

Svojstva nehrđajućih čelika

Barišić, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:847872>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-18**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PROIZVODNO STROJARSTVO**

MARIO BARIŠIĆ

SVOJSTVA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2015

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PROIZVODNO STROJARSTVO**

MARIO BARIŠIĆ

SVOJSTVA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Tihana Kostadin, mag.ing.stroj.

Karlovac, 2015



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / specijalistički studij:.....STROJARSTVO.....
(označiti)

Usmjerenje:.....PROIZVODNO STROJARSTVO.....Karlovac, 11.05.2015.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student:.....MARIO BARIŠIĆ..... **Matični broj:** 0110613090

Naslov:.....SVOJSTVA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA.....

.....
...

Opis zadatka:

Nakon uvoda, u teorijskom dijelu rada opisati čelike kao materijal, sa posebnim naglaskom na svojstva i vrste nehrđajućih čelika. Također opisati koroziju materijala.

Nakon postavke zadatka, u eksperimentalnom dijelu rada napraviti analizu kemijskog sastava materijala, te ispitivanja mehaničkih svojstava izabranog nehrđajućeg čelika. Eksperimentalni dio rada napraviti u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu. Na kraju napraviti analizu rezultata i zaključak.

Završni rad urediti prema pravilima Veleučilišta u Karlovcu.

Zadatak zadan:
11.05.2015.

Rok predaje rada:
12.06.2015.

Predviđeni datum obrane:
18.06.2015.

.....

.....

.....

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad na temu SVOJSTVA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje koje sam stekao tijekom studija, uz vodstvo mentorice Tihane Kostadin, mag. ing. stroj. i kod eksperimentalnog dijela u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu sa Anom Fudurić, ing. stroj. kojima se ovim putem zahvaljujem.

Zahvaljujem se roditeljima, sestrama i djevojci Marini koji su mi bili velika podrška, te im se zahvaljujem na razumijevanju, toleranciji i strpljenju.

U Karlovcu, 10.06.2015.

Mario Barišić

SAŽETAK

Ovim završnim radom objašnjena su svojstva nehrđajućih čelika, sa naglaskom na austenitne nehrđajuće čelike.

U općem dijelu ukratko su opisana svojstva nehrđajućih čelika kao i njihova podjela, te su detaljno opisani sastav i mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika.

U eksperimentalnom dijelu izvršena su ispitivanja austenitnog čelika. Ispitivanja su rađena na materijalu X5 CrNi 18-10. Provedeno je ispitivanje vlačne čvrstoće, tvrdoće, kao i utvrđivanje kemijskog sastava.

Nakon toga slijedi analiza dobivenih rezultata i zaključak.

SUMMARY

This final paper explained the properties of stainless steel, with an emphasis on austenitic stainless steels .

In the general section briefly describes the properties of stainless steel as well as their division , as well as a detailed description of the composition and the microstructure of austenitic stainless steel .

In the experimental section , the tests of austenitic steel. Tests were carried out on the material X5 CrNi 18-10 . An investigation was carried tensile strength, hardness, as well as the determination of the chemical composition .

This is followed by analysis of the results and conclusion.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA:	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA:	IV
POPIS PRILOGA.....	V
1. UVOD	1
2. POVIJESNI RAZVOJ NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	2
3. PODJELA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	4
3.1. Uvodno o nehrđajućim čelicima.....	4
3.2. Feritni nehrđajući čelici.....	4
3.3. Austenitni nehrđajući čelici.....	8
3.3.1. Osnovna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika.....	8
3.3.2. Standardne vrste austenitnih nehrđajućih čelika	10
3.3.3. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika.....	12
3.3.4. Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika	14
3.3.5. Specijalne vrste austenitnih nehrđajućih čelika.....	15
3.4. Austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici.....	16
3.5. Martenzitni nehrđajući čelici.....	19
4. UTJECAJ LEGIRNIH ELEMENATA NA NEHRĐAJUĆE ČELIKE	23
4.1. Osnovni legirni elementi	23
4.2. Ostali legirni elementi	28
4.3. Utjecaj nečistoća (primjesa)	29
5. KOROZIJA	32
5.1. Općenito o koroziji.....	32
5.2. Korozija s obzirom na mehanizam djelovanja	33
5.3. Pojavni oblici korozije kod metalnih materijala	33
5.3.1. Opća korozija	34
5.3.2. Lokalna korozija.....	34
5.4. Načini zaštite od korozije.....	37
6. POSTAVKA ZADATKA	38

7. EKSPERIMENTALNI DIO.....	39
7.1. Opis opreme	39
7.1.1. Analiza kemijskog sastava	39
7.1.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće	40
7.1.3. Ispitivanje tvrdoće	41
7.2. Ispitivanje austenitnog nehrđajućeg čelika X5 CrNi 18-10	42
7.2.1. Opis materijala	42
7.2.2. Rezultati analize kemijskog sastava	43
7.2.3. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće	43
7.2.4. Rezultati ispitivanje tvrdoće	47
8. ANALIZA REZULTATA.....	48
9. ZAKLJUČAK	49
LITERATURA.....	50
PRILOZI.....	51

POPIS SLIKA:

Slika 1. Primjeri gotovih proizvoda izrađenih od nehrđajućeg čelika

Slika 2. „Half Moon“

Slika 3. Feritna mikrostruktura

Slika 4. Utjecaj kroma, dušika i ugljika na otpornost prema IKK

Slika 5. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika

Slika 6. Precipitacija karbida tipa $M_{23}C_6$ u austenitnom nehrđajućem čeliku

Slika 7. Model nastanka i rasta sigma-faze

Slika 8. Mikrostruktura austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika

Slika 9. Promjena udjela austenita i ferita s temperaturom zagrijavanja

Slika 10. Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika

Slika 11. Sulfidni uključak (MnS) u čeliku s 0,35 %C

Slika 12. Primjer opće korozije vanjskih stijenki spremnika

Slika 13. Primjer točkaste korozije u zavaru

Slika 14. Primjer galvanske korozije na trupu broda

Slika 15. Primjer interkristalne u području zavarenog spoja Cr-Ni čelika

Slika 16. Spektroskop ARUN Polyspek Model M

Slika 17. Kidalica Shimadzu AG-X

Slika 18. Tvrdomjer Brinell, Vickers

Slika 19. Dimenzije epruvete prema standardu DIN 50-125

Slika 20. Ispitne epruvete

Slika 21. Epruveta u steznim čeljustima kidalice

Slika 22. Lom epruvete

Slika 23. Epruvete nakon vlačnog ispitivanja

Slika 24. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 4

Slika 25. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 5

Slika 26. Izgled epruvete nakon ispitivanja tvrdoće po Brinell-u

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva i primjena feritnih čelika

Tablica 2. Maseni udjeli ugljika i legirnih elemenata u austenitnim čelicima

Tablica 3. Mehanička svojstva nekih austenitnih nehrđajućih čelika na sobnoj temperaturi

Tablica 4. Nehrđajući austenitni čelici legirani dušikom i otporni na vrlo agresivne medije

Tablica 5. Svojstva i primjena austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika

Tablica 6. Svojstva i primjena martenzitnih nehrđajućih čelika

Tablica 7. Utjecaj sadržaja fosfora na mehanička svojstva čelika

Tablica 8. Dimenzije ispitnih epruveta prema standardu DIN 50-125

Tablica 9. Kemijski sastav ispitivanog materijala

Tablica 10. Mehanička svojstva ispitivanog materijala

Tablica 11. Tvrdća ispitivanog materijala

POPIS OZNAKA:

Oznaka	Jedinica	Opis
R _m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
R _e	N/mm ²	Granica razvlačenja
R _{p0,2}	N/mm ²	Konvencionalna granica razvlačenja
A	%	Istezanje
Z	%	Suženje (kontrakcija) poprečnog presjeka
AISI		American Iron and Steel Institute
ASTM		American Society for Testing and Materials
ELA		Extra Low Additions
HB		Tvrdoća po Brinell-u
HRC		Tvrdoća po Rockwell-u

POPIS PRILOGA

Prilog 1. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava ispitnog materijala

Prilog 2. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava za epruvetu 1

Prilog 3. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 1

Prilog 4. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava za epruvetu 2

Prilog 5. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 2

Prilog 6. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava za epruvetu 3

Prilog 7. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 3

Prilog 8. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava za epruvetu 4

Prilog 9. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 4

Prilog 10. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava za epruvetu 5

Prilog 11. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 5

Prilog 12. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

1. UVOD

Nehrđajući čelik (eng. stainless steel) ili korozijski postojani čelik je generički naziv za niz različitih čelika koji se prvenstveno koriste zbog svoje korozijske postojanosti za specifičnu primjenu ili specifični okoliš.

To je slitina željeza i najmanje 12% kroma. Osim legiranja s 12% kroma, da bi čelik bio korozijski postojan (pasivan), mora biti ispunjen još jedan uvjet, a to je postojanje homogene monofazne feritne, austenitne ili martenzitne mikrostrukture, radi izbjegavanja opasnosti od nastanka područja s različitim elektropotencijalom od potencijala osnovne mase. Ostali legirajući elementi koji se dodaju služe za poboljšanje strukture i mehaničkih svojstava kao što su oblikovljivost i žilavost, a mogu biti npr. nikal, molibden, titan i bakar. Općenito vrijedi da skupina korozivskih postojanih čelika mora sadržavati:

- feritotvorci: krom (Cr), silicij (Si), aluminiј (Al), molibden (Mo), niobij (Nb), titan (Ti), vanadiј (V);
- austenitotvorci: nikal (Ni), mangan (Mn), bakar (Cu), kobalt (Co), dušik (N).

Razni su tržišni nazivi za nehrđajuće čelike *Staybrite steel*, *Allegheny metal* i *Nirosta steel*.

Nehrđajući čelici [Slika 1.] su definirani nacionalnim standardima (HRN, DIN, AISI), a vjerojatno zbog utjecaja brodogradnje u našem se okruženju ustalila upotreba oznaka za nehrđajuće čelike prema američkom standardu AISI (**A**merican **I**ron and **S**teel **I**nstitute).



Slika 1. Primjeri gotovih proizvoda izrađenih od nehrđajućeg čelika

2. POVIJESNI RAZVOJ NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Ne može se točno definirati tko je „izumio“ nehrđajući čelik. Mogu se samo nabrojati znanstvenici koji su zaslužni da danas postoji korozijski postojani čelik kao svestran materijal.

Otkrivanje nehrđajućih čelika započinje 1821. god. Pierre Berthier (Francuska) i 1822. god. Stoddard i Farraday (Engleska). Ti znanstvenici su istaknuli da su željezo-krom legure otpornije na djelovanje određenih kiselina, ali su ispitivanja provodili na legurama sa malim udjelom kroma (Berthier 1-1,5% Cr, Stoddard i Faraday 3% Cr).

Znanstvenici Woods i Clarck (Engleska) 1871. god. prepoznali su komercijalnu vrijednost nehrđajućih krom legura. Podnijeli su zahtjev za patent na „Weather-Resistant Alloys“, te naveli da za konstrukcije sa zahtjevom za maksimalnom otpornošću na koroziju udjel kroma u leguri treba biti 30% i volframa (W) 1,5%. Za konstrukcije bez zahtjeva za maksimalnom otpornošću na koroziju maseni udio kroma je 5%.

1905. godine profesor Leon Guillet (Francuska) objavljuje knjigu o nehrđajućem čeliku jednostavno nazvanu „*Stainless Steel*“. U Njemačkoj 1908. godine tvornica „Krupp Iron Works“ eksperimentira sa dodatkom nikla (Ni). Proizvodi krom-nikal čelik za jahtu „Germania“ poznatije kao „Half Moon“ [Slika 2.]. Nije poznato da li legura sadrži minimalno 12%Cr.



Slika 2. „Half Moon“ [5]

P. Monnartz (Njemačka) je 1911. god. otkrio važnost minimalnog masenog udjela kroma u leguri. Otkrio je povezanost između kroma i otpornosti prema koroziji, navodeći da je značajan poticaj u otpornosti prema koroziji, kada legura ima najmanje 12% Cr.

Harry Brearly (Engleska) se navodi kao izumitelj „rustless steel“ (čelik bez hrđe) ili kako će se kasnije nazivati „stainless steel“ (nehrđajući čelik). Istraživajući nove vrste čelika koji bi bolje mogli odoljeti eroziji počeo je ispitivati utjecaj kroma na čelik, koji je poznat po tome što podiže točku tališta, u odnosu na standardni ugljični čelik. Rezultat istraživanja je bila krom legura mnogo više korozijski postojana nego legure do tada. Prema njegovim tvrdnjama 13.kolovoza.1913. god. proizveo je prvi nehrđajući čelik sa 0,24%C i 12,8%Cr.

1911. -1914. god. znanstvenici USA-a se uključuju u istraživanje. Becker i Dantszen rade na feritnom nehrđajućem čeliku kemijskog sastava 14-16% Cr i 0,07-0,15% C.

Dr. W. H. Hatfield nastavlja rad H. Brearly-a i 1924. god. nastaje nehrđajući čelik nazvan „18/8“, koji se i danas najviše koristi, sa raznim dodacima, kad pričamo o njegovim legurama. Isti osim dodataka kroma ima i dodatak nikla (Ni) u svom kemijskom sastavu, odnosno 18% Cr i 8% Ni.

Dr. W. H. Hatfield izumio je i 18/8 nehrđajući čelik sad dodatkom titana (Ti) u svom kemijskom sastavu, poznat kao „321“ (po ASTM/AISI).

3. PODJELA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

3.1. Uvodno o nehrđajućim čelicima

Vjerovatno najvažnija skupina konstrukcijski postojećih materijala jesu tzv. nehrđajući čelici. Posebno su važni zbog odlične korozijske i toplinske otpornosti, visokog odnosa čvrstoće s obzirom na masu, dobrih svojstava kod niskih temperatura, niske magnetske permeabilnosti, itd.

Prema mikrostrukтури nehrđajuće čelike možemo podjeliti u četiri osnovne grupe:

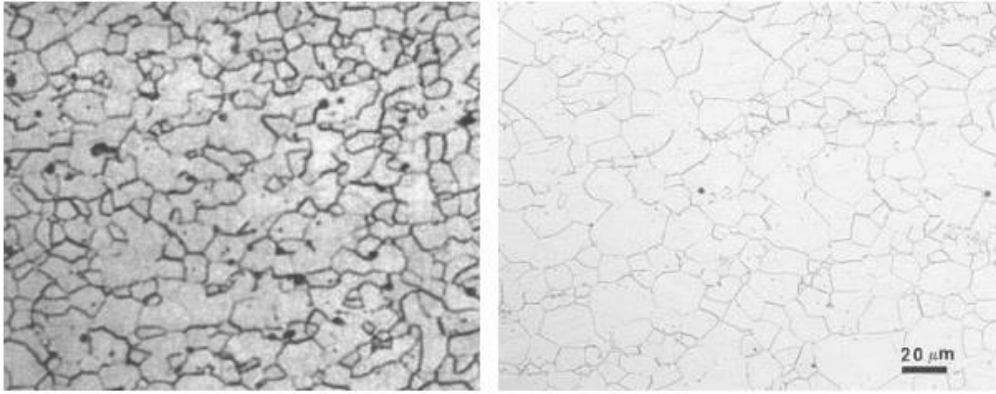
1. feritni nehrđajući čelici,
2. austenitni nehrđajući čelici,
3. austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici i
4. martenzitni nehrđajući čelici.

3.2. Feritni nehrđajući čelici

Ferit je faza koja prevladava u mikrostrukтури ovih čelika i po tome su oni i dobili ime feritni nehrđajući čelici. Feritna mikrostruktura određuje mehanička (i neka druga) svojstva [Tablica 1.]. Osnovna karakteristika ovih čelika je njihova dobra otpornost na napetosnu, rupičastu i koroziju u procijepu (osobito u medijima koji sadrže kloride).

Feritni čelici sadrže 12-17% Cr i $< 0,1\%$ C uz dodatak nekih drugih legiranih elemenata (Mo, Si, Al, Ti ili Nb). Sumpor i selen mogu se dodati kako bi se poboljšala strojna obradivost, a udio austenitizirajućih elemenata (C, N i Ni) vrlo je mali.

Feromagnetični su i zadržavaju feritnu mikrostrukтуру [Slika 3.] pri gotovo svim temperaturama, što znači da ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade jer nemaju fazu pretvorbe. Takav ferit se naziva δ -ferit (prostorno centrirana kubna rešetka).



Slika 3. Feritna mikrostruktura [6]

Svojstva feritnih nehrđajućih čelika:

- relativno mekani,
- magnetični,
- relativno slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna grijanjem iznad 900°C (ubrzano iznad 1150°C),
- skloni pojavi „krhkosti 475“ pri duljoj izloženosti temperaturi 350-520°C,
- skloni stvaranju krhke sigma faze (520-850°C),
- imaju slabu deformabilnost,
- dobra obradljivost odvajanjem čestica (bolja od austenitnih),
- postojani su prema oksidirajućim kiselinama (HNO_3),
- imaju lošu postojanost u kloridnim otopinama (npr. morska voda),
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije čak i u kloridnim otopinama,
- dodatkom molibdena povećava im se otpornost na rupičastu koroziju,
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika,
- skloni lomu pri niskim temperaturama.

Uklanjanje ili smanjenje navedenih nedostataka može se postići povišenjem udjela kroma, sniženjem udjela ugljika, te legiranjem s molibdenom i niklom (eventualno titanom i niobijem).

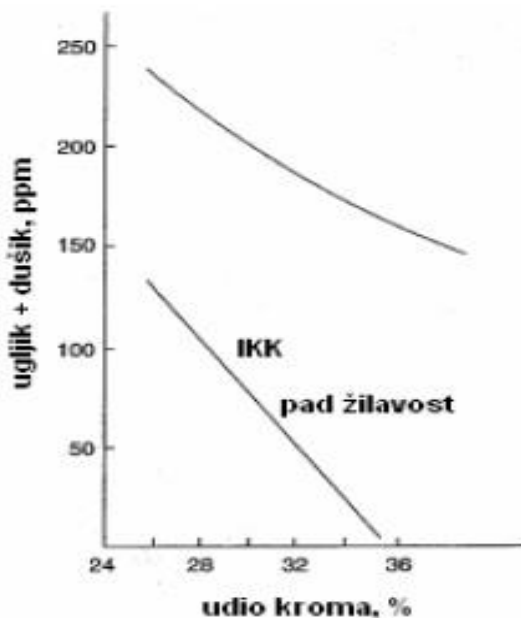
Tablica 1. Mehanička svojstva i primjena feritnih čelika [7]

oznaka čelika EN (HRN)	sastav, "ostalo" [%]	mehanička svojstva			posebna otpornost i primjeri primjene
		R_m [N/mm ²]	$R_{p0,2min}$ [N/mm ²]	A_{5min} [%]	
X6 Cr 17 (Č4174)	-	450-600	270	20	korozijski postojani pribor za jelo (osim oštrice noža), dijelovi kućanskih aparata, dijelovi uređaja u proizvodnji dušične kiseline i sapuna te u petrokemijskoj industriji
X6 CrMo 17	1,10Mo	450-650	270	20	posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline, za auto-dijelove, okvire prozora, prevlake hladnjaka, kvake, okvire retrovizora
X8 CrTi 17 (Č4971)	0,70Ti	450-600	270	20	kao X6Cr17, otporniji na rast zrna, za zavarene dijelove kućanskih aparata, za sita i okvire
X8 CrNb 17	0,90Nb	450-600	270	20	dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za zavarene dijelove)
X8CrMoTi 17	1,75Mo 0,65Ti	500-600	300	20	za jače napregnute zavarene dijelove aparata u proizvodnji jestivog octa, u mljekarama, prešaonicama voća nije za udarni rad!
X12CrMoTi25	2,50Mo 1,80Ti	650-750	550	12	za otopine s visokim udjelom slobodnog klora
X12CrMoS17	0,25Mo 0,20S	700-850	450	12	za obradu odvajanjem čestica na automatima: vijke, zakovice, matice, male zupčanike, male osovine

Znatna poboljšanja svojstava postižu se porastom čistoće feritnih čelika, tj. dobivanjem vrlo niskih udjela nečistoća i primjesa pomoću suvremenih metoda rafinacije. Zbog niskih udjela „dodataka“ takvi čelici se nazivaju ELA čelici (eng. Extra Low Additions) ili superferitni čelici. Imaju nešto bolju zavarljivost, žilavost pri niskim temperaturama, poboljšanu korozijsku postojanost, povišeni udio kroma i vrlo niski udjel dušika i ugljika ($C + N < 0,01-0,02$).

Otpornost na interkristalnu koroziju je direktno ovisna o sadržaju kroma i intersticijskih elemenata, ugljika i dušika [Slika 4.]. Kod čelika s viskim udjelom ugljika i dušika (više od 1000 ppm) ne može se brzim gašenjem izbjeći nastanak precipitata pri zavarivanju i zato su ovi čelici osjetljivi na interkristalnu koroziju. Kod čelika s niskim i srednjim sadržajem ugljika i dušika (~ 200 do 500 ppm) moguće je naglim gašenjem izbjeći nastanak precipitata po granicama zrna.

Ako su se precipitati već izlučili i ako je došlo do smanjenja sadržaja kroma uz granicu zrna, žarenjem na temperaturi od 700°C do 950°C može se sve vratiti na početno stanje prije formiranja precipitata.



Slika 4. Utjecaj kroma, dušika i ugljika na otpornost prema IKK [7]

3.3. Austenitni nehrđajući čelici

3.3.1. Osnovna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika

Austenitni nehrđajući čelici su na prvom mjestu po ukupnoj proizvodnji i po broju različitih vrsta. Korozijski su postojani u puno različitih medija. Ne mogu se toplinski očvrnuti, zadržavaju dobra svojstva na vrlo niskim temperaturama.

Maksimalna temperatura primjene je oko 760°C, do koje ne dolazi do smanjenja čvrstoće i otpornosti na oksidaciju. Mogu se očvrnuti hladnom deformacijom. Primjenjuju se u uvjetima kada se traži dobra postojanost na atmosfersku koroziju i koroziju na povišenoj temperaturi. Austenitni čelici imaju dobru korozijsku postojanost, dobru obradljivost, izvrsnu zavarljivost, mehanička svojstva, te estetske karakteristike.

Osnovni zahtjevi prema kemijskom sastavu [Tablica 2.] potrebnom da se postigne austenitna mikrostruktura nehrđajućih čelika su:

- maseni udjel ugljika treba biti što niži ($< 0,15\%$) jer je tada manja opasnost od nastanka karbida Cr_{23}C_6 (odgovoran za pojavu interkristalne korozije),
- maseni udjel kroma što viši ($> 18\%$) radi povećanja antikorozivnosti,
- maseni udjel nikla što viši ($> 8\%$) kako bi isti, kao gamageni element (γ), prevladao alfabeno djelovanje kroma i doveo do nastanka austenitne mikrostrukture,
- dodatno legiranje s molibdenom, titanom, niobijem i/ili tantalom koji pospješuju nastanak 5-10% delta ferita te djeluju stabilizirajuće na otpornost prema interkristalnoj koroziji,
- povišeni udjel dušika (0,2 – 0,4%) radi povišenja čvrstoće i otpornosti na napetosnu i rupičastu koroziju.

Tablica 2. Maseni udjeli ugljika i legirnih elemenata u austenitnim čelicima [2]

Element	Maseni udio (%)
Krom	18 do 26
Nikal	8 do 35
Mangan	1 do 2 (4 do 15,5)
Silicij	0,5 do 3
Molibden	do 2
Dušik	do 0,15
Titan i niobij	do 0,2
Ugljik	0,02 do 0,08(0,1)

Austenitni nehrđajući čelici su zbog visokog udjela legirnih elemenata skuplji od martenzitnih čelika i feritnih s nižim i srednjim sadržajem kroma, ali njihova dobra svojstva, osobito dobra oblikovljivost i zavarljivost, opravdavaju njihov izbor i kompenziraju razliku u cijeni.

Svi austenitni čelici imaju dobru žilavost i duktilnost, te postižu značajnu istezljivost tijekom vlačnog opterećenja.

Austenitni čelici primjenjuju se u vrlo različitim područjima, od nosivih konstrukcija i primjene u arhitekturi, preko kuhnijskih uređaja, do medicinske opreme. Široko područje primjene imaju ne samo zbog dobre korozijske postojanosti, već i zbog dobre oblikovljivosti, zavarljivosti, izdržljivosti i dr. Neki austenitni čelici koji imaju visoki udjel legirnih elemenata mogu izdržati visoke temperature i primjenjuju se do 1000°C. Ovakvi čelici uz visoki udio kroma imaju i visoki udio silicija, a često i aluminijske i ugljika, čime se značajno povisuje otpornost na oksidaciju i pougljičavanje, te čvrstoća na visokoj temperaturi.

Ova vrsta nehrđajućih čelika je osjetljiva na napetosnu koroziju, pa se ne preporuča njihova primjena u okruženju s morskom vodom ili mediju koji sadrži kloride, te u jako korozivnim medijima. Otpornost na ovaj tip korozije dodatno se smanjuje ako je konstrukcija izvedena zavarivanjem.

Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika:

- nemaju mogućnosti usitnjavanja zrna,
- nemagnetični su,
- javljaju se veće napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- odlične plastičnosti,
- legiranjem s molbdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturi iznad 600°C,
- visoka žilavost, oksidacija i korozijska otpornost,
- visok odnos čvrstoća/masa,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama (teorijski primjenjivi od -273°C),
- postojana austenitna struktura od „solidus“ temperature do ispod sobne temperature,
- kubično plošno centrirana (FCC) rešetka koja osigurava visoku deformabilnost,
- nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja,
- nisu sposobni da se zakale ili poboljšaju transformacijom jer nema faznih transformacija.

Karakteristična područja primjene austenitnih čelika su:

- Cr-Ni-N čelik: uređaji u mljekarama i pivovarama,
- Cr-Ni-Mo-N čelici: uređaji u industriji celuloze, boja tekstila, tlačne posude povišene postojanosti na koroziju, povišeno postojani uređaji na više koncentracije klora i do 400°C,
- Cr-Ni-Mo-N čelici s 25% Cr i 25% Ni: sumporno kiseli mediji i reducirajući uvjeti primjene,
- Cr-Ni-Mn-Mo-N čelici: uređaji u kontaktu s morskom vodom.

3.3.2. Standardne vrste austenitnih nehrđajućih čelika

Svi austenitni čelici mogu se prema vrsti gamagenih elemenata podijeliti u dvije podskupine: - austenitni nehrđajući čelici,

- Ni- Mn- N- austenitni nehrđajući čelici.

Prema američkom sustavu označavanja (AISI – American Iron and Steel Institute) prva podskupina pripada seriji 300, a čelici iz druge podskupine pripadaju seriji 200. Iako je razvijeno mnoštvo različitih vrsta austenitnih čelika, vrste s oznakom 300 (po AISI sustavu) su najstarije, imaju najširu primjenu i najčešće se primjenjuju.

Najpoznatiji (osnovni) austenitni nehrđajući čelik je UNS S30400 (AISI 304) ili 18/8. To je legura na osnovi željeza koja sadrži nominalno 18% Cr i 8,5% Ni, uključujući manje količine C, N, Mn i Si. Čelik s oznakom 304 je temeljni čelik skupine i skupa s čelikom 304L je najčešće u upotrebi.

Većina austenitnih čelika razvijena je upravo iz čelika 18/8, dodavanjem legirnih elemenata i modificiranjem sastava, čime su se postigla bolja mehanička i korozijska svojstva.

Čelici sa slovom L u oznaci imaju snižen sadržaj ugljika na vrijednost do 0,03% (304L i 316L). Neosjetljivi su na interkristalnu koroziju, ako nema dovoljno ugljika za nastanak kritične količine karbida, nema ni interkristalne korozije. Vrste s oznakom H imaju povišen maseni udio ugljika na oko 0,1%. Zbog višeg sadržaja ugljika ove vrste imaju više vrijednosti čvrstoće što osobito dolazi do izražaja na visokoj temperaturi. Čelici sa slovom N u oznaci imaju povećan sadržaj dušika do 0,20%. Maseni udio dušika može biti i veći od navedenog ako čelik sadrži dovoljno mangana, zato što mangan povišuje topljivost dušika u austenitu. Dušik povoljno djeluje na čvrstoću, otpornost na adheziju i otpornost na rupičastu koroziju.

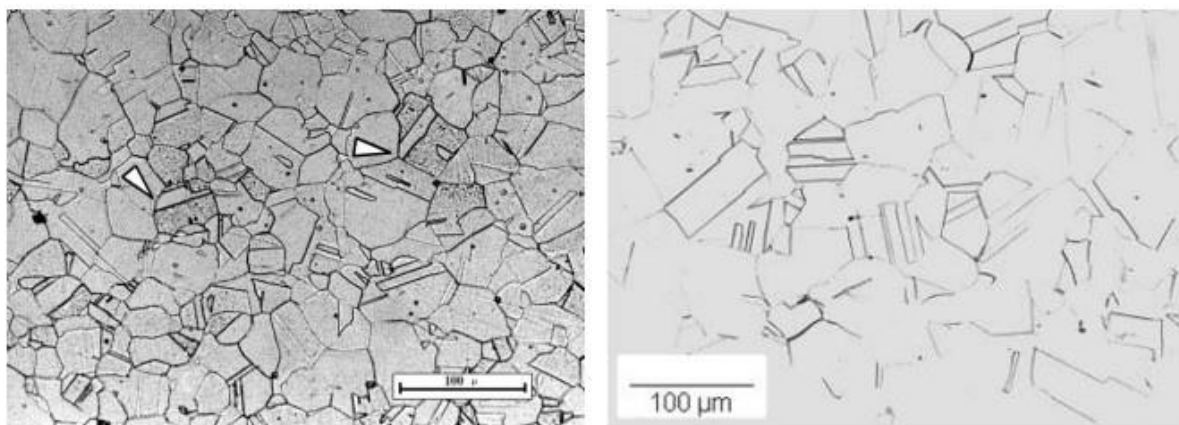
Vrste koje sadrže titan i niobij (tip 321 i 347) su stabilizirane vrste austenitnih nehrđajućih čelika, a niobij i titan se nazivaju stabilizirajućim elementima. Imaju veći afinitet prema ugljiku od kroma pa se njihovim dodavanjem sprečava nastanak kromovih karbida tipa $M_{23}C_6$, po granicama zrna.

Čelici iz serije 200 sadrže više ugljika, mangana i dušika te manje nikla od čelika iz serije 300. Zbog ovakvog sastava posjeduju i višu otpornost na adhezijski mehanizam trošenja. 50-ih godina 20. stoljeća u SAD-u se zbog nestašice nikla (Korejski rat) istražuje mogućnost njegove zamjene s drugim gamagenim legirnim elementima. Među elemente koji stabiliziraju austenitnu fazu i koji mogu zamijeniti skupi nikal ubrajaju se ugljik, mangan, bakar i kobalt. Nijedan od ovih elemenata pojedinačno dodan nema dovoljno jako djelovanje u smislu promicanja austenitne mikrostrukture, pa se više njih mora dodati ako se želi postići potpuna austenitna mikrostruktura.

Korozijska postojanost im nije tako dobra kao kod čelika iz serije 300. Čelici koji sadrže više ugljika osjetljivi su na napetosnu koroziju kod zavarivanja. Osjetljivost na napetosnu koroziju raste s povećanjem debljine materijala.

3.3.3. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika

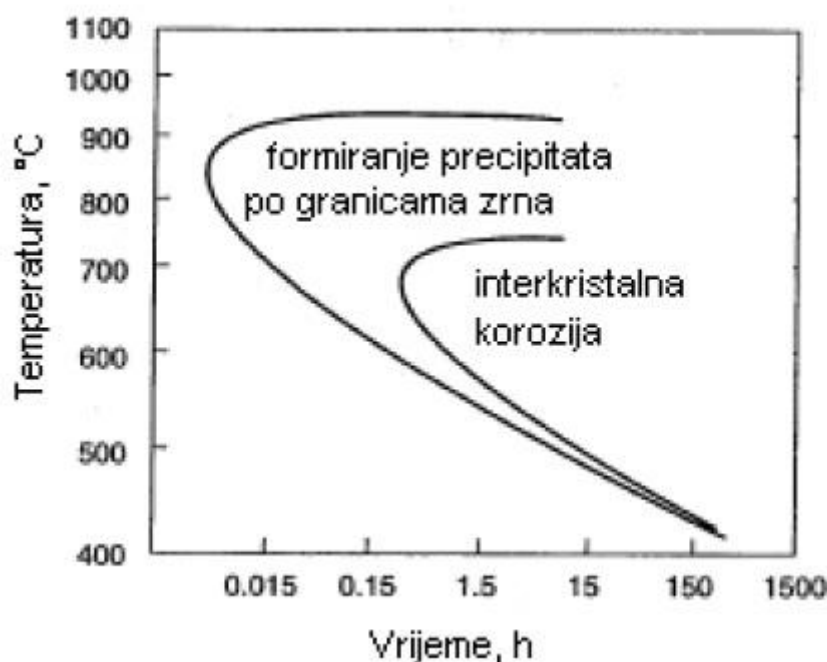
Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [Slika 5.] može biti ovisno o balansu alfa i gama faza legiranih elemenata ili potpuno austenitna ili austenitno feritna. Kemijski sastav i termomehanička obrada nehrđajućih austenitnih čelika podešavaju se tako da mikrostruktura na sobnoj temperaturi bude potpuno austenitna ili austenitna s malim udjelom feritne faze. Feritna faza nastaje zbog segregacije alfa faze legiranih elemenata (ponajprije kroma) tijekom kristalizacije i naknadne termomehaničke obrade.



Slika 5. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [6]

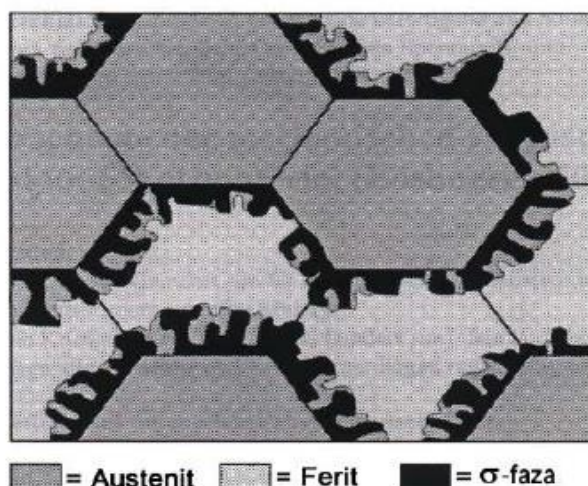
Volumni udio delta ferita ovisi o sadržaju gama faze legiranih elemenata i brzini hlađenja, te najčešće ne prelazi 2 do 3%. Uz karbide i nitride u austenitnim nehrđajućim čelicima mogu nastati i mnogi drugi, u pravilu štetni mikrostrukturni precipitanti. Karbidi mogu nastati u skoro svim austenitnim čelicima zbog kroma koji je jaki karbidotvorac, a neizostavan je legirni element u svim nehrđajućim čelicima. Najveći značaj imaju karbidi tipa $M_{23}C_6$ [Slika 6.] zbog utjecaja na korozijsku postojanost. Sitni karbidni precipitanti formiraju se po granicama austenitnih zrna u temperaturnom području između 425 i 870°C. U vrlo kratkom vremenu mogu izazvati interkristalnu koroziju ako se čelik nađe u određenom okruženju.

Ova pojava je jače izražena kod austenitnih čelika koji su očvršnuti deformacijom u hladnom stanju. Minimalan sadržaj delta ferita u austenitnim nehrđajućim čelicima je nužan radi osiguravanja otpornosti prema pojavi toplih pukotina. Pritom, gornja dopuštena granica delta ferita iznosi ~10%, jer bi kod višeg udjela delta ferita znatno porasla sklonost nastanku sekundarnih faza (npr. σ -faza) pri povišenim temperaturama.



Slika 6. Precipitacija karbida tipa $M_{23}C_6$ u austenitnom nehrđajućem čeliku [2]

Sigma, chi, eta i Kavsova faza su neke od intermetalnih faza koje u određenim uvjetima mogu nastati u austenitnim nehrđajućim čelicima. Lakše i brže nastaju u čelicima koji sadrže molibden, niobij i titan. U austenitnim čelicima s potpuno austenitnom mikrostrukturom sigma – faza teško može nastati, čak ako se čelik jako dugo vrijeme zadržava na temperaturi između 600 i 900 °C. U austenitnim čelicima koji u mikrostrukтури imaju delta – ferita nastaje u vrlo kratkom vremenu. Osim kroma, formiranje sigma-faze pomiču molibden, niobij, silicij, volfram, vanadij, titan i cirkonij. Ugljik i dušik djeluju suprotno i usporavaju rast precipitata sigma-faze. Što je veći udio delta- ferita, sigma faza nastaje brže i u većoj količini. Na slici 7. prikazan je model nastanka i rasta sigma-faze. sigma-faza nastaje na granici ferit-austenit i dalje se širi u ferit. Udio ferita se pritom smanjuje, a raste udio sigma-faze i udio austenita.



Slika 7. Model nastanka i rasta sigma faze [2]

3.3.4. Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika

Vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja austenitnih nehrđajućih čelika [Tablica 3.] prilično su skromne i slične su vrijednostima kod niskougličnih čelika. Minimalne vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$) kod niskougličnih čelika su u rasponu od 205 do 275 N/mm², a vlačne čvrstoće (R_m) između 520 i 760 N/mm². Istezljivost je u rasponu od 40 do 60 %. Vrijednosti čvrstoće i granice razvlačenja mogu se povisiti hladnom deformacijom. Austenitni čelici općenito ne mogu očvrnuti precipitacijom niti strukturnom transformacijom.

Tablica 3. Mehanička svojstva nekih austenitnih nehrđajućih čelika na sobnoj temp. [2]

	Vlačna čvrstoća	Granica razvlačenja	Istezljivost	Suženje
Čelik	N/mm ²	N/mm ²	%	%
X5CrNi18-10	515	205	40	50
X2CrNi18-9	480	170	40	50
X3CrNiMo17-13-3	515	205	40	50
X2CrNiMo17-12-2	480	170	40	50
X6CrNiTi18-10	515	205	40	50
X6CrNiNb18-10	515	205	40	50

3.3.5. Specijalne vrste austenitnih nehrđajućih čelika

Ove vrste čelika su razvijene s ciljem da zadovolje posebne zahtjeve u eksploataciji. Dije se u dvije osnovne skupine, u prvoj skupini se nalaze čelici za rad pri povišenim temperaturama, a u drugoj skupini su austenitni čelici legirani dušikom za rad u agresivnom okruženju, a u ovu grupu svrstavaju se i tzv. superaustenitni čelici.

Nehrđajući austenitni čelici i ljevovi za povišene temperature se primjenjuju u petrokemijskim i energetskim postrojenjima gdje su izloženi povišenoj temperaturi, a uz to su i mehanički opterećeni. Zbog toga većina ovih čelika ima povišen maseni udio ugljika, koji osigurava visoku čvrstoću na povišenoj temperaturi. Udio ugljika je najčešće od 0,04 do 0,10%. Austenitni nehrđajući ljevovi za rad na povišenoj temperaturi sadrže više od 0,40% ugljika. Nekim vrstama su uz povećani sadržaj kroma i nikla, dodani jaki karbidotvorci, Nb, Ti, Mo i W čime se poboljšava otpornost na puzanje, otpornost na toplinski umor te otpornost na visoku temperaturnu koroziju, oksidaciju, sulfidizaciju i karbonizaciju.

Izboru materijala za dijelove koji rade na povišenoj i visokoj temperaturi posvećuje se velika pozornost. Iako mehanička svojstva, korozijska postojanost, raspoloživost, tehnologičnost i cijena imaju važnu ulogu, najvažniji zahtjev je stabilnost mikrostrukture i svojstava na povišenoj temperaturi. Ako dođe do mikrostrukturnih promjena i izluče se neke štetne mikrostrukturne faze, doći će do degradacije svojstava što može dovesti do loma materijala.

Nehrđajući austenitni čelici legirani dušikom i otporni na vrlo agresivne medije su čelici kojima je dodatno poboljšana korozijska postojanost dodavanjem dušika. Osim što poboljšava korozijsku postojanost (najviše na rupičastu koroziju), dušik poboljšava i mehanička svojstva, osobito čvrstoću. Svi čelici iz ove skupine mogu se svrstati u tri podskupine [Tablica 4.]. U prvoj podskupini su čelici koji su razvijeni iz austenitnih čelika sa sniženim udjelom ugljika. Druga podskupina osim povišenog udjela dušika (do 0,40%) ima povišen i sadržaj Mn do 18%. Čelici iz ove skupine poznati su pod trgovačkim nazivom *Nitronic* i *GallTough*. Treća podskupina razvijena je s namjerom da se još više poboljša postojanost austenitnih čelika na rupičastu koroziju i napetosnu koroziju u kloridnom okruženju. To su tzv. superaustenitni čelici.

Tablica 4. Nehrđajući austenitni čelici legirani dušikom i otporni na vrlo agresivne medije[2]

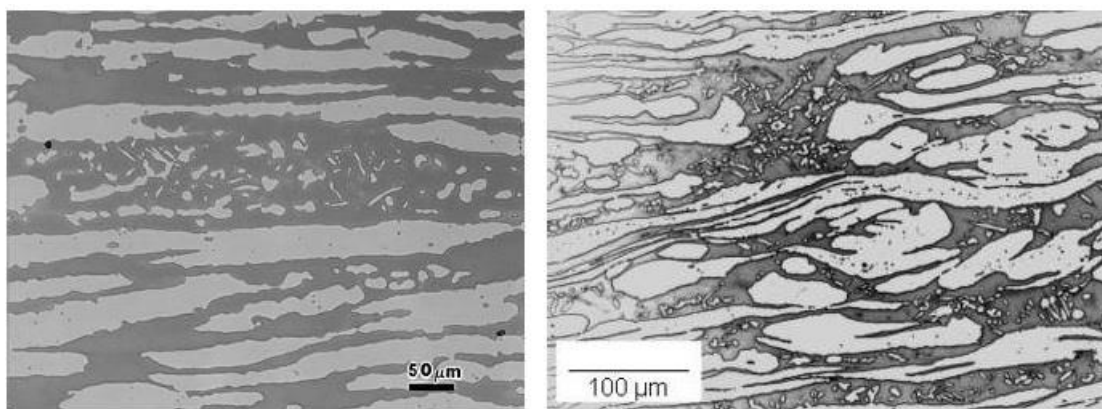
			Maseni udio elemenata								
EN		UNS No.	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N	Ostalo	PRE _N
Standardni s povišenim dušikom											
X2CrNiN 18-10		304LN	0,02	1,00	0,04	19,0	10,0	-	0,13	-	21
X2CrNiMoN17-13-3		316LN	0,02	1,00	0,04	17,0	12,0	2,2	0,13	-	26
X2CrNiMoN18-12-4		317LN	0,02	1,00	0,04	19,0	13,0	3,3	0,15	-	32
X2CrNiMoN17-13-5		317LMN	0,02	1,00	0,04	18,5	15,5	4,5	0,16	-	36
Povišen dušik, povišen mangan											
		Nitronic 30	0,02	8,0	0,5	16,0	2,25	-	0,23	-	20
		Nitronic 32	0,08	18,0	0,5	18,0	-	1,0	0,50	Cu: 1,0	25
		Nitronic 33	0,04	13,0	0,4	18,0	3,0	-	0,30	-	23
		Nitronic 40	0,04	9,0	0,5	20,0	6,5	-	0,28	-	24
		Nitronic 50	0,04	5,0	0,4	22,0	12,5	2,25	0,30	Nb: 0,20	34
		Nitronic 50	0,05	8,0	4,0	17,0	8,5	-	0,13	-	19
		Gall-Tough	0,15	5,0	3,5	16,5	5,0	3,5	0,15	-	30
Superaustenitni											
		254SMo	0,01	0,5	0,4	20,0	18,0	6,25	0,20	Cu: 0,75	44
		AL 6XN	0,02	1,0	0,5	21,0	24,5	6,5	0,22	-	46

3.4. Austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici

Dupleks feritno-austenitni nehrđajući čelici dobili su ime po svojoj mikrostrukturi [Slika 8.] koja se sastoji od ferita i austenita u podjednakim volumnim udjelima (50:50). Otkriveni su 1930. god. ali nisu bili u široj primjeni zbog problema sa zavarivanjem, korozijskom postojanošću i krhkošću. Širu primjenu doživljavaju 1980- tih godina prošlog stoljeća kada su im navedeni nedostaci uklonjeni, uglavnom dodavanjem dušika. Osim dušika, važni legirni elementi su molibden, volfram i bakar. Molibden ,volfram i bakar dodaju se uglavnom zbog povišenja korozijske postojanosti.

Dupleks čelici se primjenjuju na mnogim mjestima zbog izvrsne korozijske postojanosti i vrlo dobrih mehaničkih svojstva. Zbog visokog udjela ferita oni su feromagnetični, imaju višu toplinsku vodljivost i nižu toplinsku rastezljivost od austenitnih čelika. Na mjestima gdje se traži visoka otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju, bolji su izbor od austenitnih čelika. Od dupleks čelika se izrađuju konstrukcije koje su izložene koroziji jer posjeduju izvanrednu kombinaciju korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava.

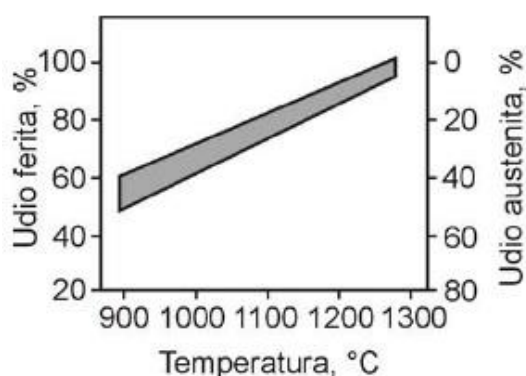
Zbog navedenih svojstva moguće je smanjenje nosivih prjesjeka i smanjenje ukupne mase proizvoda. Dupleks čelici imaju puno višu granicu razvlačenja (oko 425 N/mm^2) u odnosu na austenitne (oko 210 N/mm^2). Također im je i tvrdoća viša, a samim time i otpornost na abrazijsko trošenje. Noviji dupleks čelici imaju dobru žilavost i duktilnost. Donja temperatura primjene im je ograničena na -40°C . Gornja temperatura primjene dupleks čelika je oko 315°C .



Slika 8. Mikrostruktura austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika [6]

Previsoki udio ferita može uzrokovati sniženje korozijske postojanosti, te pojavu krhkosti. Omjer austenita i ferita ovisi i o temperaturi toplinske obrade [Slika 9.].

Žarenjem na $870 - 950^\circ\text{C}$ mogu se učinkovito ukloniti izlučeni karbidi kroma koji nastaju po granicama ferit/austenit. Nakon takvog žarenja potrebno je provesti hlađenje na zraku ili u ulju radi izbjegavanja nastanka sigma faze i „krhkosti 475“.



Slika 9. Promjena udjela austenita i ferita s temperaturom zagrijavanja [7]

Svojstva austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika:

- povećana otpornost prema napetostnoj koroziji (poseban nedostatak austenitnih čelika) i utjecaju klorida,
- postojanost prema interkristalnoj koroziji je viša što je viši sadržaj ferita,
- bolja otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike,
- čvrstoća je također veća u odnosu na čvrstoću austenitnih čelika,
- teže se stvaraju karbidi Cr_{23}C_6 (krom se otapa u feritu, a ugljik u austenitu),
- intermetalna sigma-faza može nastati u austenitu i feritu,
- primjena na povišenim temperaturama je moguća do maksimalno 250 – 350°C zbog pojave „krhkosti 475“ koja se javlja u dupleks čelicima u feritnoj fazi (po istom principu kao i kod feritnih čelika),
- magnetični su,
- temperatura primjene je između -50 i +350°C.

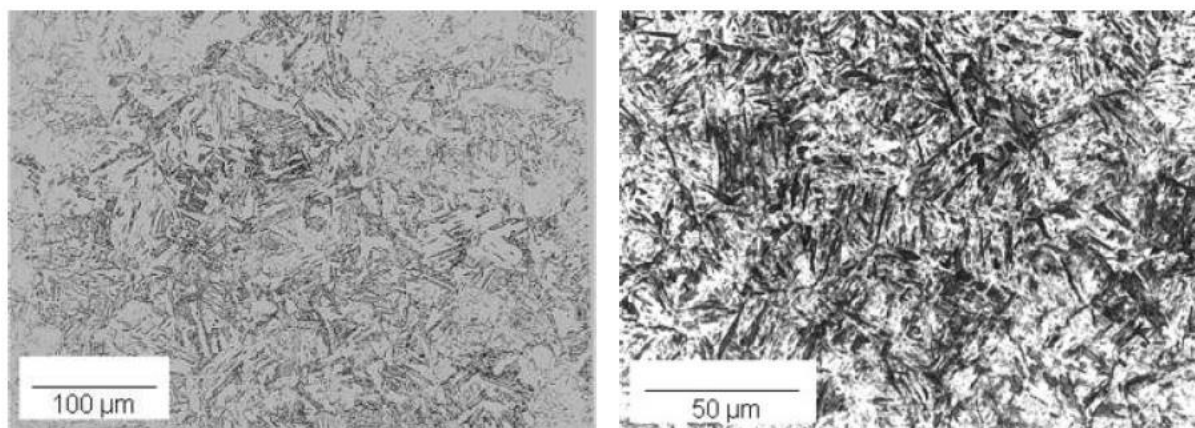
Primjena austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika [Tablica 5.] : izmjenjivači topline, posude pod tlakom, veliki spremnici za transport kemikalija (cisterne), u industriji nafte i plina (crpke, destilatori, desalizatori, ventili, cjevovodi, pumpe), petrokemijskoj industriji (alati za ekstruziju PVC filma, apsorberi, separatori), kemijsko-procesnoj industriji (u proizvodnji kiselina, rad s otopinama HF u HNO_3 , uređaji za H_2SO_4) brodogradnji (osovine brodskog vijka, kormila, crpke, grijači, ležajevi) industriji papira (ventili, cijevi regeneracijskih peći, osovine mješača, pročišćavanje vode).

Tablica 5. Svojstva i primjena austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika [7]

OZNAKA LIJEVA (DIN)	W.Nr.	PRIMJERI PRIMJENE	
G-X 8CrNiN 26 7	1.4347	Povišena svojstva čvrstoće u odnosu na austenitne vrste. Primjena do 300 °C	Poboljšana svojstva otpornosti na koroziju u morskoj vodi. Pumpe, brodski propeleri, kemijska industrija
G-X 3 CrNiMoN 26 6 3 G-X 3 CrNiMoCuN 26 6 3	1.4468 1.4515		Povećana otpornost na točkastu koroziju i koroziju u rasporu.
G-X 3 CrNiMoCuN 26 6 3 3	1.4517		Povećana otpornost na neoksidirajuće kiseline, npr. sumporna.
G-X 3 CrNiMoN 25 7 4	1.4469		Uvjeti povišenog parcijalnog tlaka H ₂ S i/ili povišene temperature u morskoj ili bočatoj vodi
G-X 40 CrNi 27 4	1.4340	U odnosu na vrste legirane kromom (1.4085 i 1.4086), posebno za odljevke složenih oblika i više žilavosti. Za velika kućišta pumpi i kola.	
G-X 40 CrNiMo 27 5	1.4464	U odnosu na 1.4340 povećana otpornost na koroziju. Odljevci izvrgnuti koroziji i trošenju.	

3.5. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici su legure temeljene na trojnom sustavu Fe-Cr-C. Martenzitni nehrđajući čelici, zbog potebe zakaljivanja, imaju povišeni udio C (0,20 – 1,0%), te u pravilu iznad 13% Cr (do 18%). Mogu sadržavati i do 1,3% Mo i 2,5% Ni. Kod ovih čelika martenzitna mikrostruktura postiže se alotropskom modifikacijom austenita. Mikrostruktura se sastoji od ferita i karbida [Slika 10.]. Feromagnetični su i optimalna svojstva i korozijska postojanost postiže se kaljenjem na zraku ili u ulju naknadnim popuštanjem. Martenzitni čelici kristaliziraju iz taline u delta ferit, a zatim pri hlađenju prelaze u austenit, koji daljnim hlađenjem prelazi u martenzit.



Slika 10. Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika [9]

Mala toplinska vodljivost ovih čelika zahtjeva postepeno ugrijavanje na temp. austenitizacije i gašenje u ulju ili vakumu (i zbog opasnosti od oksidacije). Što je viši %C i %Cr to će biti potrebna viša temperatura austenitizacije da se otopi što više ugljika u austenitu (zbog zakaljivosti) i što više kroma (zbog korozijske postojanosti).

Martenzitni čelici mogu se podijeliti u dvije podskupine :

1. Konstrukcijski (sadrže do $\sim 0,25\%C$, poboljšavaju se, dobra korozijska postojanost) i
2. Alatni čelici ($> 0,3\%C$, nakon kaljenja se nisko popuštaju, otpornosti na abrazijsko trošenje).

Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika:

- osjetljivost prema vodikovoj krhkosti posebno u sulfidnoj okolini,
- imaju lošu otpornost na udarni lom kod sniženih temperatura,
- u odnosu na feritne i austenitne nehrđajuće čelike imaju višu tvrdoću i čvrstoću te otporost na trošenje,
- mogu se kaliti jer imaju transformaciju $\gamma - \alpha$,
- imaju poboljšanu granicu razvlačenja i otpor puzanju pri povišenim temperaturama,
- obično se koriste u poboljšanom stanju.

Mehanička svojstva i korozijska postojanost ovisi o kemijskom sastavu i mikrostrukturi [Tablica 6.].

Tablica 6. Svojstva i primjena martenzitnih nehrđajućih čelika [7]

čelik	posebno postojan	primjeri primjene
X20Cr13 (Č4172)	- na vodu i vodenom paru, na organske kiseline: octenu, mliječnu, voćnu	- kirurški instrumenti (klijesta, pincete) - pribor za jelo: vilice, žlice - strojni dijelovi: osovine, stapalice, ventilni stošci, sapničke igle, turbinske lopatice, "holandski" noževi (za papir)
X20CrMo13	- povišena postojanost u odnosu na X20Cr13 (posebno toplinska)	- kao X20Cr13 ali za radne temperature i do 500°C, za toplinski napregnute opruge
X22CrNi17 (Č4570)	- na organske kiseline kojese javljaju u industriji namirnica, octene kiseline i sapuna, na oksidirajuću razrijeđenu HNO ₃ , postojan na morsku vodu	- osovine, ventili, dijelovi pumpa, dijelovi uređaja u mljekarama, u industriji papira, u proizvodnji kvasca i škroba, za dijelove kompresora
X30Cr13 (Č4173)	- na vodu i paru (samo u kaljenom stanju)	- opruge, vijci (za rad u agresivnoj atmosferi), škare, mjerni alat
X36CrMo17 (alatni)	- u atmosferi aminokiselina, octene kiseline, pa i solne kiseline (PVC)	- dijelovi kalupa za preradbu polimera, kirurški rezní alat, zubarski alat
X42Cr13 (alatni)	- kao X36CrMo17	- kao X36CrMo17, posebno za aminoplaste
X45CrMoV15	- otporan do 500°C	- različiti rezní alati, kirurški skalpeli
X90CrMoV18	- istovremeno vrlo otporan na trošenje i koroziju	- noževi za meso, skalpeli, korozijski postojani kotrljajući ležajevi, sapnice, pribor za jelo otporan na abrazijske praške za čišćenje, britve, žileti

Martenzitni nehrđajući čelici nemaju dobru postojanost kao drugi nehrđajući čelici, a uzrok tome je niži sadržaj kroma i viši sadržaj ugljika nego kod drugih čelika. Zbog toga se primjenjuju u uvjetima kad se od materijala traži visoka čvrstoća i tvrdoća uz blaže zahtjeve glede korozijske postojanosti. Jeftiniji su od drugih nehrđajućih čelika zbog nižeg sadržaja kroma i drugih legirnih elemenata. Ne koriste se na temperaturama višim od 650°C zbog pada mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti. Imaju najlošiju zavarljivost od svih nehrđajućih čelika zato što pri hlađenju nakon zavarivanja u mikrostrukturi ostaje nepopušteni martenzit.

Da bi martenzitni čelik imao povišenu postojanost prema koroziji i zadovoljavajuća mehanička svojstva potrebno je povišiti sadržaj kroma na 17 – 18%. Međutim, porast sadržaja kroma neizbježno dovodi do proširenja područja delta ferita.

To se može izbjeći:

1. povišenjem sadržaja ugljika (nepovoljno se utječe na korozijsku postojanost) ili
2. dodatkom određene količine nikla (1,5 – 2%) koji sužava područje delta ferita.

Ukoliko se sadržaj ugljika smanji ($< 0,10\%$) tada nastaju tzv. mekomartenzitni nehrđajući čelici koji spadaju u visokočvrste čelike (granica razvlačenja do 1000 N/mm^2). Sniženje mehaničkih svojstava (čvrstoća, granica razvlačenja) u tom slučaju nadomješta se legiranjem s Cr (13 – 18%), Ni (1 – 6%) i Mo ($< 3\%$).

Mekomartenzitni nehrđajući čelici se primjenjuju za izradu dijelova strojeva i aparata izloženih djelovanju nečistog zraka (iznimno djelovanju morske vode), izradu lopatica Peltonovih i Kaplanovih turbina, za valjke u proizvodnji papira, izradu dijelova pumpi (rotori, osovine, lopatice, klizne plohe).

4. UTJECAJ LEGIRNIH ELEMENATA NA NEHRĐAJUĆE ČELIKE

4.1. Osnovni legirni elementi

Poznato je da niti jedna skupina materijala ne može legiranjem toliko mijenjati svojstva kao čelik. Čeliku se dodaju određeni elementi kako bi se postiglo željeno svojstvo ili kombinacija svojstava gotovog proizvoda. Najčešći legirajući elementi prisutni u čelicima su krom, nikal, mangan, silicij, volfram, vanadij i molibden. U posebnim slučajevima čelik se može legirati kobaltom, titanom, aluminijem, niobijem i dr. Legirajući elementi se u čeliku pojavljuju:

- otopljeni u α -željezu ili γ -željezu,
- kao spojevi (karbidi, intermetalni spojevi),
- kao nemetalni uključci (oksidi, nitridi, sulfidi, fosfidi).

Ugljik

Ugljik je sastavni dio čelika (maksimalno 2%) i za njega se ne smatra da je legirajući element iako ima najveći utjecaj na svojstva čelika. Porastom udjela ugljika u čeliku raste čvrstoća i granica razvlačenja, a smanjuje se duktilnost i žilavost. Ugljik ima važan utjecaj u osiguravanju zakaljivosti nelegiranih i legiranih čelika. Zakaljivost čelika predstavlja mogućnost kaljenja. Kod nelegiranih čelika uvjet je da je sadržaj ugljika veći od 0,25%. Jako prokaljivi čelik može se zakaliti i na debljim presjecima, a ugljični samo do debljine 16mm.

Uglavnom je sadržaj ugljika nizak osim kod martenzitnih čelika gdje viši udio ugljika omogućuje toplinsku obradu. Ugljik ima utjecaj na smanjenje otpornosti na koroziju kada se ugljik veže s kromom i stvara karbide čime se osiromašuje površinski sloj slobodnim atomima kroma čime se onemogućava stvaranje dovoljne količine otpornog površinskog sloja krom oksida.

Krom

Krom omogućava kaljenje čelika u ulju (čak i na zraku) budući da povisuje prokaljivost čelika i snižava temperaturu početka stvaranja martenzita (M_s).

Zbog afiniteta prema ugljiku krom lako stvara karbide pa se često dodaje čelicima za izradu reznih alata. Karbidi kroma povećavaju otpornost na trošenje čime se povećava izdržljivost i trajnost oštrice proizvedenog alata. Dodatkom kroma kao legirajućeg elementa povišuje se toplinska čvrstoća, vatrootpornost i otpornost na djelovanje komprimiranog vodika. Nužni uvjet za korozijsku postojanost čelika pri sobnoj temperaturi je legiranje s minimalno 12% kroma. Ukoliko se uz krom (feritotvorac) ne dodaju elementi koji proširuju područje austenita (npr. Ni, Mn) niskougljični čelik s $<0,1\%$ C i $>15\%$ Cr posjedovat će postojanu feritnu mikrostrukturu od sobne temperature pa do temperature solidusa. Legiranje kromom utječe na sklonost pojavi krhkosti nakon popuštanja, ali se to može izbjeći dodatnim legiranjem s molibdenom.

Nikal

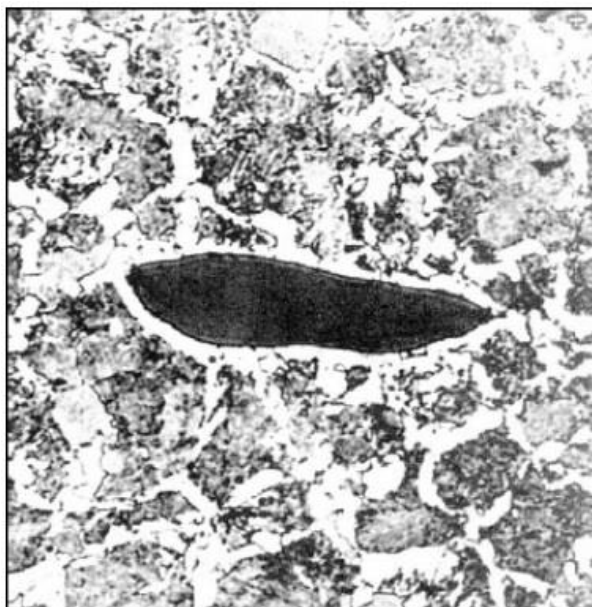
Nikal kao legirajući element proširuje područje austenita, te zbog vrlo slabog afiniteta prema ugljiku ne stvara karbide. Legiranjem s niklom može se povišiti žilavost konstrukcijskih čelika kao i korozijska postojanost (uz minimalni dodatak 12% kroma). Dakle, nikal je zaslužan za stvaranje austenitne strukture koja omogućuje povišenu čvrstoću, duktilnost čak i na vrlo niskim temperaturama. Također daje materijalu nemagnetičnost. U precipitacijski očvrnutim (PH) čelicima nikal stvara intermetalne spojeve Ni_3Ti i/ili Ni_3Al . Zbog ekonomskih razloga (visoka cijena) nikal se gotovo uvijek legira u kombinaciji s drugim legirajućim elementima.

Molibden

Legiranjem s molibdenom (najčešće u kombinaciji s ostalim legirajućim elementima) povećava se prokaljivost i čvrstoća čelika, a sprečava pojava visokotemperaturne krhkosti popuštanja. Iz tog razloga, konstrukcijski čelici sadrže od 0,2 do 5% molibdena. Molibden je karbidotvorac pa utječe na sitnozrnatost čelika i na otpornost na trošenje (npr. brzorezni čelici). U kombinaciji s kromom, molibden povećava otpornost čelika prema općoj i jamičastoj koroziji.

Mangan

Mangan se najčešće koristi kao dezoksidator i desulfizator tijekom proizvodnje čelika. Zbog velikog afiniteta prema sumporu, mangan stvara sulfid MnS [Slika 11.] čime se sprječava negativno djelovanje sulfida FeS . Sprječavanje nastanka sulfida FeS je naročito važno kod čelika za automate (obrada odvajanjem čestica na automatima) koji zbog lakše obradljivosti moraju sadržavati čak do 0,4% sumpora. Mangan proširuje područje austenita, tj. snižava temperaturu A_{c3} i A_{c1} u odnosu na ugljične čelike. Legiranjem s manganom povećava se prokaljivost čelika, u odnosu na ugljične čelike, a u nezakaljenim čelicima poboljšava se čvrstoća i žilavost. Dodatak svakih 1% mangana može dovesti do povišenja granice razvlačenja konstrukcijskih čelika za oko 100 N/mm^2 . Čelici poprimaju austenitnu mikrostrukturu, neovisno o sadržaju ugljika, ukoliko je sadržaj mangana veći od 12%.



Slika 11. Sulfidni uključak (MnS) u čeliku sa 0,35% C [8]

Slicij

Silicij se često koristi kao sredstvo za dezoksidaciju, te kao legirajući element koji povišuje čvrstoću, otpornost prema trošenju i granicu razvlačenja (npr. čelici za izradu opruga). Budući da silicij izrazito povišuje otpornost prema djelovanju topline neizbježan je legirajući element koji se dodaje vatrootpornim čelicima (do 2,5%).

Titan

Titan zbog svog izraženog afiniteta prema kisiku, dušiku, sumporu i ugljiku djeluje izrazito dezoksidirajuće, denitrirajuće i desulfizirajuće. Vezanjem s ugljikom titan stvara vrlo stabilan karbid TiC pa se zajedno s niobijem i tantalom primjenjuje za stabilizaciju nehrđajućih čelika. Ukoliko se nalazi na većim udjelima može djelovati na precipitacijsko očvršćivanje stvaranjem intermetalnih spojeva Ni_3Ti ili $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$. Titan sprječava interkristalnu koroziju u zoni zavara kod feritnih čelika.

Vanadij

Dodatkom vanadija kao legirajućeg elementa može se postići usitnjavanje primarnog austenitnog zrna. Budući da je vanadij jaki karbidotvorac i nitrotvorac u udjelima iznad 0,4% povišuje otpornost na trošenje stvaranjem stabilnog VC ili V_4C_3 karbida. Sposobnost stvaranja karbida VC ili V_4C_3 iskorištena je pri proizvodnji brzoreznih čelika, te alatnih i konstrukcijskih čelika namijenjenih za rad na povišenim temperaturama.

Wolfram

Wolfram kao legirajući element pripada skupini karbidotvoraca. Legiranjem čelika s wolframom sprječava se rast zrna, a time posredno utječe i na povišenje žilavosti čelika. Budući da stvara karbide izrazito otporne na trošenje wolfram predstavlja nužni legirajući element za brzorezne čelike.

Niobij i Tantal

Niobij i tantal zbog identičnog djelovanja na svojstva dolaze skoro uvijek zajedno kao legirajući elementi u čeliku. Budući da su izrazito jaki karbidotvorci uglavnom se primjenjuju za stabilizaciju čelika postojanih na djelovanje kiselina. Niobij pored karbida može stvarati nitride i karbidonitride, potpomagati nastanak sitnijeg zrna u čeliku i olakšavati precipitacijsko očvršćivanje.

Kao legirajući element niobij se dodaje sa ili bez dodatka vanadija u zavarljive sitnozrnate čelike povišene granice razvlačenja i čvrstoće (HSLA čelici) te u neke ultračvrste PH-čelike.

Olovo

Olovo se koristi kao legirajući element kod čelika za obradu odvajanjem čestica na automatima jer pozitivno utječe na lomljenje strugotine i postizanje čiste obrađene površine. Olovo je netopivo u čeliku, te ne utječe na mehanička svojstva čelika.

Kobalt

Kobalt ne stvara karbide, ali utječe na sprječavanje rasta zrna pri visokim temperaturama. Zbog poboljšavanja vlačne čvrstoće i postojanosti na popuštanje pri povišenim temperaturama kobalt se dodaje brzoreznim, alatnim i konstrukcijskim čelicima koji su namijenjeni za rad pri povišenim temperaturama. Nepoželjan je u čelicima za dijelove nuklearnih energetskih postrojenja jer stvara radioaktivan izotop ^{60}Co .

Bor

Bor u nehrđajućim austenitnim čelicima omogućava precipitacijsko očvršćivanje (povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće), ali snižava otpornost prema općoj koroziji. Dodatkom bora se s jedne strane poboljšava prokaljivost nisko i srednje ugljičnih čelika, ali se s druge strane pogoršava njihova zavarljivost.

Aluminij

Aluminij se najčešće koristi kao sredstvo za dezoksidaciju. Dodatkom aluminija čelik postaje manje osjetljiv prema starenju, te se potpomaže stvaranje sitnijeg zrna.

Sposobnošću stvaranja nitrida aluminij predstavlja veoma važan legirajući element za nitiranje (stvara spojeve AlN). Također, reakcijom aluminija s niklom ili titanom mogu nastati intermetalni spojevi (Ni_3Al i Ni_3Ti).

Aluminij se dodaje nehrđajućim čelicima kojima izlučeni precipitati povisuju čvrstoću i tvrdoću. Aluminij je snažan feritotvorac, te se dodaje nekim feritnim čelicima s niskim udjelom kroma da im povisi otpornost na opću koroziju.

Bakar

Bakar se rjeđe koristi kao legirajući element jer se pri visokim temperaturama nakuplja ispod površinskog sloja ogorine te uzrokuje površinsku osjetljivost tijekom kovanja ili valjanja (tzv. crveni lom). Dodatkom bakra može se povisiti omjer granica razvlačenja/vlačna čvrstoća, a ukoliko ga ima iznad 0,4% tada omogućava precipitacijsko očvršćivanje.

U kotlovskim limovima iz nelegiranih čelika bakar u sadržaju do 0,35% povisuje postojanost prema atmosferskoj koroziji. Bakar može pozitivno djelovati na postojanost prema djelovanju različitih kiselina ukoliko mu sadržaj ne prelazi 1% (npr. visokolegirani čelici otporni na kiseline).

4.2. Ostali legirni elementi

Dušik

Dušik u većini slučajeva predstavlja nepoželjni element (nečistoća), ali se ponekad dodaje i kao legirajući element. Već 0,01% dušika povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću, ali smanjuje deformabilnost i žilavost čelika. Brzim hlađenjem dušik može ostati zarobljen u rešetci željeza. U nelegiranim i niskolegiranim čelicima nije poželjan jer povećava sklonost takvih čelika prema starenju, posebno kod hladno deformiranih čelika (deformacijsko starenje). Pojava starenja rezultira porastom čvrstoće i smanjenjem žilavosti. Porastom temperature (200 - 300°C) atomi dušika mogu difundirati u područje dislokacija već za vrijeme deformacije uz istovremeno stvaranje nitrda.

Zbog toga takav čelik ne smije biti izložen deformaciji pri temperaturi 200-300 °C jer postoji opasnost od pojave „plavog loma“. Ukoliko se uz dušik dodaju elementi koji imaju veći afinitet prema dušiku od željeza (npr. aluminij, titan, niobij) dolazi do povlačenja dušika iz čvrste otopine u nitride, a čelik postaje otporan na starenje.

U slučaju austenitnih nehrđajućih čelika dušik predstavlja legirajući element, jer kao intersticijski element znatno povećava granicu razvlačenja, te proširuje područje austenita. Legiranjem dušikom može se zamijeniti dodatak određene količine vrlo skupog nikla. Dušik se kao legirajući element najčešće dodaje u količini do ~0,25%.

Cirkonij

Cirkonij je izrazito djelotvoran za dezoksidaciju i odsumporavanje. Sulfidi cirkonija su još manje štetni od sulfida mangana. Cirkonij kao karbidotvorac utječe na ustinjenje zrna, pa se dodaje u niskolegirane sitnozrnate čelike namijenjene poboljšanju.

4.3. Utjecaj nečistoća (primjesa)

Fosfor

Fosfor je nepoželjna primjesa u čeliku, te njegov maseni udio treba biti što je moguće niži (ispod 0,06%). Fosfor u čeliku tijekom skrućivanja dovodi do pojave primarnih segregacija. Izrazito spora difuzija fosfora u željezu uzrokuje nemogućnost njegove jednolike raspodjele. Nakon prolaska faze skrućivanja primarni dendritni kristali siromašni su fosforom i legirajućim elementima, dok ostatak taline sadrži fosfor i većinu nemetalnih uključaka. Toplim oblikovanjem se dendritna lijevana mikrostruktura trakasto izdužuje. Poznato je da je fosfor uzorčnik krhkosti čelika [Tablica 7.]. Krhkost čelika je izraženija čim je prisutan viši sadržaj ugljika, te što je viša temperatura austenitizacije. U iznimnim slučajevima neki čelici mogu imati povišeni sadržaj fosfora radi poboljšanja rezljivosti (npr. čelici za obradu na automatima).

Također, ponekad se korozijski postojanim austenitnim čelicima može dodati određena količina fosfora (do 0,1%) koji može povisiti granicu razvlačenja efektom precipitacije. Segregacije fosfora su nepoželjne u čelicima jer predstavljaju štetnu nehomogenost strukture.

Tablica 7. Utjecaj sadržaja fosfora na mehanička svojstva čelika [8]

Sadržaj fosfora, %	Granica razvlačenja, N/mm ²	Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Tvrdoća, HB	Kontrakcija, %	Žilavost, J/cm ²
0	280	340	1000	30	340
0,2	360	410	1250	30	200
0,4	440	480	1550	25	0

Kisik

Kod niskougličnih čelika često je povišen maseni udio kiska što dovodi do pojave oksida željeza (FeO). Prisutnost oksida FeO, kao i sulfida FeS, dovodi do pojave „crvenog loma“. Kisik povećava sklonost starenju čelika. Ovisno o raspodjeli i sadržaju kisik može utjecati i na smanjenje žilavosti čelika. Kisik se iz taline može ukloniti dezoksidacijom čelika pri čemu nastaje Al₂O₃ i SiO₂.

Sumpor

U zavisnosti od načina proizvodnje u čelicima uvijek ostaje 0,005 do 0,006%. Sumpor je glavni element odgovoran za pojavu segregacija (sulfida) u čeliku. Sulfid željeza (FeS) uzrokuje pojavu „crvenog“ i „bijelog loma“ (nastaje pri početnim temperaturama valjanja ili kovanja). Budući da talište sulfida FeS iznosi 985°C, a topla prerada se provodi na temperaturi iznad 1000 °C, rastaljivanjem FeS dolazi do pojave „crvenog loma“ i smanjenja žilavosti. Zbog toga se čelici s višim sadržajem sumpora ne mogu deformirati u toplom stanju. Štetan utjecaj FeS uklanja se dodatkom mangana i stvaranjem sulfida MnS koji ima znatno višu temperaturu taljenja (1610 °C) od temperature prerade čelika.

Sumpor se namjerno dodaje u slučaju da su namijenjeni obradi odvajanjem čestica na automatima. Razlog dodavanja sumpora takvim čelicima je taj što on snižava trenje između obratka i alatne oštrice te omogućava lakše lomljenje strugotine.

Vodik

Vodik predstavlja nepoželjan (štetan) element u čeliku. Vodik pripada skupini elemenata s najmanjim promjerom atoma pa je brzina difuzije vodika u željezu vrlo visoka, tj. viša od brzine difuzije ugljika. Štetnost vodika se očituje u tome što on snižava žilavost, a da pri tome ne raste čvrstoća i granica razvlačenja. Ukoliko prodre u čelik vodik dovodi do razugljičenja površine čeličnog proizvoda, te razara stabilne karbide (npr. Fe_3C stvarajući metan CH_4) i metalnu vezu između kristalnih zrna.

5. KOROZIJA

5.1. Općenito o koroziji

Korozija je (spontano) razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija. Dolazi od grčke riječi „*corrodere*“ što znači nagristi. Korozija je danas jedan od važnih čimbenika svjetske krize materijala i energije i uzrok je znatnih gubitaka u gospodarstvu svake zemlje. Budući da je područje korozije vrlo široko i raznovrsno, postoji više podjela korozije i to:

1. prema mehanizmu djelovanja (kemijska i elektrokemijska),
2. prema izgledu korozijskog napada (jednolika i lokalizirana),
3. prema korozivnim okolinama (atmosferska korozija, korozija na tlu, korozija u elektrolitima i neelektrolitima),
4. posebni oblici korozije (kontaktna korozija, korozija u procjepu...).

Na brzinu i vrstu korozije utječu:

unutrašnji faktori:

- stanje materijala i naprezanja,
- stanje površine- hrapavost, talozi i dr.,
- sastav materijala i ujednačenost sastava po presjeku,
- čistoća i udio uključaka u materijalu,
- mikrostruktura- stanje i strukturna anizotropija,
- zaostala naprezanja.

vanjski faktori:

- vrsta medija i njegov sastav,
- prisutnost bakterija u mediju,
- promjena sastava medija u radnim uvjetima,
- temperatura okolnog medija i promjene temperature,
- tlak okolnog medija i promjene tlaka,
- brzina i smjer strujanja medija ili dijela u mediju,
- sadržaj kisika u mediju i odzračivanje,

- oblik dijela i primjenjeni postupci oblikovanja i spajanja,
- vrste spojeva, zaostala naprezanja,
- vrste materijala u dodiru,
- mehanička i tribološka naprezanja,
- djelovanje elektromagnetskog polja i radioaktivnog zračenja i sl.

5.2. Korozijska s obzirom na mehanizam djelovanja

Kemijska korozijska nastaje djelovanjem agresivnog korozijskog elementa na površinu materijala, a zbiva se u neelektrolitima, tj. u medijima koji ne provode električnu struju. Kemijska korozijska prepoznaje se po vanjskoj promjeni izgleda i pojavi opne na površini materijala.

Elektrokemijska korozijska je korozijska koja nastaje u metalima i legurama u dodiru s elektrolitima kao što su voda i vodene otopine, kiseline, lužina i soli pri čemu se odvijaju reakcije oksidacije i redukcije.

5.3. Pojavni oblici korozijske kod metalnih materijala

Određivanje vrste korozijske je vrlo bitno, jer nam pomaže u rješavanju problema. Prema geometrijskom obliku korozijskog razaranja, korozijsku dijelimo na:

1. opća korozijska,
2. lokalna korozijska,
3. selektivna korozijska,
4. interkristalna korozijska.

5.3.1. Opća korozija

Opća korozija [Slika 12.] se karakterizira kao korozija s ravnomjernim smanjenjem debljine metala, kada je čitava površina materijala izložena agresivnoj sredini pod približno jednakim uvjetima s obzirom na unutrašnje i vanjske faktore. Brzina odvijanja ove korozije se predstavlja dubinom prodiranja procesa korozije u metal u određenom vremenskom periodu.



Slika 12. Primjer opće korozije vanjskih stijenki spremnika [10]

5.3.2. Lokalna korozija

Lokalna korozija nastaje na mikroskopskoj razini (najčešće na granici zrna materijala) i djeluje ubrzano na samo malom lokalnom području. Zrna materijala predstavljaju katodu, a granice zrna anodu. Lokalna korozija dijeli se na:

- pjegastu koroziju
- rupičastu ili pitting koroziju
- potpovršinsku koroziju
- kontaktanu koroziju

Pjegasta korozija je najraširenija pojava lokalne korozije i napada samo neke djelove izložene površine materijala. Pjegasta korozija je opasnija od opće korozije, jer je korozijski proces teže kontrolirati.

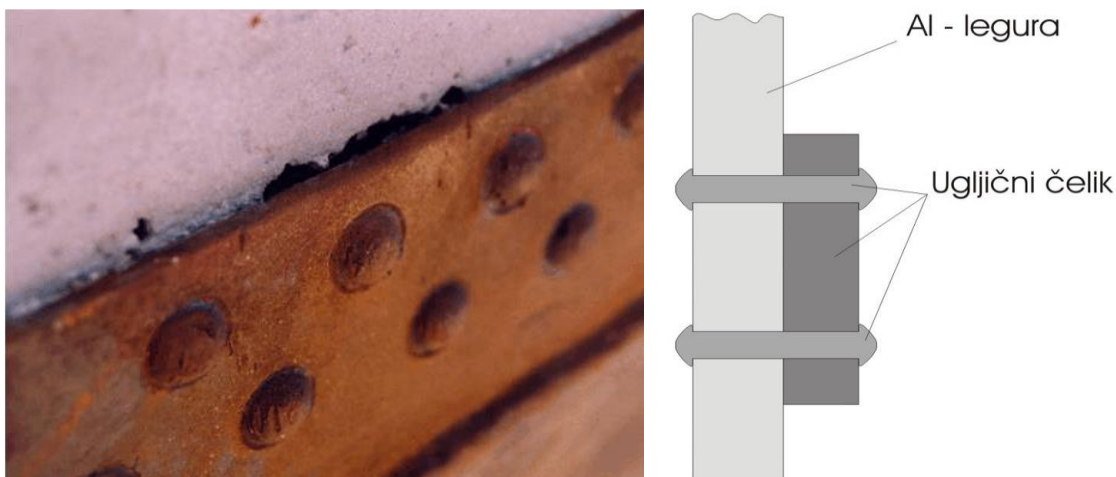
Rupičasta (pitting) korozija je korozija kod koje nastaju rupičasta oštećenja, tj. šupljine koje se protežu od površine u metal. Brzina ove korozije se povećava sa rastom temperature. Rupičasta korozija [Slika 13.] nastaje kada postoji velika katodna i mala anodna površina, zbog čega je jačina napada anode velika.



Slika 13. Primjer točkaste korozije u zavaru [10]

Potpovršinska korozija je najraširenija na valjanim metalima u dodiru s morskom vodom i s kiselinama. Na površini materijala nastaju mjehuri, jer se u njegovoj unutrašnjosti gomilaju čvrsti korozijski produkti kojima je volumen veći od volumena uništenog metala. Većina korozijskih oštećenja nehrđajućih čelika nastaje u neutralnim do kiselim otopinama koje sadrže ione koji sadrže klor.

Kontaktna korozija se dijeli na galvansku koroziju (bimetalna) i na koroziju u procjepu. Galvanska korozija [Slika 14.] nastaje kada su dva različita metala u kontaktu, dok korozija u procjepu nastaje kod kontakta istovrsnih metala.

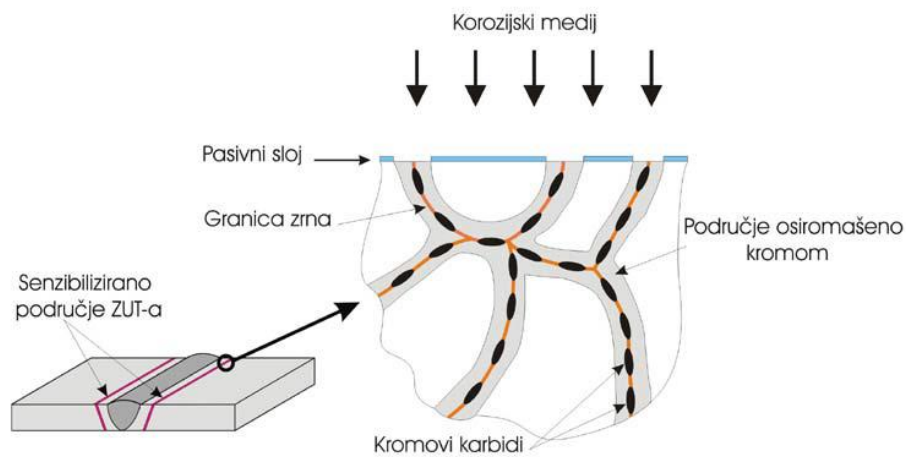


Slika 14. Primjer galvanske korozije na trupu broda [10]

Selektivna korozija je korozija kod koje dolazi do selektivnog rastvaranja manje plemenite komponente ili faze legure. Uzrok za nastajanje ove vrste korozije je razlika u korozijskom potencijalu legura. Plemenitiji element ponaša se kao katoda galvanskog članka, dok manje plemeniti postaje nezaštićena anoda koja korodira.

Interkristalna korozija [Slika 15.] je lokalna korozija koja razara materijal na granicama zrna (granula, kristala) šireći se na taj način u dubinu. Ova vrsta korozije najopasniji je oblik korozije jer može dugo ostati neprimjećena, a naglo dovodi do smanjenja čvrstoće i žilavosti materijala, te loma ili čak raspada materijala u zrna.

Ovoj vrsti korozije su podložni austenitni i feritni nehrđajući čelici, dok martenzitni nisu. Duljim držanjem nehrđajućih austenitnih čelika između 550°C do 800°C dolazi do senzibilizacije austenita, tj. do stvaranja uvjeta za formiranje Cr_{23}C_6 karbida po granicama zrna prilikom ohlađivanja iz tog temperaturnog intervala. Ako je %C previsok, a brzina ohlađivanja preniska, tada se stvaraju i izlučuju Cr- karbidi, tj. pojavljuje se druga faza – karbid, a istovremeno se osiromašuju područja uz granice zrna na Cr, nakon čega ta granična područja više ne ispunjavaju nužne uvjete otpornosti na koroziju.



Slika 15. Primjer interkristalne korozije u području zavarenog spoja Cr-Ni čelika [10]

5.4. Načini zaštite od korozije

Postoji više načina zaštite od korozije, najčešće korišteni su:

- isključivanje uzroka korozije: elektrolita, naprezanja, dodir različitih materijala i sl.;
- utjecaj na medij dodatkom stabilizatora, inhibitora i sl.;
- drukčije konstrukcijsko oblikovanje;
- **primjena materijala otpornog na koroziju;**
- primjena zaštitnih prevlaka i platiranja;
- primjena katodne i anodne zaštite.

6. POSTAVKA ZADATKA

U ovome završnom radu opisani su nehrđajući čelici, te njihova mehanička svojstva. Nakon teorijskog dijela, provest će se eksperimentalni dio u kojem će biti provedeno ispitivanje vlačne čvrstoće, ispitivanje tvrdoće i utvrđivanje kemijskog sastava. Odabrani materijal je X5 CrNi 18-10.

Ispitivanja su rađena u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu.

7. EKSPERIMENTALNI DIO

7.1. Opis opreme

7.1.1. Analiza kemijskog sastava

Ispitivanje kemijskog sastava materijala vrši se na visoko kvalitetnom spektroskopu ARUN Polyspek Model M [Slika 16.] , koji radi na principu optičke emisijske spektrometrije.



Slika 16. Spektroskop ARUN Polyspek Model M

7.1.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće

Ispitivanje vlačne čvrstoće materijala izvodi se na kidalici Shimadzu AG-X [Slika 17.], koja je računalom upravljana, te omogućava provođenje i zapisivanje rezultata u elektronskom obliku kao i dobivanje Hookov-a dijagrama na temelju dobivenih rezultata ispitivanja materijala. Na kidalici je moguće vršiti ispitivanje materijala statički vlačnim pokusom, statički tlačnim pokusom te savijanjem. Mjerno područje ove kidalice je do 100 kN.



Slika 17. Kidalica Shimadzu AG-X

7.1.3. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće izvodi se na tvrdomjeru Brinell, Vickers [Slika 18.]. Ispitivanje tvrdoće po Brinell-u spada u grupu ispitivanja materijala bez razaranja (oštećenja površine su neznatna). To je postupak ustiskivanja gdje se na površinu ispitivanog materijala utiskuje kuglica od kaljenog čelika promjera d . Sila utiskivanja određuje se prema predviđenoj tvrdoći materijala.

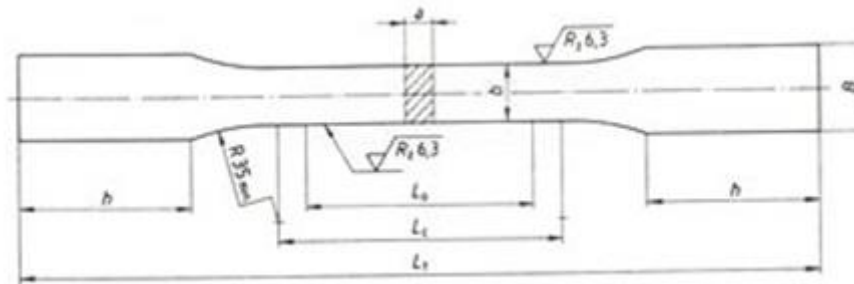


Slika 18. Tvrdomjer Brinell, Vickers

7.2. Ispitivanje austenitnog nehrđajućeg čelika X5 CrNi 18-10

7.2.1. Opis materijala

Epruvete na kojima će se vršiti ispitivanje izrađene su prema standardu DIN 50-125 [Slika 19.]. Dimenzije izrađenih epruveta prikazane su u tablici 8. Izgled gotovih epruveta prikazan je na slici 20. Materijal od kojeg su izrađene prikazane epruvete je austenitni nehrđajući čelik X5 CrNi 18-10.



Slika 19. Dimenzije epruvete prema standardu DIN 50-125

- a- debljina epruvete [mm],
- b- širina epruvete [mm],
- B- širina glave epruvete [$\sim 1,2b + 3\text{mm}$],
- h- visina glave epruvete [$\sim 2b + 10\text{mm}$],
- L_0 - početna mjerna duljina epruvete [mm].
- L_c - ispitna duljina epruvete [mm],
- L_t - ukupna duljina epruvete [mm].

Tablica 8. Dimenzije ispitnih epruveta prema standardu DIN 50-125

a	b	L_0	B min.	H min.	L_c min.	L_t min.
3	8	30	12	26	38	115



Slika 20. Ispitne epruvete

7.2.2. Rezultati analize kemijskog sastava

Ispitivanje kemijskog sastava izvršeno je na spektroskopu ARUN Polyspek Model M, a rezultati koji su dobiveni ovom analizom prikazani su u tablici 9.

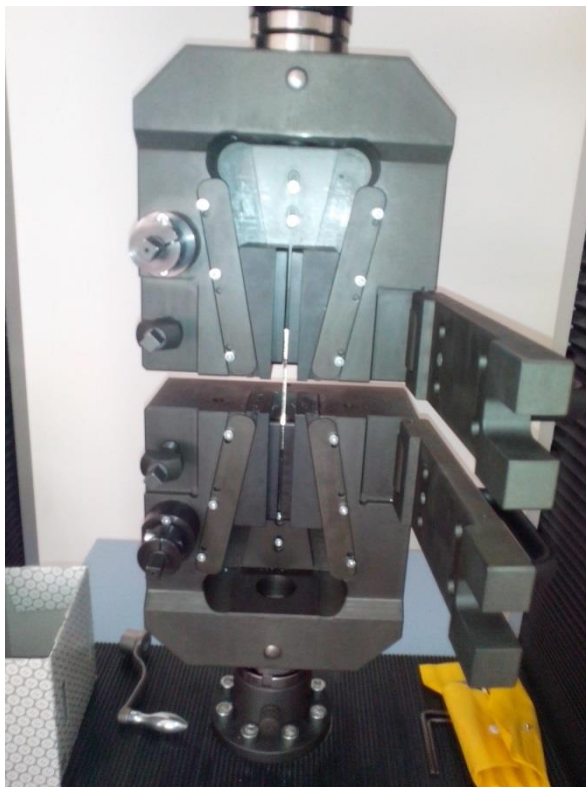
Tablica 9. Kemijski sastav ispitivanog materijala

	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Al	%Mo
Utvrđeno	0,031	0,714	1,08	0,051	0,012	18,12	7,54	<0,001	0,154

7.2.3. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

Vlačno ispitivanje je postupak ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na kidalici, kojim se utvrđuju glavna svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala, ali i njegovu deformabilnost. Na kidalici se direktno mjeri čvrstoća materijala, produljenje ispitnog uzorka i suženje poprečnog presjeka. Vlačna čvrstoća je omjer maksimalne sile i površine poprečnog presjeka epruvete, a granica razvlačenja je omjer sile elastičnosti i površine poprečnog presjeka epruvete.

Ispitivanje se vrši stavljanjem i stezanjem ispitne epruvete u čeljusti kidalice [Slika 21.]. Nakon toga povećava se vlačna sila koja epruvetu izdužuje, te na kraju epruvetu dovodi do puknuća [Slika 22.], [Slika 23.].



Slika 21. Epruveta u steznim čeljustima kidalice



Slika 22. Epruveta nakon loma



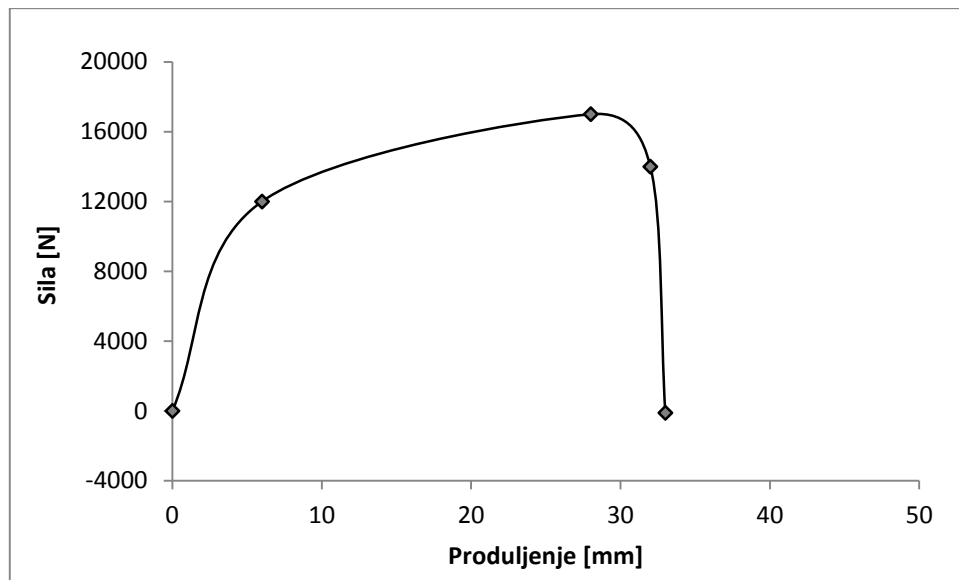
Slika 23. Epruvete nakon vlačnog ispitivanja

Ispitivanje vlačne čvrstoće izvršeno je na pet ispitnih epruveta, a rezultati mehaničkih svojstava prikazani su u tablici 10.

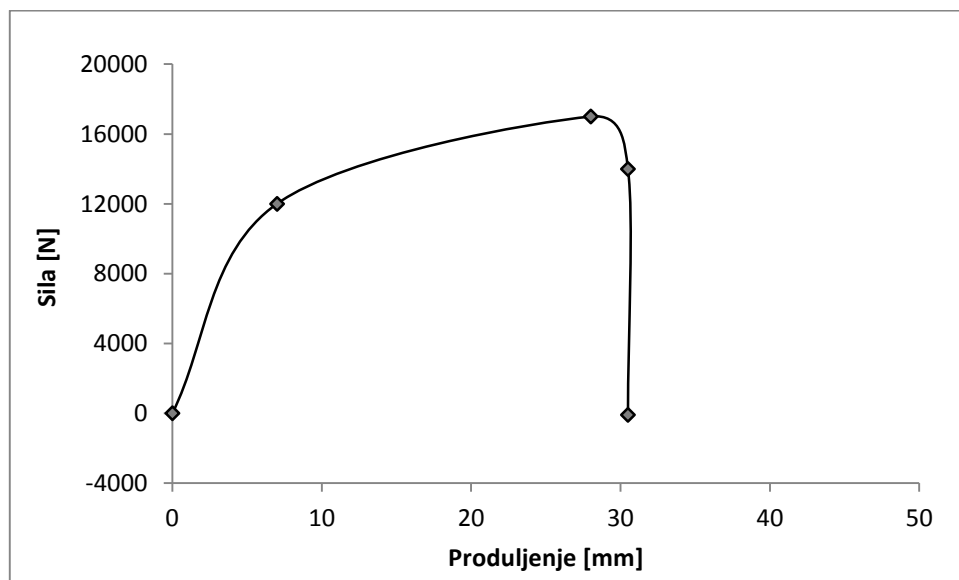
Tablica 10. Mehanička svojstva ispitivanih epruveta

Značajke ispitivanja	Granica razvlačenja R_e [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća R_m [N/mm ²]	Izduženje A [%]
1	491,245	715,864	28,785
2	484,607	718,710	27,924
3	486,887	718,372	28,864
4	475,280	715,729	29,140
5	485,928	716,763	27,834

Pomoću dobivenih parametara može se za svaku epruvetu nacrtati dijagram sila/produljenje. U nastavku su prikazana dva dijagrama i to za navjeće [Slika24.] i najmanje [Slika 25.] produljenje.



Slika 24. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 4



Slika 25. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 5

7.2.4. Rezultati ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće prema Brinell-ovoj metodi vrši se utiskivanjem kaljene kuglice određenog promjera (ϕ 2,5mm) u ispitni uzorak. Na epruveti nakon ovog ispitivanja ostaje udubljenje, što je prikazano na slici 26. Vrijeme utiskivanja je 30 sekundi. Dobivene vrijednosti nakon ovog ispitivanja prikazane su u tablici 11.



Slika 26. Izgled epruvete nakon ispitivanja tvrdoće po Brinell-u

Tablica 11. Tvrdoća ispitivanog uzorka

Epruveta	Tvrdoća HB
1	188,3
2	190,1
3	182,1
4	190,1
5	190,1

8. ANALIZA REZULTATA

Kemijski sastav ispitnog uzorka pokazuje nam da u ispitnom materijalu postoji dovoljan udio kroma i nikla kako bi materijal bio korozijski postojan.

Promatrajući rezultate dobivene ispitivanjem vlačne čvrstoće, primjećujemo da je vlačna čvrstoća ispitivanoga materijala vrlo visoka, tj. bliža je gornjoj granici. Vrijednosti vlačne čvrstoće za austenitne čelike su od 520 N/mm² do 760 N/mm². Istezanje kod maksimalne sile je nešto manje nego što je uobičajeno za austenitne nehrđajuće čelike.

Tvrdoća ispitivanog materijala je veća od uobičajenih vrijednosti kod austenitnih čelika, što je rezultat nešto višeg sadržaja ugljika u ispitnom materijalu.

9. ZAKLJUČAK

Nehrđajući čelici ili korozijski postojani čelici nalaze primjenu u gotovo svim područjima ljudskog djelovanja (prehrambena, farmaceutska, kemijska i petrokemijska industrija, u građevinarstvu, strojarstvu, brodogradnji, medicini, itd.), a široka primjena omogućena je time što nehrđajući čelici uz zadovoljavanje nekih drugih (mehaničkih, toplinskih i dr.) svojstava osiguravaju korozijsku postojanost konstrukcije.

Pojam „korozijski postojani“ ne znači da ova vrsta materijala ima apsolutnu zaštitu od korozijskih oštećenja. Upravo suprotno, u određenim uvjetima oni postaju vrlo skloni lokalnim korozijskim oštećenjima vezanim uz narušavanje homogenosti pasivnog filma koromovih oksida koji se nalazi na površini materijala i koji je glavna prepreka pojavi korozije.

U praksi je dokazano da se pravilnim odabirom materijala i oblika konstrukcije opasnosti od korozijskih oštećenja kod nehrđajućih čelika znatno umanjuju, te se tako dobiva konstrukcija sa visokom otpornošću na korozijska oštećenja, visoke čvrstoće, male mase i niskih troškova.

U eksperimentalnom dijelu izvršena su ispitivanja mehaničkih svojstava austenitnog nehrđajućeg čelika, kao i kemijska analiza. Vlačnim ispitivanjem i ispitivanjem tvrdoće je utvrđeno da austenitni nehrđajući čelik posjeduje dobra mehanička svojstva (vlačna čvrstoća, žilavost i duktilnost). Kemijskom analizom dokazano je da austenitni nehrđajući čelici posjeduju povišeni sadržaj kroma i nikla, što im osigurava dobru korozijsku postojanost. Upravo zbog ovakvih svojstava, austenitni nehrđajući čelik ima vrlo široku primjenu iako je skuplji od feritnih i martenzitnih nehrđajućih čelika.

LITERATURA

- [1] http://hr.wikipedia.org/wiki/Nehr%C4%91aju%C4%87i_%C4%8Delik
- [2] Tomislav Filetin, Franjo Kovačiček, Janez Indof : Svojstva i primjena materijala
- [3] http://www.bssa.org.uk/about_stainless_steel.php?id=31
- [4] <http://www.estainlesssteel.com/historyofstainlesssteel.shtml>
- [5] <http://www.museumsinthesea.com/>
- [6] <http://www.acroni.si/en/?subpageid=3>
- [7] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Slavonski Brod 1998.
- [8] Kožuh, S.: Skripta – Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu, Metarulški fakultet, Sisak, 2010.
- [9] <http://pwatlas.mt.umist.ac.uk/internetmicroscope/micrographs/microstructures/more-metals/steel/steel-micrographs/stainless-steel/martensite.html>
- [10] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1333523750-0-im6_korozija_12.pdf
- [11] <http://cmk.vuka.hr/hr/ispitivanje-materijala/>
- [12] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Kidalica>

PRILOZI

Prilog 1. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava ispitnog materijala

	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	
	IZVJEŠĆE / REPORT	

LABORATORIJ ZA MATERIJALE I TOPLINSKU OBRADU LABORATORY FOR MATERIAL TESTING AND HEAT TREATMENT

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING			
Radni nalog Work order	-	Naručilac Purchaser	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža Drawing No.	-	Narudžba br. Order No.	Završni rad
Materijal Material	Č.4580	Količina Quantity	-
Norma Standard	-	Tehnički propis Technical Specifications	-
Broj šarže Cast No.	-	Broj probe Test piece No.	-
Objekat Plant	-	Toplinska obrada Heat treatment	-
Predmet Object	Probna epruveta		

KEMIJSKI SASTAV / CHEMICAL ANALYSIS										
Br. Uzorka Sample No.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Al %	Mo %	
Zahtijevano In accordance										
Utvrđeno Realized	0,031	0,714	1,08	0,051	0,012	18,12	7,54	<0,001	0,154	

Primjedba: Remark: Izrada završnog rada studenta Maria Barišića.
--

Datum/Date: 22-05-2015	Ispitao/Examined: Ana Fudurić, bacc.mech.eng. Tihana Kostadin, mag.eng.mech.	Odobrio/Approved: Marijan Brozović, dipl.ing	Nadzor/Supervision:
---------------------------	--	---	---------------------

Prilog 2. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava za epruvetu 1

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručilac	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	
Materijal	Č.4580	Količina	
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	3x8	Toplinska obrada	
Predmet	Završni rad - Mario Barišić	Brzina ispitivanja	30 N/sec
Datum ispitivanja	27.05.2015.	Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1 _ 1	17180,7	715,864	28,7859	28,7859

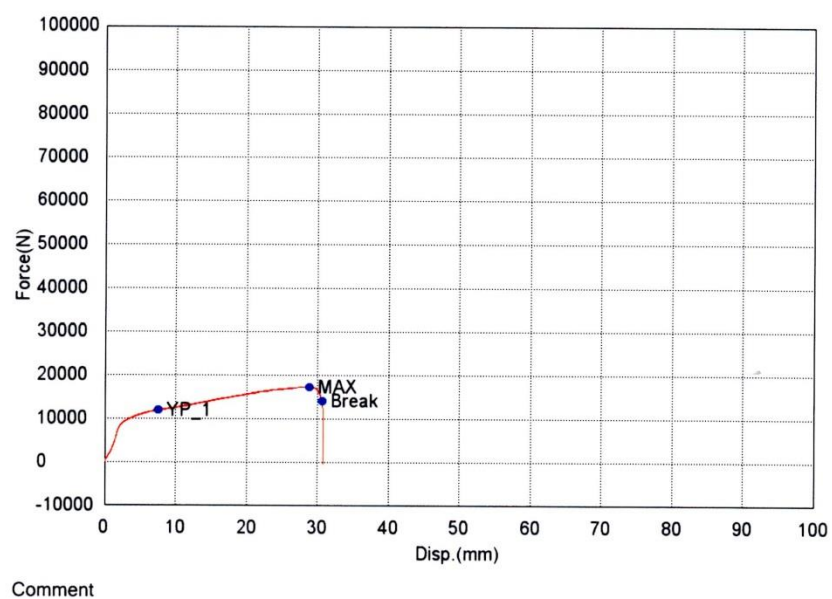
Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
1 _ 1	13994,9	583,120	30,6590	30,6590

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
1 _ 1	11789,9	491,245	7,57290	7,57290

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
1 _ 1	7,57290	-.-	-.-	-.-

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
1 _ 1	-.-

Prilog 3. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 1



Prilog 4. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava za epruvetu 2

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	
Materijal	Č.4580	Količina	
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	3x8	Toplinska obrada	
Predmet	Završni rad - Mario Barišić	Brzina ispitivanja	30 N/sec
Datum ispitivanja	27.05.2015.	Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
2_2	17248,8	718,701	27,9240	27,9240

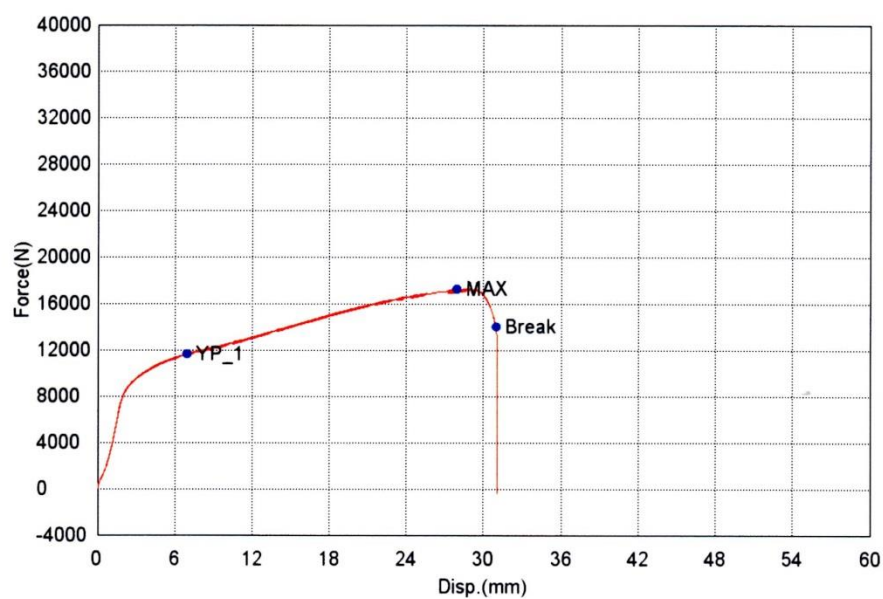
Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
2_2	13975,3	582,304	30,9451	30,9451

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
2_2	11630,6	484,607	6,90850	6,90850

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
2_2	6,90850	--	--	--

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
2_2	--

Prilog 5. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 2



Comment

Prilog 6. Rezultati ispitivanja mehančkih svojstava za epruvetu 3

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručilac	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	
Materijal	Č.4580	Količina	
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	3x8	Toplinska obrada	
Predmet	Završni rad - Mario Barišić	Brzina ispitivanja	30 N/sec
Datum ispitivanja	27.05.2015.	Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
3_3	17240,9	718,372	28,8642	28,8642

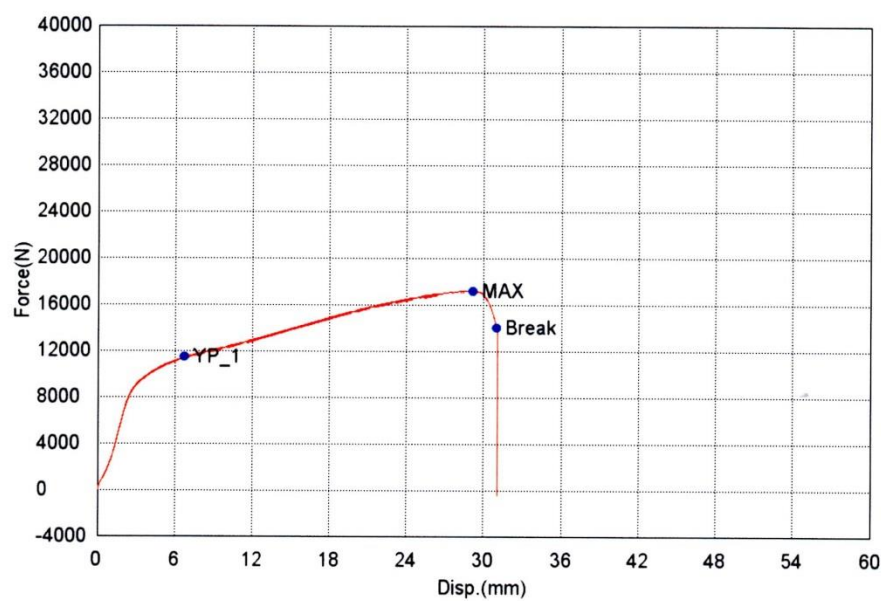
Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
3_3	14065,0	586,040	30,7109	30,7109

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
3_3	11685,3	486,887	6,92652	6,92652

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
3_3	6,92652	-.-	-.-	-.-

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
3_3	-.-

Prilog 7. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 3



Comment

Prilog 8. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava za epruvetu 4

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručilac	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	
Materijal	Č.4580	Količina	
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	3x8	Toplinska obrada	
Predmet	Završni rad - Mario barišić	Brzina ispitivanja	30 N/sec
Datum ispitivanja	27.05.2015.	Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
4_4	17177,5	715,729	29,1407	29,1407

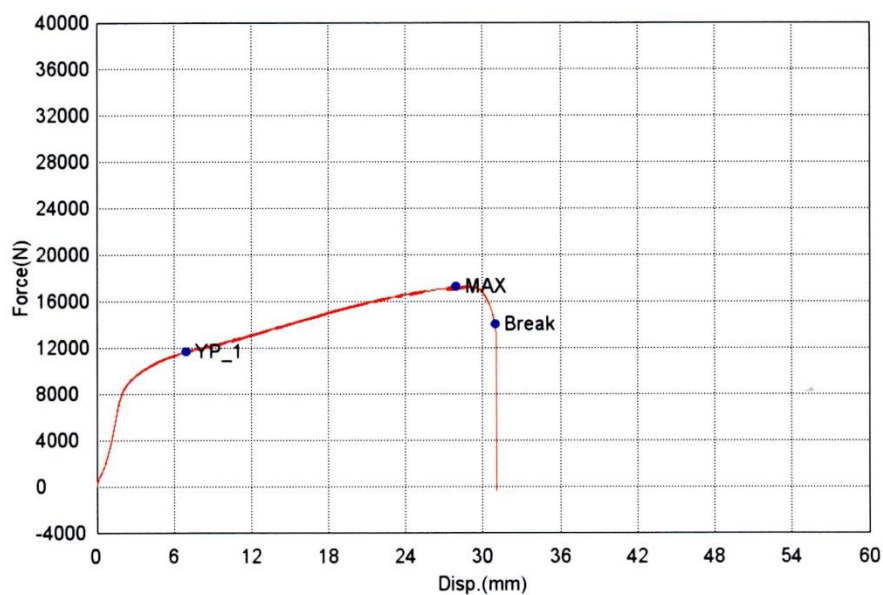
Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
4_4	13973,5	582,230	30,9646	30,9646

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
4_4	11406,7	475,280	6,73606	6,73606

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
4_4	6,73606	-.-	-.-	-.-

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
4_4	-.-

Prilog 9. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 4



Comment

Prilog 10. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava za epruvetu 5

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	
Materijal	Č.4580	Količina	
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	3x8	Toplinska obrada	
Predmet	Završni rad - Mario Barišić	Brzina ispitivanja	30 N/sec
Datum ispitivanja	27.05.2015.	Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
5_5	17202,3	716,763	27,8342	27,8342

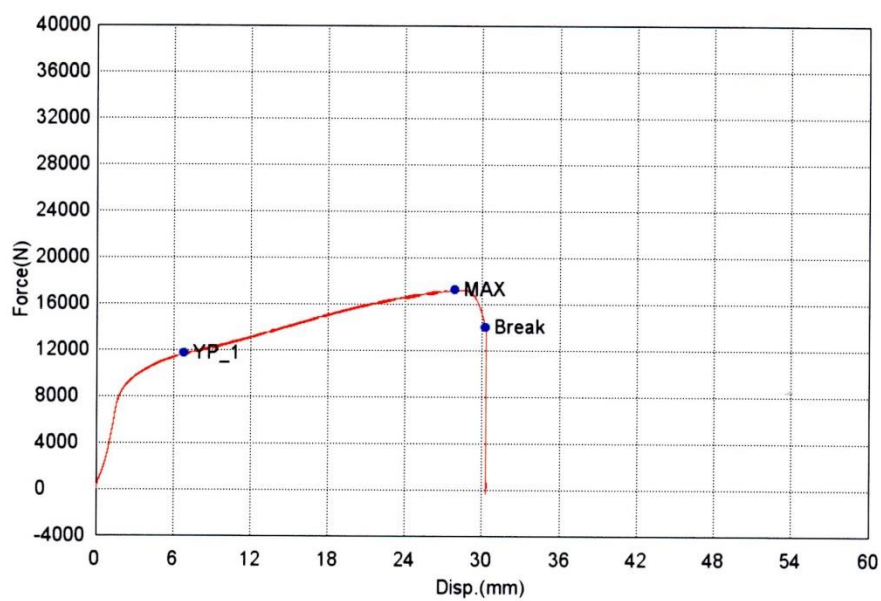
Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
5_5	14015,7	583,987	30,2111	30,2111

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
5_5	11662,3	485,928	6,79469	6,79469

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
5_5	6,79469	--	--	--

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
5_5	--

Prilog 11. Dijagram sila/produljenje za epruvetu 5



Comment

Prilog 12. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	
	IZVJEŠĆE / REPORT	Broj/No: LMT.2015.A.042

LABORATORIJ ZA MATERIJALE I TOPLINSKU OBRADU
 LABORATORY FOR MATERIALS TESTING AND HEAT TREATMENT

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING

Radni nalog Work order	-	Naručilac Purchaser	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža Drawing No.	-	Narudžba br. Order No.	Završni rad – Mario Barišić
Materijal Material	Č.4580	Količina Quantity	5xvlačna čvrstoća
Norma Standard	-	Tehnički propis Technical Specifications	-
Broj šarže Cast No.	-	Broj probe Test piece No.	-
Dimenzija Dimension	-	Toplinska obrada Heat treatment	-
Predmet Object	Probne epruvete		

MEHANIČKA SVOJSTVA / MECHANICAL PROPERTIES

Značajke ispitivanja Test marks	Dimenzija epruvete [mm] Dimension test piece	Granica razvlačenja Re [N/mm ²] Yield strenght	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²] Tensile strenght	Izduženje A [%] Elongation	Kontrakcija Z [%] Contraction	Udarni rad loma KU [J] 20°C Impact energy	Tvrdoća HB Hardness value	Savijanje Bending
Zahtjevano In accordance								
Utvrđeno Realized 1		491,245	715,864	28,785			188,3 190,1 182,1 190,1 190,1 190,1	
Utvrđeno Realized 2		484,607	718,701	27,924				
Utvrđeno Realized 3		486,887	718,372	28,864				
Utvrđeno Realized 4		475,280	715,729	29,140				
Utvrđeno Realized 5		485,928	716,763	27,834				

Primjedba:
Remark:

Ispitivanje vlačne čvrstoće za potrebe izrade završnog rada studenta Maria Barišića.

Datum/Date: 27-05-2015	Ispitao/Examined: Ana Fudurić, bacc.ing.mech.	Odobrio/Approved: Marijan Brozović, dipl.ing.	Nadzor/Supervision:
---------------------------	--	--	---------------------