

Ispitivanje mehaničkih svojstava brodograđevnog čelika povišene čvrstoće oznake LR-AH 36 pri različitim temperaturama

Šarić, Josipa

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:132379>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-23**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

**ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA BRODOGRAĐEVNOG
ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE OZNAKE LR-AH36 PRI
RAZLIČITIM TEMPERATURAMA**

ZAVRŠNI RAD

JOSIPA ŠARIĆ

Matični broj: 1065

Split, rujan 2020

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
SMJER: KEMIJSKO INŽENJERSTVO

**ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA BRODOGRAĐEVNOG
ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE OZNAKE LR-AH36 PRI
RAZLIČITIM TEMPERATURAMA**

ZAVRŠNI RAD

JOSIPA ŠARIĆ

Matični broj: 1065

Split, rujan 2020

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
UNDERGRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
CHEMICAL ENGINEERING

**INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH
STRENGTH SHIPBUILDING STEEL LR-AH36 AT DIFFERENT
TEMPERATURES**

BACHELOR THESIS

JOSIPA ŠARIĆ

Parent number: 1065

Split, September 2020

Sveučilište u Splitu
Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu
Preddiplomski studij kemijske tehnologije

Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo
Tema rada je prihvaćena na 28. sjednici Fakultetskog vijeća Kemijsko-tehnološkog fakulteta

Mentor: prof. dr. sc. Ladislav Vrsalović
Pomoć pri izradi: mag. ing. chem. ing. Teo Ugrina

**ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA BRODOGRAĐEVNOG ČELIKA POVIŠENE
ČVRSTOĆE OZNAKE LR-AH36 PRI RAZLIČITIM TEMPERATURAMA**

Josipa Šarić, 1065

SAŽETAK: U ovom radu provedeno je ispitivanje mehaničkih svojstava brodograđevnog materijala kvalitete AH36 pri različitim temperaturama. Dio epruveta je podvrgnut pothlađivanju do $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, a dio zagrijavanju do $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mjerenje je provedeno u Brodosplitu na kidalici MAN 60 na kojoj se vlačnom silom djeluje na ispitni uzorak sve do pojave loma. Dobiveni dijagrami pothlađenih epruveta jasno prikazuju točku granice razvlačenja dok je kod epruveta povišene temperature ona slabije izražena. Iz rezultata se može zaključiti da granica razvlačenja i vlačna čvrstoća rastu snižavanjem temperature, a izduženje se smanjuje. Kod epruvete 8 i 11 uočena su manja odstupanja od navedenog zaključka.

Ključne riječi: čelik, mehanička svojstva, kidalica, granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, izduženje.

Rad sadrži: 29 stranica, 27 slika, 5 tablica i 17 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav povjerenstva za obranu:

1. prof. dr. sc. Senka Gudić - predsjednik
2. doc. dr. sc. Miće Jakić - član
3. prof. dr. sc. Ladislav Vrsalović - član-mentor

Datum obrane: 24. rujna 2020.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta Split, Ruđera Boškovića 35.

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology Split
Undergraduate Study of Chemical Technology

Scientific area: Technical Sciences

Scientific field: Chemical Engineering

Thesis subject was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 28

Mentor: Dr. sc. Ladislav Vrsalović, Full Professor

Technical assistance: mag. ing. chem. ing. Teo Ugrina

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH SHIPBUILDING STEEL LR-AH36 AT DIFFERENT TEMPERATURES

Josipa Šarić, 1065

Abstract: In this paper, the mechanical characteristic of AH36 quality shipbuilding material was tested at different temperatures. Part of the tubes was subjected to subcooling to $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, and part to heating to $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. The measurement was performed in Brodosplit on a MAN 60 tensile testing machine on which the tensile force acts on the test specimen until fracture occurs. The obtained diagrams of subcooled specimens clearly show the point of yield strength, while in the case of elevated temperature specimens it is less expressed. From the results it can be concluded that the yield strength and tensile strength increase with decreasing temperature, and the elongation decreases. In test tubes 8 and 11 minor deviations from the stated conclusion were observed.

Keywords: steel, mechanical properties, tensile testing machine, yield strength, tensile strength, elongation.

Thesis contains: 29 pages, 27 figures, 5 tables, 17 references

Original in: Croatian

Defence committee:

1. Dr. sc. Senka Gudić, Full prof. – chairperson
2. Dr. sc. Miće Jakić, Assistant prof. – member
3. Dr. sc. Ladislav Vrsalović, Full prof. – supervisor

Defence date: September 24, 2020.

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of Faculty of Chemistry and Technology Split, Ruđera Boškovića 35.

Završni rad je izrađen u Zavodu za elektrokemiju i zaštitu materijala, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom prof. dr. sc. Ladislava Vrsalovića u razdoblju od lipnja do rujna 2020. godine. Eksperimentalna ispitivanja na kitalici MAN 60 napravljena su u firmi BIS-Laboratoriji d.o.o.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ladislavu Vrsaloviću na ukazanoj prilici i pomoći prilikom pisanja Završnog rada. Također se zahvaljujem mag. ing. chem. ing. Teu Ugrini i dipl. ing. strojarstva Branku Stanišiću na izdvojenom vremenu i trudu pri izvedbi eksperimentalnog dijela te svim drugim djelatnicima Brodosplita koji su na bilo kakav način sudjelovali u izvedbi istog.

Zahvala svima koji su me pratili na ovom putu.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

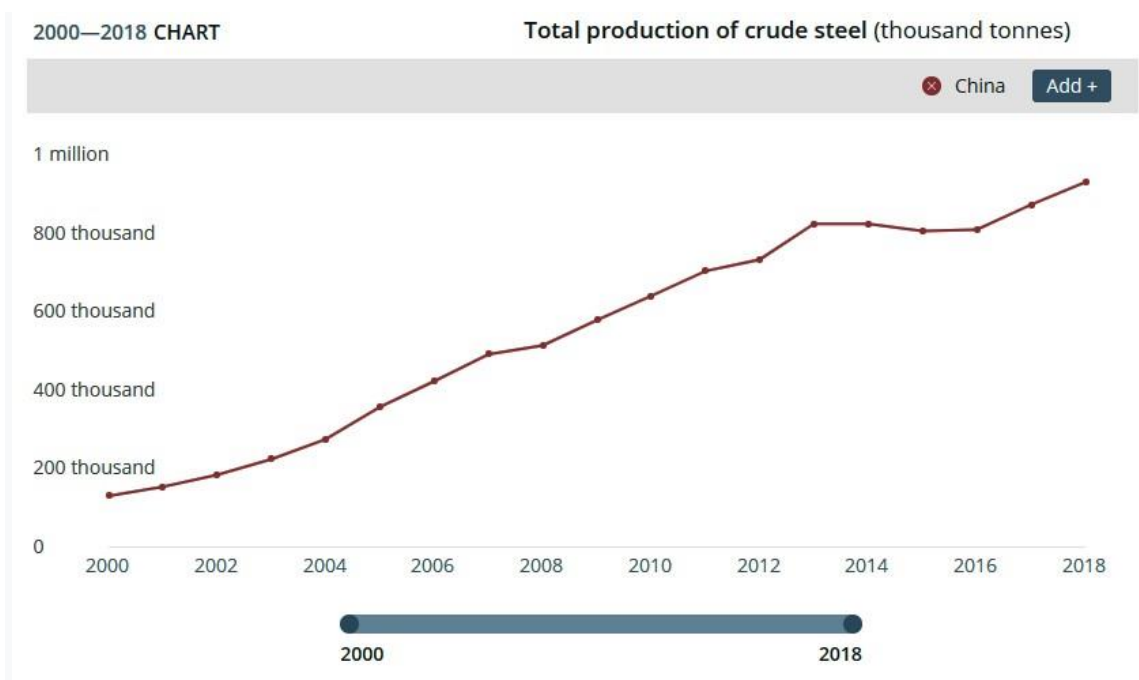
- Ispitne uzorke (epruvete) od kojih je dio ohlađen, a dio zagrijan, postaviti u kidalicu gdje se vrši vlačno ispitivanje.
- Pratiti promjene na dijagramu i odrediti silu na granici razvlačenja F_e i maksimalnu silu F_m . Izračunati granicu razvlačenja R_e i vlačnu čvrstoću R_m .
- Pomoću ravnala izmjeriti konačnu duljinu epruvete te izračunati izduženje.
- Na osnovi rezultata zaključiti o utjecaju temperature na mehanička svojstva AH36 čelika.

SADRŽAJ

UVOD	1
1. OPĆI DIO	2
1.1. Čelik.....	2
1.2. Podjela čelika	3
1.2.1. Primjese.....	4
1.3. Proizvodnja čelika	5
1.3.1. Kotlovski čelik.....	7
1.4. Mehanička ispitivanja	9
1.4.1. Ispitivanje čvrstoće i elastičnosti	10
1.4.2. Ispitivanje tvrdoće.....	13
1.4.3. Ispitivanje žilavosti	16
2. EKSPERIMENTALNI DIO	17
2.1. Materijal.....	17
2.2. Priprema uzorka	18
2.3. Opis aparature i postupak mjerenja	18
3. REZULTATI	20
4. RASPRAVA	25
5. ZAKLJUČAK.....	27
6. LITERATURA	28

UVOD

Zbog svojih izvanrednih svojstava, velike čvrstoće i tvrdoće, žilavosti i elastičnosti, otpornosti prema koroziji i dobre toplinske vodljivosti, čelik je danas najvažniji tehnički materijal. Važno je ukazati i na relativno niske troškove proizvodnje čelika kao i ekološku prihvatljivost zbog mogućnosti njegova recikliranja. Napretkom industrije, potrošnja energije za proizvodnju čelika pala je za 40 % u odnosu na potrošnju prije 60 godina. Također, zbog jedinstvenih magnetskih svojstava, karakteristike čelika ostaju nepromijenjena bez obzira koliko se puta reciklira. U prosjeku novi čelični proizvodi sadrže 30 % recikliranog čelika.¹ Iako je britanski izumitelj Henry Bessemer zaslužan za tehniku dobivanja čelika iz sirovog željeza, 1856. godine, povijest čelika datira još iz vremena prije Krista. Naime, u Anatoliji je otkriven čelični predmet procijenjene starosti od 4000 godina. Pema podacima World Steel Association organizacije, koja predstavlja proizvođače čelika i čelične industrije, u 2018. godini proizvedeno je više od 1808 milijuna tona čelika. Najveći svjetski proizvođači su Kina, Indija, Japan i SAD, dok Hrvatska godišnje proizvede nešto više od 100 tisuća tona. Čelik se koristi u svakom aspektu našeg života, u proizvodnji automobila, građevinskih proizvoda i teretnih brodova, do hladnjaka, perilica, i kirurških skalpela. Obzirom na različita fizikalna i kemijska svojstva, razlikujemo oko 3500 različitih vrsta čelika.



Slika 1. Prikaz proizvodnje čelika u Kini od 2000. do 2018. godine²

1.2. Podjela čelika

Čelik se može grupirati na više načina. Neke od podjela su prema:

- a) kemijskom sastavu,
- b) mikrostrukturi,
- c) načinu proizvodnje,
- d) namjeni,
- e) stupnju dezoksidacije.

a) Prema kemijskom sastavu razlikujemo ugljične i legirane čelike:

- Ugljični čelici u svojoj strukturi sadrže do 2 % ugljika zbog čega imaju visoku čvrstoću i malu žilavost,
- Legirani čelici sadrže legirajuće elemente koji se dodaju kako bi se poboljšala ili postigla određena željena svojstva.

b) Prema tipu mikrostrukture čelici mogu biti:

- feritni,
- perlitni,
- martenzitni,
- austenitni,
- ledeburitni.

c) Obzirom na način proizvodnje, čelik se dijeli na

- Bessemerov,
- Thomasov,
- Simens-Martinov,
- čelik proizveden u električnim pećima,
- čelik proizveden u konverterima s kisikom.

d) Prema namjeni razlikujemo:

- konstrukcijske čelike (vratila, osovine, vijci, ventili, zupčanici),
- alatne čelike (pile, svrdla, noževi, škare, turpije),
- posebne čelike (vatrootporni, otporni na trošenje, kemijski otporni).

e) Dezoksidacijom se smanjuje sadržaj kisika na željenu količinu, a prema načinu dezoksidacije razlikujemo:

- umireni čelik (tekući čelik prelazi u kruto stanje bez naglog razvijanja plinova),

- poluumireni čelik (dolazi do manje oksidacije),
- neumireni čelik (čelik prelazi u kruto stanje uz kretanje koje podsjeća na ključanje).

1.2.1. Primjese

Primjese u čeliku mogu biti korisne i štetne. Korisni legirajući elementi dodaju se radi poboljšavanja određenih svojstava (korozijska otpornost, poboljšanje i očuvanje čvrstoće, otpornost na habanje itd.). Štetne primjese se uklanjaju radi njihovog nepoželjnog djelovanja na materijal.

- Korisne primjese

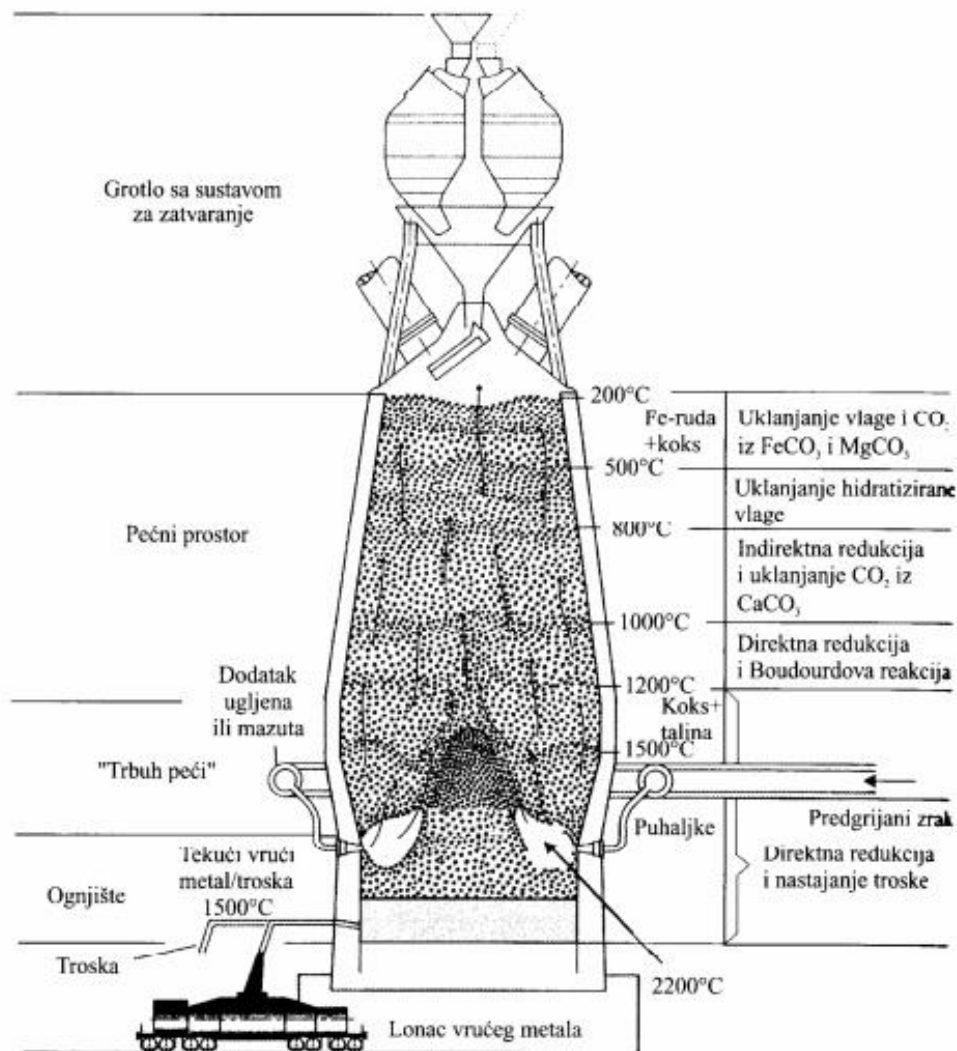
Kao sredstva za dezoksidaciju i povećanje žilavosti koriste se aluminij, mangan i silicij. Mangan u čeliku povećava granicu razvlačenja, žilavost i prokaljivost. Mangan u čeliku također djeluje i kao dezoksidans i desulfurizator jer na sebe veže kisik i nepoželjni sumpor pri čemu nastaje manganov oksid, odnosno sulfid koji prelaze u trosku. U cilju povećanja otpornosti na koroziju kao legirni elementi dodaju se bakar, krom, molibden i titan. Zbog izrazitog afiniteta prema kisiku, dušiku i sumporu, titan djeluje jako dezoksidirajuće, denitrirajuće kao i desulfurirajuće sredstvo. Nikal kao legirajući element povišuje žilavost čelika, a zbog visoke cijene uvijek se dodaje u kombinaciji s drugim legirajućim elementima. Volfram i vanadij su jaki karbidotvorci čime povećavaju čvrstoću, tvrdoću te otpornost na trošenje i starenje.

- Štetne primjese

Prisutnost dušika uzrokuje starenje čelika što dovodi do povećanja krtosti i pada žilavosti. Fosfor uzrokuje pojavu nehomogenosti strukture. U nekim slučajevima se fosfor namjerno dodaje zbog povećanja otpornosti na koroziju. Kisik, vodik i sumpor smanjuju čvrstoću i žilavost čelika. Sumpor je naročito nepoželjan u čeliku jer već pri minimalnim koncentracijama stvara karakterističnu fazu u mikrostrukturi željeza – željezov sulfid, FeS. Uslijed svoje neznatne plastičnosti, željezov sulfid pri temperaturama između 800 i 1000 °C izaziva krtost čelika ukoliko se nalazi na granicama zrna.

1.3. Produkcija čelika

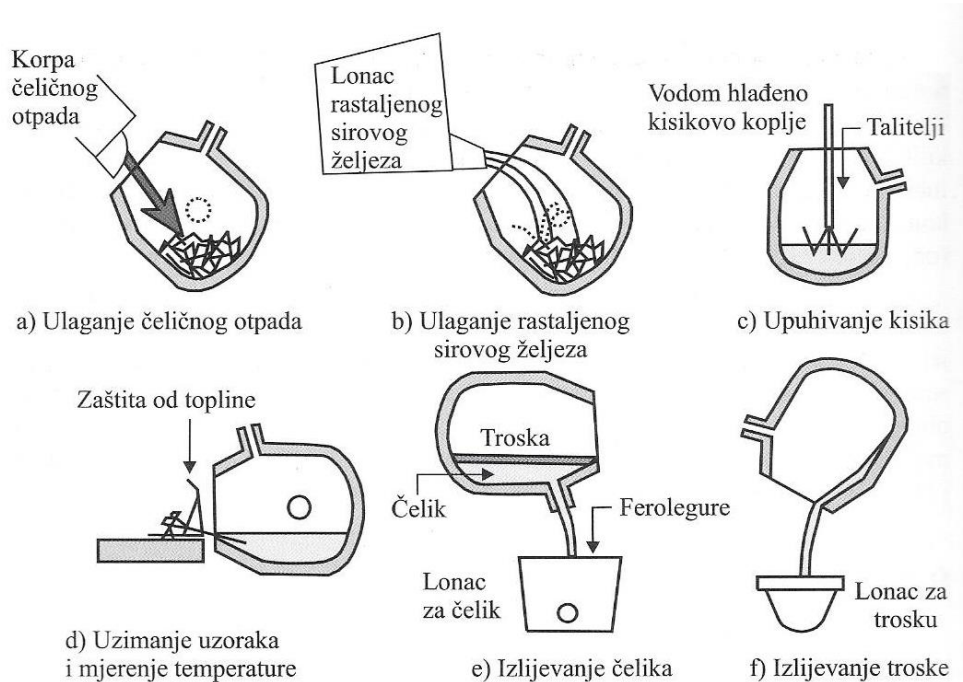
Osnovna sirovina za dobivanje čelika jest sirovo željezo koje se dobiva iz željezne rude u visokim pećima. Najvažnije rude za dobivanje željeza su: magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), limonit (FeOOH) i siderit (FeCO_3).⁵ Proces proizvodnje sirovog željeza odvija se u visokoj peći (slika 3) procesima redukcije željeznih ruda ugljikom iz koksa:⁶



Slika 3. Shematski prikaz poprečnog presjeka i temperaturni profil visoke peći⁶

Dobivanje čelika iz sirovog željeza se svodi na oksidaciju svih nečistoća. Sadržaj ugljika mora se smanjiti na vrijednost udjela ispod 1,7 %, a sve ostale nečistoće koje bi mogle štetno djelovati na osobine čelika nastoje se potpuno ukloniti.⁶ Najvažniji postupak proizvodnje čelika jest proizvodnja u kisikovim konverterima (LD postupak ili Linz-Donawitz postupak).

Uz sirovo željezo sirovine su i čelični otpad ili neki drugi izvor metala. Postupak se sastoji od nekoliko faza koje su prikazane na slici 4. Prvo se u konvertor ubacuje čelični otpad, zatim se iz visoke peći doprema sirovo željezo. Kroz kisikovo koplje se upuhuje kisik pri velikim brzinama ($560-1000 \text{ Nm}^3/\text{min}$) čija čistoća mora minimalno iznositi 99,5 %. Upuhivanje zraka provodi se kroz 3 ili više faza u kojima se kisik dovodi s različitih udaljenosti od rastaljene taline. Istodobno se uz upuhivanje kisika u talinu dodaju talitelji (Ca ili Mg oksidi) tj. tvari za kontrolu sadržaja sumpora i fosfora. Prisutne nečistoće s taliteljima stvaraju trosku koja pliva na vrhu rastaljenog čelika i služi kao toplinski izolator.⁶ Nastali čelik se doraduje procesima sekundarne metalurgije koje uključuju kemijske reakcije dezoksidacije, odsumporavanja, odosforavanja, legiranja itd. Tako obrađeni čelik se odvodi u kristalizatore tzv. kokile na skrućivanje.



Slika 4. Shematski prikaz faza proizvodnje čelika u kisikovom konvertoru⁶

1.3.1. Kotlovski čelik

Kotlovski čelik koristi se u industriji za proizvodnju kotlova i posuda pod tlakom. Proizvodnja takve vrste spremnika je detaljno regulirana jer se u kotlovima uglavnom nalaze hlapljivi spojevi koje djeluju korodirajuće. Zbog toga učinkovit dizajn ovisi o korištenom materijalu za izradu ovakvih spremnika.

Kotlovski čelici dizajnirani su za rad pri visokom tlaku i temperaturama. Uz otpornost na koroziju, moraju imati dobru žilavost i zavarljivost. Proizvodi od čelika koji se koriste za izradu kotlova i tlačnih posuda se u skladu s EN 10028-2 standardom dijele na nelegirane i legirane čelike s određenim svojstvima pri povišenim temperaturama.



Slika 5. Čelični kotao⁷

1. Nelegirani čelici

Čelici za kotlovski lim sadrže niski udio ugljika ($< 0,2 \%$) te mangan ($> 0,4 \%$), aluminij ($> 0,02 \%$) i krom ($< 0,3 \%$). Najčešće korišteni čelici za kotlovski lim su čelici P235GH (Č1202) i P265GH (Č1204).³ Značenje oznaka: P - moguće zavarivanje, G - omekšalo žarenje, H - stvrdnut. U odnosu na P265GH, P235GH ima niži sadržaj ugljika, a viši sadržaj mangana što znači da ima i manju vlačnu čvrstoću. Područje primjene ovih čelika je do $450 \text{ }^\circ\text{C}$ jer pri višim temperaturama dolazi do rekristalizacije i pojave krhkosti. U tablici 1 prikazane su granice razvlačenja P235GH i P265GH u ovisnosti o temperaturi.

Tablica 1. Promjena granice razvlačenja s promjenom temperature P235GH⁸ i P265GH⁹

T/ °C	Granica razvlačenja (MPa) P235GH		Granica razvlačenja (MPa) P265GH	
	e ≤ 16 mm	e > 16 mm	e ≤ 16 mm	e > 16 mm
50	≥ 227	≥ 218	≥ 256	≥ 247
100	≥ 214	≥ 205	≥ 241	≥ 232
150	≥ 198	≥ 190	≥ 223	≥ 215
200	≥ 182	≥ 174	≥ 205	≥ 197
250	≥ 167	≥ 160	≥ 188	≥ 181
300	≥ 153	≥ 147	≥ 173	≥ 166
350	≥ 142	≥ 136	≥ 160	≥ 154
400	≥ 133	≥ 128	≥ 150	≥ 145

Za iste iznose temperature i debljine čelik razreda P235GH ima nižu vrijednost granice razvlačenja od čelika P265GH. Granica razvlačenja smanjuje se porastom temperature.

2. Legirani čelici

Elementi koji se dodaju su krom i molibden, u nekim slučajevima i vanadij. Oni stvaraju stabilne karbide Cr_7C_3 , Mo_2C , V_4C_3 čime se povećava prokaljivost, otpornost na trošenje, starenje i popuštanje. Temperaturno područje primjene ove grupe čelika je od 450 °C do 580 °C. Pri višim temperaturama može doći do koagulacije karbida, osiromašenja osnove s molibdenom te smanjenja temperature rekristalizacije. Najčešće korišteni niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama su: 15Mo3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10, 22CrMo4-4, 24CrMoV5-5.³

Tablica2. Mehanička svojstva niskolegiranih čelika¹⁰

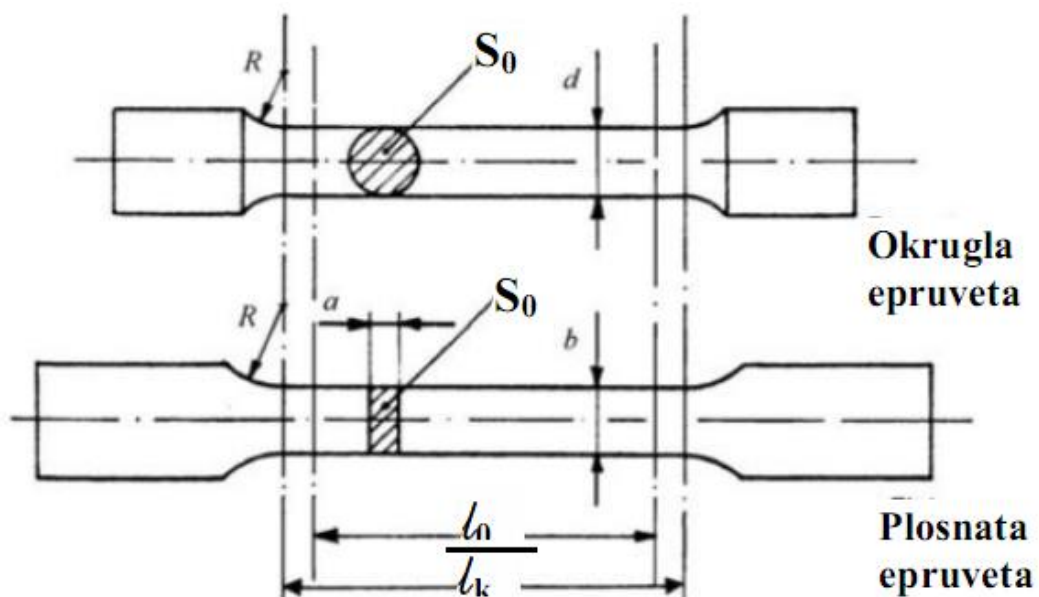
Oznaka čelika	Mehanička svojstva										
	R _m , N/mm ² pri 20°C	R _{p0,2} , N/mm ² , pri °C				R _{p1/10000} , N/mm ² , pri °C				A ₅ , % min.	KV, J min.
		20	200	400	500	450	500	530	580		
C35E	500-650	280	216	147	-	59	25	-	-	21	-
15Mo3	440-570	260	255	177	147	216	147	85		23	48
13CrMo4-4	440-590	290	275	206	177		186	78		22	48
22CrMo4-4	640-790	490		343		255	172	74		18	41
10CrMoV8-10	440-590	260	245	206	186		157	83	47	20	55
24CrMoV5-5	690-830	540	412	304	235	324	206	98		17	57

1.4. Mehanička ispitivanja

Mehanička ispitivanja primjenjuju se u cilju određivanja mehaničkih svojstava odnosno karakteristika materijala koja pokazuju odgovor na primijenjeno opterećenje. Podatci dobiveni ovim ispitivanjima daju uvid u područje prerade i primjene materijala te kazuju o kvaliteti materijala. Na osnovi mehaničkih svojstava dimenzioniraju se dijelovi uređaja, a mogu se ispitivati samo eksperimentalno. Poznavanje mehaničkih svojstava omogućuje izbjegavanje neželjenih ponašanja i oštećenja materijala. Ona su posljedica strukturnog stanja materijala, a najčešće razmatrana svojstva su čvrstoća, tvrdoća, žilavost i elastičnost.

Dva glavna odgovora materijala na djelovanje vanjske sile su deformacija i lom. Deformacija može biti elastična, viskoelastična (vremenski ovisna elastična deformacija) ili plastična i puzanje (vremenski ovisna plastična deformacija). Lom može nastati iznenada ili nakon ponavljajućih opterećenja (umor). I deformacija i lom osjetljivi su na oštećenja i temperaturu.¹¹

Kako naizgled identični uzorci ispitivanog materijala mogu pokazivati različite rezultate, obično se provodi više ispitivanja kako bi se utvrdila mehanička svojstva. Ispitivanje se vrši na posebnim uzorcima tzv. epruvtama (slika 6) koji se izrezuju iz materijala u obliku cilindra točno određenih dimenzija.



Slika 6. Oblici epruveta za statičko vlačno ispitivanje: a) okrugla epruveta, b) plosnata epruveta¹²

Naprezanje je, uz deformaciju i lom, također posljedica vanjskog opterećenja. Vrste deformacija i naprezanja prikazane su na slici 7.



Slika 7. Vrste deformacija i naprezanja¹³

1.4.1. Ispitivanje čvrstoće i elastičnosti

Čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala da pruža otpor djelovanju vanjske sile. Na temelju poznavanja čvrstoće materijali se vrednuju prema mehaničkoj otpornosti. Razlikujemo *vlačnu* i *tlačnu* čvrstoću.

Vlačna čvrstoća predstavlja opiranje materijala rastezanju. Definira se kao omjer maksimalnog opterećenja koje materijal može podnijeti i izvorne površine presjeka ispitivanog uzorka.

Tlačna čvrstoća je maksimalno naprezanje koje se može postići djelovanjem tlačne sile. Odnosi se na izdržljivost materijala prema opterećenju koja smanjuju njegovu veličinu. Utvrđuje se omjerom maksimalne tlačne sile i površine početnog poprečnog presjeka uzorka.

Ispitivanje se vrši na tzv. kidalici (slika 8), uređaju gdje se vlačnom, odnosno tlačnom silom djeluje na ispitni uzorak do pojave loma. Uređaj je povezan s monitorom na kojem se ispisuje dijagram kidanja te se mjeri promjena početne duljine epruvete. Dijagram kidanja može prikazivati ovisnosti naprezanja i deformacije, sile i produljenja ili sile i vremena.



Slika 8. Univerzalna kidalica¹²

Ovisnost promjene oblika čvrstog tijela o djelovanju vanjske sile opisuje Hookeov zakon. Ono vrijedi samo za tijela u obliku štapa ili šipke (epruveta) isključivo u području elastičnosti u kojem je naprezanje σ razmjerno deformaciji ε .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (6)$$

Ako se na epruvetu duljine L i površine poprečnog presjeka S djeluje nekom vanjskom silom F dolazi do naprezanja σ koje se opire toj sili prema izrazu (7):

$$\Delta L = \frac{F}{E \cdot S} \cdot L = \frac{\sigma}{E} \cdot L \quad (7)$$

σ - naprezanje (N/mm²)

E - Youngov modul elastičnosti (N/mm²)

ε - deformacija (bezdimenzijska veličina)

L - duljina epruvete (mm)

ΔL - produljenje epruvete (mm)

F - sila kojom se djeluje na epruvetu (N)

S - poprečni presjek epruvete (mm²)

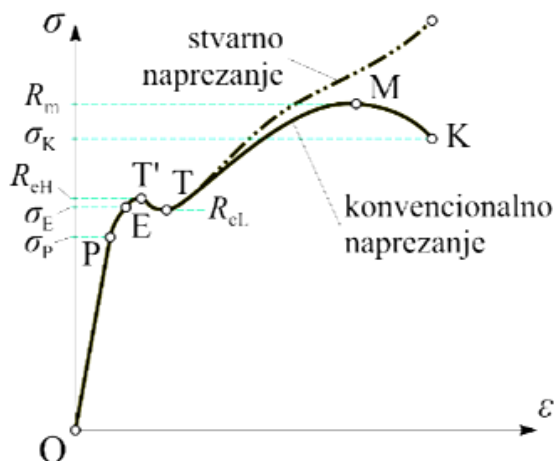
Modul elastičnosti (Youngov modul) E pokazuje koliko se duljina tijela promijenila pod djelovanjem vanjske sile. On predstavlja omjer naprezanja i deformacije u području elastičnosti te je karakterističan za pojedini materijal. Što je Youngov modul veći materijal je krući, a nagib Hookeovog pravca će biti strmiji.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (9)$$

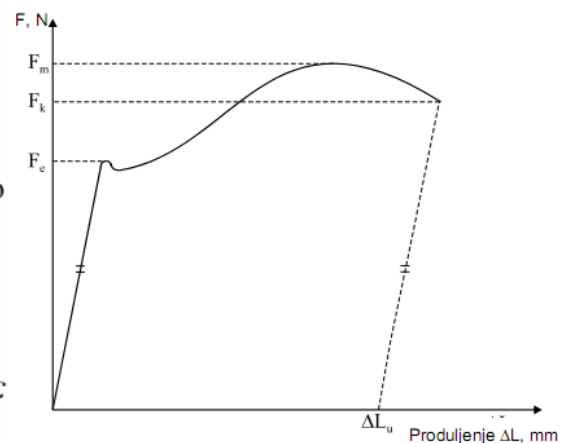
Hookeov zakon vrijedi sve dok se ne počnu mijenjati fizikalna svojstva materijala, odnosno sve dok je linija na dijagramu linearna. U tom području materijal je elastičan što znači da se nakon prestanka djelovanja sile ono vraća u početno stanje.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (10)$$

L_0 - početna duljina epruvete (mm)



Slika 9. Dijagram kidanja $\sigma - \varepsilon$ ¹⁴



Slika 10. Dijagram kidanja $F - \Delta L$ ¹⁵

Hookeov pravac počinje iz ishodišta i vrijedi sve do granice proporcionalnosti σ_P (točka P). Do te točke sila i produljenje, odnosno naprezanje i deformacija, proporcionalno rastu, a sve deformacije u tom području su elastične. Točka E predstavlja točku elastičnosti σ_E i prekoračenjem te točke prestaje vrijediti Hookeov zakon. Materijal prelazi u područje plastičnosti što znači da se nakon prestanka djelovanja sile ono ne vraća na početnu duljinu već ostaje trajno deformirano.

Za materijale koji nemaju izraženu granicu plastičnosti, uzima se konvencionalna granica plastičnosti koja predstavlja naprezanje pri kojem trajna deformacija iznosi 0,2 % nakon rasterećenja epruvete.¹² Između točaka T' i T'' (donje i gornje granice razvlačenja) nastaje zona velikih deformacija. Donja granica razvlačenja označava silu na granici razvlačenja F_e . Dijeljenjem iznosa te sile sa površinom poprečnog presjeka dobivamo iznos granice razvlačenja R_e koje označava naprezanje koje razdvaja elastične od plastičnih deformacija. Točka M predstavlja vlačnu čvrstoću u kojoj sila F_m dostiže najveću vrijednost. Dijeljenjem te maksimalne sile s površinom poprečnog presjeka epruvete dobivamo iznos vlačne čvrstoće materijala R_m . Na kraju u točki K dolazi do loma materijala.

1.4.2. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća predstavlja otpor materijala prodiranju drugog tijela u njegovu površinu. Za ispitivanje tvrdoće koriste se statičke i dinamičke metode koje se provode na tvrdomjeru (slika 11).



Slika 11. Uređaj za ispitivanje tvrdoće tzv. tvrdomjer¹⁶

1. Statičke metode

Princip mjerenja statičkim metodama jest mjerenje površine ili dubine izazvane djelovanjem penetratora (utiskivača) na ispitni materijal. Penetrator je izrađen od tvrdog materijala oblika kuglice, stošca ili piramide koji pod djelovanjem vanjske sile prodire u materijal. Postoji više vrsta metoda za ovakvu vrstu ispitivanja (tablica 3).

Tablica 3. Statičke metode ispitivanja tvrdoće¹²

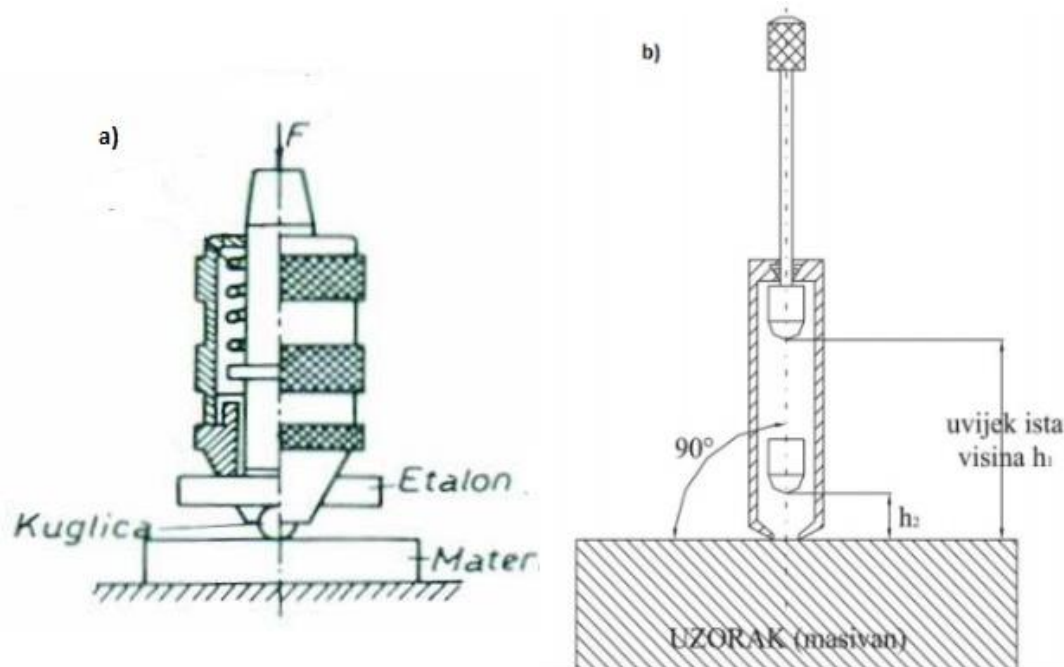
	Vrsta penetratora	Metoda ispitivanja
Brinell	Zakaljena čelična kuglica normiranih promjera (1, 2, 2.5, 5 i 10 mm).	Penetratorom promjera D se silom F utiskuje u površinu materijala. Na površini nastaje otisak oblika kalote promjera baze d i dubine h. Tvrdoća se određuje kao omjer sile i površine kalote. $HB = \frac{F \cdot 0,204}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (11)$ Koristi se samo za mjerenje tvrdoće do 450 HB (meki čelik).
Vickers	Četverostrana istostranična dijamantna piramida vršnog kuta od 136°.	Metoda je slična Brinellovoj. Mjeri se površina otiska penetratora pomoću dijagonala. Tvrdoća se označava sa HV. $HV = \frac{F \cdot 0,102}{d^2} \quad (12)$ Univerzalna metoda mjerenja. Vrijedi i za meke i tvrde materijale tvrdoće veće od 450 HB.
Rockwell	Čelična kuglica za meke čelike (HRB metoda) promjera 1/16", 1/8", 1/4" i 1/2". Dijamantni stožac vršnog kuta od 120° za tvrde čelike (HRC metoda).	Kod ove metode ne mjeri se površina otiska već dubina prodiranja h. Ispitivanje se provodi u 3 faze. U prvoj fazi se predopterećenjem prodire na početnu dubinu h ₀ . Glavno opterećenje se dodaje u drugoj fazi do dubine h ₁ . U trećoj fazi se uklanja glavno opterećenje te se penetrator vraća i zaustavlja na dubini h ₂ . Dubina prodiranja (e) se mjeri kao razlika h ₂ i h ₀ . $HRB = 130 - \frac{e}{0,002} \quad (13)$ Mjerno područje za HRB je 350-100 HRB. $HRC = 100 - \frac{e}{0,002} \quad (14)$ Mjerno područje za HRC je 20-70 HRC. Tvrdoća se očitava na uređaju.

2. Dinamičke metode

Dinamičke metode koriste se za grubu procjenu tvrdoće uz pomoć prijenosnih uređaja. Ispitivanja su brža i jednostavnija, a koriste se za ispitivanje materijala velikih dimenzija i složene konstrukcije. Princip ove metode temelji se na mjerenju elastičnog odskoka penetratora od ispitivane površine ili na dinamičnom djelovanju sile na penetrator.

Poldieva metoda ispitivanja slična je Brinellovoj. Kao penetrator koristi se čelična kuglica polumjera 10 mm koja se postavlja između ispitivanog materijala i čelične šipke poznate tvrdoće. Na šipku se udara tzv. Poldijevim čekićem i mjeri se polumjer otiska na materijalu te se uz pomoć tablica dobivenih uz uređaj određuje tvrdoća prema Brinellu.

Ispitivanje tvrdoće Shoreovom metodom zasniva se na elastičnom odskoku bez utiskivanja penetratora. Sa standardne visine kroz staklenu cijev ispušta se pokretni utiskivač s dijamantrnim stožastim vrhom. On slobodno pada na površinu materijala te se mjeri visina odskoka koja se preko tablice preračunava u tvrdoću prema Brinellu.

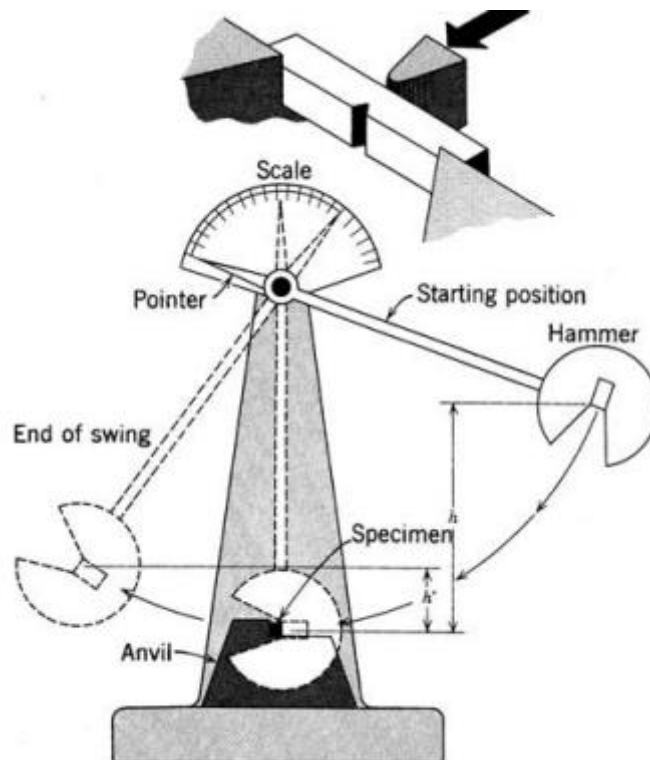


Slika 12. a) Poldieva metoda¹⁷ b) Shoreova metoda¹²

1.4.3. Ispitivanje žilavosti

Žilavost materijala se definira kao otpornost na lom, odnosno sposobnost materijala da se plastično deformira i apsorbira energiju u procesu prije loma. Na žilavost utječe kemijski sastav, prisutne nečistoće u materijalu te temperatura. Postoji više metoda ispitivanja, a najčešće se provodi ispitivanje Charpyjevom metodom.

Zarezana šipka razbije se njihajućim batom. Energija apsorbirana u lomu mjeri se tako što se bilježi visina bata nakon loma. Jedna od glavnih prednosti ovog uređaja je ta što se žilavost može mjeriti pri različitim temperaturama. Uzorak se može zagrijati ili ohladiti na željenu temperaturu, potom prebaciti u Charpyjev uređaj (slika 13) u kojem se brzo provodi mjerenje uz zanemaru promjenu temperature.¹⁰ Energija se očitava direktno na mjernoj skali.



Slika 13. Shema Charpyjevog uređaja¹⁰

2. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada izvršena su ispitivanja mehaničkih svojstava (granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i izduženje) brodograđevnog materijala.

2.1. Materijal

Kao materijal za ispitivanje korišten je brodograđevni lim u obliku epruvete debljine 5,0 mm, veličine 25 x 5,0 mm, površine poprečnog presjeka $S_0 = 125 \text{ mm}^2$ i početne duljine $L_0 = 65 \text{ mm}$. Materijal je kvalitete AH36, prema Lloyd's Register, čiji je certifikat prikazan na slici 14. To je čelik visoke čvrstoće koji se koristi za morsku i pomorsku upotrebu. Materijal je nabavljen od tvrtke Makstil AD, Skoplje, Makedonija.

Customer: DUFERCO S.A.		INSPECTION CERTIFICATE No. 708041 2264 LR1		PM ML 83 22																						
Customer's order no.: SO4201008004		According to EN 10204 / 2004 : 32		Pages : 1/ 1																						
Order No. / Lot No.: / 2264		Issued in electronic form																								
Manufacturer's symbol: ŽSK		Technical delivery conditions: LR																								
Delivered conditions: NR - normalizing rolling		EN 10029:2010 cl.B cl.N																								
		EN 10163-1&2:2004 cl.B/2		Issued : 09.09.2018																						
HOT ROLLED STEEL PLATES							CHEMICAL COMPOSITION																			
Heat No.	Steel grade	Item no.	Pieces	Dimensions (mm)			Weight (kg)	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	Cu	Ni	Ti	V	Nb	Mo	B	Ca	Pb	As	CEV
				Thickness	Width	Length		10 ⁻² %	10 ⁻² %	10 ⁻² %	10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	10 ⁻² %	10 ⁻² %	10 ⁻² %	10 ⁻² %	10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	10 ⁻⁴ %	10 ⁻⁴ %	10 ⁻³ %
480338	AH36	2	1	5.00	2500	12500	1227	18	28	110	8	4	43	8	10	35	13	1	1	1	1					42
480374	"	3	4	5.00	2500	12500	4908	17	25	105	15	5	37	7	5	34	11	1	1	1	1					39
479965	"	5	1	5.50	2500	12500	1349	16	20	105	19	7	50	8	9	34	11	1	1	1	1					38
Total :		6					7484	MANUFACTURING PROCESS: EAF ¹⁾																		
PRODUCT IDENTIFICATION				TENSILE TEST				IMPACT TEST						SUPPLEMENTARY REQUIREMENTS												
Heat No.	Plate No.	Plate No.	Test No.	Section	Orientation	Reb N/mm ²	Rm N/mm ²	A %	Type	Individual values			Mean value J	At +C	Width of test piece	Section	E ₁₁									
										1	2	3														
480338	49430-02	49734-01	49426	1	T	402	572	29.0																		
480374	49733-02	49735-02	49733	1	T	382	525	28.0																		
479965	39378-01	39377	39377	1	T	392	527	28.7																		

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL HAS BEEN MADE BY AN APPROVED PROCESS AND SATISFACTORILY TESTED IN ACCORDANCE WITH THE RULES OF LLOYD'S REGISTER

Bend test :
 Ultra-sonic test :
 Visual and dimensional inspection - without objection
 We hereby certify, that the delivered material complies with the terms of the order.
 1) Direction of the test piece - L - longitudinal, T - transverse; Z - in the thickness direction
 2) Location of the test sample - 1 - top, 2 - bottom
 Die-stamp marking :
 Makstil's symbol / Grade / Heat No. / Plate No./CS mark

Q.D. 'MAKSTIL' A.D.
 QM.dip.eng I.BOGESKI
 RZ TECHNICAL CONTROL A.D. - SKOPIJE
 tech manager dipl.Eng.E.Uprizovic

MAKSTIL AD - Skopje, ISO 9001:2015 CERTIFIED BY BSI, CERTIFICATE No. FM 55593
 Laboratory RZ TECHNICAL CONTROL AD - Skopje, ISO 9001:2008 CERTIFIED BY LRAQ, CERTIFICATE No. FM 207982

Slika 14. Certifikat ispitnog materijala AH36

2.2. Priprema uzorka

Od 14 izrađenih epruveta (slika 15), određen broj je pothlađen na temperaturu od 0 °C do -30 °C u rashladnom uređaju s alkoholnom kupkom, a dio je zagrijan na +200 °C do +650 °C u laboratorijskoj peći. Vrijeme zadržavanja epruveta na određenoj temperaturi prilikom hlađenja i grijanja je bilo približno 10 minuta, dok je za epruvete 12, 13 i 14 to iznosilo 1 sat.



Slika 15. Epruvete za mehanička ispitivanja

2.3. Opis aparature i postupak mjerenja

Ispitivanje je obavljeno u firmi Brodosplit-Laboratoriji d.o.o. na 60-tonskoj kidalici „MAN 60“, prikazanoj na slici 16, pri čemu su se koristile standardne epruvete, izrezane iz lima i strojno obrađene. Uređaj se sastoji od:

- postolja,
- uređaja za mjerenje sile,
- mehanizma za opterećivanje,
- računala.



Slika 16. Kidalica „MAN 60“

Pripremljena epruveta se postavlja u čeljust kidalice na koju se onda djeluje vlačnom silom. Epruveta se razvlači sve do pojave loma. Na računaru se ispisuje dijagram ovisnosti sile F o vremenu t preko kojeg se određuje sila na granici razvlačenja F_e i maksimalna sila F_m . Duljina epruvete nakon loma se mjeri ručno pomoću ravnala, a izduženje se izračunava preko formule:

$$A = \frac{L_k - L_0}{L_0} \cdot 100\% \quad (15)$$

Granica razvlačenja i zatezna čvrstoća određuju se preko jednadžbi:

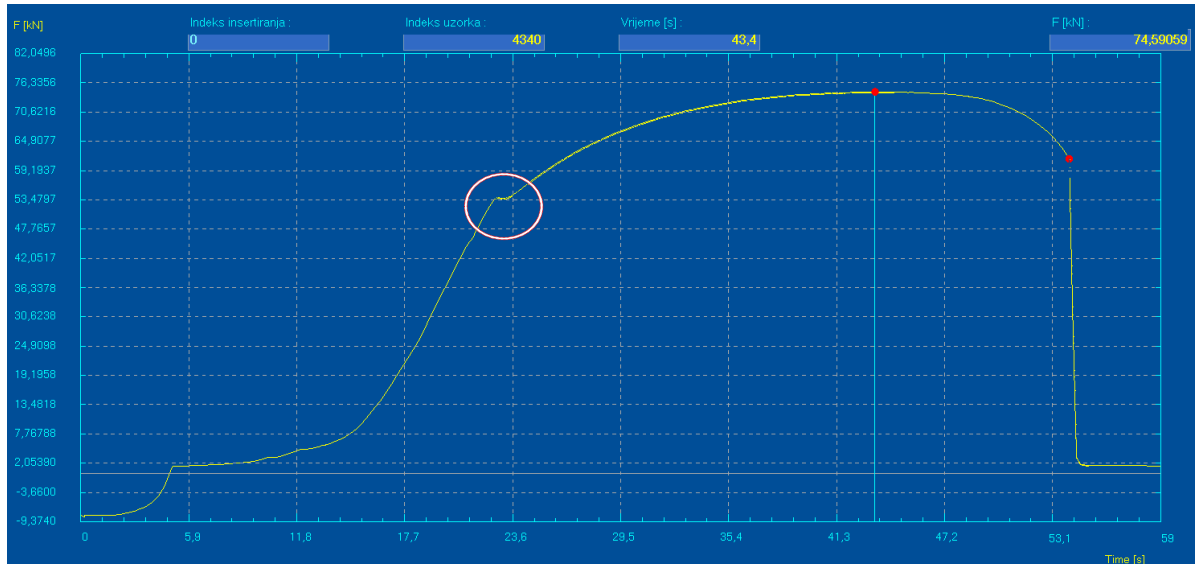
$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (16)$$

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (17)$$

Isti postupak se ponavlja za sve epruvete te se uspoređuju dobivene vrijednosti.

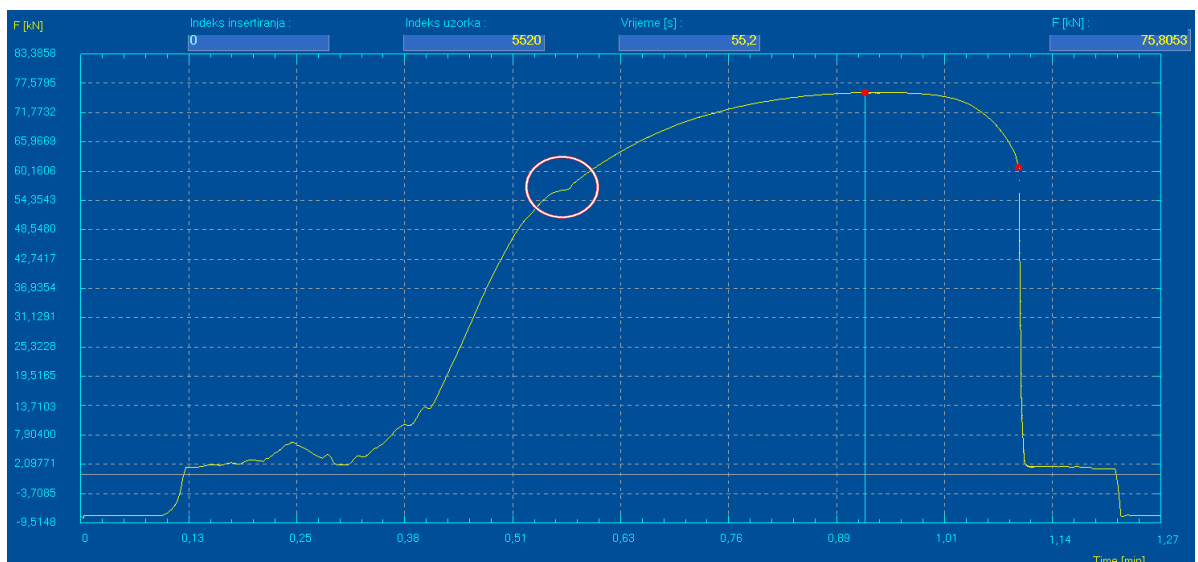
3. REZULTATI

Na slikama 17-26 prikazani su dijagrami ovisnosti sile F o vremenu t iz kojih se očitava sila na granici razvlačenja F_e i maksimalna sila F_m .



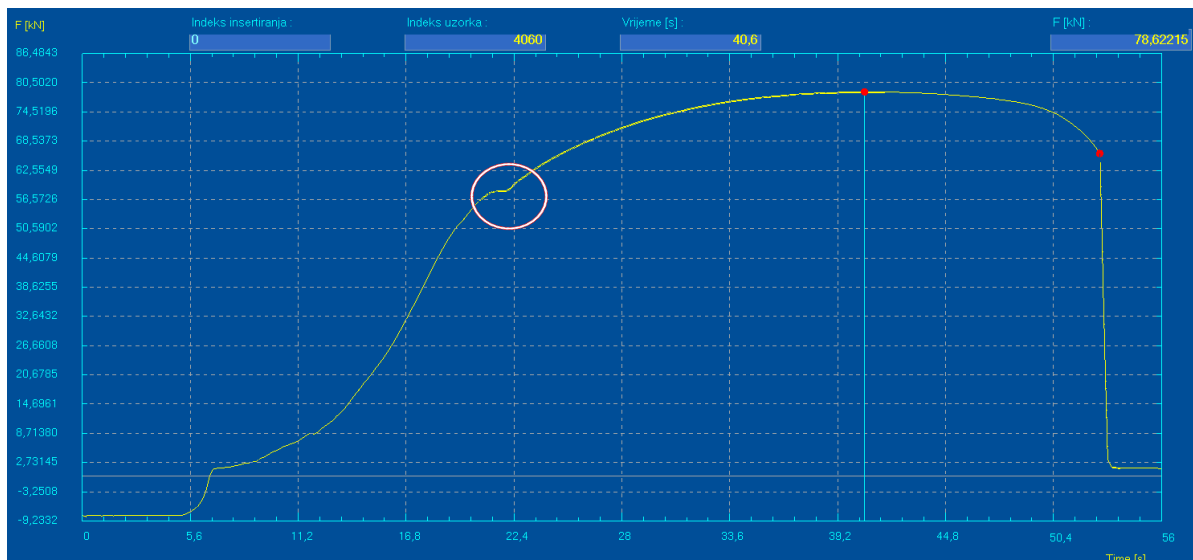
Slika 17. $F - t$ dijagram epruvete 1 temperature 20 °C

Iznosi sila epruvete 1: $F_e = 54$ kN i $F_m = 74$ kN



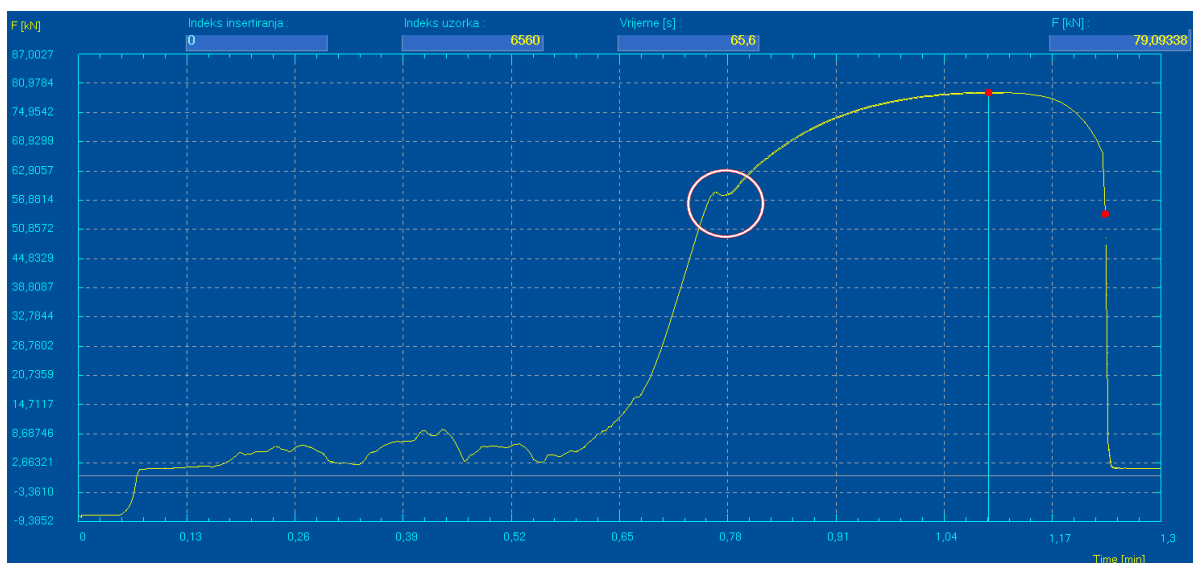
Slika 18. $F - t$ dijagram epruvete 2 ohlađene na 0 °C

Iznosi sila epruvete 2: $F_e = 56$ kN i $F_m = 76$ kN



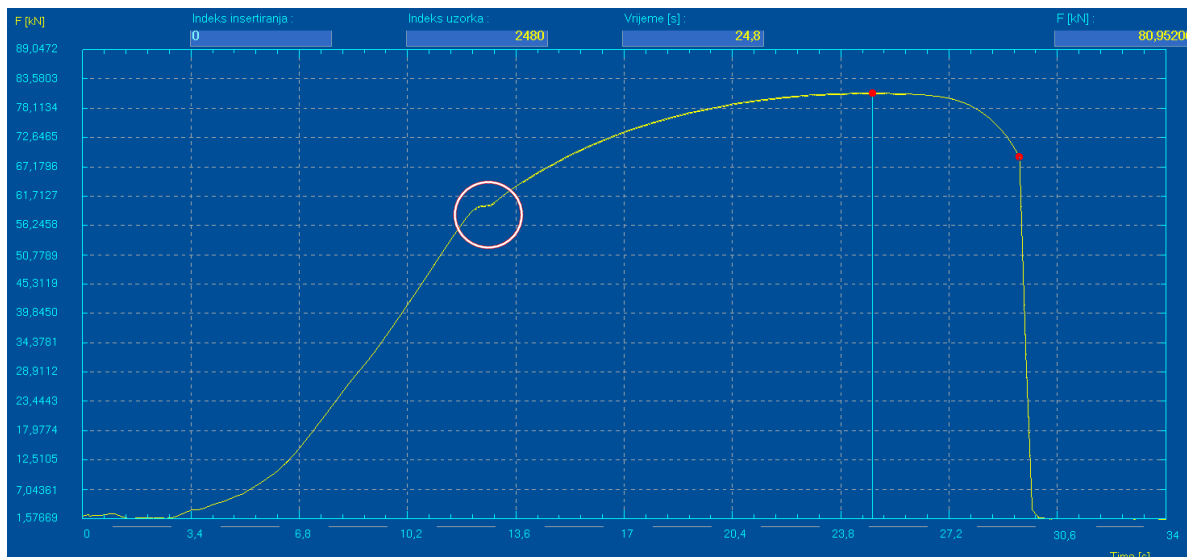
Slika 19. $F-t$ dijagram epruvete 4 ohlađene na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Iznosi sila epruvete 4: $F_e = 58\text{ kN}$ i $F_m = 78,5\text{ kN}$



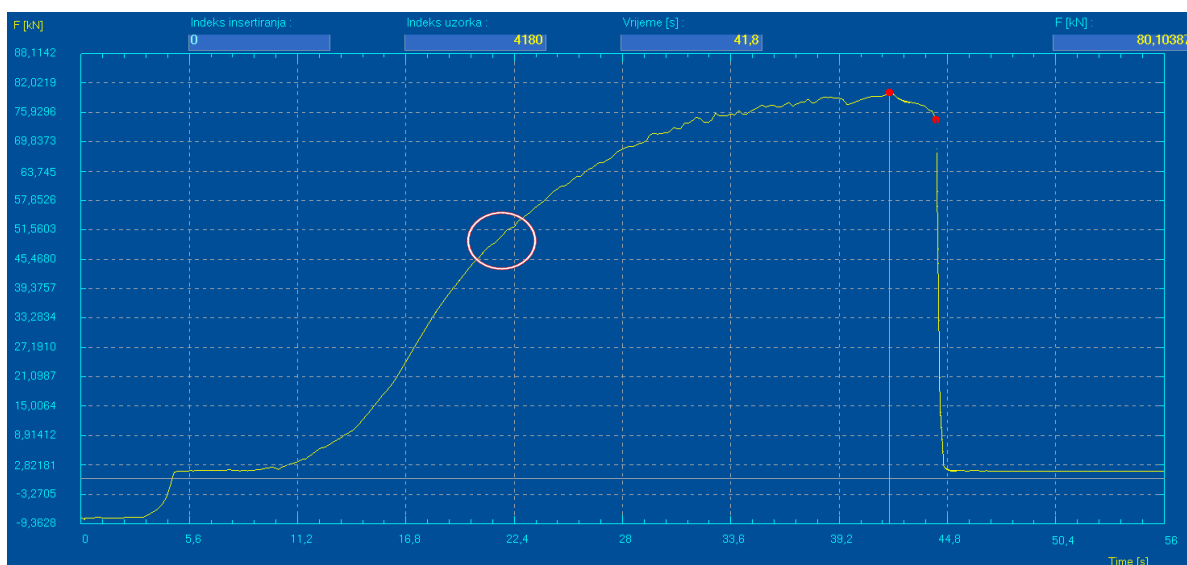
Slika 20. $F-t$ dijagram epruvete 5 ohlađene na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Iznosi sila epruvete 5: $F_e = 58,5\text{ kN}$ i $F_m = 79\text{ kN}$



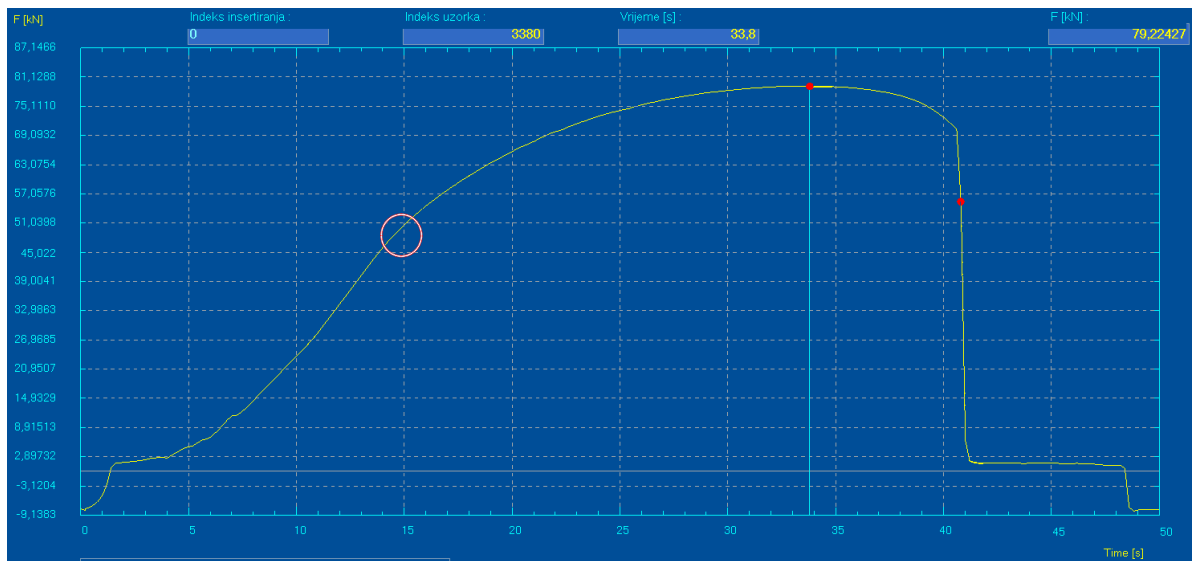
Slika 21. $F - t$ dijagram epruvete 6 ohlađene na $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Iznosi sila epruvete 6: $F_e = 59,5\text{ kN}$ i $F_m = 81\text{ kN}$



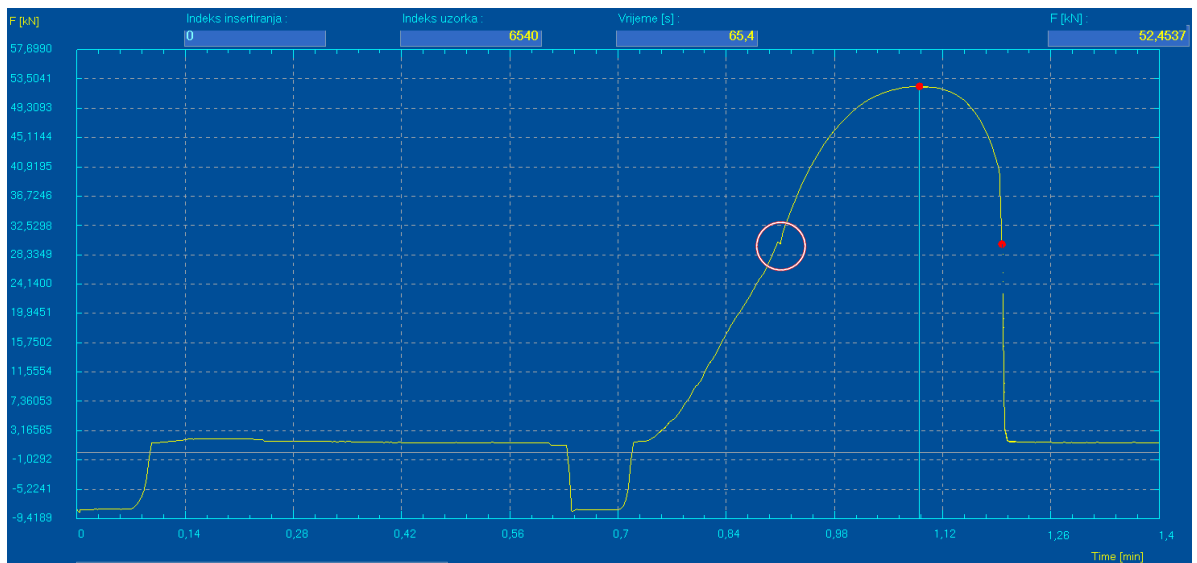
Slika 22. $F - t$ dijagram epruvete 8 zagrijane na $200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Iznosi sila epruvete 8: $F_e = 49\text{ kN}$ i $F_m = 80\text{ kN}$



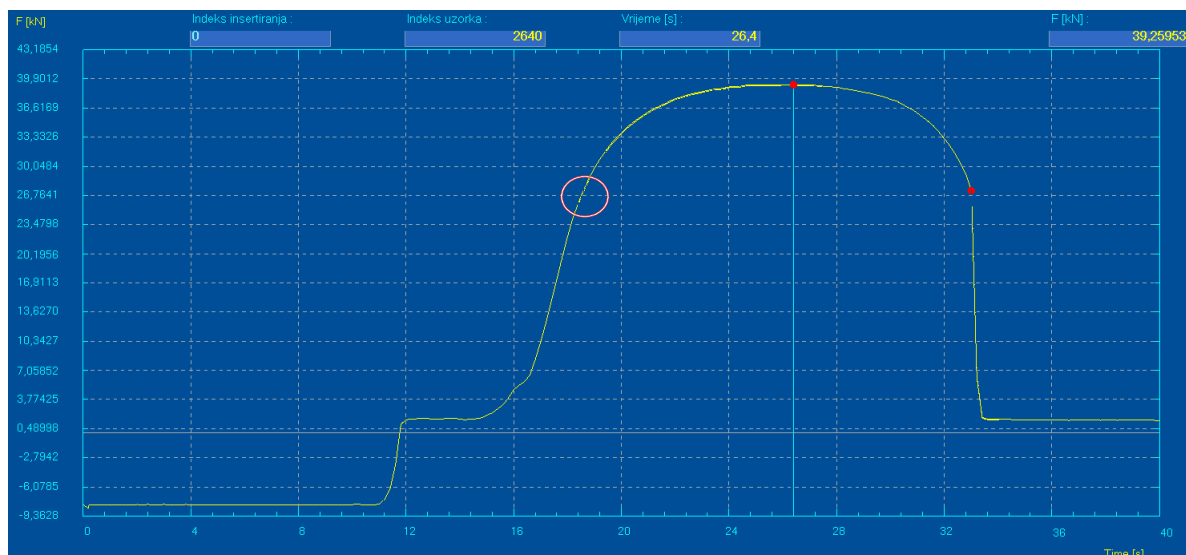
Slika 23. $F - t$ dijagram epruvete 11 zagrijane na 400 °C

Iznosi sila epruvete 11: $F_e = 47$ kN i $F_m = 79$ kN



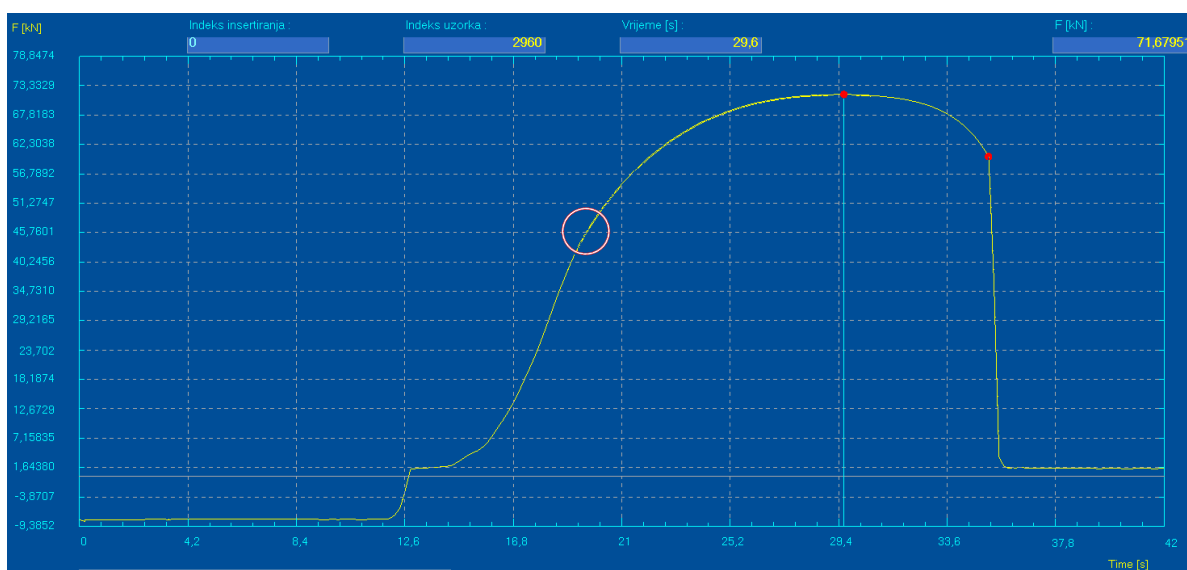
Slika 24. $F - t$ dijagram epruvete 12 zagrijane na 600 °C

Iznosi sila epruvete 12: $F_e = 30$ kN i $F_m = 52,5$ kN



Slika 25. $F - t$ dijagram epruvete 13 zagrijane na $650\text{ }^{\circ}\text{C}$

Iznosi sila epruvete 13: $F_e = 25\text{ kN}$ i $F_m = 39\text{ kN}$



Slika 26. $F - t$ dijagram epruvete 14 zagrijane na $450\text{ }^{\circ}\text{C}$

Iznosi sila epruvete 14: $F_e = 46\text{ kN}$ i $F_m = 71,5\text{ kN}$

4. RASPRAVA

Na slikama 17-26 prikazani su dijagrami ovisnosti sile o vremenu, odnosno dijagrami kidanja. Oni pokazuju da pothlađene epruvete imaju veće vrijednosti sile na granici razvlačenja i maksimalne sile od zagrijanih epruveta. Iznosi granica razvlačenja i zatezne čvrstoće (izračunati preko formula (16) i (17)) u ovisnosti o temperaturi nalaze se u tablici 4.

Tablica 4. Ovisnost granice razvlačenja R_e i vlačne čvrstoće R_m o temperaturi.

Epruveta	T/°C	R_e (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)
1	20	432	596
3	0	448	608
4	-20	464	628
5	-20	468	632
6	-30	476	648
8	200	392	640
11	400	376	632
14	450	368	572
12	600	240	420
13	650	200	312

U tablici 5 nalaze se vrijednosti duljina nakon vlačnog ispitivanja (L_k) i izduženja.

Tablica 5. Vrijednosti konačne duljine i izduženja

Epruveta	T/°C	L_k (mm)	A (%)
1	20	82	26,1
3	0	82	26,1
4	-20	81,5	25,4
5	-20	81,5	25,4
6	-30	81	24,6
8	200	78	20
11	400	81	24,6
14	450	86	32,3
12	600	81	24,6
13	650	84	29,2

Na slici 27 nalazi se originalno izvješće o rezultatima mehaničkog ispitivanja.

BRODOGRAĐEVNA INDUSTRIJA SPLIT d.d. / Shipbuilding Industry Split Ltd Brodosplit - Laboratorij d.o.o. - Brodosplit-Laboratory Ltd Put Supavla 21, p.p. 517 - 21 000 SPLIT - HRVATSKA												IZVJEŠTAJ BR.: 8010 REPORT N°: LME BR.: PROJEKT: 111								
REZULTATI MEHANIČKIH ISPITIVANJA / RESULTS OF MECHANICAL TESTING												OZNAKA ŠARŽE HEAT N°: 480374 MAKSTIL-Skopje								
OBJEKT OBJECT				PREDMET SUBJECT: Čelični lim				DIMENZIJA DIMENSION: 11500x1500x5 mm				PROJEKT KVALITETE QUALITY NORM: LR-AH3G								
NARUČITELJ ORDERER				RASTEZANJE / TENSILE TEST Standard: EN ISO 6892-1 / EN ISO 4136 <input type="checkbox"/>				SAVLJANJE BEND TEST Standard: EN ISO 5173		TVRDOĆA HARDNESS Standard:		UDARNA RADNJA LOMA / IMPACT TEST KV: TEMP: [°C] Standard: EN ISO 148-1								
BROJ No.	ZAHTEVNA KVALITETA QUALITY REQUIRED Temp. isp.	MJERE PRIJE PREKIDA ORIGINAL CROSS SECTION		GRANICA RAZVLAČENJA YIELD POINT		ZATEZNA ČVRSTOĆA TENSILE STRENGTH		IZDUŽENJE ELONGATION AFTER FRACTURE			SUŽENJE REDUCTION OF AREA		KUT ANGLE α [°]	OCJENA EVALUATION	EN ISO 6506-1 HB EN ISO 6506-1 HRC	POJEDINAČNA VRIJEDNOST INDIVIDUAL VALUE			SREDNJA VRIJEDNOST AVERAGE VALUE H	
		W ₀ [mm]	S ₀ [mm]	F _{0.2} [N]	R _m [N/mm ²]	F _t [N]	R _m [N/mm ²]	MJERNA DULJINA GAUGE LENGTH L ₀ [mm]	L ₁ [mm]	A _{11.2} [%]	PROMJER DIAMETER [mm]	Z [%]				1	2	3		
1.	+20°C	25,50	1250	54	432	745	596	650	810	26,1										
3.	0°C	-	-	56	448	760	608	-	810	26,1										
4.	-20°C	-	-	58	464	785	628	-	815	25,4										
5.	-20°C	-	-	68,5	468	790	632	-	-	-										
6.	-30°C	-	-	59,5	476	810	648	-	810	24,6										
8.	+200°C	-	-	49,0	392	890	640	650	780	20,0										
11.	+400°C	-	-	470	376	790	632	-	810	24,6										
14.	+450°C	-	-	460	368	745	572	-	860	32,3										
13.	+600°C	-	-	390	340	525	420	-	810	24,6										
13.	+650°C	-	-	250	200	330	312	-	840	29,2										
KEMIJSKI BASTAV U ELEMENTI / ELEMENTS												NAPOMENA / NOTE								
C																				
Si																				
Mn																				
P																				
S																				
Cr																				
Ni																				
Mo																				
DATUM / DATE: 19. 06. 2020.																				
ISPITAO CHECKED BY: RA.				PREDSTAVNIK CLASSIFICATION				RUKOVODITELJ LABORATORIJA MANAGER OF LABORATORY: [Signature]												

Slika 27. Rezultati mehaničkih ispitivanja

Kako bi se bolje prikazao utjecaj temperature na mehanička svojstva, uspoređeni su rezultati dviju epruveta. Kao referentna epruveta uzeta je epruveta 1 pri 20 °C koja pokazuje vrijednosti $R_e = 432 \text{ N/mm}^2$ i $R_m = 596 \text{ N/mm}^2$, dok epruveta 6 pri -30 °C pokazuje vrijednost R_e veću za 10,2 %, odnosno vrijednost R_m veću za 8,7 %. Također, duljina epruvete 1 manja je za 1 mm, a izduženje je manje za 1,5 %. Iz navedenih podataka može se zaključiti da se vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće povećavaju sniženjem temperature, dok se duljina i izduženje epruveta smanjuju. Razlog tome jest promjena mikrostrukture materijala pri nižim, odnosno višim temperaturama. Atomi i molekule, se snižavanjem temperature lokaliziraju, a pri višim temperaturama se povećava njihova pokretljivost unutar materijala.

Kod epruvete 8 i 11 uočena su mala odstupanja od pravila povećanja izduženja i vlačne čvrstoće povišenjem temperature. Razlog tome je relativno kratko zadržavanje epruveta na tim temperaturama, za razliku od epruveta 12-14 koje su bile dulje izložene utjecaju topline i doživjele strukturnu promjenu karakterističnu za odžareno stanje. Također, povišenjem temperature ispitivanja granica razvlačenja postaje slabije izražena, pa bi u ovakvim slučajevima trebalo odrediti tzv. konvencionalnu granicu razvlačenja ($R_{0,2}$).

5. ZAKLJUČAK

Na temelju ispitivanja mehaničkih svojstava brodograđevnog materijala AH36 provedenih na kidalici pri temperaturama od -30 do 650 °C može se zaključiti sljedeće:

- Snižanjem temperature ispitivanja od sobne (epruveta 1) do -30 °C (epruveta 6), granica razvlačenja i vlačna čvrstoća rastu za 10,2 %, odnosno 8,7 %, dok se izduženje smanjuje za 1,5 %.
- Povišenjem temperature ispitivanja od sobne (epruveta 1) do 650 °C (epruveta 13), granica razvlačenja i zatezna čvrstoća se smanjuju za 53,7 %, odnosno 47,7 %, dok se izduženje povećava za 3 %.
- Povišenjem temperature granica razvlačenja je manje izražena na dijagramu te u tom slučaju treba odrediti konvencionalnu granicu razvlačenja.
- Kako bi se izbjegla odstupanja pri višim temperaturama vrijeme zadržavanja treba biti duže.

6. LITERATURA

1. URL: <https://steelfacts.worldsteel.org/assets/facts/32-5e4cf13d9d8a0.jpg> (2.7.2020)
2. URL: https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-data-viewer/P1_crude_steel_total/CHN (2.7.2020)
3. *S. Kožuh*, Specijalni čelici, skripta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
4. URL: <http://www.laser-ing.hr/blog/oznacavanje-celika-prema-en-normi/> (3.7.2020)
5. *I. Filipović, S. Lipanović*, Opća i anorganska kemija II. dio, Školska knjiga Zagreb, 1995.
6. *M. Gojić*, Metalurgija čelika, Sveučilište u Zagrebu, Denona d.o.o., Sisak, 2005., (131-132; 207-216)
7. URL: <https://www.turcert.com/images/standartlar2/buhar-kazani-periyodik-muayenesi.jpg> (15.7.2020)
8. URL:
https://www.salzgitterflachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/warmgewalzte_produkte/eng/P235GH.pdf (15.7.2020)
9. URL:
https://www.salzgitterflachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/warmgewalzte_produkte/deu/P265GH.pdf (15.7.2020)
10. *M. Pongrac*, Materijali za tlačne posude, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2016.
11. *W.F. Hosford*, Mechanical Behavior of Materials, second edition, Cambridge University Press, New York, (2010), 218, 219.
12. *I. Gabrić, S. Šitić*, Materijali I, skripta, Sveučilište u Splitu, Konstrukcijsko strojarstvo, Split, 2012.
13. *Z. Kolumbić, M. Dundjer, G Salopek*, Elementi strojeva 1, interna skripta, Sveučilište u Rijeci, Studij politehnike, Rijeka.
14. *B. Plazibat, A. Matoković, V. Vetma*, Nauka o čvrstoći, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2019.
15. *R. Renjo*, Utjecaj predopterećenja na rezultate vlačnog umjeravanja kidalice, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
16. URL: <https://www.mediotehna.hr/hr/Stolni-uredaji-za-mjerenje-tvrdoce/Stolni-uredaj-za-mjerenje-tvrdoce-IDV10-digitalni.h> (20.8.2020)

17. *S. Rešković*, Ispitivanje materijala, recenzirana predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2009.