima zadovoljiti sva pravila određena dokumentima:

International Gas Carrier Code 'IGC Code' – SOLAS – Chapter VII, part C

Posebna pravila Klasifikacijskih ustanova

Četiri specijalna zahtjeva Američke obalne straže

Godine 1973. IMO (Internationam Maritime Organization) izdala je pravilo koje je prihvaćeno i primjenjivo u svijetu a odnosi se na projektne i konstrukcijske standarde primjenjive na brodove za prijevoz ukapljenog plina. Dokument se naziva IGC Code 'International Code for Construction and Equipment os Ships carrying Liquified Gases in Bulk', a uvršten je u SOLAS pravila pod nazivom 'International Conversion for the Safety of Life at Sea' – Chapter VII, part C. Pravila iz ovog dokumenta se odnose na slijedeće aspekte:

Sposobnost broda za preživaljavanje

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 i protupožarni sustav na brodu

Zaštita posade

Ograničenja razina krcanja teretnih tankova

Zahtjevi za opremu za rukovanje teretom

Američka obalna straža je uz postavljena pravila dodala svoja četiri zahtjeva, a to su:

Korištenje materijala za izradu tankova koji blokiraju napredovanje pukotine

Veći faktor sigurnosti za nestrukturne tankove tereta

Postavljanje sustava za regulaciju tlaka i kontrola kvalitete

Definiran raspored temperaturnog gradijenta po strukturi tanka i unutrašnje oplata da bi se izvršio pravilan izbor konstrukcijskog materijala

Uz ova međunarodna pravila uklapaju se opći zahtjevi Hrvatskog registra brodova koji se primjenjuju na materijale i proizvode predviđene ugradnji, popravku i opremanju brodova, priobalnih instalacija i ostalih konstrukcija.

U posebnim okolnostima, Registar može tražiti veći raspon ispitivanja materijala i proizvoda koji nastaju na temelju suvremenih istraživanja ili praktičnih iskustava.

Obzirom na vrstu tereta koji prevoze brodovi za prijevoz ukapljenog plina i na radnu temperaturu u teretnim tankovima važno je naročitu pažnju posvetiti odabiru materijala za izradu tanka. Odabiru se materijali pogodni za rad na niskim temperaturama zadržavajući pri tom svoju istezljivost. Kemijski sastav materijala mora biti odobren od strane klasifikacijskih ustanova, mehanička svojstva materijala moraju biti u skladu s vrijednostima propisanim normama.

U tablici 1 nalaze se podaci iz Hrvatskog registra brodova o primjeni čelika na niskim temperaturama [3]. Mogu se primjeniti finoizrtni konstrukcijski čelici s nazivnom granicom tečenja do 355 N/mm^2 za temperaturu do -45°C , dok se za niže temperature koriste niklom legirani čelici u skladu s normom DIN 17280. Za prijevoz ukapljenog plina prihvatljivi su austenitni čelici u skladu s normom DIN 17440.

Tablica 1. Čelici primjenjivi na niskim temperaturama

Table 1 Steel materials for sub-zero temperatures

Kategorija	Norma / Oznaka materijala	Najniža proračunska temperatura [$^\circ\text{C}$]
Finoizrtni konstrukcijski čelici s nazivnom granicom tečenja do 355 N/mm^2	DIN 17102	-45
Niklom legirani čelici koji sadrže:	DIN 17280	
0.5 % Ni	13 Mn Ni 6 3	-55
1.5 % Ni	14 Ni Mn 6	-60
3.5 % Ni	10 Ni 14	-90
5 % Ni	12 Ni 19	-105
9 % Ni	X 8 Ni 9	-165
Austenitni čelici	DIN 17440 (AISI 304 L) 1.4404 (AISI 316 L) 1.4541 (AISI 321) 1.4306, 1.4550 (AISI 347)	-165

4. Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala

Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima materijala, jer se na osnovu njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. Mehanička svojstva su posljedica strukturnog stanja materijala koja se dobiva obradom materijala određenog sastava određenim tehnološkim postupkom.

Materijali podliježu ispitivanjima, a u određenoj količini materijala definira se uzorak za ispitivanje. Uzorci se režu na točno određenim dijelovima materijala te se mogu pripremiti nakon završetka svih mehaničkih i toplinskih obrada koje se primjenjuju. Iz uzorka se priprema epruveta za ispitivanje tj. komad propisanih dimenzija i izgleda. Epruvete mogu biti okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka.

Kod ispitivanja materijala limova i toplo valjanih traka epruvete se režu poprečno od smjera valjanja. Broj epruveta za ispitivanje određuje se prema tipu proizvoda kako je navedeno:

Limovi i ploče: jedna epruveta s jednog kraja lima ili ploče. Ako je duljina lima veća od 7 m uzimaju se po jedna epruveta na svakom kraju lima ili ploče.

Toplo valjane široke trake: jedna epruveta

Ostali proizvodi: jedna epruveta u ispitnoj skupini

Mehanička svojstva materijala ispituju se statičkim vlačnim pokusom. Ispitivanje se provodi na uređajima koji se nazivaju kidalice, na kojima se epruvete kontinuirano vlačno opterećuju do loma. Kod kidalica opterećenje se provodi hidraulički ili mehanički. Rezultati ispitivanja su osnovna mehanička svojstva materijala kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća ili istezljivost materijala. Za precizno mjerenje produljenja na epruvete se učvršćuju ekstenzometri koji rade na mehaničkom, optičkom ili elektronskom principu.

Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje epruvete te se na pisaču kidalice crta dijagram 'sila-produljenje'. Iznos sila pri statičkom vlačnom pokusu ne daje pravi uvid u mehanička svojstva materijala dok se ne uzme u obzir površina poprečnog presjeka epruvete odnosno ukoliko se umjesto sile ne uvede naprezanje kao omjer sile i poprečnog presjeka. Produljenje epruvete se može podijeliti s početnom duljinom te se dobiva relativno produljenje ili istežanje materijala. Iz dijagrama 'sila-produljenje' dobiva se dijagram 'naprezanje-istežanje'. Primjer dijagrama za konstrukcijski čelik prikazan je slikom 5. Karakteristične vrijednosti naprezanja i istežanja prikazane dijagramom su:

R_e – granica razvlačenja

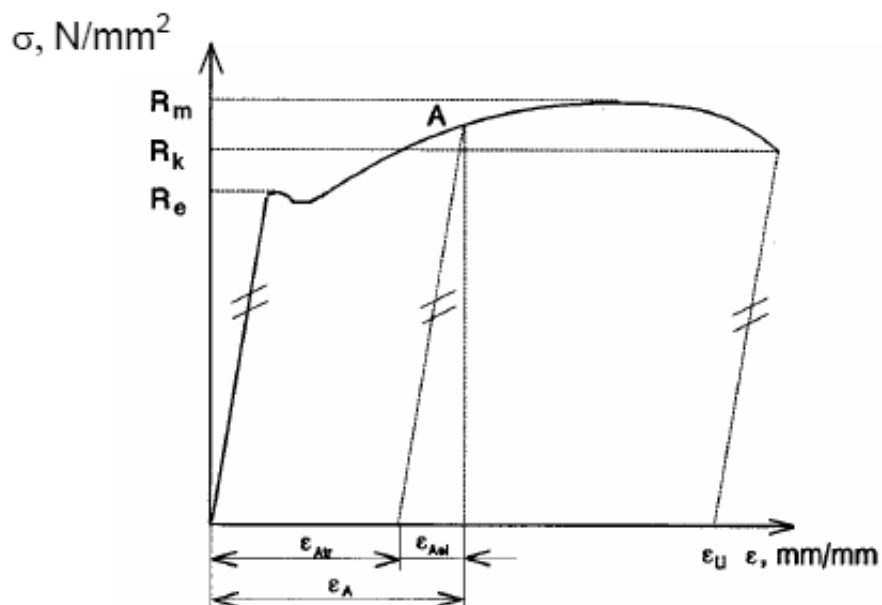
R_m – vlačna ili rastezna čvrstoća

R_k – konačno naprezanje kod kojeg dolazi do loma epruvete

ϵ_A – ukupno istežanje

ϵ_{ael} – elastično istežanje

ϵ_{apl} – plastično istežanje



Slika 5. Dijagram 'naprezanje-istežanje' za konstrukcijski čelik

Fig. 5 'Stress-Strain' diagram for steel

Sukladno uvjetima eksploatacije, ispitivanje mehaničkih svojstava materijala provodi se i kod povišenih i sniženih temperatura. Sniženje ili povišenje temperature utječe na strukturu

materijala i na mehanička svojstva. Da bi se utvrdio utjecaj promjene temperature na mehanička svojstva epruveta se postavlja u komoru koja se tijekom ispitivanja grije ili hladi. Prema podacima iz literature, na niskim temperaturama vrijednosti granice razvlačenja R_e i vlačne čvrstoće R_m rastu, istezljivost materijala se smanjuje, vrijednost modula elastičnosti se ne mijenja [4].

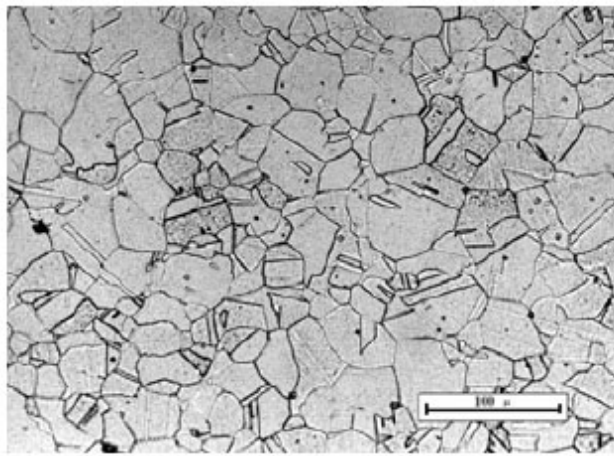
5. Ispitivanje mehaničkih svojstava austenitnog čelika pri niskim temperaturama

Prema zahtjevima Hrvatskog registra brodova i prema podacima iz tablice 1, materijal za izradu tankova za prijevoz ukapljenog plina je jedan od austenitnih čelika. Izabran je austenitni čelik oznake AISI 316L. Epruveta za ispitivanje izrađena je prema zahtjevima Registra, a statički vlačni pokus provodi se na univerzalnoj kidalici na temperaturama od -40°C , -80°C , -165°C te na sobnoj temperaturi od 22°C . Za svaku temperaturu provedena su tri ispitivanja. Prije prikazivanja rezultata prikazati će se osnovne značajke ispitivanog materijala, izgled i dimenzije epruvete te mjerna oprema.

5.1. Austenitni nehrđajući čelik

Austenitni nehrđajući čelici su CrNi čelici s malim postotkom ugljika (C) koji se kreće u granicama od 0.03% do 0.12%. Postotak kroma (Cr) se kreće od 12 do 25% dok je postotak nikla (Ni) u granicama od 8 do 25%.

Za ispitivanje je odabran austenitni čelik oznake AISI 316L (X2CrNiMo) ili (Č1.4404) čija je mikrostruktura prikazana slikom 6, a kemijski sastav i mehanička svojstva dana u tablicama 2 i 3. Ovaj čelik ima sadržaj ugljika oko 0.03% te ima potpunu austenitnu strukturu na sobnoj temperaturi. Značajke čelika su dobra kovnost, duktilnost i otpornost na koroziju te postojanost na visokim i niskim temperaturama.



Slika 6. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 316L

Fig. 6 Microstructure of the stainless steel AISI 316L

Tablica 2. Kemijski sastav austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 316L

Table 2 Chemical composition of the stainless steel AISI 316L

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

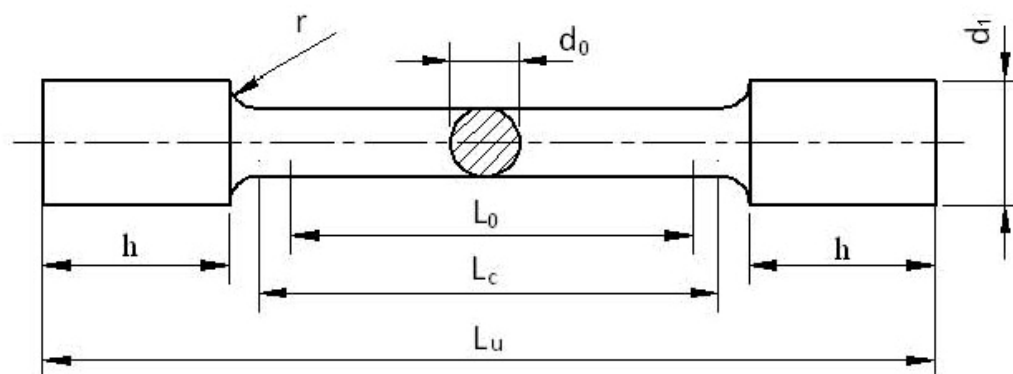
Tablica 3. Mehanička svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 316L pri 20°C**Table 3** Mechanical characteristics of the stainless steel AISI 316L

Tvrdoća [HB]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	Istezljivost A [%]
≤ 205	460	600-720	40

5.2. Epruvete za ispitivanje

Izgled i dimenzije epruveta za ispitivanje propisane su pravilima Registra. Epruvete mogu biti okruglog ili pravokutnog presjeka, ali se kod ispitivanja prednost daje okruglim epruvetama radi jednostavnije primjene. Slikom 7 prikazana je epruveta za ispitivanje s karakterističnim mjerama koje se moraju zadovoljiti, a to su:

- d_o – promjer vrata
- d_1 – promjer glave
- h – duljina glave
- L_o – početna mjerna duljina
- L_c – duljina ispitnog dijela
- L_u – ukupna duljina epruvete
- r – prijelazni polumjer

**Slika 7.** Epruveta za ispitivanje**Fig. 7** Testing specimen

Promjer vrata epruvete se određuje prema maksimalnoj sili ispitnog uređaja i značajkama materijala. Za ispitivanje mehaničkih svojstava nehrđajućeg austenitnog čelika AISI 316L dimenzije epruvete dane su u tablici 4.

Tablica 4. Dimenzije epruvete za ispitivanje**Table 4** Dimensions of the testing specimen

Veličina	d_o	d_1	L_o	L_c	L_u	r	h
Dimenzija [mm]	8	12	40	48	115	10	30

5.3. Mjerna oprema

Ispitivanja su provedena na statičkoj kidalici marke Messphysik Beta 50-5 prikazanoj slikom 8 s maksimalnom silom od 50kN [5]. Pomak čeljusti kidalice ostvaruje se pomoću dva vretena. Ispitni uređaj je spojen s računalom, pa se prije ispitivanja definiraju svi parametri kao što su brzina ispitivanja, dimenzije i površina presjeka epruvete te vrsta ispitivanja. U ovom slučaju ispitivanje se provodi u komori prikazanoj slikom 9 koja se hladi na željenu temperaturu te na toj temperaturi epruveta mora ostati dva sata radi ravnomjernog hlađenja prije nego započne eksperiment. Za hlađenje epruveta koristi se tekući dušik, a željena temperatura se regulira i kontrolira pomoću uređaja za regulaciju. Na uređaju su dva zaslona, jedan koji pokazuje trenutnu temperaturu u komori i drugi koji pokazuje željenu temperaturu za ispitivanje.

Pri određivanju mehaničkih svojstava materijala koriste se precizni mjerni uređaji kao što su ekstenzometri koji mjere istezljivost materijala. U praksi se koriste različite vrste ekstenzometara kao što su elektrootporne mjerne trake, mehanički ili zrcalni ekstenzometri ili u novije vrijeme videoekstenzometri i laserski ekstenzometri. U ovom radu korišten je laserski ekstenzometar čije su prednosti u odnosu na ostale vrste uređaja kako slijedi:

- nema izravni kontakt s epruvetom,
- nema ograničenja mjerenja obzirom na produljenje epruvete,
- nema postavljanja posebnih mjernih markera na epruvetu
- mjerenje produljenja provodi se kroz staklo komore što je bitno obzirom na temperaturu od -165°C u komori

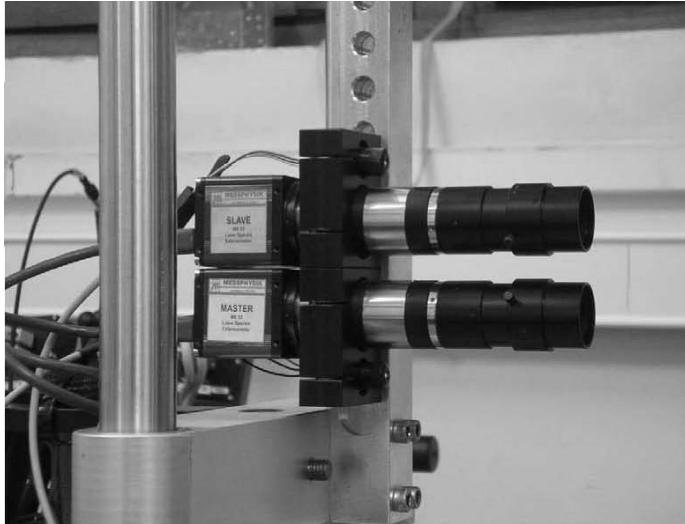


Slika 8. Statička kidalica Messphysik Beta 50-5
Fig. 8 The testing machine Messphysik Beta 50-5



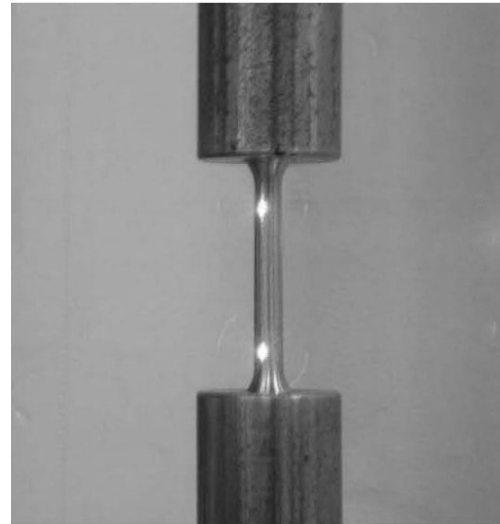
Slika 9. Komora za ispitivanje
Fig. 9 The chamber for testing

Laserski ekstenzometar, spojen na računalo, sastoji se od dvije kamere i dvije laser diode snage 3mW crvenog snopa kako je prikazano slikom 10. Međusobni razmak kamera definira početni razmak mjernih točaka i u ovom slučaju iznosi 40 mm. Za vrijeme rada laserskog ekstenzometra koherentno lasersko svjetlo obasjava površinu epruvete kako se vidi na slici 11 dok kamera snima refleksiju površine. Kada koherentno lasersko svjetlo pogodi optički hrapavu površinu, svjetlo se disperzira u različite smjerove.



Slika 10. Kamere laserskog ekstenzometra

Fig. 10 The laser extensometer cameras



Slika 11. Lasersko svjetlo na površini epruvete

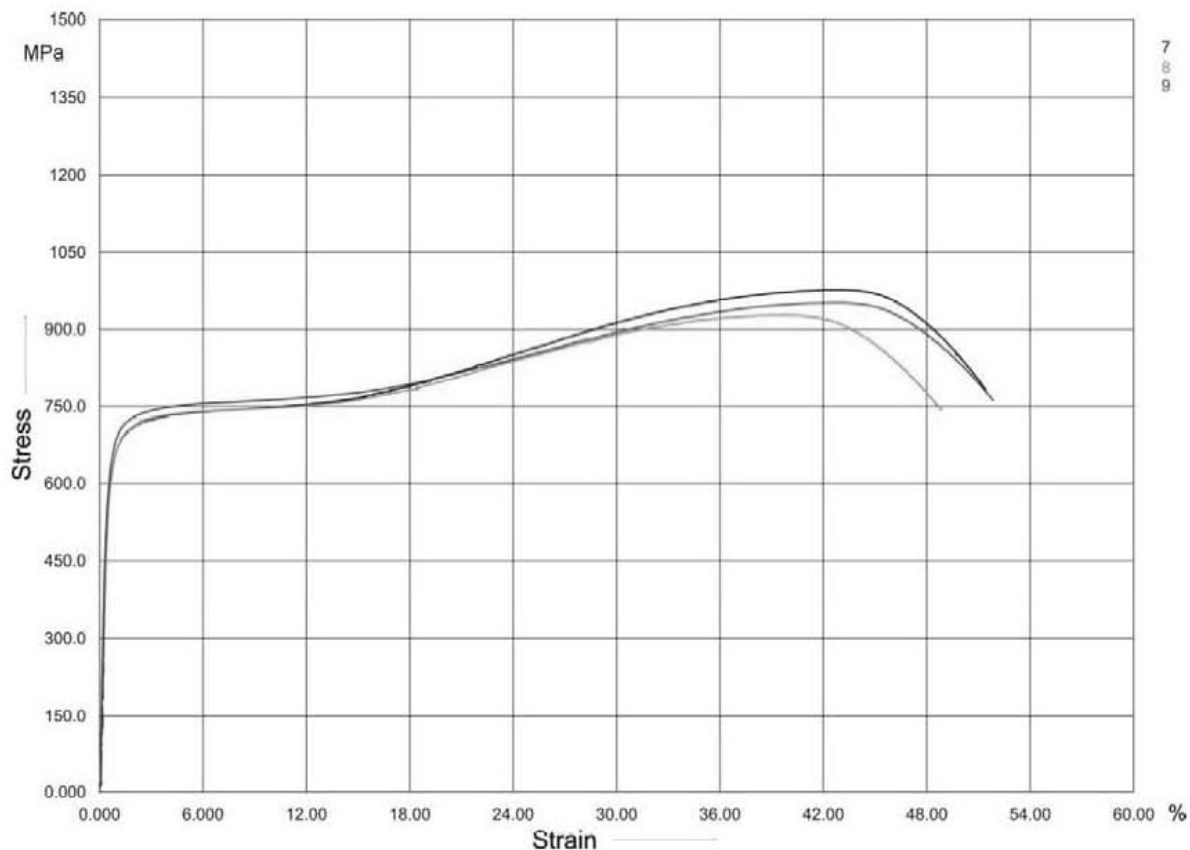
Fig. 11 The laser light on the testing specimen surface

Zbog hrapavosti površine dolazi do pojave interferencije zraka svjetlosti te se na slici koju pokazuju kamere vidi zrnata struktura različito osvijetljenih piksela. Svaka promatrana grupa piksela ima jedinstveni uzorak poput otiska prsta. Kako se tokom ispitivanja površina materijala mijenja, mijenja se i slika koja se vidi kamerama. Analizom slika kamere u različitim vremenskim intervalima video procesor na uzastopnim slikama pronalazi početni referentni uzorak i mjeri udaljenost za koju se uzorak u tom vremenu pomakao.

Nedostatak rada s laserskim ekstenzometrom je što se produljenje ne može točno izmjeriti kada se poklopi položaj laserskog svjetla i vrat epruvete na kojem će doći do pucanja.

5.4. Rezultati ispitivanja

Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala provelo se na temperaturama od -40°C , -80°C , -165°C te na sobnoj temperaturi od 22°C . Za svaku temperaturu ispitivane su tri epruvete, a rezultati su prikazani dijagramom 'naprezanje-istezanje' i tablično. U tablici se nalaze redni broj, oznaka, promjer i površina epruvete te vrijednosti modula elastičnosti E , konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0.2}$, granice razvlačenja R_m , deformacije ϵ_m i istezljivosti A . U zadnjem retku tablice su srednje vrijednosti ispitivanja za tri epruvete. Radi ograničenog prostora u članku prikazat će se rezultati ispitivanja na temperaturi od -80°C . Dijagram 'naprezanje-istezanje' prikazan je slikom 12, a rezultati su dani u tablici 5.



Slika 12. Dijagram 'naprezanje – istezanje' na temperaturi -80°C

Fig. 12 'Stress-Strain' diagram for testing at temperature -80°C

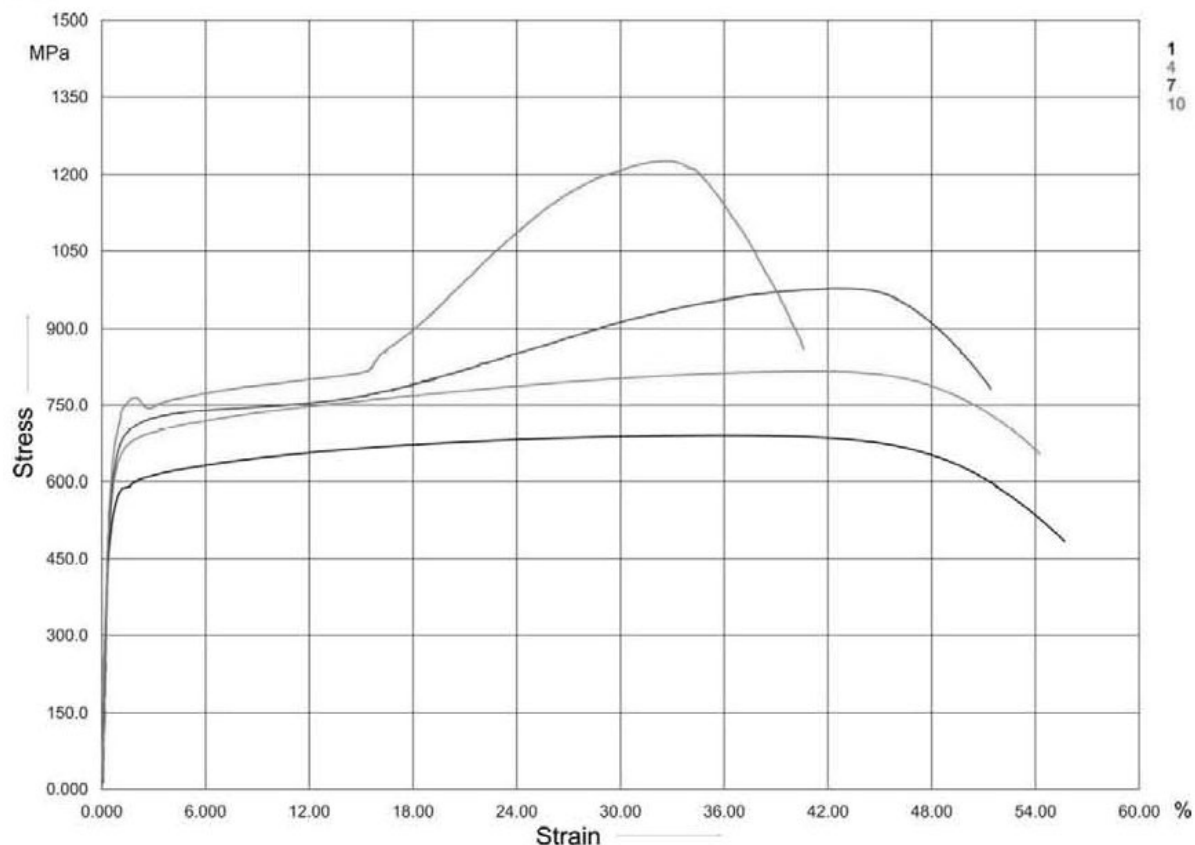
Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava materijala triju epruveta na temperaturi od -80°C su međusobno vrlo slični, u skladu su s očekivanjima, a krivulje u dijagramu imaju sličan oblik.

Tablica 5. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na -80°C

Table 5 The results of the material mechanical characteristics testing at temperature -80°C

Redni broj mjer.	Oznaka epruvete	d	So	E	R _{p0.2}	R _m	ε _m	A
		[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
1.	E-7-M80	7.88	48.768	195.2	572.6	976.7	42.14	50.94
2.	E-8-M80	7.93	49.389	203.6	561.8	927.2	39.14	48.41
3.	E-9-M80	7.95	49.639	212.1	580.0	951.3	42.34	51.46
	Srednja vrijednost	7.92	49.265	203.6	571.5	951.7	41.21	50.27

Usporedni dijagram ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na niskim temperaturama prikazan je slikom 13. Za ovaj prikaz uzeta je po jedna karakteristična epruveta iz svake ispitne grupe za svaku temperaturu, a rezultati su prikazani i u tablici 6.



Slika 13. Usporedni dijagram ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na niskim temperaturama

Fig. 13 Comparative diagram of the material mechanical characteristics testing at sub-zero temperatures

Rezultati ispitivanja su u skladu s očekivanjima. Snižavanjem temperature vrijednosti granice razvlačenja R_e i vlačne čvrstoće R_m rastu, dok se istezljivost A i deformacija ϵ_m smanjuju. Vrijednosti modula elastičnosti E su približno jednake bez obzira na promjene temperature što se vidi na dijagramu jer sve krivulje imaju isti nagib Hookovog pravca.

Detaljnijom analizom mjernih rezultata pojedinog svojstva materijala uočeno je da vlačna čvrstoća lagano raste u intervalu od sobne temperature do -40°C nakon čega porast postaje izraženiji. Suprotno od ovih rezultata sniženjem temperature istezljivost A lagano pada u intervalu od sobne temperature do -80°C nakon čega taj pad postaje izraženiji. Za daljnja razmatranja sugeriraju se dodatna ispitivanja materijala pogotovo u intervalu temperatura od -80°C do -165°C .

Tablica 6. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na niskim temperaturama

Table 6 The results of the material characteristics testing at sub-zero temperatures

Redni broj mjer.	Oznaka epruvete	d	So	E	$R_{p0.2}$	Rm	ϵ_m	A
		[mm]	[mm^2]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
1.	E-1-sobna	7.98	50.014	204.4	485.4	688.9	35.79	55.44
2.	E-4-M40	7.99	50.202	198.5	568.5	815.9	40.30	53.82
3.	E-7-M80	7.88	48.768	195.2	572.6	976.7	42.14	50.94
4.	E-10-M165	6.85	36.863	203.2	603.4	1227.7	31.68	37.18

6. Zaključak

Obzirom na vrstu tereta koju prevoze LNG brodovi i na ekstremno nisku radnu temperaturu u tankovima tereta na materijale za izradu tankova postavljaju se visoki zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava. Cilj rada je eksperimentalno određivanje mehaničkih svojstava materijala pogodnih za izradu tankova tereta brodova za prijevoz ukapljenog plina, a to su austenitni nehrđajući čelici.

Za ispitivanje statičkim vlačnim postupkom izabran je austenitni nehrđajući čelik oznake AISI 316L. Ispitivanja su izvedena na 4 različite temperature i to na sobnoj temperaturi od 22°C te na temperaturama od -40°C, -80°C i -165°C. Na svakoj temperaturi ispitane su tri epruvete, a određene su vrijednosti modula elastičnosti E, konvencionalne granice razvlačenja, $R_{p0.2}$, vlačne čvrstoće R_m , deformacija ϵ_m i istežljivosti A.

U radu je pokazano da se u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje uspješno mogu provesti ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na niskim temperaturama s postojećom opremom. Ispitivanja su provedena univerzalnom kidalicom marke Messphysik Beta 50-5 s maksimalnom silom od 50kN. Mjerenja produljenja epruvete obavljena su laserskim ekstenzometrom. Rezultati su prikazani dijagramom 'naprezanje-istezanje' i tablično. Sukladno očekivanjima snižavanje temperature utječe na mehanička svojstva materijala. Vrijednosti granice razvlačenja R_e i vlačne čvrstoće R_m rastu dok se deformacija ϵ_m i istežljivost A smanjuju. Modul elastičnosti E ima neznatne promjene te se može reći da je utjecaj temperature zanemariv. U intervalu temperatura od -80 do -165 događaju se značajnije promjene mehaničkih svojstava materijala pa bi za detaljniju analizu rezultata trebalo provesti dodatna ispitivanja.

LITERATURA

- [1] B. Bronzan: LNG, Energetika marketing, Zagreb, 1999.
- [2] G. Poljak: Tehnologija gradnje brodova za ukapljeni plin, diplomski rad, FSB,
- [3] Hrvatski registar brodova: Pravila za tehnički nadzor pomorskih objekata, dio25 – metalni materijali, 2005.
- [4] M. Franz: Mehanička svojstva materijala, FSB, 1998
- [5] P. Ljubičić: Mehanička svojstva brodograđevnog čelika pri niskim temperaturama, diplomski rad, FSB, 2010.