

Karakterizacija materijala stijenke cijevi iz eksploatacije

Rudelić, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:755638>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-05**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mario Rudelić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Željko Alar, red. prof.

Student:

Mario Rudelić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se roditeljima i prijateljima na podršci svih ovih godina. Također, zahvaljujem se svom mentoru na pruženoj pomoći i potpori tijekom izrade ovog završnog rada.

Mario Rudelić



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mario Rudelić**

JMBAG: **0035206516**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija materijala stijenke cijevi iz eksploatacije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of pipe material from exploitation**

Na dijelu cijevne konstrukcije debljine stijenke 40 mm, koja je bila korištena u posebnim eksploatacijskim uvjetima, potrebno je provesti analizu materijala. Prema specifikacijama proizvođača materijal cijevi je čelik S355. Kako bi se potvrdila kvaliteta materijala, potrebno ga je podvrgnuti kartakterizaciji u više koraka.

Opis zadatka:

1. Opisati metode karakterizacije materijala
2. Provesti statička i dinamička ispitivanja mehaničkih svojstava na uzorcima cijevi
3. Provesti metalografsku analizu uzoraka
4. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.


Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.


Predvideni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Željko Alar

Predsjednik Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. ČELICI	2
2.1. Primjese i nemetalni uključci u čeliku	2
2.2. Legirni elementi u čeliku	3
2.3. Podjela čelika	7
2.4. Opći konstrukcijski čelici.....	8
2.4.1. Primjena konstrukcijskih čelika.....	9
2.5. Kemijska i mehanička svojstva konstrukcijskih čelika.....	12
2.5.1. Toplo valjani konstrukcijski čelici.....	14
2.5.2. Kemijski sastav	14
2.5.3. Mehanička svojstva.....	15
3. METODE KARAKTERIZACIJE MATERIJALA	18
3.1. Analiza kemijskog sastava	18
3.1.1. Metode analize	18
3.1.2. Kvalitativna kemijska analiza	19
3.1.3. Kvantitativna kemijska analiza	19
3.2. Metalografija.....	19
3.2.1. Mikrografija	20
3.2.2. Makrografija	21
3.3. Mehanička ispitivanja	21
3.3.1. Statičko vlačno ispitivanje	22
3.3.2. Ispitivanje savijanjem	24
3.4. Dinamičko ispitivanje	24
3.4.1. Ispitivanje udarnog rada loma.....	24
3.4.2. Ispitivanje dinamičke izdržljivosti.....	26
3.5. Fraktografska ispitivanja.....	27
3.6. Analiza fraktografije	28
3.7. Vrste lomova.....	29
4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE	30
4.1. Plan eksperimentalnih ispitivanja	30
4.2. Izrezivanje ispitinih uzoraka	30
4.3. Mehanička ispitivanja	32
4.3.1. Statičko vlačno ispitivanje	32
4.3.2. Ispitivanje tvrdoće.....	36

Mjerenje tvrdoće metodom HV5 provodilo se na uređaju Indentec 5030TKV. Navedeni uređaj prikazan je na slici 21.	36
4.3.3. Ispitivanje udarnog rada loma.....	37
4.4. Kemijska i metalografska ispitivanja.....	40
4.4.1. Kemijska analiza.....	40
4.4.2. Metalografska analiza.....	41
4.5. Dinamička ispitivanja.....	44
4.6. Fraktografska analiza.....	45
4.7. Analiza rezultata ispitivanja.....	48
5. ZAKLJUČAK.....	52
LITERATURA.....	53

POPIS SLIKA

Slika 1.	Feritno-perlitna mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika [2].....	8
Slika 2.	Čelična konstrukcija [10]	9
Slika 3.	Spremnik za vodu napravljen od konstrukcijskog čelika [11]	10
Slika 4.	Čelični spremnik za plin [12]	10
Slika 5.	Čelični kostur automobila [13].....	11
Slika 6.	Čelik u brodogradnji [14]	11
Slika 7.	Dijagram naprezanje-istezanje za normalizirani konstrukcijski čelik [18]	22
Slika 8.	Epruveta okruglog presjeka [18]	23
Slika 9.	Charpy-jev bat [19]	25
Slika 10.	Postavljanje epruvete kod ispitivanja po Charpy-ju [20]	25
Slika 11.	Dio cijevi iz eksploatacije	30
Slika 12.	Primjer lokacije na cijevi za izuzeće ispitnih uzoraka	31
Slika 13.	Epruveta za ispitivanje žilavosti.....	31
Slika 14.	Epruveta za ispitivanje savijanja	32
Slika 15.	Epruveta za dinamičko ispitivanje	32
Slika 16.	Kidalica EU 40 MOD	33
Slika 17.	Epruveta prije ispitivanja.....	34
Slika 18.	Epruveta poslije ispitivanja	34
Slika 19.	Dijagram sila – izduženje za ispitivanje uzdužnog presjeka cijevi.....	34
Slika 20.	Dijagram sila – izduženje za ispitivanje poprečnog presjeka cijevi.....	35
Slika 21.	Tvrdomjer Indentec 5030TKV	36
Slika 22.	Mjerna skala Charpy bata.....	37
Slika 23.	Sustav za ohlađivanje ispitnih uzoraka	38
Slika 24.	Epruvete prije ispitivanja.....	38
Slika 25.	Epruvete poslagane redom od 1.1 do 1.6	39
Slika 26.	Uređaj LECO GDS 850A za optičku emisijsku spektrometriju (GDOS)	40
Slika 27.	Uređaj OLYMPUS GX51	41
Slika 28.	Mikrostruktura u smjeru valjanja	42
Slika 29.	Mikrostruktura poprečno na smjer valjanja.....	42
Slika 30.	Mikrostruktura u poliranom stanju.....	43
Slika 31.	Detalj nepravilnosti u materijalu	43
Slika 32.	Epruveta za dinamičko ispitivanje	44
Slika 33.	Prihvatni sustav za epruvetu na umaralici	44
Slika 34.	Digitalni zapis umaranja.....	45
Slika 35.	Skenirajući elektronski mikroskop Tescan Vega	46
Slika 36.	Analizirane nepravilnosti u materijalu	46
Slika 37.	Linijska analiza nepravilnosti.....	47
Slika 38.	Graf analize rezultata za SVI ispitivanje uzdužnog presjeka	48
Slika 39.	Graf analize rezultata za SVI ispitivanje poprečnog presjeka.....	48
Slika 40.	Analiza KV na temperaturi od -20°C	49
Slika 41.	Analiza KV na sobnoj temperaturi (23°C)	49
Slika 42.	Analiza vrijednosti HV5.....	50
Slika 43.	Mjerenje tvrdoće feritnog zrna	50
Slika 44.	Mjerenje tvrdoće perlitnog zrna	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Granični maseni udio legiranih elemenata u nelegiranim čelicima prema EN 10020 [2]	4
Tablica 2. Ostali elementi u čeliku osim ugljika [1]	7
Tablica 3. Analiza kemijskog sastava toplo valjanih čelika [15]	15
Tablica 4. Minimalna granica razvlačenja toplo valjanih čelika [15]	16
Tablica 5. Vlačna čvrstoća toplo valjanih čelika [15]	16
Tablica 6. Maksimalni CEV baziran na analizi toplo valjanog čelika [15]	17
Tablica 7. Minimalne vrijednosti udarne energije pri testnim temperaturama toplo valjanih čelika [15]	17
Tablica 8. Tablica rezultata za uzdužne uzorke	35
Tablica 9. Tablica rezultata za poprečne uzorke	35
Tablica 10. Rezultati ispitivanja tvrdoće	36
Tablica 11. Rezultati ispitivanja na -20°C	39
Tablica 12. Rezultati ispitivanja na 23°C	39
Tablica 13. Rezultati kemijskog ispitivanja	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
σ	N/mm ²	naprezanje
ε	mm/mm	istezanje
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
R_e	N/mm ²	granica razvlačenja
R_{eL}	N/mm ²	donja vrijednost granice razvlačenja
R_{eH}	N/mm ²	gornja vrijednost granice razvlačenja
R_k	N/mm ²	konačno naprezanje
E	N/mm ²	modul elastičnosti
A	%	istezljivost
d_0	mm	početni promjer epruvete
S_0	mm ²	početna površina presjeka epruvete
L_0	mm	početna mjerna duljina epruvete
L_c	mm	ispitna duljina epruvete
L_t	mm	ukupna duljina epruvete
C_e	%	ugljični ekvivalent
L	mm	duljina epruvete
a	mm	debljina epruvete
D	mm	promjer
ε_{ApI}	mm/mm	plastična deformacija
ε_{AeI}	mm/mm	elastična deformacija
N	/	broj ciklusa
N_g	/	granični broj ciklusa
R	/	koeficijent asimetrije
R_d	MPa	dinamička izdržljivost
KV	J	udarna energija
W	mm	poprečna dimenzija epruvete za žilavost
B	mm	poprečna dimenzija epruvete za žilavost
l	mm	duljina epruvete za žilavost
S_u	mm	poprečna površina epruvete poslije ispitivanja
L_u	mm	duljina epruvete poslije ispitivanja
$R_{p0,2}$	N/mm ²	konvencionalna granica razvlačenja
$R_{m,min}$	N/mm ²	minimalna vlačna čvrstoća
$R_{p0,2,min}$	N/mm ²	minimalna konvencionalna granica razvlačenja

SAŽETAK

Tijekom eksploatacije pojedinih konstrukcijskih dijelova može doći zbog eksploatacijskih uvjeta do pojave oštećenja materijala koji mogu uzrokovati havarije te konstrukcije. Stoga je bitno u određenim vremenskim periodima provoditi određene kontrole stanja materijala konstrukcije. U ovom radu je provedena analiza stanja materijala konstrukcijske cijevi koja je bila 20 godina u eksploataciji izložena morskim uvjetima. Cijev je, prema navodima proizvođača, proizvedena od konstrukcijskog čelika S355 koji je jedan od standardnih konstrukcijskih materijala. U teoretskom dijelu je dan opis konstrukcijskih čelika te metode karakterizacije materijala. U eksperimentalnom dijelu su provedena mehanička ispitivanja, kemijska i metalografska ispitivanja, dinamička ispitivanja te djelomično fraktrografska ispitivanja. Na temelju dobivenih rezultata su dani određeni zaključci.

Ključne riječi: konstrukcijski čelik S355, cijev, mehanička ispitivanja, metalografska ispitivanja

SUMMARY

During the exploitation of certain structural parts, due to the exploitation conditions, damage to the material can occur and result in breakdown of the structure. Therefore, it is important to carry out certain checks on the condition of construction materials in certain periods of time. In this paper, an analysis of the condition of construction pipe materials was performed, which was in operation for 20 years exposed to marine conditions. According to the manufacturer, the pipe is made of S355 structural steel, which is one of the standard construction materials. In the theoretical part, a description of structural steels and methods of material characterization are given. In the experimental part, mechanical tests, chemical and metallographic tests, dynamic tests and partially fractographic tests were performed. Based on the obtained results, certain conclusions are given.

Key words: structural steel S355, pipe, mechanical tests, metallographic tests

1. UVOD

Prilikom konstruiranja proizvoda bitan je izbor materijala. Karakterizacijom materijala utvrđuje se vrsta materijala te svojstva tog materijala. To definira kvalitetu proizvoda. Na osnovi svojstava materijala određuje se i njegova upotreba. Svojstva su posljedica kemijskog sastava i strukture pa ih dijelimo na mehanička, kemijska, fizička, optička, električna i toplinska. Osim što nam karakterizacija materijala omogućuje određivanje kvalitete materijala, omogućuje i praćenje procesa proizvodnje te istraživanje i razvoj novih materijala.

Konstruktivski čelici su čelici sa visokom granicom razvlačenja, dobrom plastičnom deformabilnošću, visokom granicom puzanja i čvrstoćom na povišenim temperaturama te dobrom žilavoti i dinamičkom izdržljivosti. Zbog takvih svojstava su najviše korišteni za nosive konstrukcije u visokogradnji, mostogradnji, brodogradnji, gradnji vozila, gradnji spremnika i slično.

Metode karakterizacije, odnosno ispitivanja materijala su: analiza kemijskog sastava, metalografija, mehanička ispitivanja i dinamička ispitivanja. Služe kako bi saznali više o strukturi i svojstvima materijala koji ispitujemo.

U ovom radu je obrađena karakterizacija, odnosno ispitivanje konstrukcijske cijevi iz eksploatacije koja je 20 godina bila izložena morskim uvjetima. Cijev je izrađena od konstrukcijskog čelika S355 koji je standardni konstrukcijski čelik za područje Europe.

2. ČELICI

Čelici su kovke slitine željeza s ugljikom (do 2,06%) i drugim elementima. Za legiranje može sadržaj ugljika biti i nešto veći od 2,06% pri većem sadržaju dodanih elemenata. Sve vrste čelika sadrže (iz procesa proizvodnje) još i manje količine Mn (Mangan), Si (Silicij), P (Fosfor) i S (Sumpor). Čelike koji sadrže Mn < 0,8% i Si < 0,6% još ne smatramo legiranim. Sadržaj P i S gotovo je uvijek nepoželjan. Čelik je najvažniji konstrukcijski i alatni materijal u strojarstvu, što proizlazi iz njegovih svojstava. Naime, radi se o dobroj kombinaciji sljedećih svojstava – čvrstoće, žilavosti, rezljivosti, spojivosti, oblikovljivosti deformiranjem, mogućnosti promjene sastava legiranjem, toplinskom obradom, obradom deformiranjem, a tu je i relativno niska cijena. [1]

2.1. Primjese i nemetalni uključci u čeliku

Primjese u čeliku mogu biti elementi pratioci, skriveni i slučajni elementi. Prateće primjese su prisutne u svakom čeliku i njihove udjele treba svesti na najmanju moguću mjeru. Pratioci i nečistoće su: Si, Mn, N, P, S te nemetalni uključci sulfidnog, oksidnog ili silikatnog tipa. Male količine Cu, Cr, Ni, As, Sn dolaze u čelik iz otpada i iz rude. [2]

Dušik (N) je uglavnom nepoželjna primjesa, a njegov je maseni udio oko 0,01 do 0,03 %. Dušik je element koji povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću, no jako smanjuje deformabilnost, kao i udarni rad loma. Pojavu starenja i to posebno kod hladno deformiranih čelika izaziva prisutnost dušika, rezultat je povišena čvrstoća i smanjena žilavost. Dodavanjem elemenata koji imaju veći afinitet prema dušiku od željeza (to su: Al, Ti, Nb i dr.), dušik se povlači iz čvrste otopine u nitride, pa čelik postaje otporan na starenje. [2]

Fosfor (P) je nepoželjna primjesa u čeliku, čiji maseni udio treba biti manji od 0,06 %. Ovo je element koji čini sa željezom supstitucijski kristal mješanac. Povećanje masenog udjela fosfora uzrokuje pojavu krhkosti u hladnom stanju. [2]

Kisik (O) je element čija prisutnost povisuje krhkost čelika. Dezoksidacijom čelika uklanja se veći dio kisika. [2]

Mangan (Mn) je prateći element, čiji je maseni udio oko 0,2 do 0,8 % i uglavnom potječe iz rude ili iz feromangana. Dobar je dezoksidans, a na sebe veže sumpor, tvoreći kemijski spoj MnS. [2]

Silicij (Si) je prateći element, čiji je maseni udio oko 0,2 do 0,5 % i potječe iz rude ili iz ferosilicija. [2]

Sumpor (S) je nepoželjna primjesa, a dolazi uglavnom iz rude, ili iz produkata izgaranja (SO₂). Dopušteni maseni udio sumpora je maksimalno 0,05 %. Sumpor sa željezom tvori FeS, koji je nepoželjan i u mikrostrukturi čelika se pojavljuje po granicama zrna. Međutim, ponekad viši maseni udio sumpora može imati i pozitivan utjecaj i to ako se radi o čelicima koji trebaju imati povišenu rezljivost. [2]

Vodik (H) je element koji sa željezom čini intersticijske mješance. Vodik uzrokuje pad žilavosti, makar čvrstoća ne raste, jer iz atomarnog stanja prelazi u molekularni u obliku sitnih mjehurića, a ta se pojava naziva „vodikova krhkost”. [2]

Svojstva oblikovljivosti i otpornosti na lom kod čelika određena su količinom, vrstom i rasporedom nemetalnih uključaka. Uključci mogu biti oksidni, sulfidni ili silikatni. Utvrđivanje prisutnosti uključaka je relativno teško, a uglavnom se mogu podijeliti na okrugle, poligonalne i izdužene. Pri djelovanju vanjskog opterećenja u njihovoj blizini dolazi do koncentracije naprezanja. Prisutnost uključaka smanjuje žilavost i dovodi do izrazite anizotropnosti svojstava čvrstoće i duktilnosti čelika. [2]

2.2. Legirni elementi u čeliku

Legirani čelik sadrži osim željeza i ugljika, jedan ili više legirnih elemenata, a legiranjem se mijenjaju svojstva čelika. Dakle, čelik se legira s određenom količinom nekog elementa, kako bi se dobilo traženo svojstvo, ili pak kombinacija svojstava, ali se neminovno legiranjem neka svojstva i pogoršavaju.

Legirni elementi u čeliku, promatrajući njihov afinitet prema ugljiku mogu biti:

- karbidotvorci (krom, molibden, niob, tantal, titan, vanadij i volfram) i

- nekarbidotvorci (mangan, nikal i kobalt).

Ako se promatra utjecaj legirnih elemenata na dijagram stanja željezo – ugljik, tada legirne elemente dijelimo na:

- gamagene elemente koji proširuju područje austenita (mangan, nikal, kobalt) i
- alfavagene elemente koji proširuju područje ferita (krom, molibden, vanadij, volfram).

U skladu s europskom normom, čelik je legiran ako sadrži jedan ili više elemenata, čiji maseni udio prelazi vrijednosti iz [Tablica 1].

Tablica 1. Granični maseni udio legirnih elemenata u nelegiranim čelicima prema EN 10020 [2]

Legirni element	Granični maseni udio, %	Legirni element	Granični maseni udio, %
Aluminij (Al)	0,10	Niobij (Nb)	0,05
Bakar (Cu)	0,40	Olovo (Pb)	0,40
Bizmut (Bi)	0,10	Selen (Se)	0,10
Bor (B)	0,0008	Silicij (Si)	0,50
Cirkonij (Zr)	0,05	Telur (Te)	0,10
Kobalt (Co)	0,10	Titan (Ti)	0,05
Krom (Cr)	0,30	Vanadij (V)	0,10
Mangan (Mn)	1,60	Volfram (W)	0,05
Molibden (Mo)	0,08	Rijetke zemlje – lantanidi	0,05
Niki (Ni)	0,30	Ostali elementi (osim C, P, S, N, O)	po 0,05

Gruba podjela čelika prema masenim udjelima legirnih elemenata je na:

- niskolegirane (s ukupnim udjelom legirnih elemenata do 5 %) i
- visokolegirane (s masenim udjelom barem jednog legirnog elementa više od 5 %).

Legirni elementi se u čelicima mogu pojaviti: rastvoreni u BCC rešetki (α – Fe) ili u FCC rešetki (γ – Fe); kao spojevi sa željezom ili međusobno (karbidi i intermetalni spojevi) i kao nemetalni uključci (oksidi, nitridi, sulfidi i fosfidi). [2]

Ugljik (C) zapravo „pripada” čeliku, pa se obično i ne smatra legirnim elementom, a za veći broj čelika je ugljik najvažniji element, koji utječe na svojstva čelika. Maseni udio ugljika u čeliku je do 2,03 %. Ugljik u nekaljenim čelicima povisuje čvrstoću i granicu razvlačenja, a snižava

duktilnost. U slučaju kaljenja čelika, ugljik u svim čelicima osigurava zakaljivost (visinu tvrdoće gašenja). [2]

Aluminij (Al) se najviše koristi kao element za dezoksidaciju u metalurškoj preradi čelika, a također je učinkovito sredstvo za denitriranje (stvara spoj AlN). Nadalje, aluminij povećava otpornost na koroziju pri povišenim i visokim temperaturama. [2]

Kobalt (Co) proširuje austenitno područje. Usporava rast zrna pri povišenim temperaturama, omogućava postojanost mikrostrukture, te povisuje čvrstoću pri povišenim temperaturama, pa se naročito koristi kod brzoreznih čelika. [2]

Krom (Cr) je jak karbidotvorac, a karbidi povisuju otpornost na pritisak i otpornost na abrazijsko trošenje. Krom povisuje prokaljivost čelika i snižava temperaturu početka stvaranja martenzita (M_s = martensite start). Krom proširuje područje ferita (pa je tzv. alfageni element). Legiranje kromom utječe na sklonost krhkosti popuštanja, koja se izbjegava legiranjem molibdenom. Također, krom u čeliku djeluje na smanjenje toplinske vodljivosti i toplinske rastezljivosti. [2]

Mangan (Mn) djeluje dezoksidirajuće, a također na sebe veže sumpor. Kod konstrukcijskih čelika povisuje granicu razvlačenja i povoljno djeluje na žilavost. Mangan znatno poboljšava prokaljivost čelika. Mangan proširuje austenitno područje (pa je to tzv. gamageni element), a čelici s više od 12 % mangana su austenitne mikrostrukture i pri normalnoj temperaturi. [2]

Molibden (Mo) se najčešće dodaje zajedno s drugim legirnim elementima. Ovaj element utječe na povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, te granice puzanja. Molibden povećava prokaljivost čelika, a sprječava pojavu krhkosti kod popuštanja. Uz prisutnost kroma, povećava otpornost na koroziju i to osobito na pitting koroziju. [2]

Nikal (Ni) je gamageni element, pa su austenitni nehrđajući čelici uobičajeno legirani s niklom. Nikal se tako najviše koristi kao legirni element kod čelika posebnih svojstava – nehrđajući i korozijski postojani, zatim čelici za rad pri povišenim i niskim temperaturama, vatrootporni čelici. Nikal povisuje žilavost konstrukcijskih čelika. Zbog ekonomskih razloga, odnosno visoke cijene, nikal se gotovo uvijek dodaje u kombinaciji s drugim legirnim elementima. [2]

Silicij (Si) je jak dezoksidator, povisuje čvrstoću i otpornost na trošenje, te granicu razvlačenja, pa je zbog toga koristan legirni element za čelike koji se koriste za izradu opruga. Silicij povisuje vatrootpornost i njime se zato legiraju vatrootporni čelici. Kod toplinske obrade, čelici legirani sa silicijem pokazuju sklonost razugljičenju površine, dok pri cementiranju silicij otežava difuziju ugljika u čelik. [2]

Titan (Ti) ima jaki afinitet prema kisiku, ugljiku, dušiku i sumporu. Titan je najjači karbidotvorac. [2]

Vanadij (V) je jak karbidotvorac i na taj način povisuje tvrdoću i otpornost na trošenje. Vanadij usitnjava primarno austenitno zрно. Potreban je u brzoreznim čelicima, alatnim čelicima za rad pri povišenim temperaturama, te u konstrukcijskim čelicima za trajni rad pri povišenim temperaturama. [2]

Volfram (W) je jak karbidotvorac, tvori vrlo tvrde i toplinski postojane karbide. Legiranje volframom omogućava povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće. Upravo zbog visoke otpornosti na trošenje svojih karbida, posebno je potreban legirajući element za brzorezne čelike. [2]

Ostali legirni elementi su: bakar (Cu), bor (B), niobij (Nb), tantal (Ta), olovo (Pb). [2]

Na svojstva čelika bitno utječe maseni udio ugljika, koji je osnovni i najutjecajni element čelicima. Porastom masenog udjela ugljika smanjuje se sposobnost čelika za plastičnu deformaciju i zavarljivost, a raste zakaljivost. Zato većina konstrukcijskih čelika sadrži oko 0,6 do 0,8 % ugljika. Na svojstva čelika također utječe maseni udio pratioča i nečistoća, te vrsta i udio legirnih elemenata, koji omogućavaju postizanje posebnih traženih svojstava. Temeljna svojstva čelika određena su također mikrostrukturom i stanjem, kao i oblikom i dimenzijama proizvoda. [2]

2.3. Podjela čelika

1. Prema postupku proizvodnje:

a) Obični čelici – dobivaju se većinom iz Siemens-Martinovih peći (SM čelici) ili iz konvertera (Bessemerovih ili Thomasovih). Obični čelici su nelegirani (ugljični) ili malo legirani, a upotrebljavamo ih redovno bez toplinske obrade.

b) Plemeniti čelici- dobivaju se rafinacijom ili rafinacijom i legiranjem u električnim pećima (elektročelici). Plemeniti se čelici redovno toplinski obrađuju.

2. Prema sadržaju:

a) Ugljični čelici – one vrste čelika u kojima odlučujući utjecaj na svojstva čelika ima ugljik, a drugih elemenata ima samo u količinama koje nemaju bitnog utjecaja, tj. [Tablica 2.]

Tablica 2. Ostali elementi u čeliku osim ugljika [1]

Mn < 0,8%	Cr < 0,2%	Co < 0,05%
Si < 0,6%	W < 0,1%	Ti < 0,05%
Ni < 0,3%	Mo < 0,05%	Al < 0,05%
Cu < 0,3%	V < 0,05%	

b) Legirani čelici – one vrste čelika u kojima odlučujući utjecaj na svojstva čelika imaju legirni elementi (tj. oni koji se namjerno dodaju da bi se postigla određena svojstva). Nisko legirani čelici imaju do 5% dodanih elemenata, a visoko legirani više od 5%.

3. Prema upotrebi:

a) Konstrukcijski čelici – ugljični čelici (obični ili plemeniti) sa sadržajem C < 0,6% ili legirani (uglavnom sa Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V itd.). Upotrebljavamo ih za izradu čeličnih konstrukcija, sastavnih dijelova strojeva, aparata i različitih uređaja.

Razlikujemo:

- Obične (ugljične ili malo legirane) čelike za opće svrhe (masovna upotreba)
- Plemenite (rafinirane) ugljične ili legirane čelike za dijelove s većim zahtjevima (dijelove strojeva itd.)

Alatni čelici – plemeniti ugljični čelici sa sadržajem C < 0,6% (< 2,06%) ili legirani (uglavnom sa Cr, W, V, Mo, Co itd.). Upotrebljavamo ih za izradu alata. [1]

2.4. Opći konstrukcijski čelici

Opći konstrukcijski čelici najviše se koriste i to za nosive konstrukcije u visokogradnji, mostogradnji, brodogradnji, gradnji vozila, gradnji spremnika i slično.

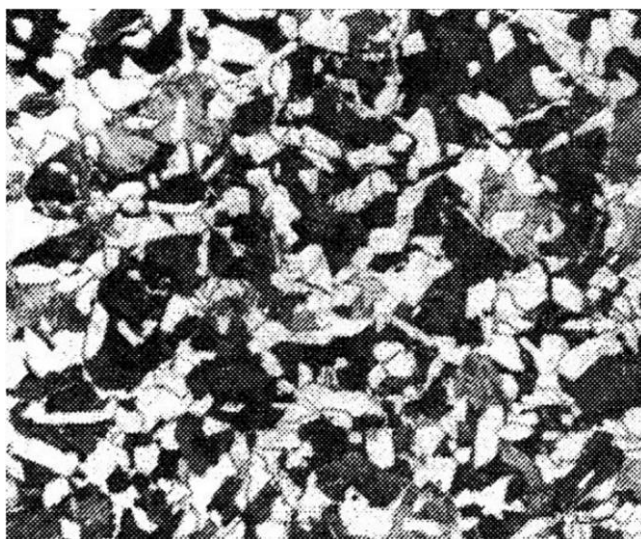
Mehanička svojstva koja se traže od ovih čelika su:

- visoka granica razvlačenja – elastičnosti (R_{eH});
- visoka čvrstoća (vlačna, tlačna, savojna)
- visoka žilavost – udarni rad loma pri 20 °C i što niža „prijelazna temperatura”.

Prijelazna temperatura je temperatura koja odvaja područje visokog udarnog rada loma od područja niskih vrijednosti.

Granica razvlačenja dijeli elastično područje od plastičnog. U području elastične deformacije materijal se ne deformira trajno, ali kod plastičnog područja deformacija je trajna. Modul elastičnosti, odnosno Youngov modul, E , u skladu s Hookeovim zakonom, je omjer naprezanja i deformacije, to jest tangens kuta (alfa), prikazanog u dijagramu. Potrebno je uzeti u obzir površinu poprečnog presjeka ispitnog uzorka kako bi iz sile dobili naprezanje, to jest čvrstoću.

Na [Slika 1] prikaz je mikrostrukture općeg konstrukcijskog čelika. Svjetliji dijelovi prikazuju ferit, dok tamniji perlit. [2]



Slika 1. Feritno-perlitna mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika [2]

Pokazatelj dobre zavarljivosti je što niža vrijednost ugljičnog ekvivalenta – C_e , koji se računa prema formuli:

$$C_e = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{10}$$

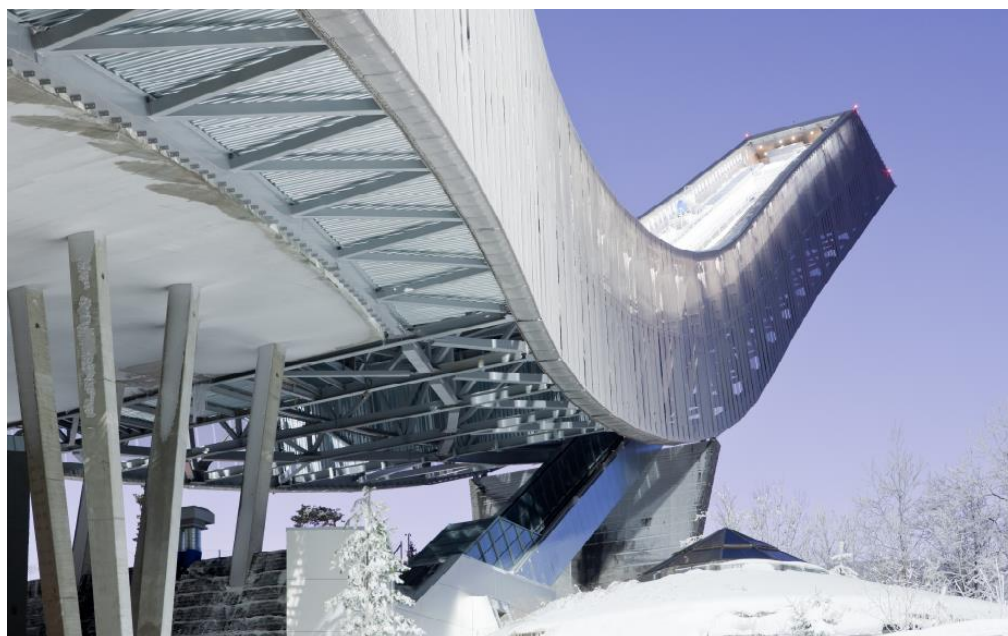
Što je niži stupanj legiranosti te što je niži postotak ugljika, zavarljivost je bolja. Kada dođe do većih iznosa ekvivalenta, potrebno je predgrijavanje materijala kod zavarivanja, pa samim time je kasnije sporije i ohladivanje. Iz tog razloga prihvatljiva je vrijednost $C_e < 0,4$.

Mehanička svojstva ovih čelika su zajamčena, dok je kemijski sastav nezajamčen; kemijski sastav ovih čelika nije propisan. Samim time nisu predviđeni za toplinsku obradu, no i zbog višeg masenog udjela nečistoća nego kod ostalih čelika. Temperature uporabe su normalne i snižene (od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Što je niza temperatura, veća je opasnost od krhkog loma.

Norme propisuju sljedeće karakteristike: orijentacijski kemijski sastav; mehanička svojstva (R_{eH} , R_m , A_5 , KV); tehnološka svojstva. [2]

2.4.1. Primjena konstrukcijskih čelika

Konstrukcijski čelici se primjenjuju kao: konstrukcije u građevinarstvu; spremnici tekućina i plinova; dijelovi vozila; kostur i oplata brodova.



Slika 2. Čelična konstrukcija [10]



Slika 3. Spremnik za vodu napravljen od konstrukcijskog čelika [11]



Slika 4. Čelični spremnik za plin [12]



Slika 5. Čelični kostur automobila [13]



Slika 6. Čelik u brodogradnji [14]

Konstruktivski čelik dolazi u mnogo oblika, ali se obično prodaje sa unaprijed definiranim poprečnim presjekom (ili profilom) dizajniranim za posebne potrebe. Na primjer uobičajeni oblici i profili su: I-profil, Z-profil, kvadratni i pravokutni profili, šuplji profil, L-profil, čelična ploča itd.. Ovisno o željenoj primjeni, inženjer će specificirati vrstu čelika (ovisno o zahtjevima za minimalnu čvrstoću, maksimalnu težinu i vremenske uvjete) i oblik presjeka s obzirom na željenu lokaciju i očekivano opterećenje koje će taj čelik morati izdržati. [3]

Konstruktivski čelici su najšire korišteni čelici zbog svoje dobre kvalitete i relativno niske cijene. Ta kombinacija ih čini korisnima u raznim sektorima. Svake godine se oko 25% konstruktivskih čelika koristi u izgradnji zgrada. Inženjeri strojarstva ga preferiraju kada grade strojeve koji nemaju mnogo posebnih potreba poput visoke izdržljivosti ili otpornosti na velika opterećenja. Ponekad je važna otpornost na trošenje materijala, uz održavanje male težine. To je, na primjer, slučaj sa opremom za šumarstvo i rudarstvo. Tada je preporučljivo koristiti čelike otporne na trošenje i visoke čvrstoće, kao što su Hardox i Strenx. [5]

Konstruktivski čelici zahtijevaju dodatni sloj zaštite od vremenskih prilika. Lako korodiraju, pa se obično koristi praškasto premazivanje bez obzira na okruženje. Za trajni premaz, metalnu površinu treba prethodno obraditi (kemijsko jetkanje ili fosfatiranje) i očistiti (pjeskarenje, pranje ili brisanje).

Drugi trajniji način zaštite konstruktivskih čelika od korozije je galvanizacija. Kvaliteta i primjenjivost premaza cinka ovisi o kemijskom sastavu čelika - postotak fosfora (P) i silicija (Si) je odlučujući faktor:

$Si + 2,5P < 0,05\%$ = kvaliteta prve klase

$0,05\% \leq Si + 2,5P \leq 0,15\%$ = loš rezultat

$0,15\% < Si + 2,5P < 0,25\%$ = kvaliteta druge klase

$0,25\% < Si + 2,5P$ = loš rezultat

U težim uvjetima umjesto njih se koriste nehrđajući čelici, najčešće AISI 304 ili AISI 316. [5]

2.5. Kemijska i mehanička svojstva konstruktivskih čelika

Konstruktivski čelik je standardni konstruktivski materijal, izrađen od specifičnih vrsta čelika i formiran u raznim oblicima i sekcijama po industrijskim standardima. Konstruktivski čelici imaju specifični kemijski sastav i mehanička svojstva za specifične aplikacije. [3]

U normi HRN EN 10025-1:2006 je opisano:

Oznaka: HRN EN 10025-1:2006

Naslov: Toplo valjani proizvodi od konstruktivskih čelika – 1. dio: Opći tehnički uvjeti isporuke (EN 10025-1:2004)

Područje primjene:

1.1 Ovaj dokument specificira zahtjeve za ravne i dugačke proizvode toplo valjanih konstrukcijskih čelika isključujući šuplje sekcije i cijevi. Prvi dio dokumenta specificira opće uvjete isporuke.

Specifični zahtjevi za konstrukcijske čelike su dani u sljedećim dijelovima:

2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za nelegirane čelike

3. dio: Tehnički uvjeti isporuke za normalizirane valjane zavarive sitnozrnate konstrukcijske čelike

4. dio: Tehnički uvjeti isporuke za toplo valjane zavarive sitnozrnate konstrukcijske čelike

5. dio: Tehnički uvjeti isporuke za konstrukcijske čelike sa poboljšanom otpornosti na atmosfersku koroziju

6. dio: Tehnički uvjeti isporuke za ravne proizvode od konstrukcijskih čelika sa visokom granicom razvlačenja u poboljšanom i kaljenom stanju

Čelici specificirani u ovom dokumentu su namjenjeni uporabi u zavarenim, zakovanim i vijcima pričvršćenim konstrukcijama.

1.2 Ovaj dokument se ne odnosi na premazane proizvode ili čelične proizvode namjenjene generalnim konstrukcijskim primjenama u skaldu sa standardima i standardima nacрта navedenim u Bibliografiji. [16]

Postoji puno primjera konstrukcijskih čelika po tom europskom standardu kao što su S195, S235, S275, S355, S420, S460 itd. U skaldu sa klasifikacijom po ECISS-u konstrukcijski čelici se moraju označiti korištenjem sljedećih simbola: "S"355"J2"K2"C"Z"W"JR"JO" gdje svaki od tih simbola označava:

S – da se radi o konstrukcijskom čeliku (structural steel)

355 – broj povezan sa minimalnom granicom razvlačenja (testiran na debljini od 16 mm)

J2 / K2 / JR / JO – žilavost metala u skladu sa Charpy metodom ispitivanja

W – čelik otporan na atmosfersku koroziju

Z- konstrukcijski čelik sa pojačanom čvrstoćom okomito na površinu

C – hladno oblikovani čelik

Ovisno o procesu proizvodnje, kemijskom sastavu i primjeni,

daljnja slova i razvrstavanja mogu se koristiti za označavanje posebnih konstrukcijskih čelika. [3]

2.5.1. Toplo valjani konstrukcijski čelici

Toplo valjanje je proces u kojem dođe do finalne deformacije pri određenoj temperaturi koja vodi do stanja materijala sa određenim svojstvima koji se ne mogu postići ili ponoviti samim zagrijavanjem materijala.

Sitnozrnati čelici su čelici fine strukture sa ekvivalentnim indeksom feritnih zrna veličine ≥ 6 određenim u skladu sa EN ISO 643

Svi čelici u dokumentu EN 10025-4:2004 su kalsificirani kao specijalni legirani čelici prema EN 10020

Dokument EN 10025-4:2004 specificira 4 razreda čelika: S275, S355, S420 i S460.

Svi razredi čelika mogu biti isporučeni u slijedećim kvalitetama, specificirani u vrijeme narudžbe:

- sa specificiranim minimalnim razinama udarne energije na temperaturama ne nižim od -20°C , označenim sa M
- sa specificiranim minimalnim razinama udarne energije na temperaturama ne nižim od -50°C , označenim sa ML

Proizvodnja čelika mora biti u skladu sa EN 10025-1. Ako je specificirana u vrijeme narudžbe, naručitelj treba biti obavješten.

Čelici trebaju imati sitnozrnatu strukturu sa dovoljnom količinom dušika.

Proizvodi trebaju biti isporučeni u toplo valjanom stanju.

Kemijski sastav određen analizom treba biti u skladu sa vrijednostima iz [Tablica 3]. Na specijalni zahtjev kupca proizvođač treba informirati kupca za vrijeme narudžbe koji od legiranih elemenata su primjereni za željeni razred čelika i koji će biti dodani.

Čelici specificirani u ovom dokumentu su prikladni za zavarivanje.

Opći zahtjevi za elektrolučno zavarivanje čelika specificiranih u ovom dokumentu su navedeni u EN 1011-2.

Ako je specificirano za vrijeme narudžbe, ploča ili traka debljine do 8 mm je primjerena za proizvodnju sekcija hladnim valjanjem. [15]

2.5.2. Kemijski sastav

Kemijski sastav konstrukcijskog čelika je izuzetno važan i strogo reguliran. To je temeljni faktor koji definira mehanička svojstva čeličnog materijala. U sljedećoj tablici

[Tablica 3] su prikazane maksimalne razine određenih reguliranih elemenata pristunih u europskim čelicima S235, S275 i S355.

Tablica 3. Analiza kemijskog sastava toplo valjanih čelika [15]

Razred	C% max.	Si% max.	Mn% max.	P% max.	S% max.	Nb% max.	V% max.
S275	0,15	0,5	1,5	0,035	0,025	0,05	0,08
S355	0,16	0,5	1,6	0,035	0,025	0,05	0,1
S420	0,18	0,5	1,7	0,035	0,025	0,05	0,12
S460	0,18	0,6	1,7	0,035	0,025	0,05	0,12
Razred	Altotal% min.	Ti% max.	Cr% max.	Ni% max.	Mo% max.	Cu% max.	N% max.
S275	0,02	0,05	0,3	0,3	0,1	0,55	0,015
S355	0,02	0,05	0,3	0,5	0,1	0,55	0,015
S420	0,02	0,05	0,3	0,8	0,2	0,55	0,025
S460	0,02	0,05	0,3	0,8	0,2	0,55	0,025

Kemijski sastav konstrukcijskog čelika jako je važan za inženjera i promijenit će se s određenim oznakama ovisno o namjerenj primjeni. Na primjer; S355K2W je konstrukcijski čelik koji je kaljen (K2) i napravljen s kemijskim sastavom kako bi bolje izdržao vremenske utjecaje (W). Zbog toga će ovaj čelik imati drugačiji kemijski sastava od običnog čelika S355. [3]

2.5.3. Mehanička svojstva

Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika su visoka granica razvlačenja (elastičnosti) povezana s dovoljnom plastičnom deformabilnošću, dovoljno visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama, dovoljna žilavost i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama i dovoljna dinamička izdržljivost. [2]

Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika temeljna su za njegovu klasifikaciju i primjenu. Iako je kemijski sastav jako bitan faktor za mehanička svojstva čelika, također je vrlo važno uzeti u obzir i druge faktore mehaničkih svojstava kao što su granica razvlačenja i vlačna čvrstoća. [3]

Granica razvlačenja konstrukcijskog čelika mjeri minimalnu silu potrebnu za stvaranje trajne deformacije u čeliku. Pravilnik o imenovanju koji se koristi u europskom standardu EN 10025 odnosi se na minimalnu granicu razvlačenja testiranu na određenoj vrsti čelika debljine 16 mm. [3]

Vlačna čvrstoća konstrukcijskog čelika odnosi se na točku u kojoj dolazi do trajne deformacije kada se materijal povuče ili razvuče po duljini. [3]

Tablica 4. Minimalna granica razvlačenja toplo valjanih čelika [15]

Razred	Minimalna granica razvlačenja R_{eH} [MPa], debljina u mm					
	≤ 16	$>16, \leq 40$	$>40, \leq 63$	$>63, \leq 80$	$>80, \leq 100$	$>100, \leq 120$
S275	275	265	255	245	245	240
S355	355	345	335	325	325	320
S420	420	400	390	380	370	365
S460	460	440	430	410	400	385

Tablica 5. Vlačna čvrstoća toplo valjanih čelika [15]

Razred	Vlačna čvrstoća R_m [MPa], debljina u mm				
	≤ 40	$>40, \leq 63$	$>63, \leq 80$	$>80, \leq 100$	$>100, \leq 120$
S275	370 - 530	360 - 520	350 - 510	350 - 510	350 - 510
S355	470 - 630	450 - 610	440 - 600	440 - 600	430 - 590
S420	520 - 680	500 - 660	480 - 640	470 - 640	460 - 620
S460	540 - 720	530 - 710	510 - 690	500 - 680	490 - 660

S355 je nelegirani konstrukcijski čelik europskog standarda (EN 10025-2), najčešće korišten poslije S235 u slučajevima gdje je potrebna veća čvrstoća. Ima dobru zavarljivost i obradivost.

S – konstrukcijski čelik (structural steel)

355 – minimalna granica razvlačenja testirana na modelu debljine 16 mm

Obično se varijacija S355 bira na temelju udarne čvrstoće na različitim temperaturama, jer čelik postaje krhkiji kada temperatura padne. Ako konstrukcija treba izdržati temperaturu od -20°C , bolje je i sigurnije odabrati S355J2.

Ako na kraju imena stoji slovo H, to znači da je čelik šuplji (H – hollow section).

S355 je dobio naziv po svojoj minimalnoj granici razvlačenja od 355 Mpa (N/mm²), međutim, granica razvlačenja je manja što je debljina veća od 16 mm, to vrijedi za ravne proizvode i šuplje profile.

Gustoća čelika S355 je 7850 kg/m³.

Tvrdoća čelika S355J2 varira od 146 HB do 187 HB (HB – Brinell Hardness)

Modul elastičnosti S355 varira od 190 do 210 Gpa. [4]

Tablica 6. Maksimalni CEV baziran na analizi toplo valjanog čelika [15]

Maksimalni CEV u % za nominalnu debljinu u mm				
≤16	>16, ≤40	>40, ≤63	>63, ≤120	>120, ≤150
0,34	0,34	0,35	0,38	0,38
0,39	0,39	0,4	0,45	0,45
0,43	0,45	0,46	0,47	0,47
0,45	0,46	0,47	0,48	0,48

Tablica 7. Minimalne vrijednosti udarne energije pri testnim temperaturama toplo valjanih čelika [15]

Razred	Minimalne vrijednosti udarne energije u J na testnoj temperaturi u °C						
	20	0	-10	-20	-30	-40	-50
S275	63	55	51	47	40	31	27
S355							
S420							
S460							

3. METODE KARAKTERIZACIJE MATERIJALA

3.1. Analiza kemijskog sastava

Kemijska analiza je skup operacija kojima se nekoj tvari određuje kemijski sastav i struktura tvari. Temelji se na provedbi klasičnih kemijskih reakcija ili na određivanju nekog fizikalno-kemijskog svojstva tvari pomoću instrumenata. Najvažniji koraci kemijske analize su postupak uzorkovanja i izbor metode. [7]

Kemijska analiza može biti kvalitativna i kvantitativna. Kvalitativnom analizom određuju se sastojci od kojih se sastoji neka tvar, a kvantitativnom analizom određuje se u kojoj se količini ili u kojem se međusobnom omjeru nalaze pojedini sastavni dijelovi u nekoj tvari. Kvalitativna i kvantitativna kemijska analiza usko su međusobno povezane, jer se bez poznavanja kvalitativnog sastava uzorka ne može provesti ispravna kvantitativna analiza. [7]

Ponekad se u analizi radi o ispitivanju neke određene, manje količine tvari. Tada se ne uzima uzorak za analizu, već se analizira čitava količina. Najčešće, međutim, treba analizirati neku sirovinu ili proizvod, koji se nalazi u velikim količinama na skladištu, u transportu itd. Od te velike količine tvari treba uzeti manji uzorak, koji se analizira. Na temelju rezultata analize procjenjuje se vrijednost čitave količine tvari. Uzorak mora biti srednji uzorak, tj. mora imati jednak kemijski sastav kao i čitava količina materijala. Takav se uzorak naziva reprezentativnim uzorkom. Budući da većina industrijskih ili rudarskih sirovina i produkata nisu homogene tvari, uzimanje ispravnog uzorka, reprezentativnog uzorka, složen je i odgovoran posao. Ponekad je uzimanje reprezentativnog uzorka najsloženija faza cijelog analitičkog procesa. S obzirom na agregatno stanje uzorci mogu biti kruti, tekući ili plinoviti, pa se i metode uzimanja reprezentativnih uzoraka u pojedinim agregatnim stanjima bitno razlikuju. [7]

Razgradnja uzorka. Prije analize uzorak se gotovo uvijek mora prevesti u oblik pogodan za analizu. To se postiže otapanjem ili nekom drugom razgradnjom, kao npr. taljenjem ili spaljivanjem uzorka. Analitičke se reakcije većinom zbivaju u otopinama. Destilirana voda je poželjno otapalo jer ne sadrži strane ione, koji bi mogli smetati u toku analize. [7]

3.1.1. Metode analize

Kemijska analiza završava konačnim određivanjem (proma tranjem ili mjerenjem) nekog svojstva

sustava koje je u direktnoj ili indirektnoj vezi s određivanom komponentom. Ranija kemijska obrada uzorka (otapanje, raščinjavanje, separacija) služi samo kao priprema sustava za konačno određivanje. Ako ta obrada nije potrebna, kemijska analiza sadrži samo određivanje, pa se pod analitičkim metodama često podrazumijevaju samo metode određivanja. [7]

3.1.2. Kvalitativna kemijska analiza

Kemijske metode kvalitativne analize sastoje se u primjeni određenih kemijskih reakcija, u kojima dolazi do primjetljivih pojava (promjene agregatnog stanja, boje i sl.) karakterističnih za ispitivanu komponentu (analit). U anorganskoj analizi obično se određuje elementarni sastav, a u kvalitativnoj analizi organske tvari nastoje se identificirati prisutni organski spojevi. S obzirom na ogromno mnoštvo najrazličitijih organskih spojeva izgrađenih od svega nekoliko elemenata, poznavanje elementarnog sastava ima samo ograničenu vrijednost. Na temelju rezultata raznih analitičkih postupaka pretpostavlja se najvjerojatniji spoj, kojem zatim treba potvrditi identitet. Radi toga se pripremaju jedan ili više poznatih derivata ispitivanog spoja (izoliranog iz uzorka) i određuju im se fizičke konstante poznate iz literaturnih podataka. Za potvrđivanje identiteta vrlo su prikladne i instrumentalne metode. [7]

3.1.3. Kvantitativna kemijska analiza

Pod kvantitativnom analizom, kemijskom i instrumentalnom, podrazumijeva se određivanje relativne količine pojedinih sastojaka uzorka. U kemijskoj kvantitativnoj analizi, koja se primjenjuje u ispitivanju anorganskih tvari, razlikuju se dvije velike grupe metoda: gravimetrija i titrimetrija.

Metode gravimetrije jesu one u kojima analiza završava vaganjem produkta reakcije, dok metode titrimetrije jesu kvantitativne analitičke metode, koje se temelje na određivanju količine reagensa potrebnog za potpunu reakciju s analitom. [7]

3.2. Metalografija

Metalografija je znanstvena disciplina koja se bavi proučavanjem strukture metala, točnije proučavanjem kristalita. Metalografija klasificira kristalite prema vrsti, obliku i veličini jer svojstva metala ovise upravo o navedena tri obilježja kristalita. O kemijskom sastavu i tehnološkoj

obradi kojoj je izradak bio podvrgnut ovise vrsta, oblik i veličina kristalita. Metalografija zapravo daje vezu između dijagrama slijevanja, građe metala i njihovih svojstava. Metalografska ispitivanja se mogu podijeliti na mikro i makro ispitivanja. [6]

3.2.1. Mikrografija

Mikroskopska ispitivanja se izvode pomoću svjetlosnih mikroskopa koji mogu postići velika povećanja. Iz tog razloga potrebno je pažljivo pripremiti uzorak na kojem će biti obavljena analiza mikrostrukture. Veličina metalografskih uzorka nije strogo propisana, a ovisi o veličini izratka čija se struktura ispituje. Uzorci malih dimenzija obično se zalijevaju plastičnim masama ili nekim mekanim metalima. Uzimanje uzoraka iz ispitivanog izratka najčešće se izvodi obradom odvajanjem čestica. [6]

Površina uzorka čija se mikrostruktura želi ispitati mora se brušenjem i poliranjem dovesti do zrcalnog sjaja. Brušenje se može izvoditi strojno na specijalnim brusilicama ili ručno pomoću brusnog papira. Ručno brušenje može biti suho i mokro, a započinje na najgrubljem papiru i završava s najfinijim. Prilikom prijelaza s jednog brusnog papira na drugi uzorak treba okrenuti za 90° i brusiti dok se ne uklone tragovi prethodnog brušenja. Nakon brušenja uzorci se poliraju na stroju kojem je rotirajući disk presvučen platnom. Izbor platna ovisi o vrsti materijala koji se ispituje. Sredstvo kojim se polira najčešće je glinica Al₂O₃ pomiješana s vodom. Postoje tri stupnja finoće glinice, a poliranje se započinje s prvim stupnjem i završava za trećim. Postupak je isti kao i kod brušenja. Kod tvrdih materijala poliranje se može izvesti i s dijamantnom pastom i petrolejem različite finoće, ali je to dosta skuplje. Nakon poliranja uzorci se ispiru u tekućoj vodi ili alkoholu te se suše u struji toplog zraka. Nagrizanjem poliranih površina različitim rastvorima određenih kiselina razvija se mikrostruktura. Sredstvo za nagrizanje nanosi se kapaljkom, a vrijeme nagrizanja ograničeno je pojavom mikrostrukture. [6]

Nakon nagrizanja uzorci se ispiru u alkoholu i suše te se razvijena mikrostruktura promatra na mikroskopu. Razvijena mikrostruktura se fotografira, a uzorci se spremaju u staklene posude tzv. eksikatora, u cilju zaštite od oštećenja i korozije. [6]

3.2.2. Makrografija

Ispitivanja makrostrukture izvodi se u cilju određivanja veličine i oblika kristalita, nastalih primarnom kristalizacijom ili nakon nekih tehnoloških postupaka obrade metala. U prvom redu tu se misli na praćenje promjena strukture za vrijeme i nakon postupaka obrade metala deformiranjem ili toplinske obrade. Značajna je primjena ovih ispitivanja i u tehnologiji zavarivanja jer se mogu promatrati strukturna stanja u zavarenim spojevima. Priprema uzoraka izvodi se slično kao i kod ispitivanja mikrostrukture, ali se ne zahtjeva visoka kvaliteta površine. Na ispitivanu površinu i nagrizanje granice zrna jače djeluje sredstvo za nagrizanje. Promatranje makrostrukture izvodi se prostim okom, povećalom ili mikroskopom s malim povećanjem. U tablici dan je pregled uobičajenih sredstava za makro nagrizanje. [6]

3.3. Mehanička ispitivanja

Opća podjela mehaničkih svojstava i uvjeta ispitivanja je sljedeća:

- a) prema načinu djelovanja opterećenja na: zatezanje, pritisak, savijanje, uvijanje, smicanje te kombinacije kao zatezanje i pritisak itd;
- b) prema brzini djelovanja opterećenja na: statičko i dinamičko.

Statička opterećenja na zatezanje, pritisak, savijanje, uvijanje i smicanje, obično su kratkotrajna (traju oko deset minuta), a neka od njih mogu biti i dugotrajna kod ispitivanja puzanja i relaksacije (mogu trajati od 45 do 100 000 sati).

Dinamička opterećenja mogu biti udarna (brzina udara Charpyjeva klina obično je 5,5 m/s) ili promjenljiva (s istosmjernim ciklusima na zatezanje ili pritisak i naizmjenična s kombinacijama zatezanje i pritisak). Dinamička promjenljiva opterećenja osim na zatezanje i pritisak, mogu biti još na savijanje i uvijanje;

- c) prema temperaturi ispitivanja: na sobnoj, na povišenoj i na sniženoj temperaturi.

Najčešće se vrše ispitivanja na sobnoj temperaturi (između 10 i 35 °C), zatim pod kontroliranim uvjetima na temperaturi 23±5 °C (npr. puzanje, relaksacija itd.), te na

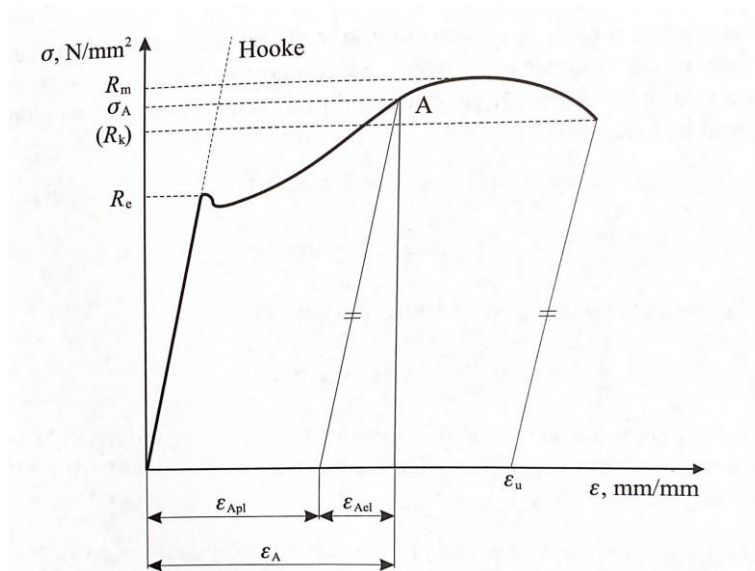
sniženoj temperaturi (npr. udarne radnje loma na -20°C) i na povišenoj temperaturi (npr. puzanje na temperaturama $+400$, $+500$, $+600^{\circ}\text{C}$ itd.);

- d) prema trajanju djelovanja opterećenja na: kratkotrajna i dugotrajna, kako je to već obrađeno pod b) [slika]. [8]

3.3.1. Statičko vlačno ispitivanje

Ispitivanje razvlačenjem ubraja se u najvažnija mehanička ispitivanja materijala, jer ono daje najviše važnih upotrebnih svojstava, kao što su: granica razvlačenja, zatezna čvrstoća, modul elastičnosti, izduženje (istezanje), suženje itd. [8]

Kod statičkih kratkotrajnih ispitivanja se ispitno tijelo, tzv. epruveta, izlaže u mašini za mehanička ispitivanja materijala postepenom porastu jednoosnog opterećenja sve do njezinog loma, odnosno kidanja. Pri tome mašina mora osigurati jednako prenošenje sile na epruvetu u uzdužnom pravcu uz istovremenu registraciju opterećenja na skali manometra s njihalom, kao i crtanje dijagrama na bubnju. [8]



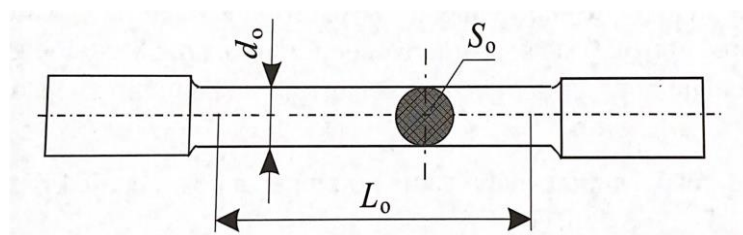
Slika 7. Dijagram naprezanje-istezanje za normalizirani konstrukcijski čelik [18]

Iz ovog dijagrama dobijamo:

- granicu razvlačenja (R_c) - to je ono naprezanje kod ojeg materijal počinje teći bez povećanja naprezanja

- plastična, odnosno trajna deformacija (ϵ_{Apl}) – do nje dolazi kada materijal pređe točku A i uđe u područje plastičnih deformacija, to je trajna deformacija koja ostaje prisutna u tijelu
- elastična deformacija (ϵ_{Ael}) – privremena ili povratna deformacija
- vlačna ili rastezna čvrstoća (R_m) – naprezanje kod maksimalne sile, nakon dostizanja vlačne čvrstoće deformacija epruvete više nije jednolika po čitavoj duljini već lokalizirana na jednom mjestu, nastaje takozvani vrat na epruveti
- konačno naprezanje (R_k) – naprezanje kod kojeg epruveta puca
- točka A – ako se u njoj rastereti epruvetu u njoj će ostati prisutna plastična deformacija
- konstanta E – Youngov modul ili modul elastičnosti koji predstavlja svojstvo materijala ovisno o jačini veze između atoma i molekula u kristalnoj rešetki ili amorfnoj strukturi [18]

Epruvete ili ispitni uzorci su uzorci propisanih oblika i dimenzija izrezani iz materijala koji treba ispitati. Najčešće su u obliku probnog štapa cilindričnog oblika kod kojeg su njego promjer i mjerna duljina u određenom razmjeru. [18]



Slika 8. Epruveta okruglog presjeka [18]

Veličine koje karakteriziraju dimenzije epruvete:

d_0 – početni promjer epruvete, mm

L_0 – početna mjerna duljina epruvete, mm

S_0 – početna površina presjeka epruvete, mm²

Pri ispitivanju zatezanjem izabrana se epruveta izlaže opterećenju zatezanjem sve do loma i utvrđuju se svojstva otpornosti i svojstva deformacije. [8]

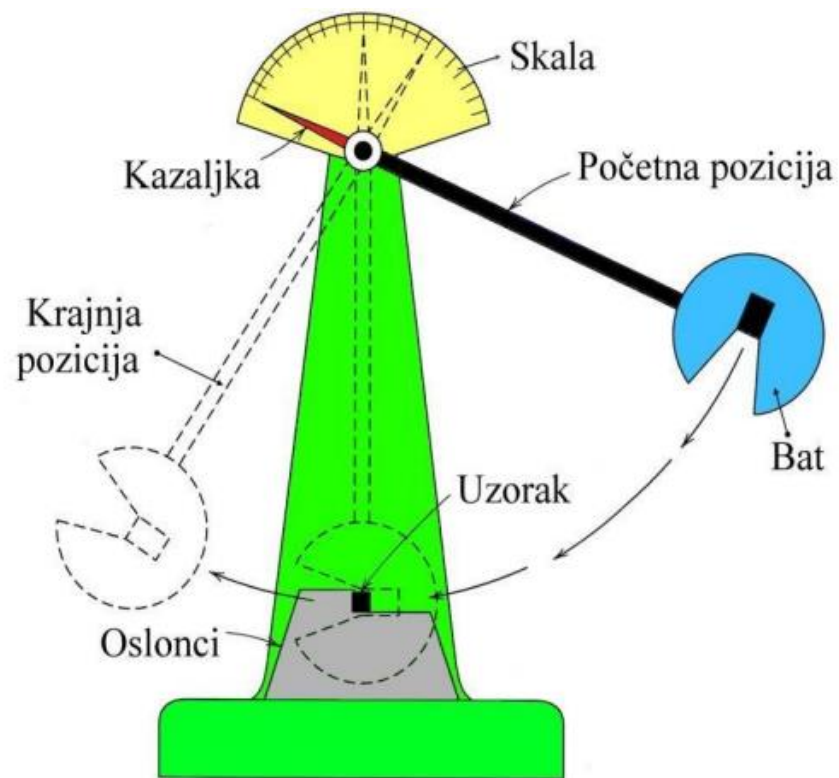
3.3.2. Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem radi određivanja savojne čvrstoće se slično ispitivanju pritiskom rijetko primjenjuje i to pretežito za krute metalne materijale, npr. za sivi liv. Najčešće se provodi opterećivanjem u tri točke (slika) pri čemu sila djeluje na polovici raspona između oslonaca epruvete. Kruti materijali se lome pri relativno malim kutovima savijanja, a pored sile se mjeri i deformacija preko veličine ugiba. [8]

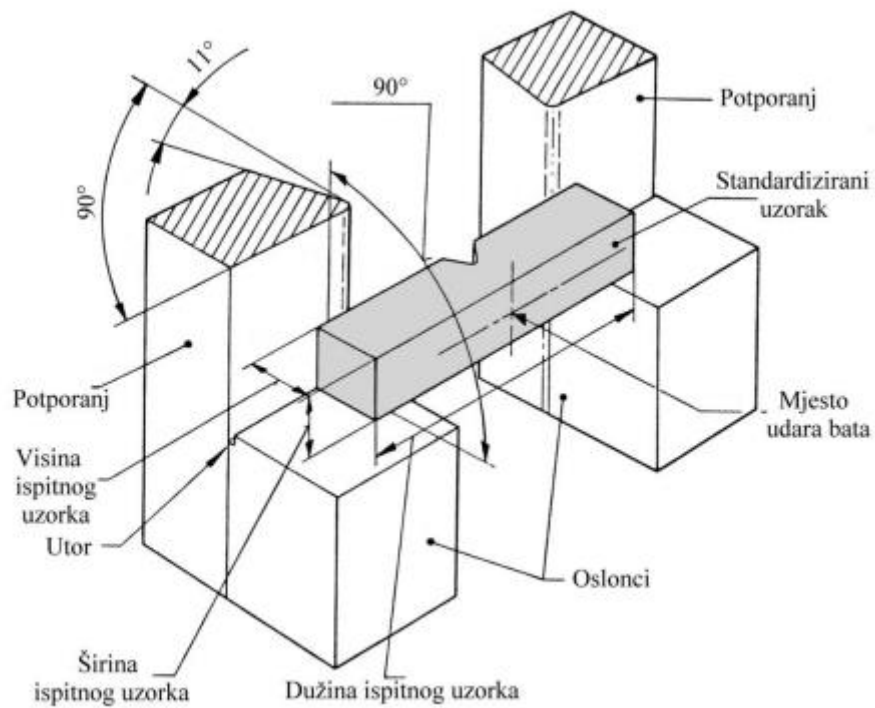
3.4. Dinamičko ispitivanje

3.4.1. Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma zarezane epruvete po Charpyju jedno je od najstarijih mehaničkih ispitivanja materijala u eksploatacijskim uvjetima, a služi za utvrđivanje njegove otpornosti prema krutom lomu. Na Charpyjevu njihalu ispituju se jednim udarcem s brzinom obično 5 do 5,5 m/s zarezane epruvete (s U-zarezom ili s V-zarezom). Rad (energija) utrošen za lom epruvete (u J) je mjera žilavosti materijala. Njezino određivanje je propisano u svim normama za prijem i isporuku materijala, a zahtijeva se i kod razvoja novih materijala, kod provjere kvalitete gotovih dijelova, te kod analiza loma uslijed raznih kvarova u praksi. [8]



Slika 9. Charpy-jev bat [19]



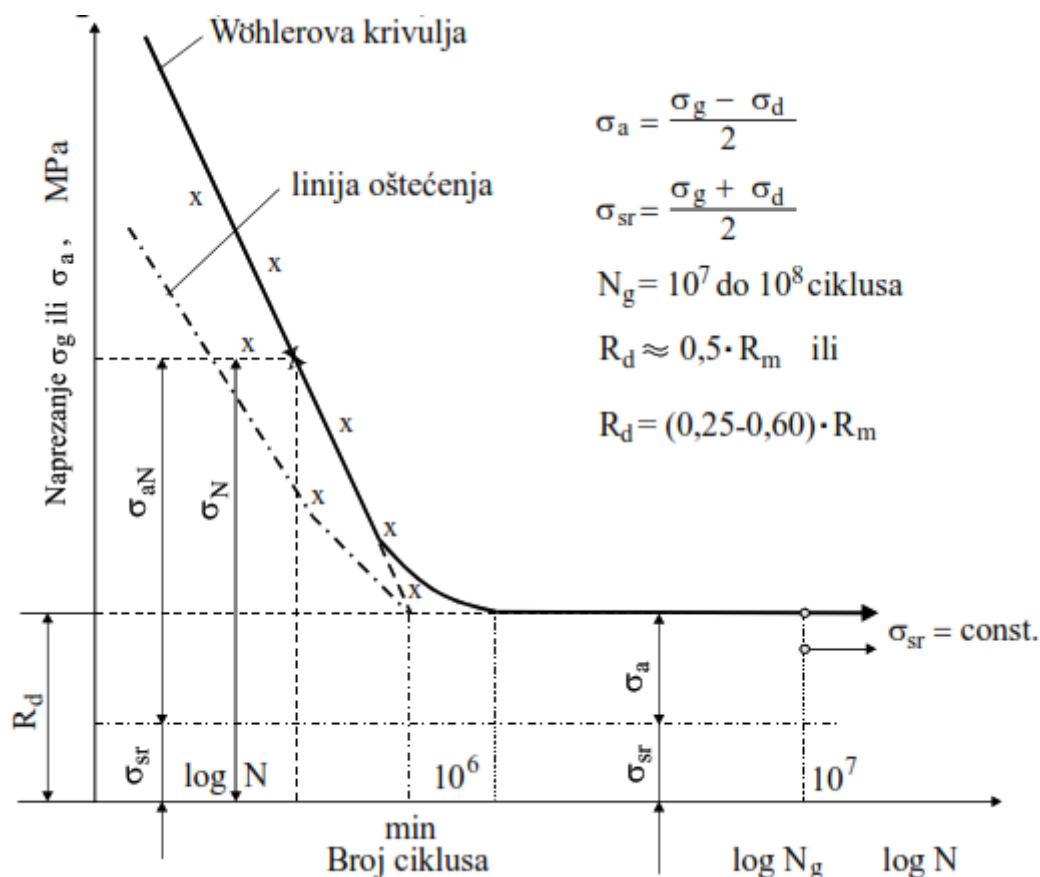
Slika 10. Postavljanje epruvete kod ispitivanja po Charpy-ju [20]

Epruveta se pri ispitivanju postavlja centrično na oslonac s razmakom od 40 mm, a njihalo slobodnim padom udara točno u njezinu sredinu sa suprotne strane od zareza i lomi je jednim udarcem. [8]

3.4.2. Ispitivanje dinamičke izdržljivosti

Pojava postepenog oštećivanja materijala uslijed dugotrajnog djelovanja periodičnih promjenljivih opterećenja odnosno naprezanja naziva se umor materijala. Umaralicama se najlakše proučava ponašanje materijala pri umaranju. Na serijama od desetak poliranih epruveta ili konstrukcijskih dijelova provodi se sinusna promjena amplituda naprezanja oko nepromjenljivog srednjeg naprezanja. Pri frekvencijama od 10 do 400 Hz ispituju se epruvete od metalnih materijala, a za granični broj ciklusa N_g najčešće se uzima 10 miliona ciklusa (raspon vrijednosti N_g kod visokocikličnog zamora je uglavnom između 2 do 100 miliona ciklusa). [8]

Ovisnost broja izdržanih ciklusa o primijenjivom naprezanju pri ispitivanju prikazuje krivulja koja se naziva Wöhler-ova ili $S-N$ krivulja (Stress-Number curve). Naprezanja mogu biti savojna, zatezno-pritisna i torzijska. Prema definiciji razlikuju se naizmjenična dinamička izdržljivost (R_{dis} s koeficijentom asimetrije ciklusa $R=-1$) i istosmjerna dinamička izdržljivost (R_{dis}). Kod zateznog ciklusa $R=0$, a kod pritisnog $R= \pm \infty$. Po definiciji, najveće primijenjeno naprezanje pod kojim ispitivana epruveta izdrži propisani ili beskonačan broj ciklusa bez pojave loma ili nekog drugog propisanog učinka naziva se dinamička izdržljivost ili dinamička čvrstoća. [8]

Slika 5.10. Wöhlerova krivulja (ovisnost σ - $\log N$) [8]

3.5. Fraktografska ispitivanja

Znanstvena disciplina koja se bavi ispitivanjem prijelomne površine kako bi se analizirao uzrok loma, a time objasnio i mogući uzrok havarije naziva se fraktografija. U užem smislu, obilježava promatranje oblika, položaja i hrapavosti lomne površine bilo golim okom ili povećalom. [9]

Bavi rastom pukotina i svojstvima loma metala, komponenata i inženjerskih konstrukcija te je djelomični je oblik analize kvarova. Analiza fraktografije može otkriti važne podatke o vrsti deformacije koja se događa i načinu neuspjeha, uključujući obrasce loma. Često se koristi kada se sumnja na koroziju ili zagađenje nekog materijala ili kada dođe do potpunog kvara. Najčešće se koriste svega različite metode za podjelu loma u jedan od četiri načina i pružaju povratne informacije o modelu loma. [9]

Dijeli se na:

- a) makrofraktografija, koja se bavi značajkama koje se mogu proučavati golim okom ili ručnim lećama, i
- b) mikrofraktografija, koja se bavi značajkama koje se mogu proučavati samo uz pomoć optičkih ili elektronskih mikroskopa

Mikrofraktografija je jako slična fraktografiji, ali uz uporabu transmisijskog ili skening elektronskog mikroskopa. Skening elektronski mikroskopi imaju veliku dubinsku oštrinu pogodnu za promatranje topografije površine prijeloma. Također, često su opremljeni i mikroanalizatorom koji omogućuje kvantitativnu kemijsku analizu površine prijeloma. [9]

3.6. Analiza fraktografije

Za određivanje načina na koji materijal propada koristi se analiza fraktografije. Kad se metalni materijali slome, stvaraju se površinska svojstva koja ukazuju na način u kojem nisu uspjeli. Umor, probijanje (puzanje), razvlačenje i cijepanje imaju svoje jedinstvene morfološke obrasce. Neki načini, poput loma jame, također mogu naznačiti je li pogreška smicanje, naprezanje ili uvijanje. [9]

Često je potrebno očistiti površinu prijeloma prije analize. Čišćenje se uvijek započinje s najmanje destruktivnim tehnikama. Značajke lomljene površine se mogu vizualizirati samo mikroskopijom jer su dovoljno male veličine za to. Mora se paziti da se dvije spojne površine ne sastave jer su značajke dovoljno tanke pa mogu oštetiti. Uzorak mora biti odgovarajuće veličine za mikroskopsku tehniku u kojoj se analizira jer se fraktografska analiza vrši mikroskopijom,. [9]

Analiza skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM) zahtijeva da uzorak bude dovoljno mali jer mora stati u komoru uređaja. Uzorak također mora biti vodljiv jer ako uzorak nije vodljiv, prska se tankim provodljivim slojem. [9]

3.7. Vrste lomova

Relativno lako utvrditi radi li se o trenutnom (nasilnom) lomu ili lomu od umora materijala jer je lomna površina karakterističnog izgleda. Makroskopski i mikroskopski lom može biti žilav ili krhak. Plastična deformacija je prisutna u blizini mjesta prijeloma kod makroskopski žilavog loma, dok je nema kod krhkog prijeloma. Uz to, prema obliku, lom može biti smični, razdvojni (ravninski) ili mješoviti (smično-razdvojni). [9]

4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

4.1. Plan eksperimentalnih ispitivanja

Za konstrukcijsku cijev koja je 20 godina bila u eksploataciji izložena morskim uvjetima predviđen je sljedeći plan ispitivanja:

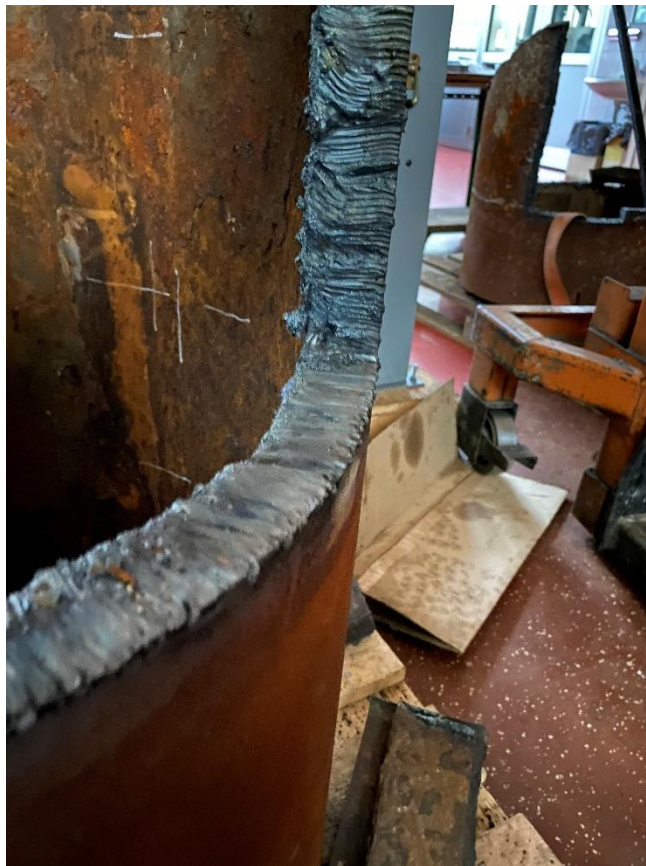
1. Izrezivanje ispitnih uzoraka za SVI, ispitivanje tvrdoće, ispitivanje udarnog rada loma, ispitivanje na savijanje, dinamička ispitivanja, metalografiju i određivanje kemijskog sastava.
2. Provedba mehaničkih ispitivanja
3. Kemijska i metalografska ispitivanja
4. Dinamička ispitivanja
5. Fraktografsko ispitivanje



Slika 11. Dio cijevi iz eksploatacije

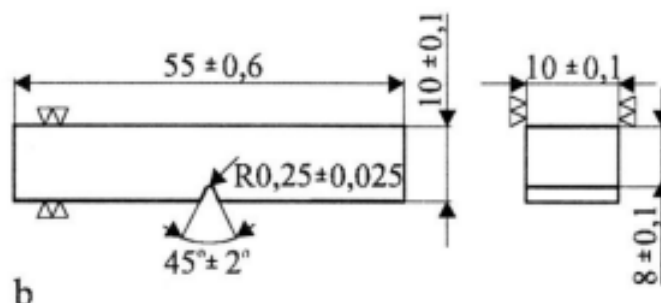
4.2. Izrezivanje ispitinih uzoraka

Uzorci se izrezuju plinskim rezanjem iz cijevi i pripremaju, odnosno izrezuju za ispitivanje. Plinsko rezanje je postupak tijekom kojeg materijal izgara u struji čistog kisika pri temperaturi nižoj od temperature taljenja.

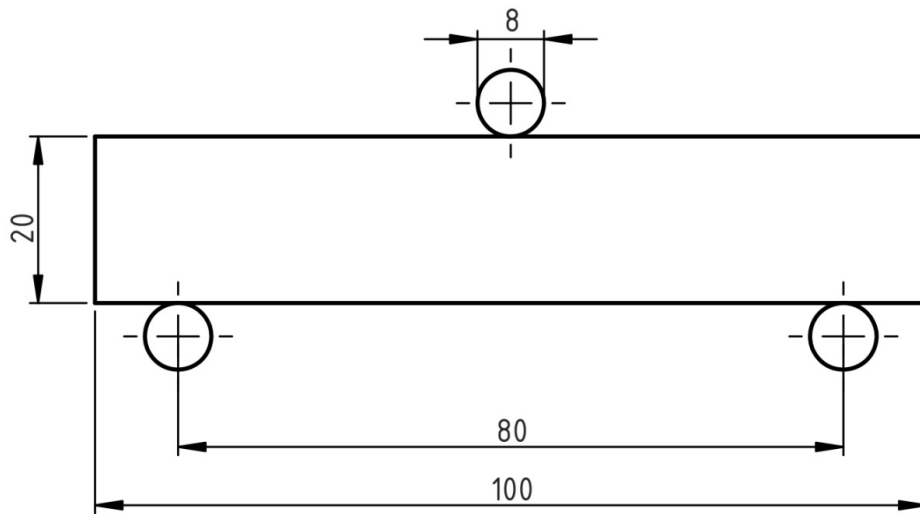


Slika 12. Primjer lokacije na cijevi za izuzeće ispitnih uzoraka

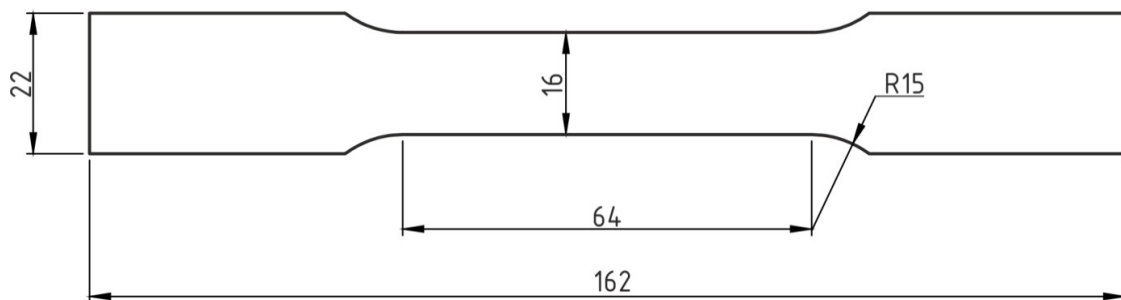
Uzorci se izrezuju na tračnoj pili uz konstantno hlađenje kako bi se izbjegao utjecaj temperature na mikrostrukturu. Na slikama 13, 14 i 15 su prikazani ispitni uzorci za provedbu ispitivanja mehaničkih svojstava (udarnog rada loma, savojne čvrstoće i granica razvlačenja).



Slika 13. Epruveta za ispitivanje žilavosti



Slika 14. Epruveta za ispitivanje savijanja



Slika 15. Epruveta za dinamičko ispitivanje

4.3. Mehanička ispitivanja

4.3.1. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na univerzalnoj kidalici u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Tijekom ispitivanja rezultati su grafički zabilježeni pomoću računala putem TIRAtest programskog paketa. Na slici 16 je prikazana kidalica EU mod.



Slika 16. Kidalica EU 40 MOD

Podaci o kidalici su sljedeći:

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

Ispitali smo uzorke izrezane iz uzdužnog i poprečnog presjeka cijevi. Uzorci su ispitani sukladno normi HRN EN ISO 6892-1:2019, a prikazani su na slikama 17 i 18.

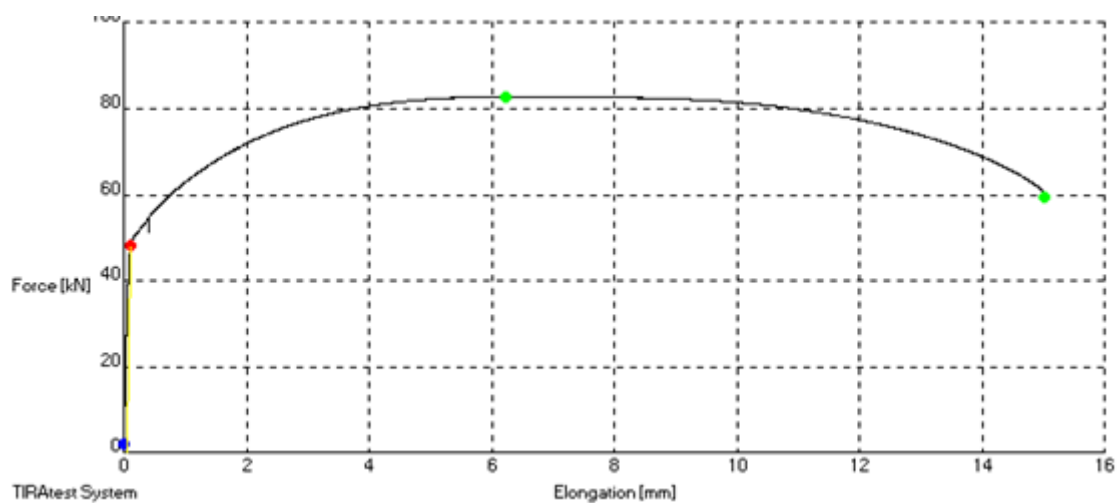


Slika 17. Epruveta prije ispitivanja



Slika 18. Epruveta poslije ispitivanja

Rezultati ispitivanja za epruvete koje su uzete u smjeru valjanja su prikazani u tablici 8, a na slici 19 je dan dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1.

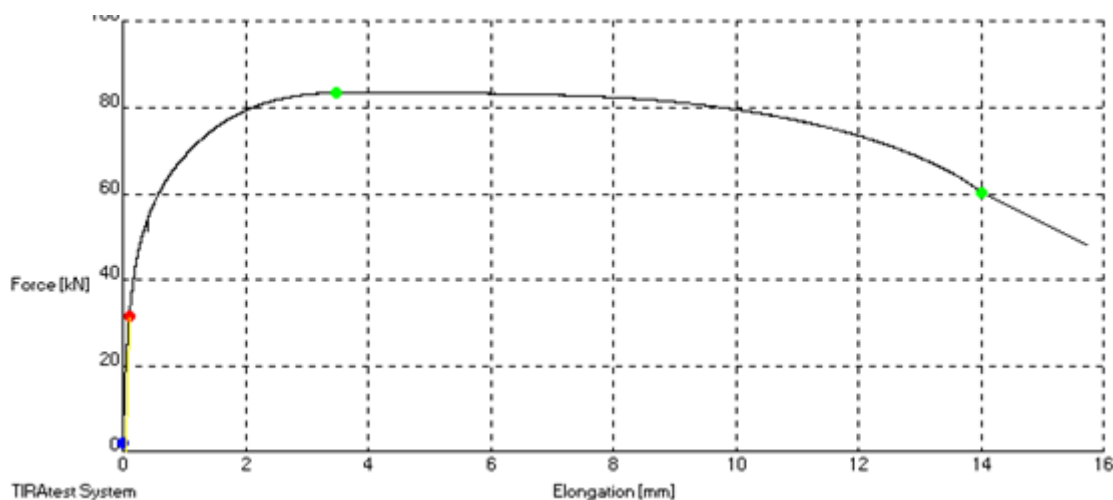


Slika 19. Dijagram sila – izduženje za ispitivanje uzdužnog presjeka cijevi

Tablica 8. Tablica rezultata za uzdužne uzorke

	Veličina	a_0	b_0	S_0	L_0	F_m	S_u	L_U	R_m	$R_{p0.2}$	A	Z
R.br.	Oznaka uzorka	mm	mm	mm ²	mm	kN	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	%
1	1	6,99	22,09	154,409	70,00	82,71	61,37	89,67	535,7	310,34	28,10	60,25
2	2	6,99	22,09	154,409	70,00	85,36	55,65	89,53	552,8	338,72	27,90	63,96
3	3	7,01	22,12	155,061	70,00	83,34	54,25	91,13	537,5	266,17	30,19	65,01
4	4	7,00	22,12	154,840	70,00	85,79	49,44	89,62	554,1	308,88	28,03	68,07
5	5	7,02	22,02	154,58	70,00	85,3	50,72	90,20	551,5	282,16	28,86	67,19
Aritmetičke sredine									546,30	301,3	28,6	64,9

Rezultati ispitivanja za epruvete koje su uzete okomito na smjer valjanja su prikazani u tablici 9, a na slici 20 je dan dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1.



Slika 20. Dijagram sila – izduženje za ispitivanje poprečnog presjeka cijevi

Tablica 9. Tablica rezultata za poprečne uzorke

	Veličina	a_0	b_0	S_0	L_0	F_m	S_u	L_U	R_m	$R_{p0.2}$	A	Z
R.br.	Oznaka	mm	mm	mm ²	mm	kN	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	%
1	1	6,99	22,05	154,130	70,00	83,56	61,56	92,86	542,1	218,09	32,66	60,06
2	2	6,99	22,19	155,108	70,00	83,38	55,97	91,24	537,6	201,21	30,34	63,92
3	3	7,01	22,12	155,061	70,00	83,34	54,25	91,13	537,5	266,17	30,19	65,01
4	4	7,00	22,12	154,84	70,00	85,8	49,44	89,62	554,1	308,88	28,03	68,07
5	5	7,02	22,02	154,58	70,00	85,3	50,72	90,20	551,5	282,16	28,86	67,19
Aritmetičke sredine									544,56	255,30	30,02	64,85

U tablicama 8 i 9 je prikazana i obrada rezultata statičnog vlačnog ispitivanja.

4.3.2. Ispitivanje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće metodom HV5 provodilo se na uređaju Indentec 5030TKV. Navedeni uređaj prikazan je na slici 21.



Slika 21. Tvrdomjer Indentec 5030TKV

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7	8
Tvrdoća, HV5	172,2	176	166,3	165,4	169,1	171,9	168,5	170,4
Srednja vrijednost tvrdoće	169,98							
Standardna devijacija tvrdoće	3,43							

4.3.3. Ispitivanje udarnog rada loma

Provodi se kako bi se utvrdilo ponašanje materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Pokazatelj nam je žilavosti ili krhkosti materijala epruveta s utorom koje su izložene udarnom opterećenju.



Slika 22. Mjerna skala Charpy bata

Na [Slika 22] prikazana je mjerna skala Charpyjevog bata na kojoj očitavamo vrijednosti udarnog rada loma mjernog područja do 300 J.

Ovim ispitivanjem smo ispitivali epruvete na temperaturama od 23°C i -20°C. Epruvete ispitane na temperaturi od -20°C smo ohladili pomoću suhog leda u uređaju za hlađenje. Temperaturu smo regulirali pomoću etanola, a mjerili putem termomjera. Kada je temperatura dostigla -25°C smo ih pripremili za ispitivanje gdje im se temperatura povećala na -20°C u razdoblju od vađenja iz uređaja do postavljanja u položaj za ispitivanje.

Na slikama 23 i 24 su prikazani sustav za ohlađivanje ispitnih uzoraka te pripremljeni ispitni uzorci za ispitivanje udarnog rada loma.

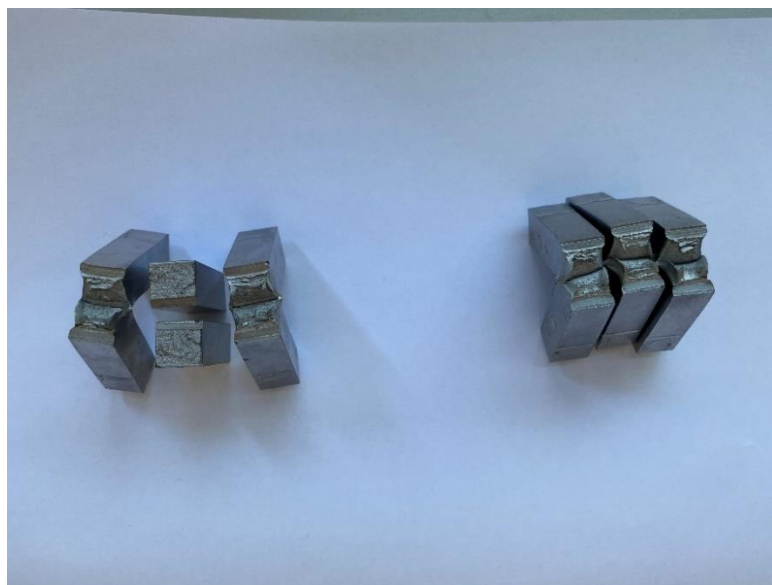


Slika 23. Sustav za ohlađivanje ispitnih uzoraka



Slika 24. Epruvete prije ispitivanja

Epruvete 1.1, 1.2 i 1.3 su ispitane na -20°C , a epruvete 1.4, 1.5 i 1.6 na 23°C i polomljeni uzorci su prikazani na slici 25. A rezultati ispitivanja su prikazani u tablicama 11 i 12.



Slika 25. Epruvete poslagane redom od 1.1 do 1.6

Tablica 11. Rezultati ispitivanja na -20°C

	Veličina	<i>W</i>	<i>B</i>	<i>l</i>	<i>Utor</i>	<i>Utor</i>	Temp	KV/U
R.br.	Oznaka	mm	mm	mm	mm	V ili U	$^{\circ}\text{C}$	J
1	1.1.	9,99	9,99	55,00	2,00	V	-20,00	157
2	1.2.	9,99	9,99	55,00	2,00	V	-20,00	15
3	1.3.	9,98	10,00	55,00	2,00	V	-20,00	162
					Aritmetička sredine			111,3
					Standardna devijacija			83,5
					Ponovljivost, %			132,0

Tablica 12. Rezultati ispitivanja na 23°C

	Veličina	<i>B</i>	<i>W</i>	<i>l</i>	<i>Utor</i>	<i>Utor</i>	Temp	KV
R.br.	Oznaka	mm	mm	mm	mm	V ili U	$^{\circ}\text{C}$	J
1	1.4.	9,99	10,00	55,00	2,00	V	23,00	220
2	1.5.	10,00	10,00	55,00	2,00	V	23,00	228
3	1.6.	9,99	9,99	55,00	2,00	V	23,00	224
					Aritmetička sredine			224
					Standardna devijacija			4
					Ponovljivost, %			4

4.4. Kemijska i metalografska ispitivanja

4.4.1. Kemijska analiza

Kemijska analiza u svrhu određivanja kemijskog sastava provodi se na uređaju Leco (Glow Discharge Atomic Emission Spectrometar) GDS 850 [Slika 26]. Ovim uređajem se materijal jednoliko odvaja snopom iona argona od površine uzorka. Zatim se taj odvojeni materijal atomizira „uzbuđuje“ u niskotlačnom pražnjenju plazme, udaljeno od površine uzorka. Ima ospeg spektra od 120 do 800 nm.



Slika 26. Uređaj LECO GDS 850A za optičku emisijsku spektrometriju (GDOS)

U Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje napravljena je kvantitativna kemijska analiza uzorka.

Metoda određivanja je optička emisijska spektrometrija, a mjerni uređaj je optički emisijski spektrometar GDS 850 A, LECO. [Slika 26]

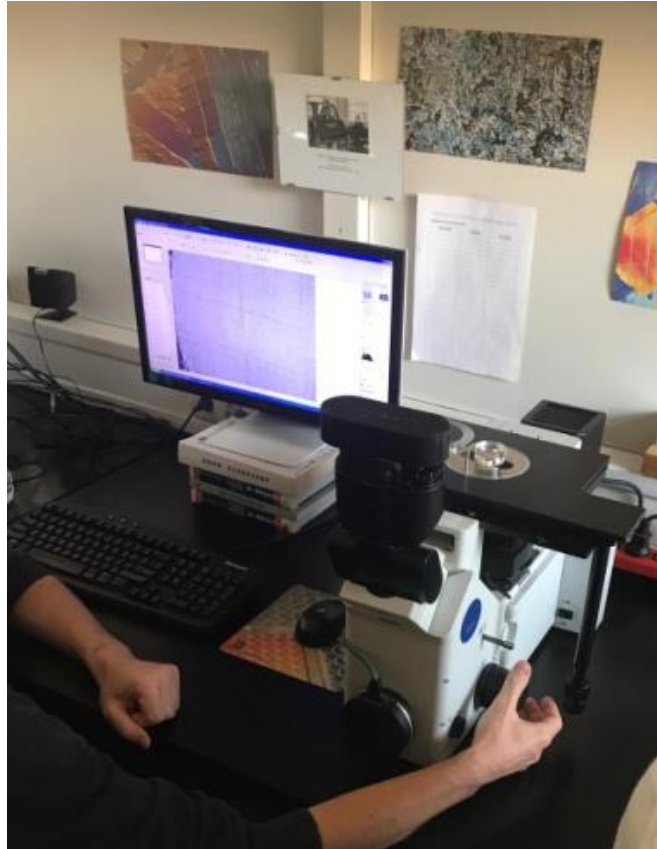
Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 13.

Tablica 13. Rezultati kemijskog ispitivanja

Oznaka uzorka	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
NU [%]	0,18	0,17	1,03	0,012	0,007	0,06	0,004	0,03	0,07	ostatak

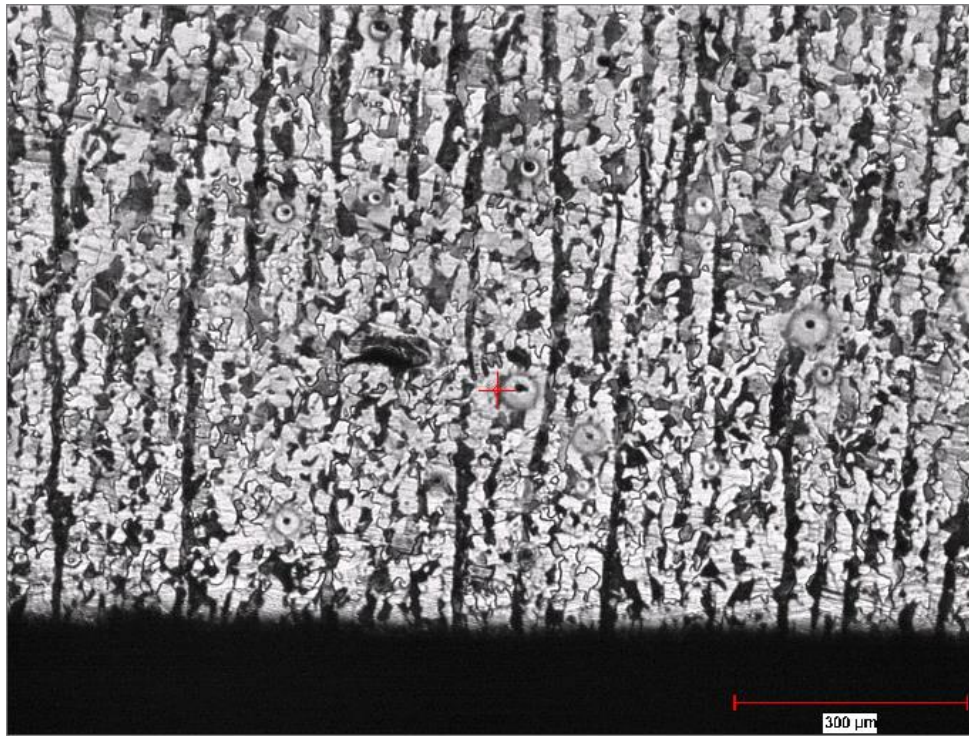
4.4.2. Metalografska analiza

Analiza mikrostrukture provedena je u poliranom i nagriženom stanju na uređaju OLYMPUS GX51. Prikaz uređaja dan je na [Slika 27].



Slika 27. Uređaj OLYMPUS GX51

Na [Slika 28] je prikazana mikrostruktura uzoraka u uzdužnom smjeru cijevi, a na [Slika 29] u okomitom smjeru. Iz ovih slika je jasno da se radi o usmjerenoj strukturi što je rezultat postupka izrade valjanjem.

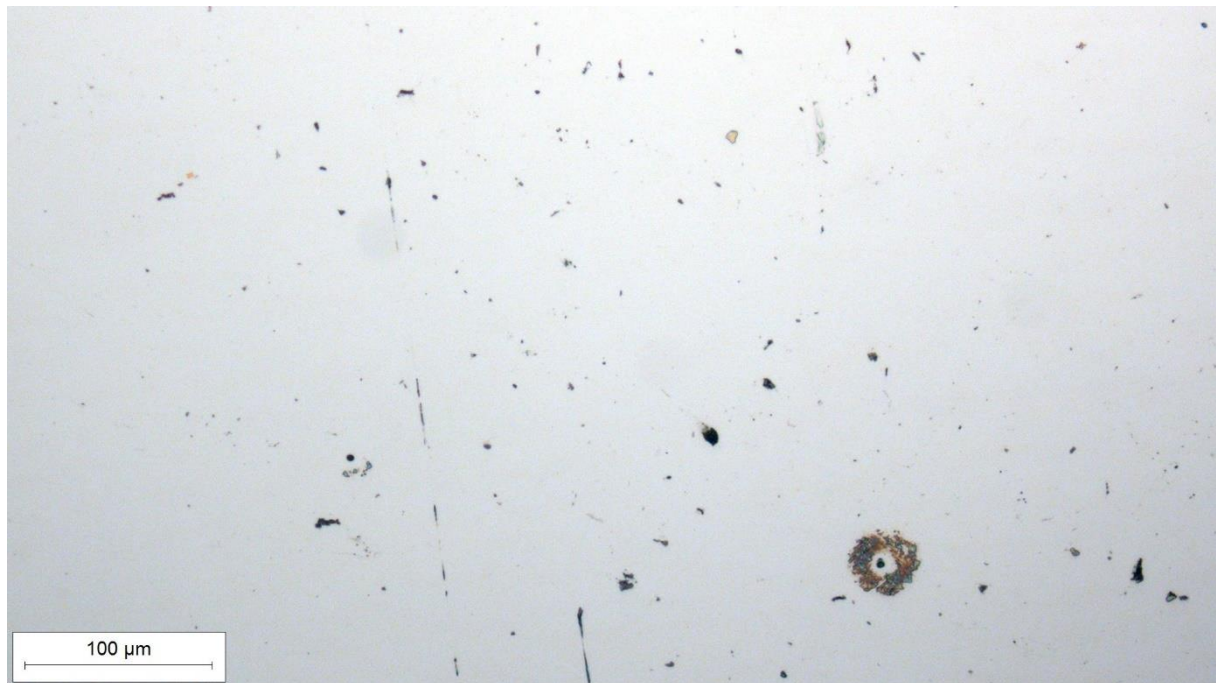


Slika 28. Mikrostruktura u smjeru valjanja



Slika 29. Mikrostruktura poprečno na smjer valjanja

Na slici 30 je prikazana polirana površina materijala na kojoj se mogu primjetiti nepravilnosti u materijalu, a na slici 31 je prikazana veličina jedne od nepravilnosti.



Slika 30. Mikrostruktura u poliranom stanju



Slika 31. Detalj nepravilnosti u materijalu

4.5. Dinamička ispitivanja

Dinamičko ispitivanje je provedeno na pulzatoru. Epruveta se optereti naizmjeničnim opterećenjem od 0 do 16 kN. Na slici 32 je prikazana jedna epruveta za dinamičko ispitivanje.

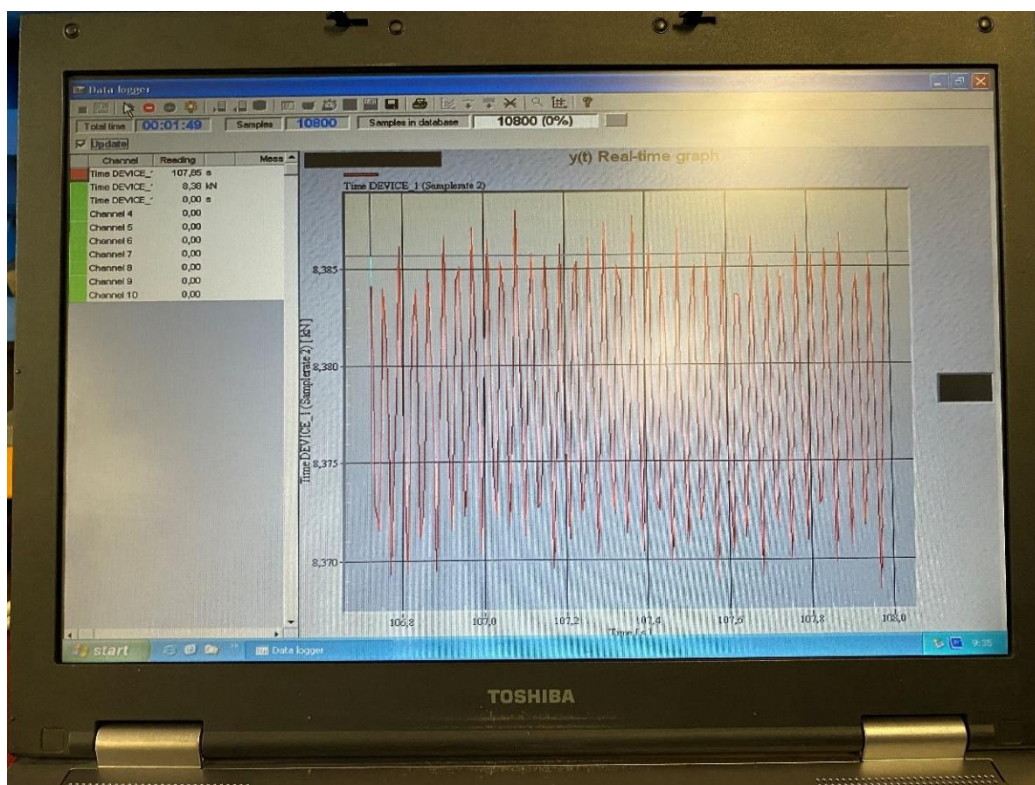


Slika 32. Epruveta za dinamičko ispitivanje

Na slici 33 je prikazan prihvatni sustav za epruvetu na umaralici, a na slici 34 digitalni zapis sinusoidalnog vlačnog karaktera opterećenja.



Slika 33. Prihvatni sustav za epruvetu na umaralici



Slika 34. Digitalni zapis umaranja

Zbog dugotrajnosti ispitivanja umaranjem za potrebe rada provedeno je ispitivanje samo na jednoj epruveti. Donja granica naprezanja je bila 1 N/mm^2 , a gornja vrijednost naprezanja je bila 330 N/mm^2 . Epruveta je izdržala 10^7 ciklusa.

4.6. Fraktografska analiza

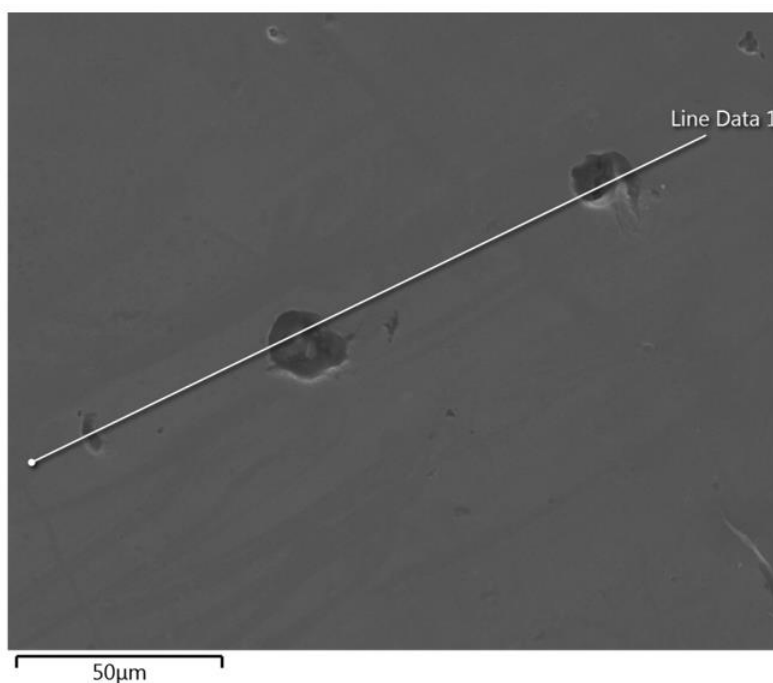
SEM (skenirajući elektronski mikroskop) je uređaj kojim se dobiva uvid u mikrostrukturu promatranog uzorka pomoću uskog snopa elektrona, uz veliko povećanje. Radi na principu da visoko energični snop elektrona skenira po uzorku i izaziva reakcije s atomima na površini koju skenira. U komori mikoskopa su detektori koji hvataju te elektrone i formiraju virtualnu sliku koja pokazuje topografiju površine ili elementne kontraste.

Ispitivanja su provedena na skenirajućem elektronskom mikroskopu u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje - Zagreb, model Tescan Vega 5136, zemlja proizvodnje Češka.



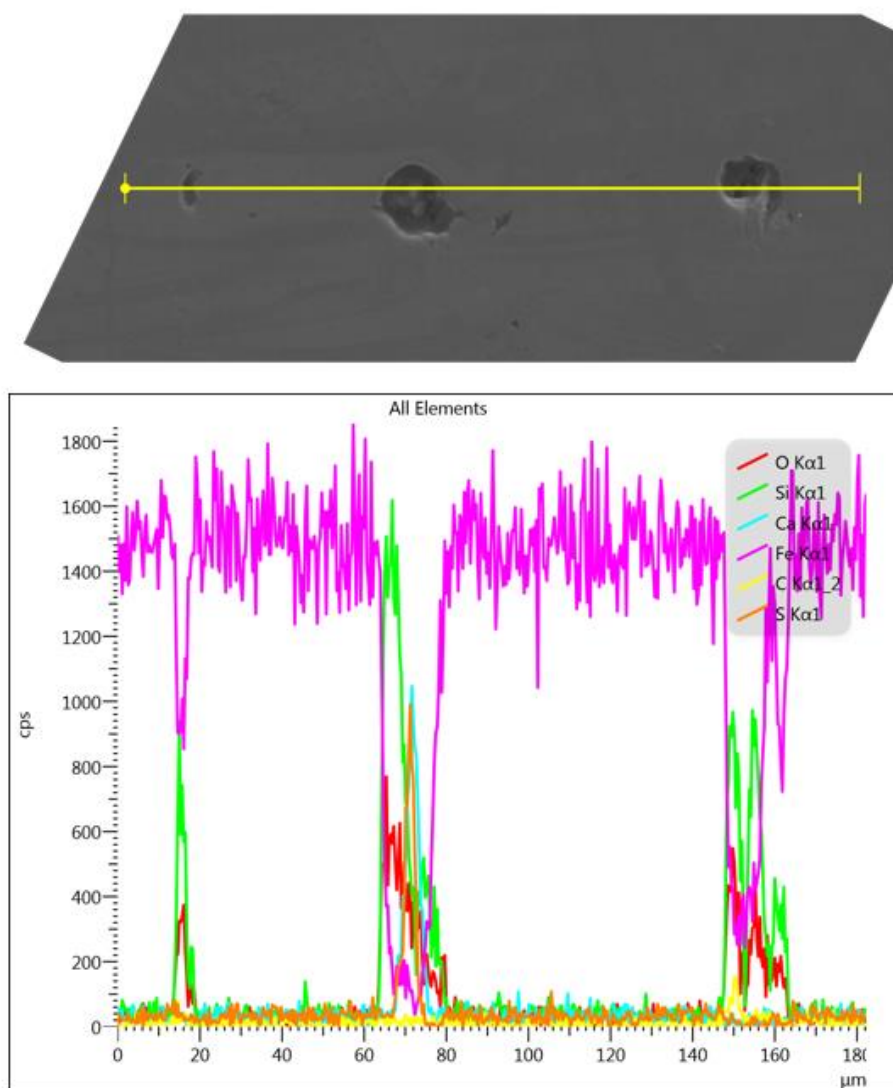
Slika 35. Skenirajući elektronski mikroskop Tescan Vega

Na [Slika 36] je prikazana nepravilnost u materijalu koja je analizirana na skenirajućem elektronskom mikroskopu.



Slika 36. Analizirane nepravilnosti u materijalu

Na slici 37 su prikazani rezultati linijske analize nepravilnosti u materijalu.

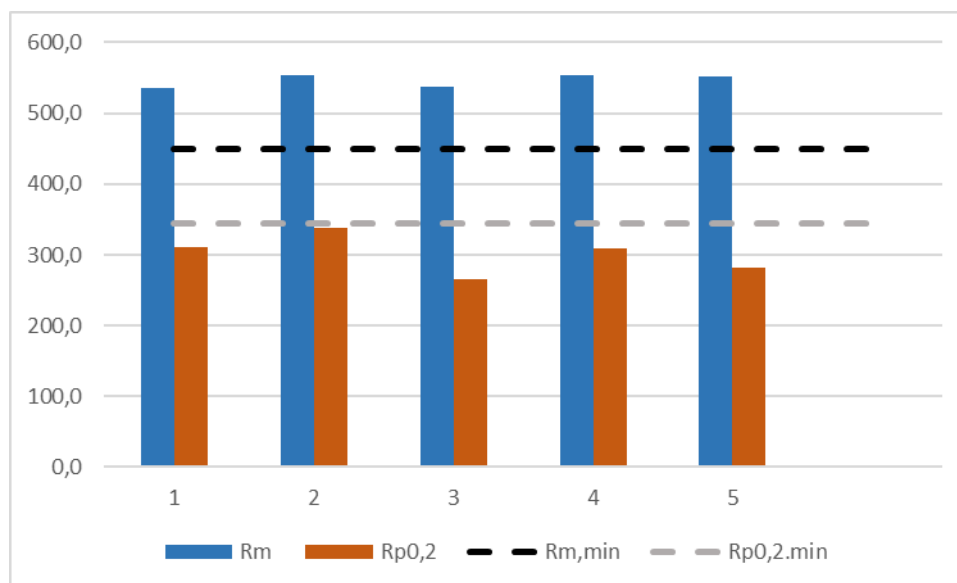


Slika 37. Linijska analiza nepravilnosti

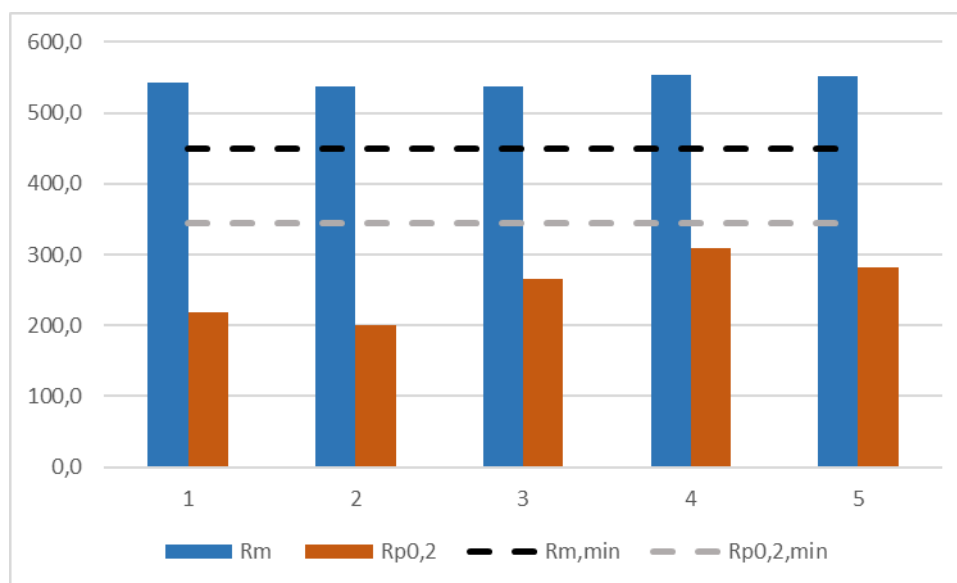
Iz linijske analize je utvrđeno da su nepravilnosti praktično rupice u materijalu.

4.7. Analiza rezultata ispitivanja

Kod analize statičkog vlačnog ispitivanja vidimo da su kod uzdužnih i poprečnih ispitivanja vrijednosti vlačne čvrstoće (R_m) iznad propisane minimalne vrijednosti dok su vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$) ispod zadanih minimalnih vrijednosti što je vidljivo na slikama 38 i 39.

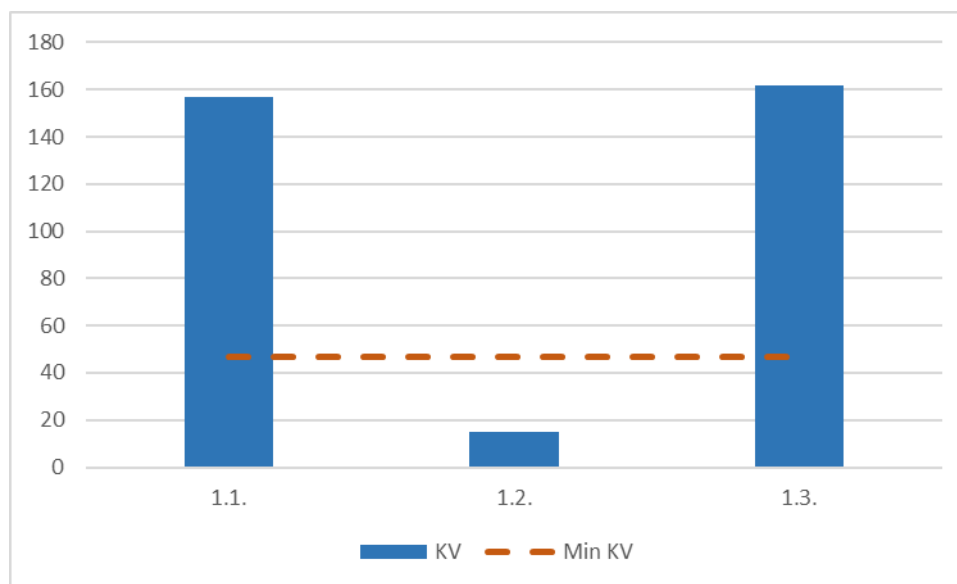


Slika 38. Graf analize rezultata za SVI ispitivanje uzdužnog presjeka



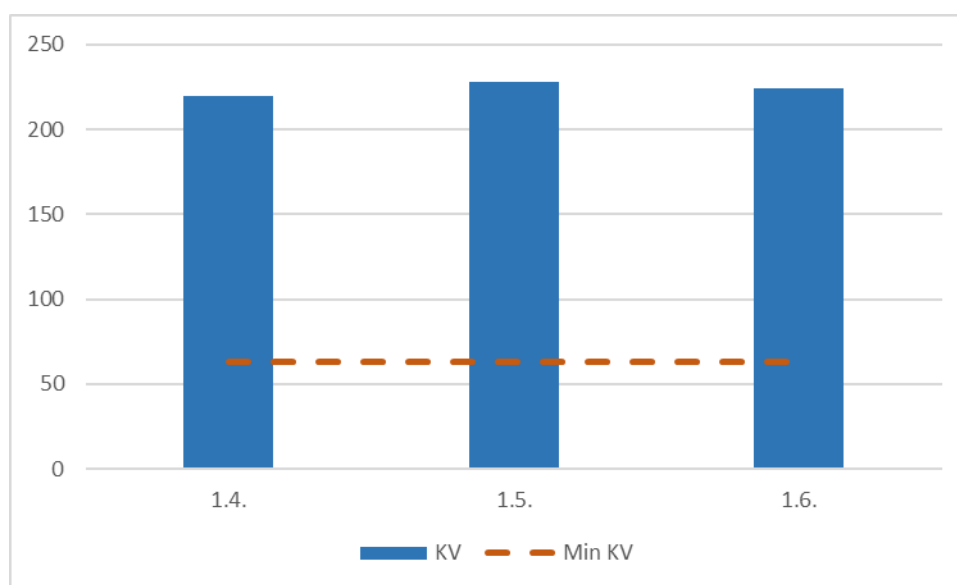
Slika 39. Graf analize rezultata za SVI ispitivanje poprečnog presjeka

Kod analize udarnog rada loma, odnosno žilavosti na -20°C vidimo da su epruvete 1.1 i 1.3 iznad minimalne zahtjevane vrijednosti udarne energije loma dok je epruveta 1.2 pukla krhkim lomom već na vrijednosti od 15 J.



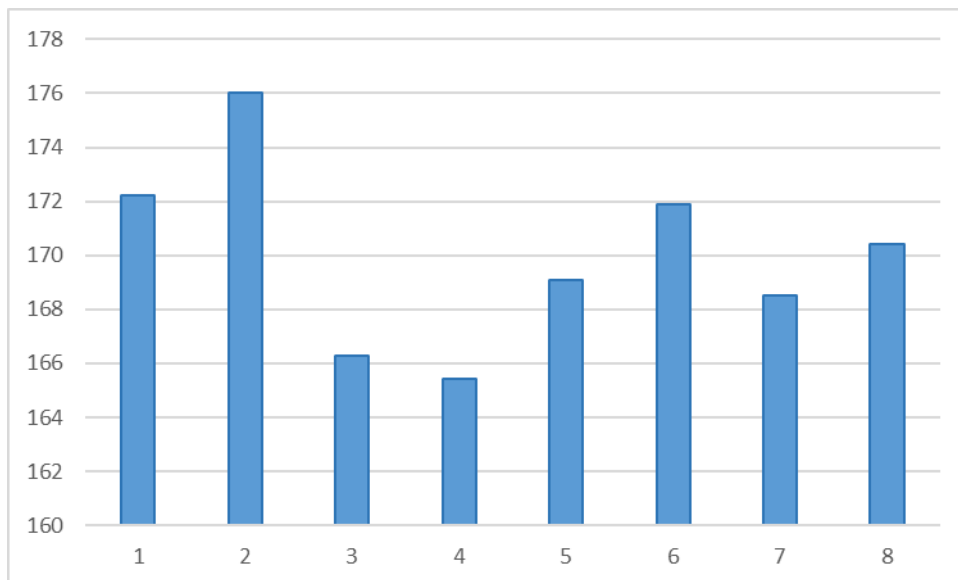
Slika 40. Analiza KV na temperaturi od -20°C

Na sobnoj temperaturi (23°C) vidimo da su sve epruvete iznad popisane minimalne vrijednosti udarne energije loma.



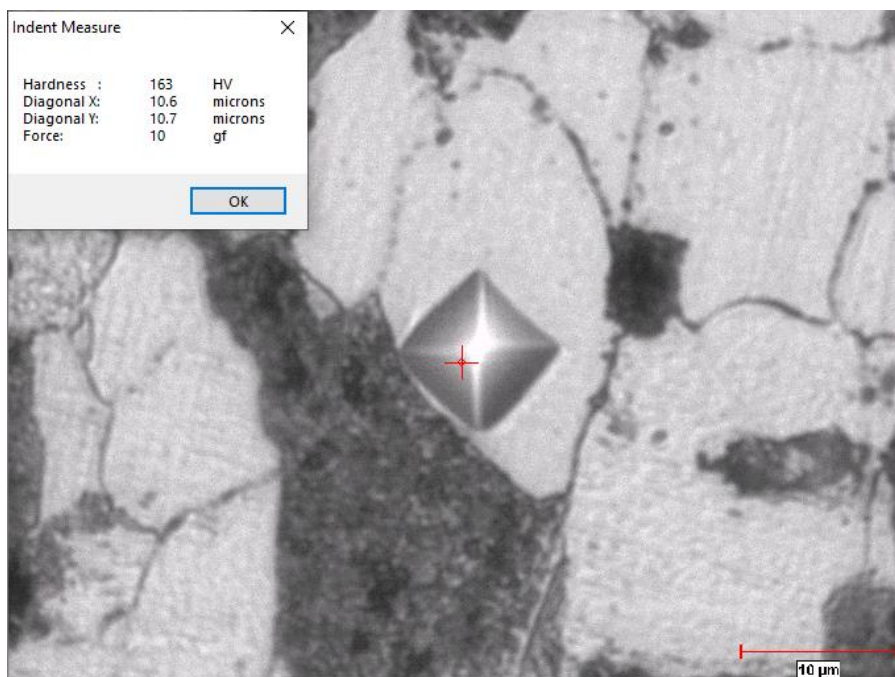
Slika 41. Analiza KV na sobnoj temperaturi (23°C)

Na slici 42 prikazana je analiza mjerenja tvrdoće i možemo zamjetiti da je rasipanje tvrdoća unutar 163 – 176 HV5 što je potvrda da se radi o feritno-perlitnoj mikrostrukturi.

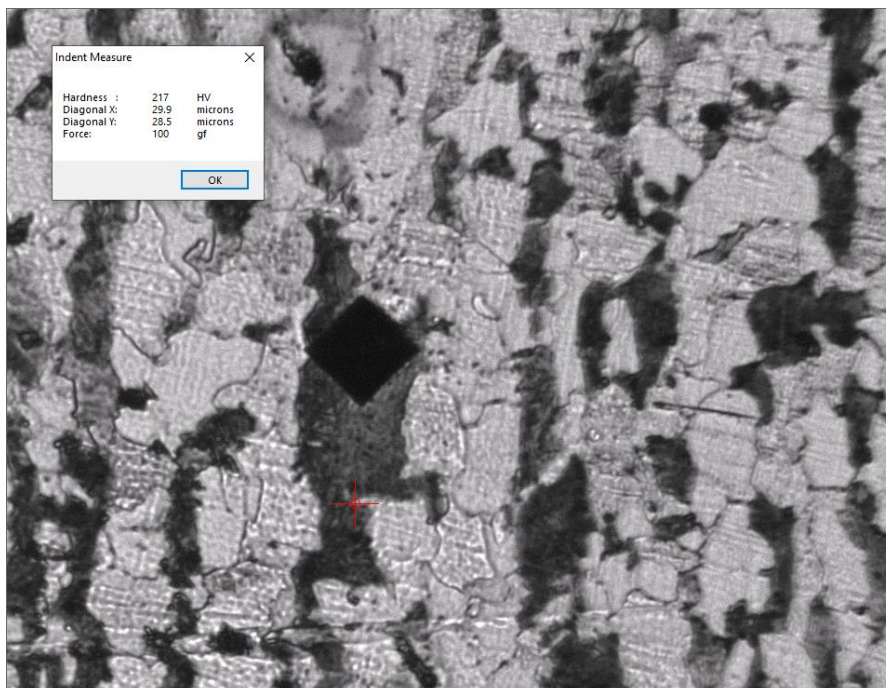


Slika 42. Analiza vrijednosti HV5

Mjerenjem mikro tvrdoće utvrđeno je da se mikrostruktura sastoji od ferita i perlita. Na slikama 43 i 44 su prikazana mjerenja mikrotvrdoće pojedinih zrna gdje se može utvrditi da se radi o feritu i perlitu.



Slika 43. Mjerenje tvrdoće feritnog zrna



Slika 44. Mjerenje tvrdoće perlitnog zrna

5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih istraživanja donešeni su sljedeći zaključci:

- Mehanička ispitivanja su pokazala da materijal prema normi EN 10020 ne zadovoljava zahtijevane kriterije minimalne vrijednosti granice razvlačenja za čelik S355. Izmjerene vrijednosti granice razvlačenja su znatno niže od minimalne dozvoljene vrijednosti za debljine materijala od 16 mm do 40 mm koja iznosi 345 N/mm².
- Kemijski sastav analiziranog uzorka je odgovarajući za čelik S355 sukladno normi EN 10020.
- Metalografska ispitivanja su pokazala da se radi o usmjerenom valjanom mikrostrukturi koja se sastoji od ferita i perlita te koja nema jednaka mehanička svojstva u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja.
- Fraktografskom ispitivanjima je dokazano da u materijalu postoje određene nepravilnosti koja su značajnog karaktera te mogu u eksploatacijskim uvjetima bitno utjecati na dinamičku izdržljivost konstrukcije.

LITERATURA

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1986.
- [2] Kostadin, T.: Čelici i željezni ljevovi, Materijali II, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [3] [Structural Steel S235, S275, S355](#) (dostupno 15.2.2022.)
- [4] [Material Properties of S355 Steel - An Overview](#) (dostupno 15.2.2022.)
- [5] [Structural Steels S235, S275, S355, S420 and Their Properties](#) (dostupno 15.2.2022.)
- [6] Simenuović, Z.: Termička obrada s ispitivanjem materijala, Svjetlost, Sarajevo, 1986.
- [7] Tehnička enciklopedija, ILZ/LZ Miroslav Krleža, 1963. – 1997.
- [8] Vitez, I., Oruč. M., Sunulahpašić. R.: Ispitivanje metalnih materijala, Univerzitet u Zenici, Zenica, 2006.
- [9] Ameen M.S.: Fractography: fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis, The Geological Society, London 1995.
- [10] [2011 ECCS Structural Steel Design Award / JDS Architects](#) (dostupno 20.2.2022.)
- [11] [Galvanized Steel Structure Elevated Water Tank](#) (dostupno 20.2.2022.)
- [12] [Cryogenic storage tank structure classification](#) (dostupno 20.2.2022.)
- [13] [Automotive Steel Processing: AHSS and Galvanized Steel](#) (dostupno 20.2.2022.)
- [14] [METAL & STEEL USED IN SHIP CONSTRUCTION](#) (dostupno 20.2.2022.)
- [15] Hrvatska norma HRN EN 10025-4, Hrvatski zavod za norme, prvo izdanje, listopad 2007.
- [16] [Repozitorij HRN EN 10025-1:2006](#) (dostupno 20.2.2022.)
- [17] [Kidalice](#) (dostupno 20.2.2022.) ž
- [18] Ivušić, I., Frant, M., Španiček, Đ, Ćurković, L.: Materijali 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [19] Callister, W. D.: Fundamentals of Materials Science and Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- [20] Norma HRN EN ISO 148-1:2016 - Metalni materijali -- Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom -- 1. dio: Metoda ispitivanja