

Nehrđajući čelik - zavarivanje i naknadne površinske obrade

Lovrenčić, Leo

Undergraduate thesis / Završni rad

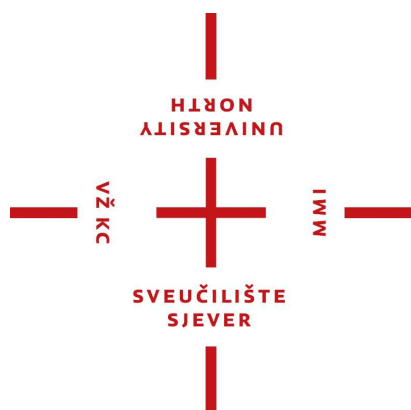
2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:165015>

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

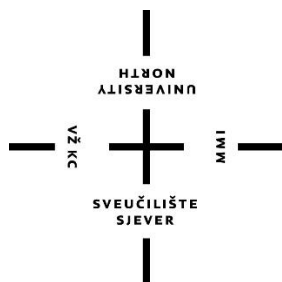
Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-26**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 309/PS/2019

**Nehrđajući čelik – zavarivanje i naknadne površinske
obrade**

Leo Lovrenčić, 1529/336

Varaždin, rujan 2019. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Leo Lovrenčić

MATIČNI BROJ 1529/336

DATUM 23.09.2019.

KOLEGIJ Tehnologija III

NASLOV RADA Nehrđajući čelik - zavarivanje i naknadne površinske obrade

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Stainless steel - welding and post-weld surface treatment

MENTOR Marko Horvat, dipl. ing.

ZVANJE predavač

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. dr. sc. Zlatko Botak, viši predavač
2. Marko Horvat, dipl.ing., predavač
3. Katarina Pisačić, dipl.ing., viši predavač
4. Veljko Kondić, mag. ing. mech., predavač
- 5.

Zadatak završnog rada

BROJ 309/PS/2019

OPIS

U Završnom radu je potrebno obraditi slijedeća područja:

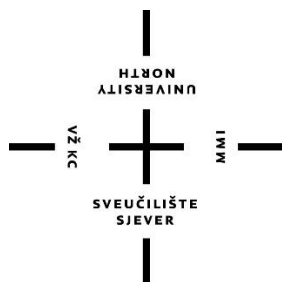
- prikazati povijest, razvoj, ulogu i sistematizaciju nehrđajućih čelika
- prikazati osnove proizvodnje (sirovine, postupci) nehrđajućih čelika
- opisati i objasniti osnovne korozijske procese povezane s ovom grupom materijala
- detaljno prikazati i opisati osnovne tehnološke procese obrade nehrđajućih čelika uz naglasak na zavarivanje i naknadnu obradu (osiguranje korozijske postojanosti)
- u zaključku dati osvrt na temu Završnog rada

ZADATAK URUČEN

24.09.2019



POTPIS MENTORA



Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 309/PS/2019

Nehrđajući čelik – zavarivanje i naknadne površinske obrade

Student

Leo Lovrenčić, 1529/336

Mentor

Marko Horvat, dipl. ing., pred.

Varaždin, rujan 2019. godine

Sažetak

U ovom završnom radu je opisana povijest čelika i razvoj nehrđajućih čelika. Navedeni su i objašnjeni postupci proizvodnje nehrđajućih čelika. Objašnjene su vrste korozija koje napadaju nehrđajuće čelike. Zatim su navedene i objašnjene vrste nehrđajućih čelika i na kraju je opisano zavarivanje i naknadne obrade nehrđajućih čelika.

Ključne riječi: nehrđajući čelik, proizvodnja nehrđajućih čelika, korozija, zavarivanje nehrđajućih čelika, naknadne obrade nehrđajućih čelika

Summary

This undergraduate work describes the history of steel and the development of stainless steels. Then the production processes are listed and explained. The types of corrosion that attack stainless steels are also listed and explained. Then, the types of stainless steels are listed and explained, and at the end is explained welding and post welding treatments for stainless steels.

Key words: stainless steel, production of stainless steel, corrosion, welding of stainless steel, post welding treatments for stainless steel

Popis korištenih kratica

AOD	Argon Oxygen Decarburization Postupak odugljičenja taline u konvertoru uporabom kisika i argona
AOD-VCR	Argon Oxygen Decarburization – Vacuum Converter Refiner AOD postupak s vakuumiranjem u završnoj fazi
BCC	Body Centered Cubic Prostorno centrirana kubna rešetka
CLU	Creusot-Loire-Uddeholm Inačica postupka proizvodnje nehrđajućeg čelika u konvertoru
FCC	Face Centered Cubic Plošno centrirana kubna rešetka
HCP	Hexagonal close packed Gusto slagana heksagonalna rešetka
K-BOP	Kombiniertes Basic Oxygen Process Kisikov konvertor s dodatkom kisika upuhivanjem u talinu odozgo i odozdo
KCB-S	Krupp Combined Blowing Stainless Modificirani AOD postupak uz kombinirano propuhivanje taline
MRP	Metal Refination Process Inačica postupka proizvodnje nehrđajućeg čelika u konvertoru
MRP-L	Metal Refination Process with Lance MRP postupak uz dodatak kisika kroz koplje
SS-VOD	Strong Stirring – Vacuum Oxygen Decarburization VOD postupak s upuhivanjem argona odozdo
VOD	Vacuum Oxygen Decarburization Postupak odugljičenja taline kisikom pod vakuumom
YAG	Yttrium-aluminium garnet Itrij-aluminijski granat
ZUT	Zona utjecaja topline

Sadržaj

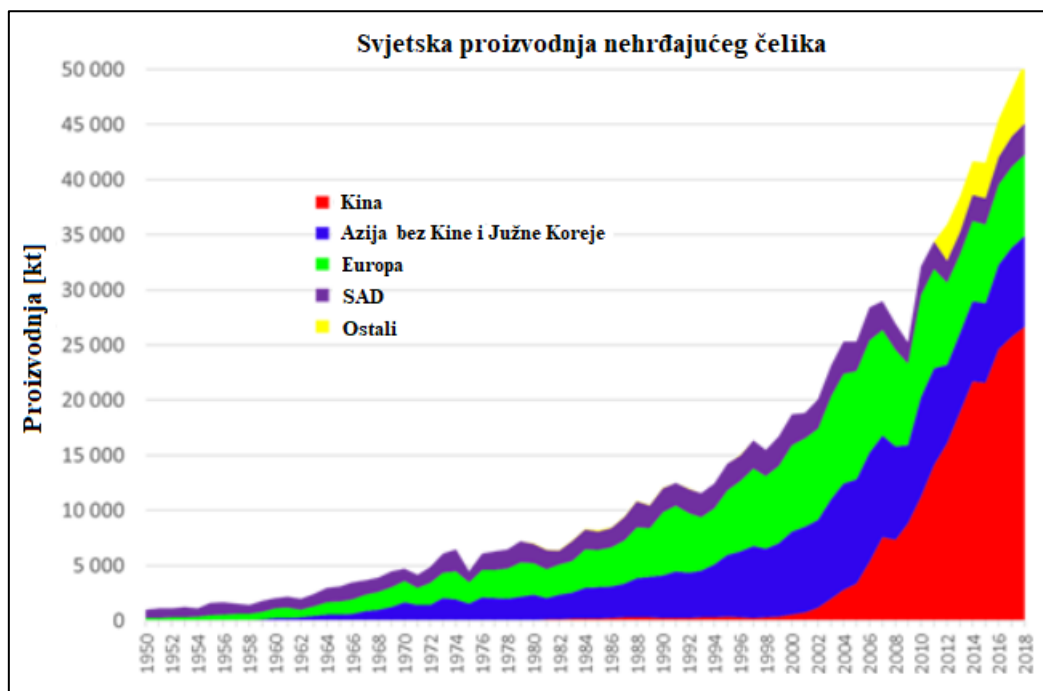
1.	Povijest čelika	1
2.	Proizvodnja nehrđajućih čelika	3
2.1.	Sirovine za proizvodnju nehrđajućih čelika	4
2.2.	AOD postupak	4
2.3.	KCB-S postupak	6
2.4.	K-BOP postupak	7
2.5.	MRP i MRP-L postupak.....	7
2.6.	CLU postupak	8
2.7.	VOD postupak	9
3.	Korozija i posebni oblici korozije	11
3.1.	Podjela korozije	11
3.2.	Kemijska korozija	12
3.3.	Elektrokemijska korozija.....	13
3.4.	Opća korozija.....	14
3.5.	Točkasta ili jamičasta korozija	14
3.6.	Interkristalna korozija	15
3.7.	Napetosna korozija.....	17
3.8.	Korozija u procjepu.....	18
3.9.	Mikrobiološki potaknuta korozija.....	19
3.10.	Erozijska korozija	20
4.	Nehrđajući čelici.....	21
4.1.	Feritni nehrđajući čelici.....	21
4.2.	Austenitni nehrđajući čelici	24
4.3.	Austenitno-feritni (duplex) nehrđajući čelici	27
4.4.	Martenzitni nehrđajući čelici	28
4.5.	Precipitacijski očvršnuti nehrđajući čelici.....	30
5.	Zavarivanje i obrada nehrđajućih čelika	32
5.1.	Zavarivanje nehrđajućih čelika	32
5.1.1.	REL zavarivanje.....	33
5.1.2.	MIG zavarivanje	34
5.1.3.	TIG zavarivanje	37
5.1.4.	Zavarivanje plazmom	39
5.1.5.	Zavarivanje laserom.....	40
5.1.6.	Zavarivanje feritnih nehrđajućih čelika.....	40
5.1.7.	Zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika.....	40
5.1.8.	Zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika.....	41
5.1.9.	Zavarivanje duplex nehrđajućih čelika.....	41
5.2.	Rezanje nehrđajućih čelika	42
5.2.1.	Rezanje plazmom.....	42
5.2.2.	Rezanje laserom	43
5.3.	Naknadna obrada nehrđajućih čelika	43
5.3.1.	Mehanička obrada	44
5.3.2.	Kemijska obrada	45
5.3.3.	Elektrokemijska obrada.....	47

6.	Zaključak.....	48
7.	Literatura.....	49
8.	Popis slika	51
9.	Popis tablica	53

1. Povijest čelika

Čelik je legura željeza i ugljika sa masenim udjelom do 2% ugljika. Čelik je prvi put u tekućem stanju dobiven 1740. godine u posudama od vatrostalnog materijala. Henry Bessemer je 1856. godine izumio jednostavan i jeftin način masovne proizvodnje čelika. Proces se sastojao od propuhivanja rastaljenog sirovog željeza zrakom u konvertoru obloženim vatrostalnim materijalom. Emile i Pierre Martin su 1865. godine u peći s otvorenim ognjištem uspjeli dobiti čelik iz starog željeza. Kod tog procesa je korišten princip predgrijavanja goriva i plinova kojeg je razvio C. W. Siemens, pa se postupak naziva Siemens-Martinov postupak. Za manje od 100 godina nakon što su ti postupci bili izumljeni, svjetska proizvodnja čelika se povećala 1000 puta. Početkom 20. stoljeća se počinje koristiti električna energija za proizvodnju čelika, pa se počinju puštati prve elektrolučne peći u proizvodnju. Količina čelika proizvedenog od 1970. do 1995. godine je veća od količine čelika proizvedenog do 1970. godine. Ukupna proizvodnja čelika u 2004. godini je iznosila oko 1035 Mt, a u 2017. godini oko 1689 Mt. [1, 2]

Iako su se nehrđajući čelici istraživali u Njemačkoj i Francuskoj, njihovo otkriće se pripisuje Harryju Brearleyju iz Engleske. Za vrijeme eksperimentiranja sa čelicima za cijevi pištolja 1913. godine, proizveo je čelik koji je imao udio kroma od 13 do 14% sa relativno visokim udjelom ugljika. Taj čelik nije korodirao kad je bio izložen atmosferi. Glavni učinak legiranja kroma sa željezom je povećanje otpornosti na korodiranje i oksidaciju pri visokim temperaturama. Pasivnost je stanje materijala u kojem pokazuje jako malu kemijsku reakciju i inertnost u korozivnim medijima. Krom daje pasivnost nehrđajućem čeliku. Nehrđajući čelici se baziraju na željezu koje sadrži više od 12% kroma. Ta razina kroma čini ovaj čelik pasivnim stvarajući jako tanak i stabilan sloj kromovog oksida na površini čelika. Brearleyjevo otkriće je dovelo do razvoja „obitelji“ nehrđajućih čelika. Napredak u zavarivanju i proizvodnji čelika 1940-ih i 1960-ih godina je dao poticaj razvoju i primjeni nehrđajućih čelika. Razvojem se zadovoljavaju rastuće potrebe sektora industrije kao što su građevinska, kemijska, rudarska, nuklearna i prehrambena industrija. Krom nije jedini legirajući element koju se koristi za nehrđajuće čelike. Nikal, molibden i bakar povećavaju pasivnost u jako agresivnim uvjetima. Mangan, silicij, aluminij, dušik, sumpor, selenij i titan imaju manji utjecaj na otpornost koroziji, ali mijenjaju mehanička i fizikalna svojstva kao što su zavarljivost i obradljivost. Na svojstva također mogu utjecati topli i hladni rad, toplinske obrade i proces proizvodnje. Primarno svojstvo nehrđajućih čelika je otpornost na koroziju i oksidaciju kod visokih temperatura. Nehrđajući čelici također imaju mnoga druga svojstva koja ih čine svestranim materijalima. [3]



Slika 1: Svjetska proizvodnja nehrđajućeg čelika [4]

2. Proizvodnja nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici su razvijeni početkom 20. stoljeća. Njihova jedinstvena svojstva dovela su do njihove upotrebe u mnogim različitim primjenama. Za izradu nehrđajućih čelika se koriste dupleks i tripleks procesi. Dupleks proces se sastoji od elektrolučne peći i konvertora, a tripleks proces se sastoji od elektrolučne peći, konvertora i vakuumskog postrojenja za završno odugljičenje i rafinaciju. Razvoj AOD procesa je revolucionirao proizvodnju nehrđajućeg čelika. Za ovaj proces su se mogle koristiti jeftinije sirovine i vrijeme proizvodnje je bilo kraće u odnosu na druge proizvodne postupke. Time se smanjila cijena proizvodnje nehrđajućeg čelika i time se drastično povećala njihova primjena. Tijekom godina razvili su se mnogi procesi za proizvodnju nehrđajućih čelika kod kojih su se koristili plinovi za proces odugljičenja, a kod nekih se taj proces odvijao pod vakuumom. Neki od tih postupaka su: KCB-S, K-BOP, MRP, MRP-L, CLU i VOD. [5]

Postupak	Država	Položaj mlaznica	Plinovi za propuhivanje odozdo	Plinovi za upuhivanje odozgo
AOD	Njemačka	Sa strane (bočno)	O ₂ , N ₂ , Ar, CO ₂ , zrak	O ₂ , N ₂ , Ar
AOD-VCR	Japan	Sa strane	O ₂ , N ₂ , Ar	
CLU	Francuska i Belgija	Odozdo	O ₂ , N ₂ , Ar, para	O ₂ , N ₂ , Ar
K-BOP	Japan i Austrija	Odozdo ili sa strane	O ₂ , N ₂ , Ar, ugljikovodici	O ₂ , N ₂ , Ar
KCB-S	Njemačka	Sa strane	O ₂ , N ₂ , Ar	O ₂ , N ₂ , Ar
MRP	Njemačka	Odozdo	O ₂ , N ₂ , Ar	
VOD	Njemačka	Odozdo (mjehanje)	O ₂ , Ar	

Tablica 1: Postupci proizvodnje nehrđajućih čelika [1]

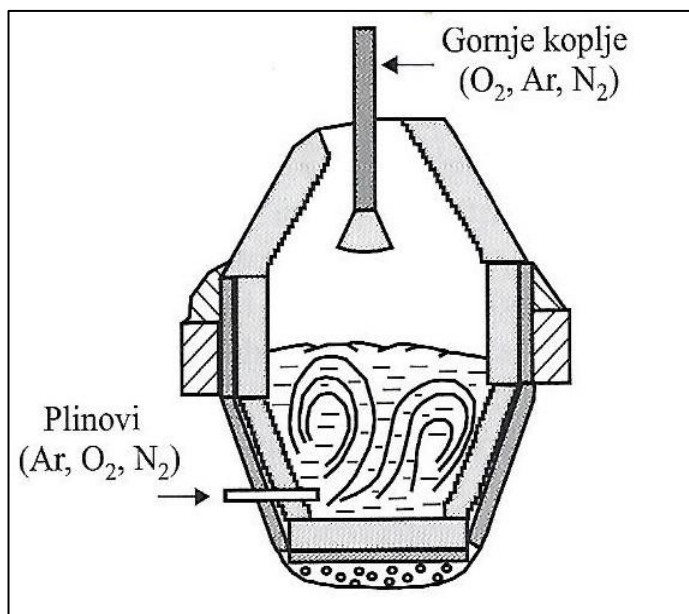
2.1. Sirovine za proizvodnju nehrđajućih čelika

Sirovine korištene za proizvodnju nehrđajućih čelika kod svih procesa se mogu podijeliti u dvije osnovne grupe: nemetalne sirovine i metalne sirovine. Potrebne nemetalne sirovine su: pečeno vapno, dolomitno vapno i kalcijev fluorit (CaF_2). Potrebne metalne sirovine su: nehrđajući čelični otpad, ugljični čelični otpad, različiti legurni elementi i deoksidansi. Najvažniji legirni elementi su: krom, nikal, mangan i silicij. Glavni izvor kroma za nehrđajuće čelike je ferokrom. Nikal je prisutan u značajnim količinama u AISI 200 i 300 seriji nehrđajućih čelika. Nikal je dostupan kao prašak, oksid, briketiran, elektrolitski nikal i feronikal. Mangan je prisutan u značajnim količinama u AISI 200 seriji legura. Mangan je dostupan kao feromangan i elektrolitički mangan. Silicij se koristi u svim postupcima dobivanja nehrđajućih čelika da bi se kemijski smanjio krom koji je prisutan u troski na kraju odugljičenja. Silicij se dodaje u obliku ferosilicija i ferokromsilicija. Potrebno je dodatno dodati silicij da bi se zadovoljile specifikacije većine nehrđajućih čelika. Najčešće korištene sirovine za zadovoljavanje udjela silicija su ferolegure koje obično sadrže od 50% do 75% silicija. Molibden se dodaje samo u neke grupe nehrđajućih čelika. Najčešće se dodaje kao molibdenov oksid u obliku praška ili briketiran i feromolibden. Aluminij je često korišten deoksidator i u tu svrhu se koristi aluminij visoke čistoće. Titan se vrlo često dodaje mnogim grupama nehrđajućih čelika zbog stabilizacije. Najčešće korištene legure titana su 70% Ti - 30% Fe i 90% Ti - 4% V - 5% Al. Cijena finalnog proizvoda najviše ovisi o korištenim sirovinama. U posljednja dva desetljeća su razvijeni programi koji optimiziraju korištenje sirovina čime se smanjuje cijena proizvodnje. [5]

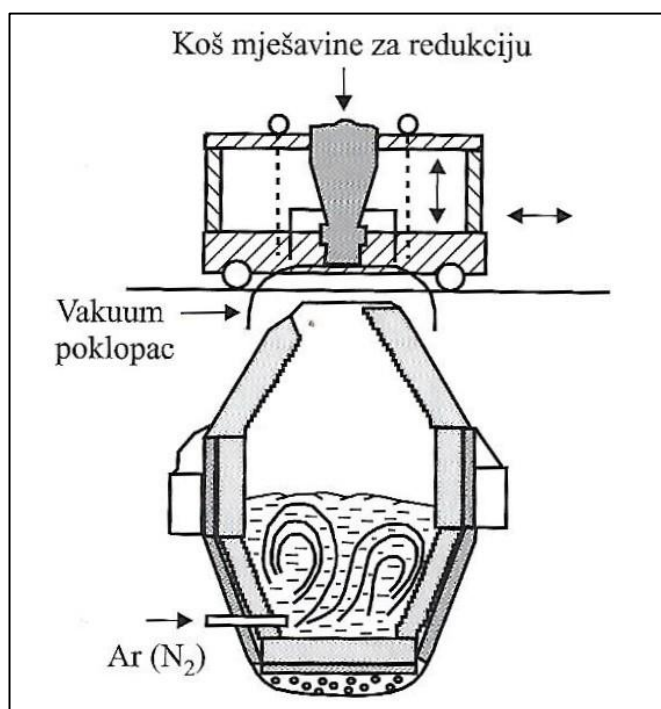
2.2. AOD postupak

AOD postupak se koristi za proizvodnju nehrđajućeg čelika i on predstavlja drugu fazu dupleks postupka. Rastaljeni čelik koji sadrži većinu kroma i nikla potrebnih za postizanje konačnog toplinskog sastava preusmjerava se iz elektrolučne peći u prienosnu posudu iz koje se onda ulijeva u AOD konvertor. U početku je konvertor bio nagnut na jednu stranu da bi se mogli uzeti uzorci i izmjeriti temperatura. Sada se mogu uzeti uzorci i izmjeriti temperatura pomoću modernih instrumenata kroz specijalno dizajnirane otvore kada je konvertor u uspravnom položaju. Glavna izmjena izvornog AOD postupka uključuje uporabu koplja za puhanje odozgo uz sapnice koje su postavljene sa strane. To koplje se koristi za upuhivanje kisika ili mješavina plinova. Time se povećava produktivnost. Još jedna izmjena AOD postupka uključuje vakuumiranje konvertora da bi se smanjila potrošnja argona i silicija i da bi se skratilo vrijeme proizvodnje niskougljičnih nehrđajućih čelika. Ova izmjena je poznata kao AOD-VCR postupak. AOD-VCR postupak je isti

kao i AOD postupak do 0,08-0,10% ugljika. Nakon toga se proces zaustavlja da bi se uzeo uzorak i da bi se stavio poklopac za vakuumiranje i onda se nastavlja proces odugljičenja. [5]



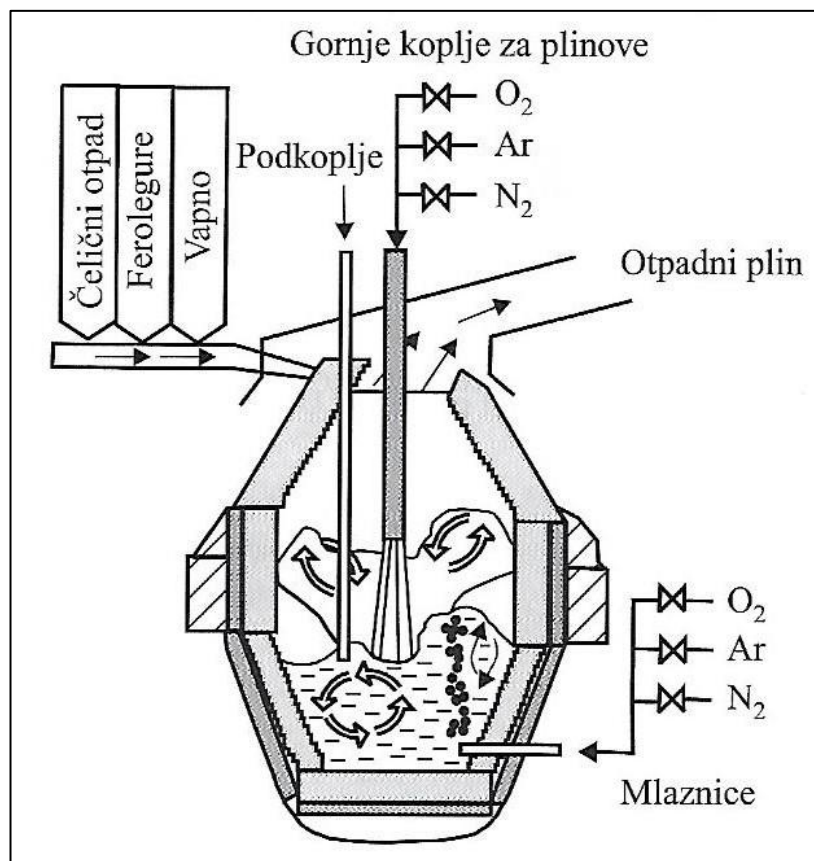
Slika 2: Shematski prikaz AOD konvertora [1]



Slika 3: Shematski prikaz AOD-VCR konvertora [1]

2.3. KCB-S postupak

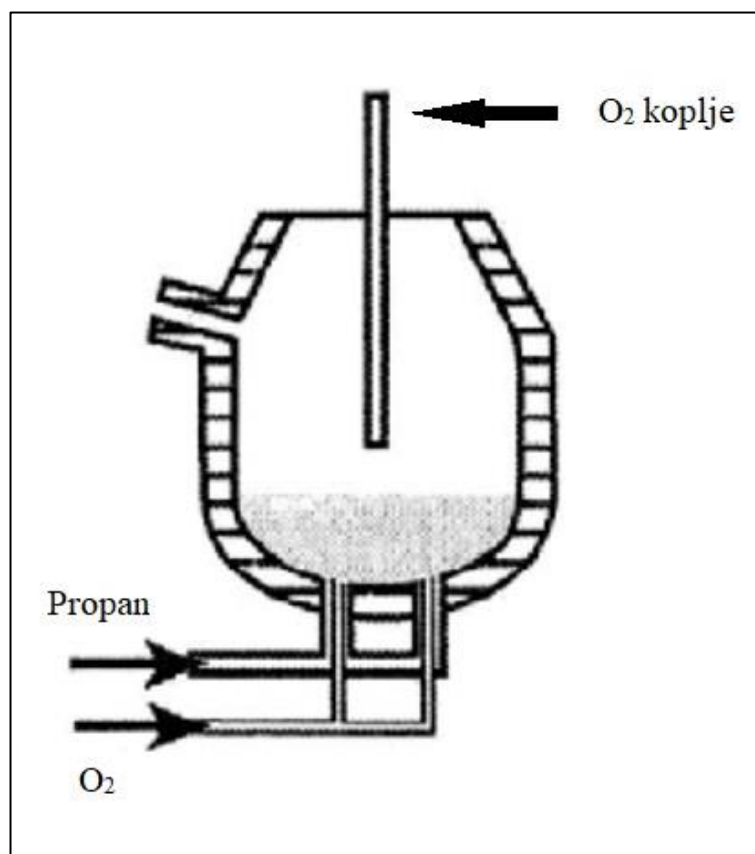
KCB-S postupak se temelji na izmijenjenom AOD procesu kod kojeg se kombinira upuhivanje kroz koplje i sapnice za rafinaciju nehrđajućeg čelika. Upuhivanje kroz gornje koplje i sapnice koje se nalaze sa strane ispod površine taline je ubrzalo proces odugljičenja. Vrijeme rafinacije se zbog toga smanjilo do 30% u odnosu na normalan AOD postupak. Tekući čelik se iz elektrolyučne peći ulijeva u konvertor. Nakon toga se čisti kisik istovremeno upuhuje kroz gornje koplje i sapnice koje se nalaze sa strane. Nakon što se dostigne željena temperatura dodaju se vapno, ferolegure i čelični otpad. Nakon što se dostigne kritična razine ugljika, udio kisika se smanjuje koristeći inertne plinove kao što su dušik i argon. Omjeri kisika i inertnog plina koji se koriste za proces odugljičenja su: 4:1, 2:1, 1:1, 1:2 i 1:4. Kada se dostigne udio ugljika od 0,15%, prestaje upuhivanje kroz koplje i upuhuje se samo kroz sapnice. Kada se dostigne željeni udio ugljika, prestaje se sa upuhivanje kisika i dodaje se silicij da bi se smanjio udio kromovog oksida u trosici i da bi se postigli zahtjevi za udio silicija.[5]



Slika 4: Shematski prikaz KCB-S konvertora [1]

2.4. K-BOP postupak

Kod K-BOP postupka se koristi uobičajeni kisikov konvertor s upuhivanjem odozgo, ali je modificiran tako da ima sedam sapnica na dnu kroz koje se može upuhivati kisik, a propan se koristi za hlađenje tih sapnica. Praškasto vapno se također može injektirati kroz te sapnice. U početnoj fazi razvoja koristila se 85 tonska elektrolučna peć koje je snabdijevala konvertor s čelikom. Korištenjem upuhivanja kisika odozgo i odozdo postigle su se visoke stope odugljičenja. [5]

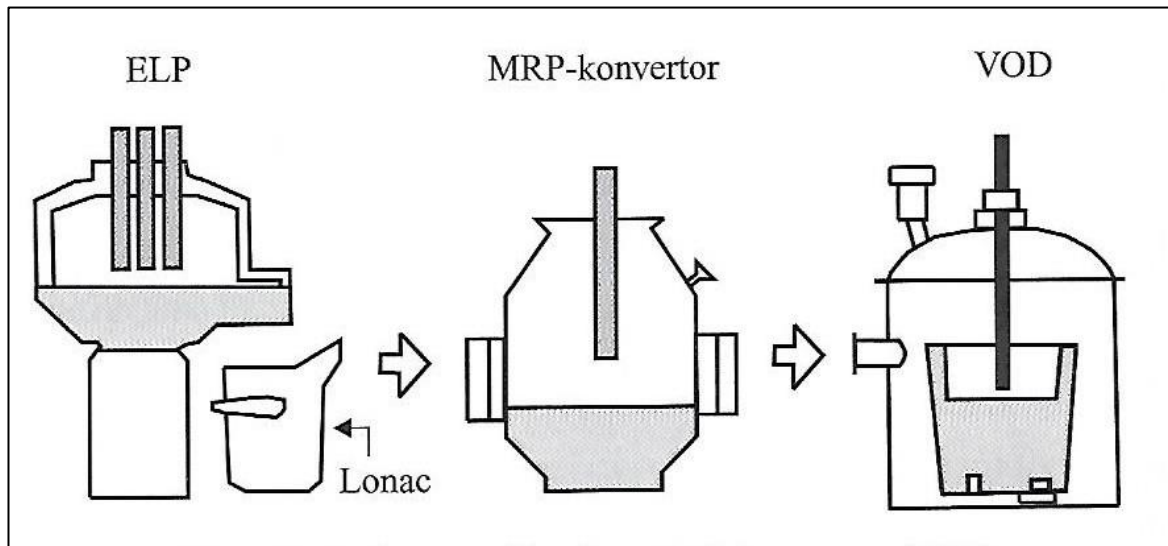


Slika 5: Shematski prikaz K-BOP konvertora [6]

2.5. MRP i MRP-L postupak

MRP postupak spada u dupleks procese gdje se sirovine i čelični otpad rastaljuju u elektrolučnoj peći. Rastaljeni metal koji sadrži krom i nikal se prebacuje u MRP konvertor. Odugljičenje se provodi koristeći kisik i inertne plinove. U ranim fazama razvoja, plinovi su se naizmjenično upuhivali kroz sapnice na dnu konvertora. Kisik se upuhivao bez miješanja sa inertnim plinovima. Time se postigao niži parcijalni tlak CO i brže odugljičenje što za rezultat ima

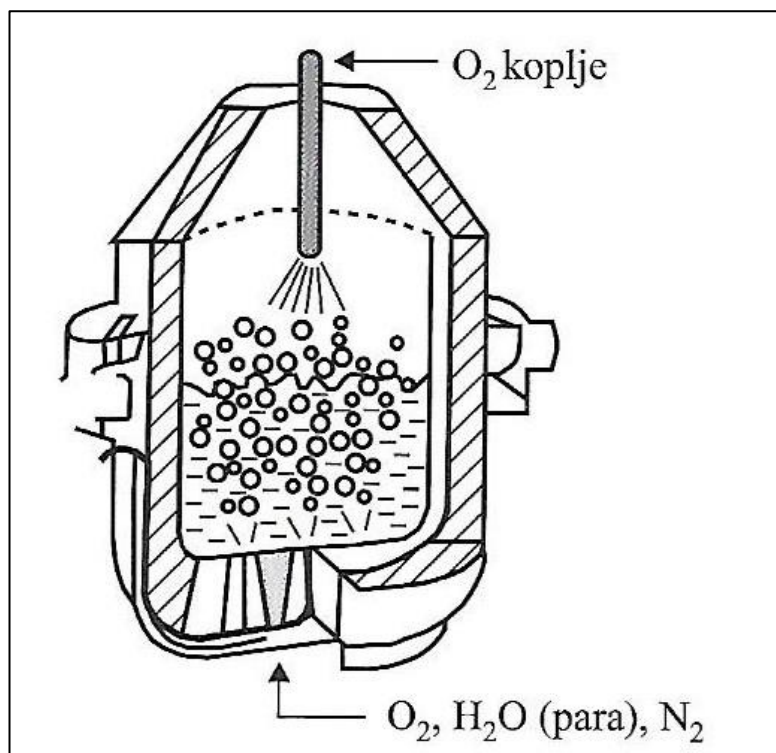
manju oksidaciju kroma i manju potrošnju silicija. Originalna verzija konvertora se razvila u MRP-L proces kod kojeg se sav kisik upuhuje odozgo, a inertnim plin odozdo kroz porozne elemente na dnu konvertora. Posljednjih godina se MRP-L postupak kombinirao s vakuumskim postrojenjem kao dio tripleks procesa za proizvodnju nehrđajućeg čelika, pogotovo onog sa niskom razinom ugljika i dušika. [5]



Slika 6: Shematski prikaz MRP-L procesa [1]

2.6. CLU postupak

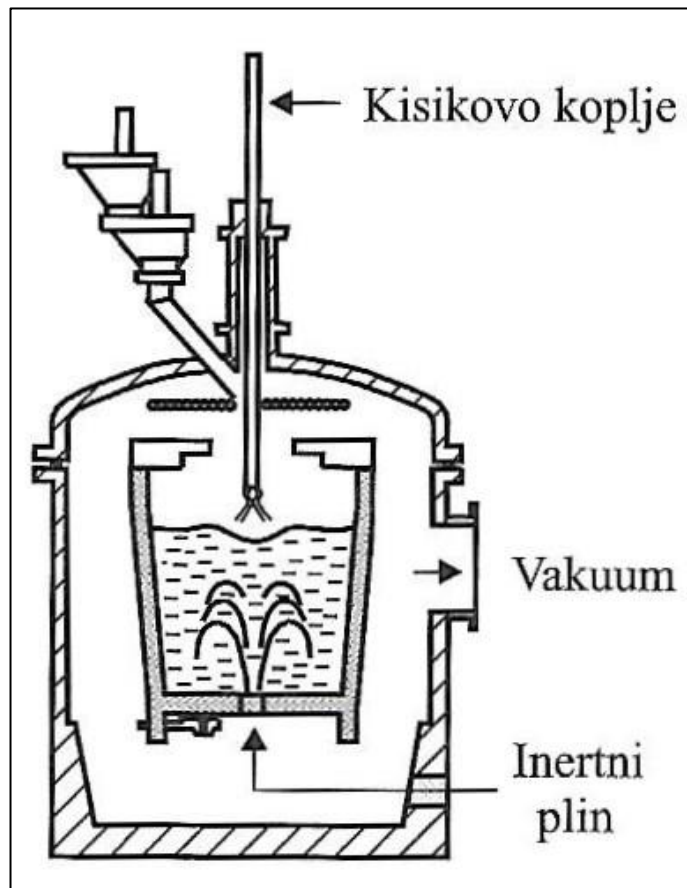
CLU postupak je sličan AOD postupku za proizvodnju nehrđajućeg čelika. Također koristi tekući čelik dobiven iz elektrolučne peći. Glavni poticaj za razvoj ovog procesa je ideja da se umjesto argona za razrjeđivanje taline koristi para. Razlika između ovog konvertora i AOD konvertora je u tome što se u ovaj konvertor upuhuje odozdo, a kod AOD konvertora se upuhuje sa strane. Proces odugljičenja se sastoji od upuhivanja mješavine kisika i pare. Ovaj proces je energetski neučinkovit jer je reakcija pare i taline endotermna. Oksidacija kroma je veća nego kod AOD postupka kad se odugljičenje nastavlja ispod 0,18% ugljika. Iako se prvotni cilj smanjenja potrošnje argona može ispuniti, povećana potrošnja silicija ne mora nužno dovesti do sveukupnog smanjenja troškova. Nadalje, saznalo se da upotreba pare kroz cijeli period vodi do neželjenih udjela vodika u čeliku. Stoga su se razvili postupci koji u procesu koriste različite količine pare, argona i dušika. [5]



Slika 7: Shematski prikaz CLU konvertora [1]

2.7. VOD postupak

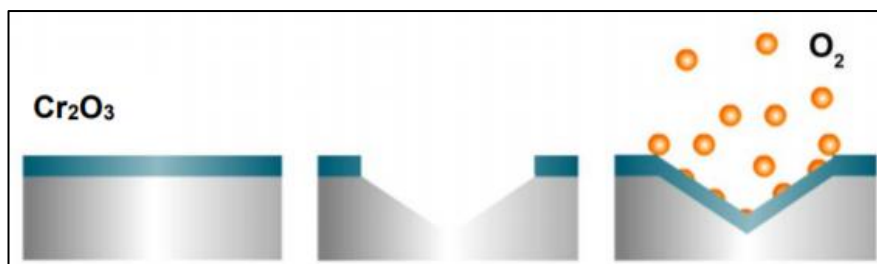
VOD postupak je razvijen u Njemačkoj sredinom 1960-ih godina. U ranim fazama razvoja VOD postupak se koristio za odugličenje rastaljenih legura iz elektrolučne peći korištenjem kisika koji se dovodio odozgo pomoću koplja. Početkom 1970-ih godina VOD postupak je modificiran upotrebom više poroznih čepova za mjehuranje u bubnju. Taj proces su nazvali SS-VOD postupak. 1988. godine postrojenja su se izmijenila da bi se proizvodio nehrđajući čelik tripleks postupkom koji se sastojao od taljenja u elektrolučnoj peći, MRP-L konvertora i VOD postupka. Najveće prednosti VOD postupka uključuju malu potrošnju argona i malu oksidaciju kroma za vrijeme odugličjenja kod niskih razina ugljika. Puhanje čelika iz bubnja koji se koristi kod vakuumskih procesa eliminira skupljanje kisika i dušika iz zraka. Zbog jakog miješanja postignutog korištenjem poroznih čepova za mjehuranje povećala se mogućnost proizvodnje s još nižim razinama ugljika, dušika i vodika kod viših razina kroma. Najveći nedostatak VOD postupka je ta da je manje fleksibilan u odnosu na AOD ili druge procese. Tipični vakuumski proces traje od 50 do 70 minuta sa početnim udjelom ugljika od 0,3%, u usporedbi sa drugim procesima koji traju od 40 do 60 minuta sa početnim udjelom ugljika od 1,5 do 2,5%. Vakuumski proces često ima veće troškove proizvodnje, ali se pomoću njega, pogotovo ako se koristi SS-VOD proces, mogu postići niže razine ugljika i dušika u nehrđajućim čelicima koje se ne mogu tako lako postići AOD ili drugim procesima. [5]



Slika 8: Shematski prikaz VOD procesa [1]

3. Korozija i posebni oblici korozije

Postoje različite definicije korozije. Definicija korozije prema normi HRN EN ISO 8044 glasi: Korozija je fizikalno-kemijsko međudjelovanje metala i njegova okoliša koje uzrokuje promjenu upotrebnih svojstava metala, a koje može dovesti do oštećenja funkcije metala, okoliša ili tehničkog sustava koji oni čine. Opća definicija korozije je da je korozija definirana kao razaranje konstrukcijskih materijala koji su u interakciji s okolišem zbog kemijskih ili elektrokemijskih procesa. Najrašireniji i najčešći oblik korozije je opća korozija koja je također i najmanje opasna. Postoje i posebni oblici korozije, a neki od njih su: točkasta, interkristalna, napetosna, korozija u procjepu i erozijska korozija. Svi nehrđajući čelici imaju visoku otpornost prema koroziji. Otpornost prema koroziji imaju zbog prirodne pojave nastajanja tankog sloja kromovog oksida na površini čelika. Iako je jako tanak, taj nevidljivi, inertni i time pasivan sloj jako prianja na površinu čelika i štiti ga od raznih korozijskih medija. Taj sloj se brzo samoobnavlja (slika 9) kod prisutnosti kisika, oštećenja abrazijom i kod strojnih obrada. [7, 8, 9, 10]



Slika 9: Mehanizam samoobnavljanja pasivnog sloja kromovih oksida [11]

3.1. Podjela korozije

Postoje različite podjele korozije u više grupa. Nema jedinstvene podjele korozije, svaka literature ih malo drugačije klasificira. Ovdje će biti navedena podjela prema mehanizmu nastajanja, prema geometriji, tj. prema obliku razaranja i biti će navedeni osam osnovnih pojava oblika. Osnovnu podjelu navedenih pojava oblika korozije možemo proširiti na specifične korozijske fenomene koji će također biti navedeni.

Podjela korozije prema mehanizmu nastajanja[12]:

- Kemijska korozija
- Elektrokemijska korozija

Podjela korozije prema obliku razaranja[13]:

- Opća
- Lokalna
- Selektivna
- Interkristalna

Osam osnovnih pojava oblika korozije[13]:

- Opća korozija
- Točkasta korozija
- Interkristalna korozija
- Napetosna korozija
- Korozija u procjepu
- Galvanska korozija
- Selektivna korozija
- Erozijska korozija

Ostali pojava oblici korozije[13]:

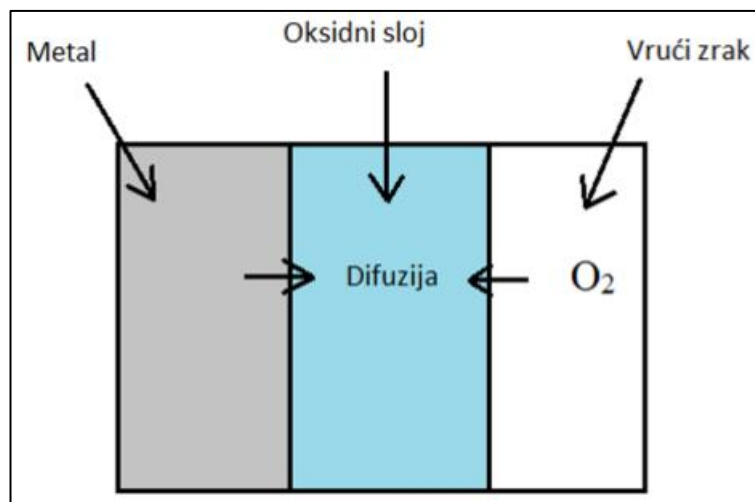
- Mikrobiološki potaknuta korozija
- Filiformna korozija
- Korozija u betonu
- Korozija uzrokovana lutajućim strujama

Od navedenih korozija, nehrđajuće čelike najčešće zahvaća točkasta korozija, interkristalna korozija, napetosna korozija i korozija u procjepu. [8, 12, 14]

3.2. Kemijska korozija

Kemijska korozija nastaje oksidacijom metala tj. spajanjem s kisikom pri izlaganju suhim i vrućim plinovima koji sadrže kisik i njegove spojeve (slika 10). Zbog toga na površini metala dolazi do stvaranja oksida. Najčešće se pojavljuje kod zavarivanja, žarenja valjanja ili kovanja metala. Kemijska korozija se odvija ako postoji kemijski afinitet između materijala i okoline. Kemijski afinitet je sklonost dvaju ili više elemenata ili spojeva da međusobno kemijski reagiraju. Za odvijanje korozijske reakcije dovoljno je postojanje afiniteta između samo jedne komponente

materijala i jedne komponente okoline. Osim u suhim i vrućim plinovima, kemijska korozija se može odvijati u tekućim neelektrolitima kao što su nafta, benzin, aceton i slično. [7, 8]



Slika 10: Kemijska korozija [12]

3.3. Elektrokemijska korozija

Elektrokemijska korozija metala je kemijski redukcijско-oksidacijski proces u sastavu metal-elektrolit. Oksidacija je reakcija kojom neka tvar oslobađa elektrone, a redukcija je reakcija kojom neka tvar veže elektrone. Elektrokemijska korozija nastaje kada se dva metala, koja su kratko spojena, s različitim elektropotencijalom nalaze u elektrolitu. Elektrolit može biti neka vodljiva tekućina ili vlažni plin. Neplemenitiji dijelovi površine su anode i one se troše otapanjem u elektrolitu uz istodobno oslobađanje viška elektrona koji putuju prema plemenitijim dijelovima površine, katodama. [7, 8]



Slika 11: Elektrokemijska korozija [15]

3.4. Opća korozija

Kao što je već prije spomenuto, opća korozija je najrašireniji i najčešći oblik korozije, ali je i najmanje opasna. Ova vrsta korozije se ravnomjerno proširuje po cijeloj površini ili velikom dijelu površine konstrukcije. Ovo je najvažniji tip korozije. Vrlo lako se otkriva, izmjeri i zaštiti on nje. Obično se mjeri gubitak mase: gram/kvadratnom metru/godinu ili gubitak debljine: milimetri/godinu. Nehrđajući čelici nisu potpuno otporni na koroziju. Stopa gubitka debljine kod nehrđajućih čelika iznosi manje od 0,1 mm/god. Nehrđajući čelici pokazuju jako malo stopu razvijanja korozije u mnogim visoko agresivnim i korozivnim uvjetima. Zbog toga su jako dobri građevinski materijali. [9, 16]



Slika 12: Opća korozija [17]

3.5. Točkasta ili jamičasta korozija

Točkasta korozija je vrsta lokalne korozije gdje mala područja metalne površine počinju korodirati i kao rezultat toga nastaju male jamice, a većina površine ostaje netaknuta. Metali koji tvore pasivne filmove, kao što su aluminij i čelici, podložniji su ovoj vrsti korozije. Može prouzrokovati propast cijele konstrukcije sa samo malim gubitkom mase konstrukcije. Zbog toga se najčešće cijela konstrukcija mora mijenjati. Kloridov ion je najčešće uzrok točkaste korozije. Jako je agresivan, pokretljiv i nažalost vrlo čest. Kod povoljnih uvjeta moguća je pojava jamice tamo gdje se nalaze površinski uključci. Kad se formiraju, jamice će imati manju koncentraciju kisika u usporedbi sa površinom i korozija će se ubrzano proširivati. Korozija se ubrzava migracijom kloridovih iona u jamicu zbog elektrostatskog privlačenja metalnih iona. Točkasta

korozija je opasnija u kiselim medijima ($\text{pH} < 7$), a vjerojatnost da će se pojaviti u lužnatim medijima ($\text{pH} > 7$) je mala. Povišene temperature povećavaju opasnost od nastajanje ove vrste korozije i ubrzavaju proces nastajanja. Proučavanja nehrđajućih čelika su pokazala da će se točkasta korozija najčešće pojaviti na mjestima gdje se nalaze uključci sulfida. Jamice mogu biti različitih oblika, međutim, nije toliko bitan oblik jamice koliko je bitna njezina dubina. Postoji mnogo mjera koje se mogu poduzeti da se izbjegne nastajanje točkaste korozije. Neke od njih su: treba odabrati visoko legirane razrede nehrđajućih čelika jer se povećanjem udjela kroma i dodavanjem molibdena i dušika povećava otpornost na točkastu koroziju, povećati pH vrijednost jer se njezinim povećanjem opasnost od pojave točkaste korozije smanjuje, treba smanjiti udio klora u korozivnim uvjetima i površine trebaju biti glatke i čiste da se osigura uklanjanje oksidnih zavora. [16, 18, 19]

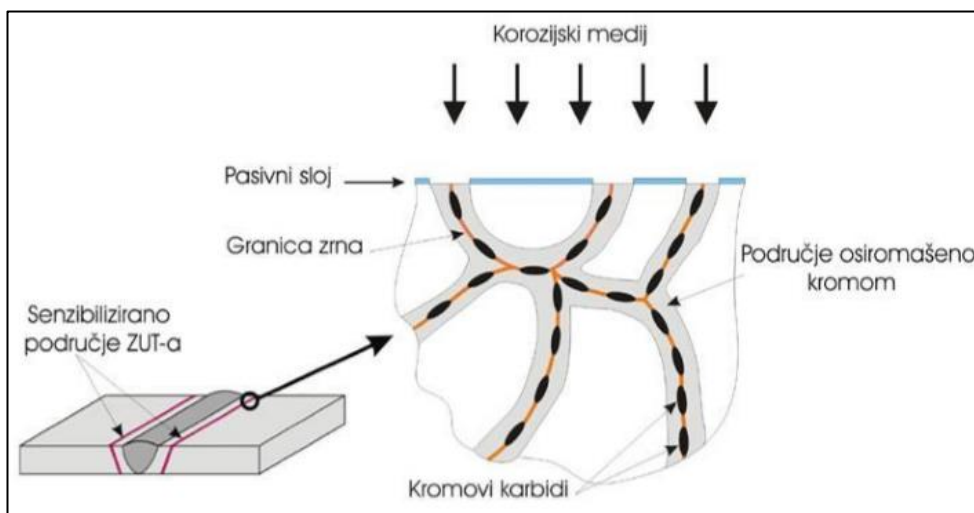


Slika 13: Točkasta korozija [20]

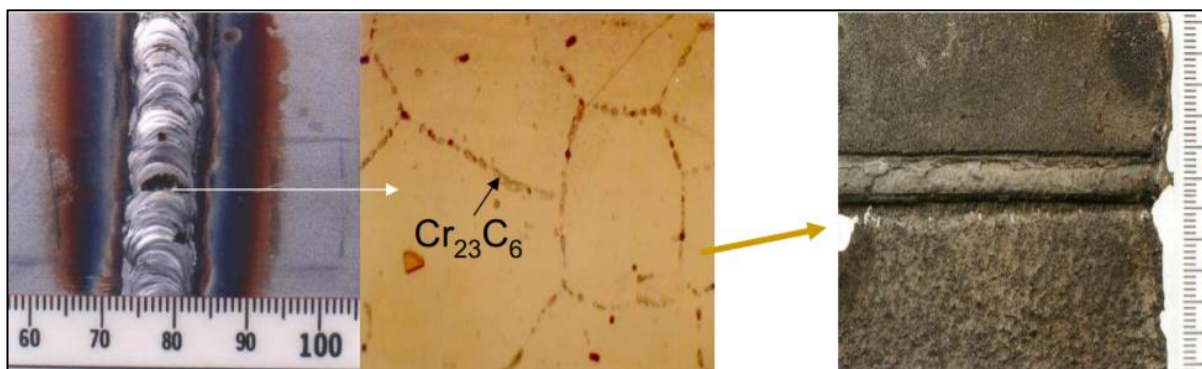
3.6. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija je vrsta lokalne korozije koja nastaje na granicama metala ili legura koji se nalaze u korozivnom mediju. To rezultira gubitkom čvrstoće i duktilnosti. Ugljik ima visoki afinitet prema kromu. Pod određenim uvjetima, ugljik će se spojiti s kromom pa nastaju kromovi karbidi (Cr_{23}C_6). Ti kromovi karbidi nastaju na temperaturama u rasponu od 450°C do 850°C na granicama zrna. Na nižim temperaturama atomi ugljika nemaju dovoljnu pokretljivost da bi se spojili s atomima kroma, a na višim temperaturama ne nastaju kromovi karbidi (Cr_{23}C_6) ili ako ih ima onda se počinju rastvarati. Nastajanje tih kromovih karbida je najčešće na granicama zrna (slika 14). Mala količina ugljika uzme relativno veliku količinu kroma i zbog toga se njegov udio

smanji na granicama zrna. Onda se kaže da je čelik senzibiliziran. Zbog toga su granice zrna podložne koroziji. Korozija se razvija duž granice zrna i zrna se raspadaju. To se može izbjeći ako se čelik zagrije na otprilike 1050°C i onda se brzo ohladi da se spriječi ponovno nastajanje tih kromovih karbida. Ova vrsta korozije je često povezana sa zavarivanjem. Interkristalnoj koroziji su podložni feritni i austenitni čelici, dok su martenzitni potpuno otporni. Da bi se izbjegla interkristalna korozija potrebno je poduzeti neke mjere predostrožnosti. Uvijek započeti obradu u nezagrijanom stanju. Koristiti stabilizirane grupe nehrđajućih čelika koji od legirnih elemenata imaju titan ili niobij. Ti elementi imaju veći afinitet prema ugljiku nego krom, pa zbog toga na sebe privlače atome ugljika tvoreći titanove ili niobijove karbide. Time ostaje malo slobodnih atoma ugljika koji se mogu povezati s kromom. Također se mogu koristiti „L“ grupe nehrđajućih čelika. Manji udio ugljika kod „L“ grupe nehrđajućih čelika značajno povećava potrebno vrijeme da bi došlo do senzibilizacije i time pruža zaštitu od senzibilizacije za vrijeme zavarivanja. Problemi kod korištenja „L“ grupe nehrđajućih čelika je ta što se teže zavaruju od ostalih grupa i čvrstoća im se smanjuje kod povišenih temperatura. [14, 16, 18]



Slika 14: Mehanizam nastanka interkristalne korozije [13]



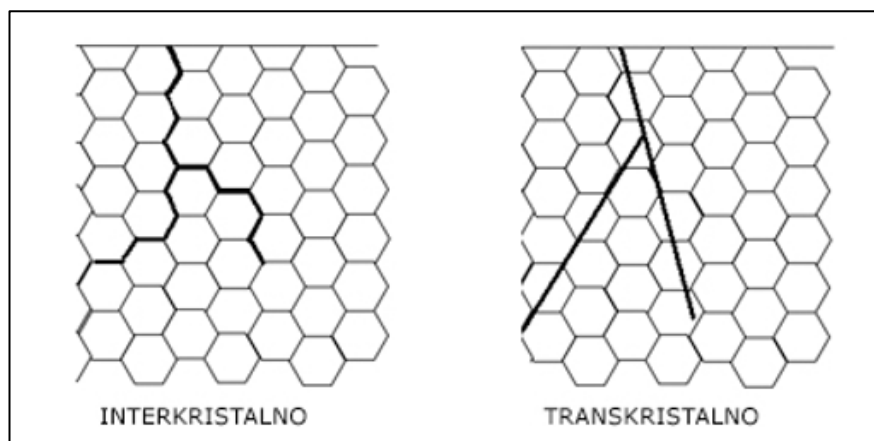
Slika 15: Interkristalna korozija [12]

3.7. Napetosna korozija

Napetosna korozija nastaje kada je materijal istovremeno podvrgnut vlačnom naprezanju i agresivnom mediju. Da bi došlo do napetosne korozije potrebno je istovremeno postojanje triju međusobno povezanih čimbenika. To su: naprezanje (vlačno ili zaostalo) - što je veće naprezanje veća je i opasnost od nastanka napetosne korozije, podložni materijal i prisutnost agresivnog medija (slika 16). Ovaj tip korozije najčešće nastaje na hladno deformiranim predmetima jer tamo ima zaostalih naprezanja. Također može nastati u okolini zavarenih spojeva gdje su povišena zaostala naprezanja. Pukotine nastaju i proširuju se otprilike pod pravim kutom na smjer djelovanja naprezanja, a način širenja tih pukotina može biti interkristalno ili transkristalno (slika 17). Zbog djelovanja agresivnog medija pukotine nastaju na manjim vrijednostima naprezanja nego što je inače potrebno za njihovo nastajanje. Napetosnoj koroziji je potrebno puno vremena da nastane, ali kad jednom nastane onda se brzo širi. Penetracijom pukotine sve dublje u materijal može doći do kvara na konstrukciji. Napetosnoj koroziji su podložni austenitni i martenzitni čelici, dok feritni nisu. Da bi se spriječila napetosna korozija, kod dizajniranja treba izbjegavati područja sa koncentracijom naprezanja, proizvodne zahtjeve kod kojih ostaju zaostala naprezanja i faktore koji mogu pridonijeti nastanku jamica. Također treba izbjegavati uvjete u kojima čelik može doći u dodir s klorom. Mogu se koristiti feritni nehrđajući čelici koji često nisu podložni napetosnoj koroziji. Pasivnost feritnih nehrđajućih čelika je poboljšana većim udjelom kroma i dodatkom molibdena. Mogu se koristiti i duplex nehrđajući čelici koji zbog nikla imaju miješanu feritno-austenitnu strukturu. Pukotina koja nastane u austenitnom dijelu strukture se zaustavi kad dođe do feritne kristalne strukture na granici zrna. [8, 16, 18]



Slika 16: Utjecajni čimbenici napetosne korozije [13]



Slika 17: Načini širenja napetosne korozije [13]



Slika 18: Napetosna korozija [7]

3.8. Korozija u procjepu

Ovaj tip korozije je vrsta lokalne korozije koji nastaje zbog naslaga prljavštine, prašine ili blata na metalnim površinama. Također može nastati ako postoji mala zračnosti između dva metalna dijela ili između metalnog i nemetalnog dijela i ako postoje pukotine ili nekakvi defekti na površini materijala. To može biti ispod podložne pločice, glave vijka, matice ili kod navoja. Nedovoljan dotok kisika onemogućava obnavljanje pasivnog filma. U prisutnosti elektrolita razara se taj pasivni sloj i opasnost od korozije postaje velika. Ako elektrolit struji onda će ova korozija biti manje intenzivna. Mnoge vodene otopine mogu uzrokovati koroziju u procjepu. One koje sadrže klor su najčešće zbog toga što je klor jako mobilan i ulazi u procjep te njegova koncentracija raste.

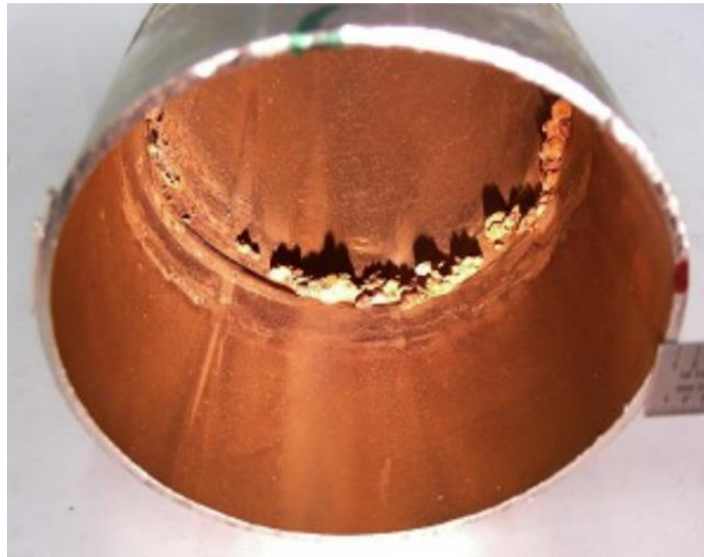
Korozija u procjepu je slična točkastoj koroziji po tome što se zahvaćeni samo neki dijelovi materijala. Da bi se izbjegla korozija u procjepu treba slijediti sljedeće upute: spremnici trebaju biti na nogama da ne bi bili u dodiru s tlom, kod dizajniranja treba izbjegavati područja kod kojih može doći do nakupljanja naslaga, kod pražnjenja spremnika treba biti omogućeno da se može potpuno isprazniti, ako je moguće treba imati zaobljenje kutove, treba izbjegavati poroznosti u zavaru, treba koristiti materijale koji imaju veći udio legirnih elemenata da bi se povećala pasivnost i treba očistiti površine od prljavštine i izlivanja tekućina. [14, 18]



Slika 19: Korozija u procjepu [20]

3.9. Mikrobiološki potaknuta korozija

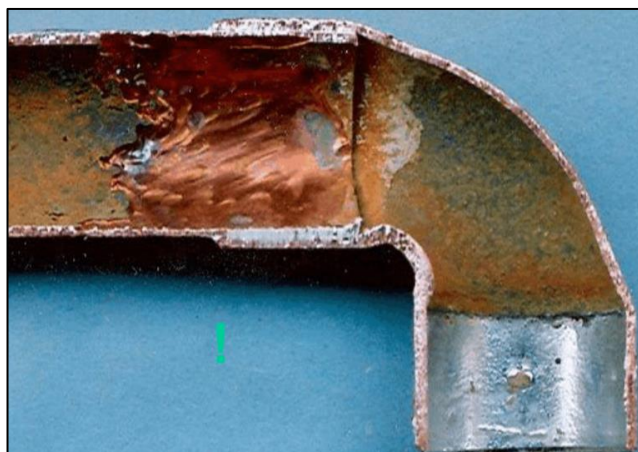
Ovaj oblik korozije nastaje zbog mikrobiološke aktivnosti bakterija. Ima puno sličnosti sa korozijom u procjepu i točkastom korozijom. Mnoge vodene otopine, pogotovo netretirana prirodna voda brane, riječna voda i vode rudnika sadrže obilje bakterija. Postoje dvije vrste bakterija, a to su aerobne i anaerobne. Aerobne bakterije zahtijevaju okoliš u kojem ima kisika, gdje su bakterije aktivne u vodenoj otopini. Anaerobne bakterije zahtijevaju okoliš u kojem nema prisutnosti kisika, gdje bakterije miruju u vodenoj otopini. Ukoliko bilo koje područje metala privuče i sadrži aktivne aerobne bakterije doći će do nakupljanja mulja. Taj mulj može postati dovoljno deo da se ispod njega smanji razina kisika što rezultira situacijom sličnoj koroziji u procjepu. Na području ispod mulja koje ima manjak kisika dolazi do nakupljanja i razmnožavanja anaerobnih bakterija. Te anaerobne bakterije imaju svojstvo stvaranja agresivnih metaboličkih produkata koji napadaju pasivni sloj na nehrđajućim čelicima. Zbog nedostatka kisika nije moguća repasivacija površine čelika i dolazi do staranja jamica. Korozija je definirana kao plitka korodirana udubina koja sadrži nekoliko dubokih jamica. [16]



Slika 20: Mikrobiološki potaknuta korozija [21]

3.10. Erozijska korozija

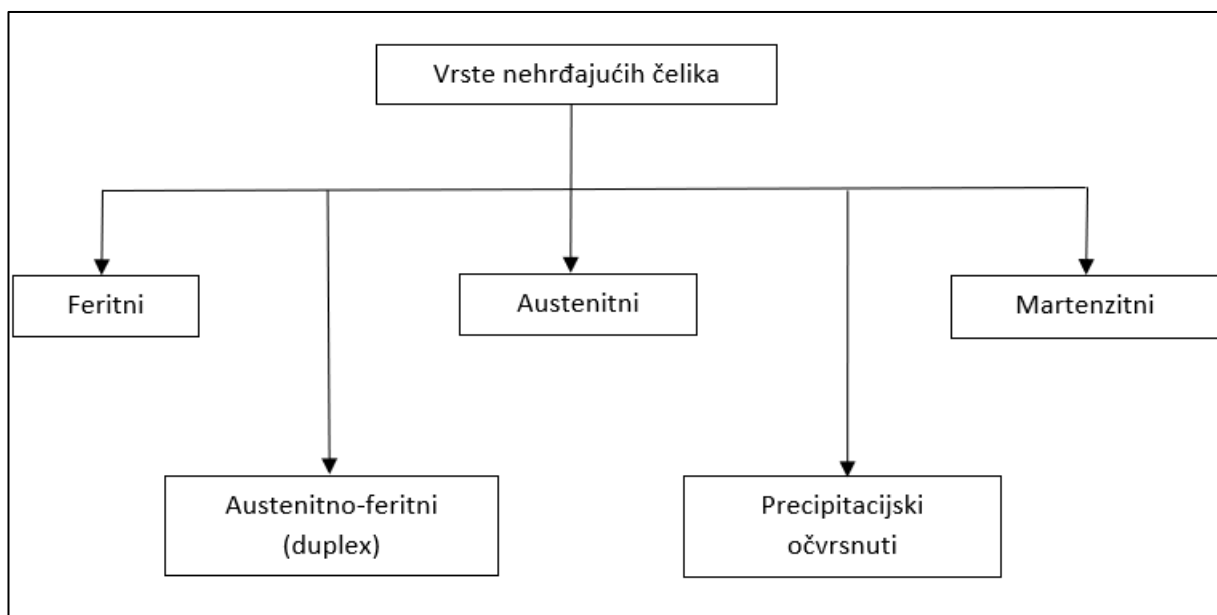
Erozijska korozija je ubrzano djelovanje korozije zbog djelovanja korozivnog fluida na metalnu površinu. Erozijska korozija se također može pogoršati neispravnom izradom. Na primjer to mogu biti neravne površine koje su ostale nakon rezanja cijevi. To uzrokuje lokalne turbulencije i velike brzine strujanja koje za rezultat imaju erozijsku koroziju. Do erozijske korozije također može doći ako se u fluidu nalaze čvrste čestice poput pijeska koje dodatno razaraju materijal. Zbog toga je izbor materijala važna stavka da bi se minimizirala šteta od erozijske korozije. Poželjno je da brzina strujanja i hrapavost cijevi budu što manje, a da se promjer poveća. Također se treba izbjegavati nagla promjena smjera strujanja. Svi nehrđajući čelici imaju visoku otpornost prema ovoj vrsti korozije zbog stabilnog i jakog pasivnog filma na površini materijala i zbog mogućnosti njegove obnove. [9, 16]



Slika 21: Erozijska korozija [20]

4. Nehrđajući čelici

Da bi čelik bio korozijski postojan, istovremeno moraju biti ispunjena dva uvjeta. Prvi uvjet korozijske postojanosti je da čelik sadrži barem 12% kroma u čvrstoj otopini. Neki korozijski postojani čelici zadrže i do 30% kroma. Drugi uvjet korozijske postojanosti je homogena monofazna mikrostruktura. Time se sprječava nastanak elektrokemijske korozije jer nema različitih elektropotencijala. Korozijski postojani čelici bi teoretski morali imati potpunu feritnu, austenitnu ili martenzitnu mikrostrukturu. Nehrđajući čelici se primjenjuju u brojnim granama industrije poput brodogradnje, građevine, rudarstva, medicine, strojarstva i elektrotehnike. [8]



Slika 22: Podjela nehrđajućih čelika [8]

4.1. Feritni nehrđajući čelici

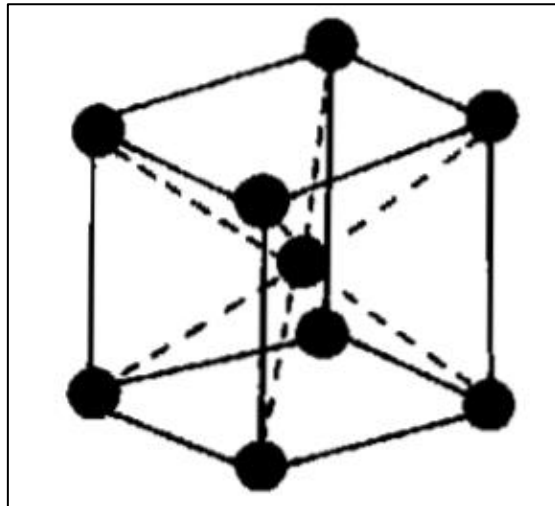
Feritni nehrđajući čelici imaju udio kroma od 14,5 do 27% (slika 25) i imaju BCC kristalnu rešetku (slika 24) od sobne temperature do temperature taljenja. Imaju niski udio ugljika koji rijetko prelazi 0,06% i to je znatno ispod propisanog minimuma. Zbog male razine ugljika, efekt pomicanja feritno-austenitnog područja i proširivanja austenitnog područja, koje ima FCC kristalnu rešetku (slika 27), je ograničen i feritna kristalna struktura ostane nezahvaćena. Ugljik također ima tendenciju spajanja s kromom, čime nastaju karbidi, što dodatno smanjuje njegov utjecaj na proširivanje austenitnog područja. Međutim, zbog niskog udjela ugljika, količina kroma koja je zaključana u tim karbidima ima učinak na smanjenje razine kroma dovoljno da utječe na njegovu sposobnost suzbijanja stvaranja austenita. Feritni nehrđajući čelici su magnetični i ne mogu se kaliti jer nema pretvorbe iz jedne kristalne strukture u drugu. Kod kratkotrajnog izlaganja

visokim temperaturama (1000°C i više) mogu postati krhki i izgubiti otpornost na koroziju. Zbog toga nisu povoljni za zavarivanje. Također pokazuju krhkost na niskim temperaturama. Kako se temperatura pada ispod sobne temperature tako oni postaju sve manje rastezljivi i žilavi i sve više krhki. [3]

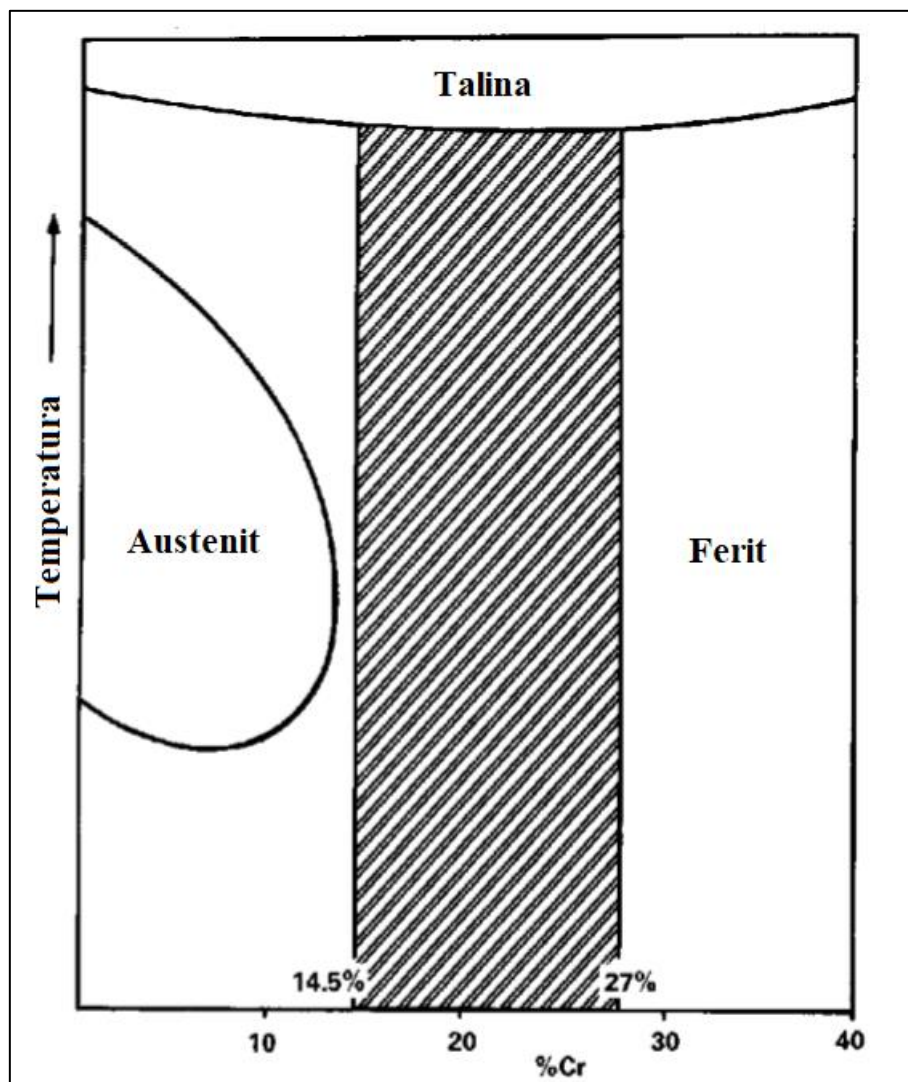
Da bi poboljšala svojstva standardnih feritnih nehrđajućih čelika razvijeni se superferitni nehrđajući čelici. Neke od njihovih značajnih karakteristika su: visok udio kroma (obično od 18 do 25%) i dodatak molibdena (obično od 1 do 4%) koji poboljšava otpornost na koroziju, niske razine dušika i ugljika (manje od 0,03%) što sprječava štetne efekte koji su posljedica nastajanja kromovih nitrida i kromovih karbida za vrijeme zavarivanja i dodaci niskog udjela nikla koji poboljšava otpornost na krhkost kod visokih temperatura. Međutim, iako je zavarljivost poboljšana, još uvijek je jedan od faktora koji ograničava upotrebu super feritnih nehrđajućih čelika. [3]



Slika 23: Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [22]



Slika 24: BCC kristalna rešetka [3]



Slika 25: Shematski prikaz udjela kroma kod feritnih nehrđajućih čelika [3]

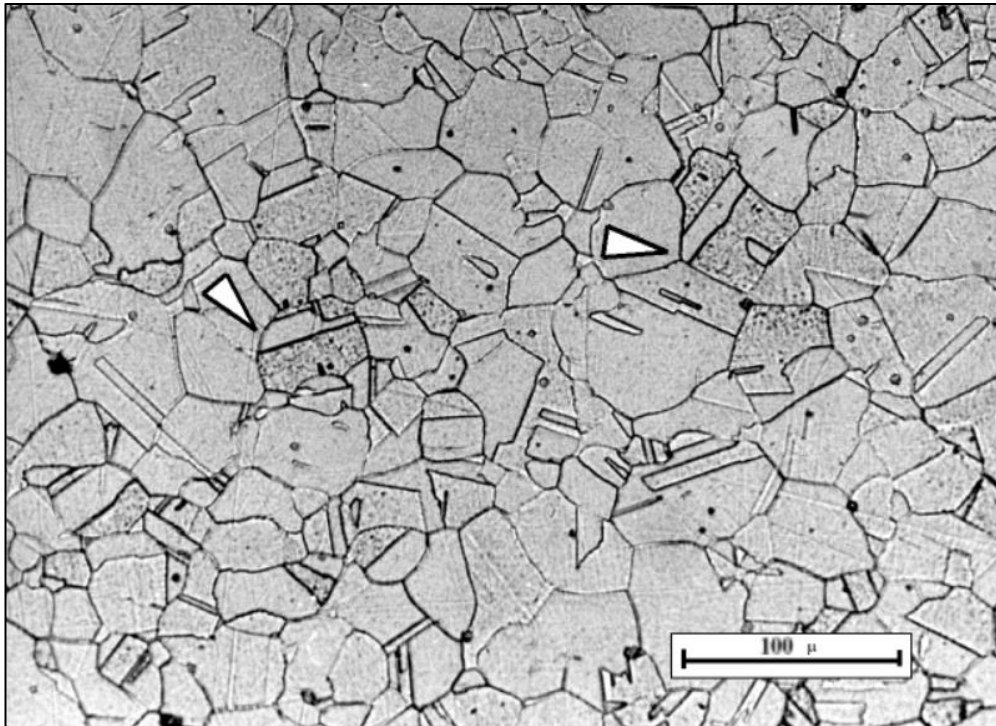
Feritni nehrđajući čelici								
Norma			Kemijski sastav [%] (maksimalni udio)					
AISI	EU	ISO	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ostalo
405	1.4002	X6CrAl12	0.08	14.50	0.60	1.00	1.00	0.30 Al
409	1.4512	X2CrTi12	0.08	11.75	0.50	1.00	1.00	0.75 Ti
430	1.4016	X6Cr17	0.12	18.00	0.75	1.00	1.00	-
442	1.4742	X10CrSiAl18-1-1	0.20	23.00	0.60	1.00	1.00	-
446	1.4762	X10CrAl18/X10CrAlSi25	0.20	27.00	0.75	1.50	1.00	0.25 N

Tablica 2: Feritni nehrđajući čelici [23]

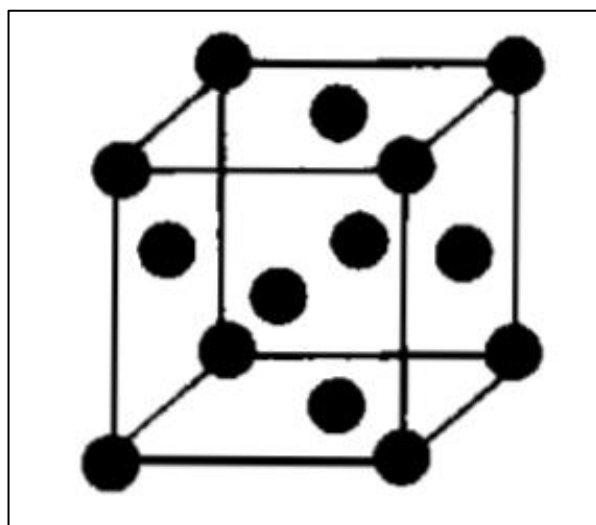
4.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici imaju udio kroma od 16 do 26% i udio nikla manje od 35% i imaju FCC kristalnu rešetku (slika 27). Imaju iznimnu otpornost na koroziju i impresivna mehanička svojstva. Imaju odličnu čvrstoću, žilavost, deformabilnost i trajnost. Visok udio kroma ukazuje na feritnu strukturu, zbog toga se koristi nikal da bi se proširilo austenitno područje (slika 28) i zadržalo na niskim temperaturama. Nikal je najčešće korišten legirajući element, ali se mangan također može koristiti da zamijeni dio nikla. Oni su supstitucijski austenitni stabilizatori koji zamjenjuju atom željeza u kristalnoj strukturi. To su veliki atomi koji polako difundiraju u željezo i stabiliziraju austenitnu kristalnu rešetku. Nekim austenitnim nehrđajućim čelicima se dodaje dušik koji pomaže niklu da poveća i stabilizira austenitnu kristalnu rešetku. Udio nikla se prilagođava prema udjelima drugih elemenata. Na primjer, kod 17% kroma potrebno je minimalno 7% nikla, a kod 26% kroma potrebno je 20% nikla da bi se osigurala austenitna struktura. Molibden se dodaje da bi se poboljšala otpornost na koroziju, ali pošto on proširuje feritno područje potrebno je povećati udio nikla da se poništi efekt povećavanja feritnog područja. Austenitni nehrđajući čelici su nemagnetični, imaju jako stabilnu kristalnu strukturu, odličnu zavarljivost, ne mogu se kaliti, ali se mogu očvrnuti hladnom deformacijom. Nikal sporo difundira, čak i na visokim temperaturama. Dulje izlaganje visokim temperaturama ima za posljedicu porast zrna ili krhkosti. Supstitucijski austenitni stabilizirajući elementi sprječavaju promjenu kristalne rešetke kod hlađenja. Zbog toga se ne mogu kaliti. Ali se kristalna struktura “želi” promijeniti i zbog toga je metastabilan. Te promjene se događaju za vrijeme hladne deformacije, čime nastaju dislokacije u kristalnoj strukturi i time se usporava njihovo gibanje što otežava plastično tečenje

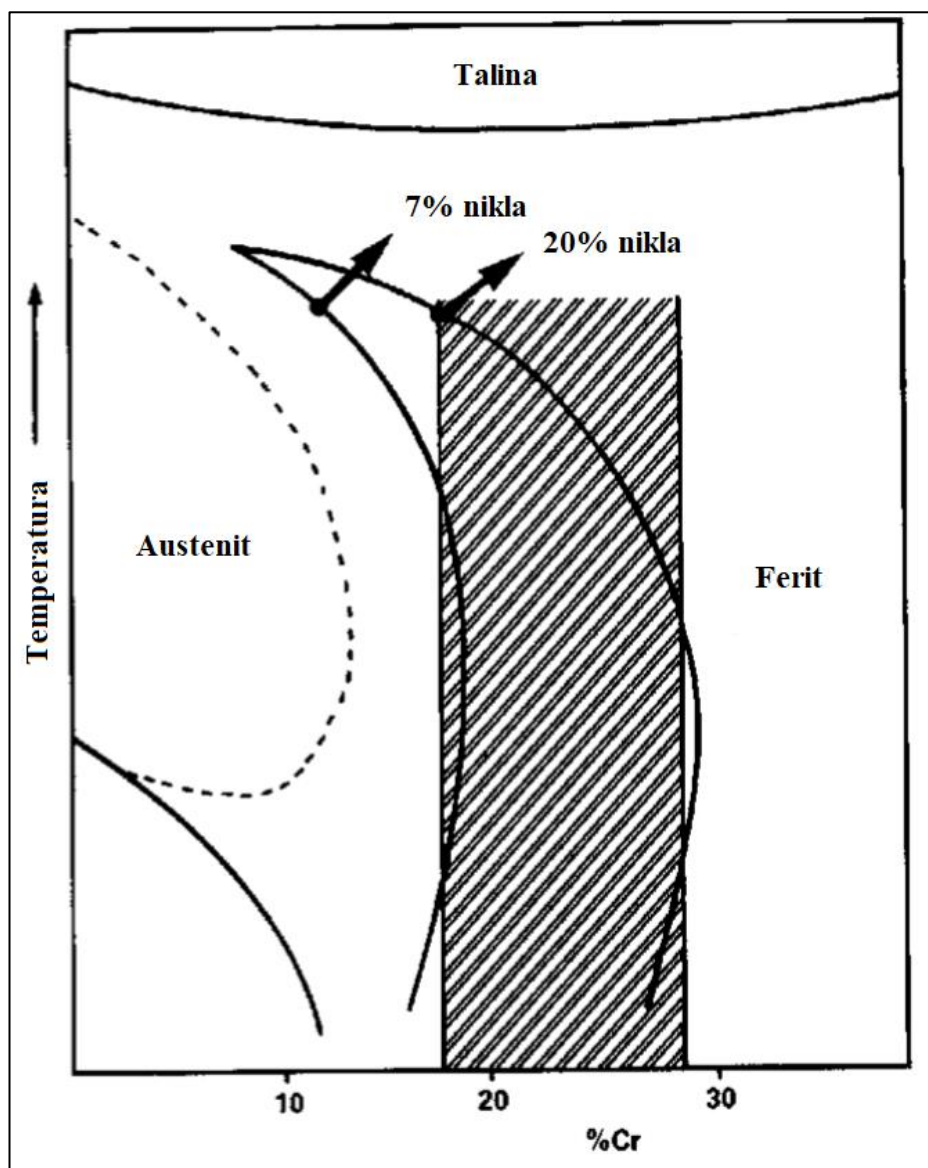
materijala. Formiraju se sitne mrlje martenzita. Taj martenzit ima niski udio ugljika, čvrst je i može imati BCC ili HCP kristalnu rešetku. Ovaj martenzit je različit od martenzita koji nastaje u martenzitnim nehrđajućim čelicima pa se zbog toga naziva kvazi-martenzit. Zbog martenzita koji je nastao za vrijeme hladne deformacije austenitni nehrđajući čelici će biti malo magnetični. Žarenjem se može ukloniti taj martenzit. Zagrijavanjem na otprilike 1050°C martenzit se rastopi i dobije se potpuno rekristalizirana austenitna struktura. [3, 24]



Slika 26: Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [25]



Slika 27: FCC kristalna rešetka [3]



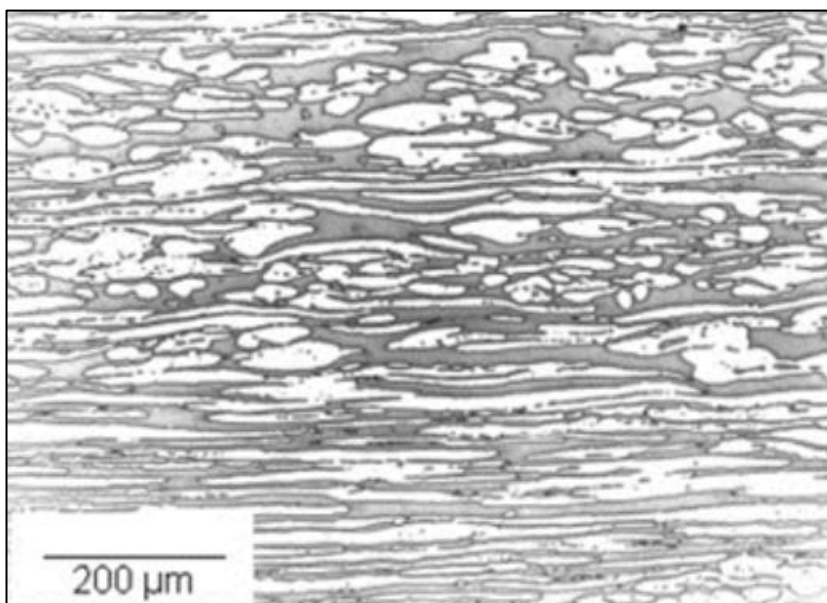
Slika 28: Shematski prikaz utjecaja udjela nikla na proširivanje austenitnog područja kod austenitnih nehrđajućih čelika [3]

Austenitni nehrđajući čelici								
Norma			Kemijski sastav [%] (maksimalni udio)					
AISI	EU	ISO	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ostalo
201	-	-	0.15	18.00	5.50	7.50	1.00	0.25 N
301	1.4310	X10CrNi18-8	0.15	18.00	8.00	2.00	1.00	-
304	1.4301	X5CrNi18-10	0.08	20.00	10.50	2.00	1.00	-
304L	1.4306	X2CrNi19-11	0.03	20.00	12.00	2.00	1.00	-
316	1.4401	X5CrNiMo17-12-2	0.08	18.00	14.00	2.00	1.00	3.00 Mo
316L	1.4404	X2CrNiMo17-12-2	0.03	18.00	14.00	2.00	1.00	3.00 Mo

Tablica 3: Austenitni nehrđajući čelici [23]

4.3. Austenitno-feritni (duplex) nehrđajući čelici

Duplex nehrđajući čelici su dvofazni, imaju austenitnu FCC rešetku u feritnoj BCC matrici. To je zbog toga što nemaju dovoljnu količinu nikla. Ovi nehrđajući čelici imaju bolju otpornost na koroziju i veću čvrstoću od austenitnih nehrđajućih čelika. Veći udio kroma, i kod nekih legura dodatak molibdena, rezultiraju većom otpornošću prema točkastoj koroziji i koroziji u procjepu. Napetosna korozija koja može nastati u austenitnom dijelu je ograničena feritnim dijelom duplex strukture. Omjer ferit : austenit duplex nehrđajućih čelika ovise o sastavu, udjelu feritotvoraca (Cr, Mo) i udjelu austenitotvoraca (Ni, N). Omjer ferit : austenit može biti od 70 : 30 do 50 : 50. Veličina i distribucija feritne i austenitne faze u duplex strukturi ovisi o toplinsko-mehaničkim ciklusima i toplinskoj obradi. Omjer je također bitan u razvoju mehaničkih i fizikalnih svojstava duplex nehrđajućih čelika, posebno granice razvlačenja i vlačne čvrstoće duplex nehrđajućih čelika u usporedbi s feritnim i austenitnim nehrđajućim čelicima. Kad su duplex nehrđajući čelici bili razvijeni, njihova zavarljivost je bila ograničena zbog nastajanja i zadržavanja ferita u zoni utjecaja topline. To je ograničavalo njihovu upotrebu, ali zbog tehnoloških napredaka njihova se zavarljivost poboljšala. Dušik je najviše doprinio uklanjanju nepoželjnih efekata zaostalog ferita u zoni utjecaja topline. On potiče nastajanje austenita u kristalnoj strukturi. Duplex nehrđajući čelici koji sadrže dušik da bi se postigao veći udio austenita u kristalnoj strukturi se nazivaju duplex nehrđajući čelici druge generacije. Duplex nehrđajući čelici imaju sljedeća svojstva: magnetični su, ne mogu se kaliti, imaju dobra mehanička i fizikalna svojstva (slična ili bolja od feritnih i austenitnih nehrđajućih čelika) i odličnu otpornost na koroziju (sličnu ili bolju od austenitnih nehrđajućih čelika). [3]



Slika 29: Mikrostruktura duplex nehrđajućih čelika [26]

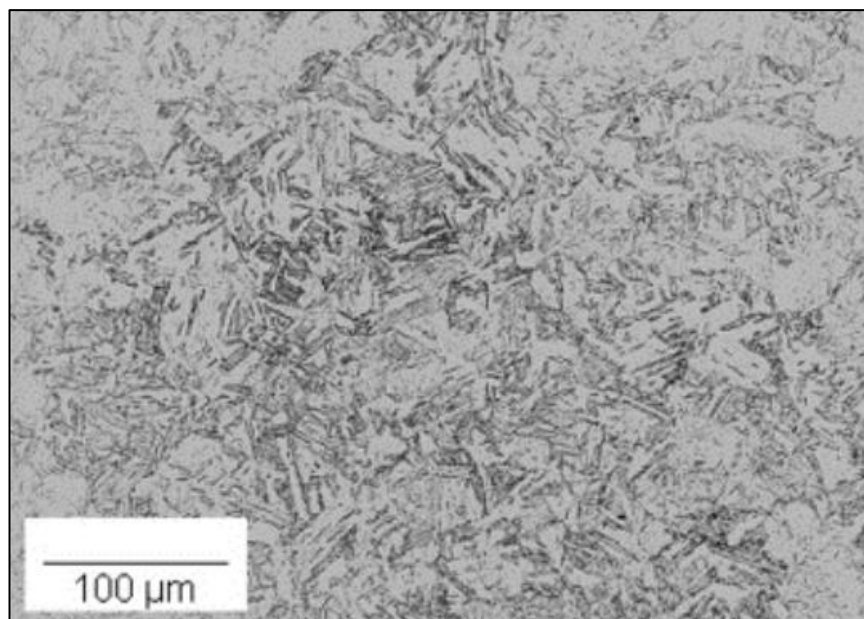
Duplex nehrđajući čelici								
Norma			Kemijski sastav [%] (maksimalni udio)					
AISI	EU	ISO	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ostalo
-	1.4062	X2CrNiN22-2	0.03	24.00	2.90	2.00	1.00	0.45 Mo
-	1.4162	X2CrMnNiN21-5-1	0.04	22.00	1.70	6.00	1.00	0.80 Mo
-	1.4362	X2CrNiN23-4	0.03	24.00	5.50	2.00	1.00	0.60 Mo
218 LN	1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	0.03	23.00	6.50	2.00	1.00	3.50 Mo
-	1.4482	X2CrMnNiMoN21-5-3	0.03	21.50	3.50	6.00	1.00	0.6 Mo

Tablica 4: Duplex nehrđajući čelici [27]

4.4. Martenzitni nehrđajući čelici

Čini se nemogućim da čelik koji ima više od 11 do 12% kroma bude nehrđajući, ali i da može postići potrebnu toplinsku deformaciju brzim hlađenjem austenita da bi se dobila zaglavljena, iskrivljena i time tvrda martenzitna kristalna struktura. Ugljik koji je jak intersticijski austenitni stabilizator se koristi kao legirajući element da pomakne feritno-austenitno područje kod većih udjela kroma i time proširi austenitno područje (slika 31). [3]

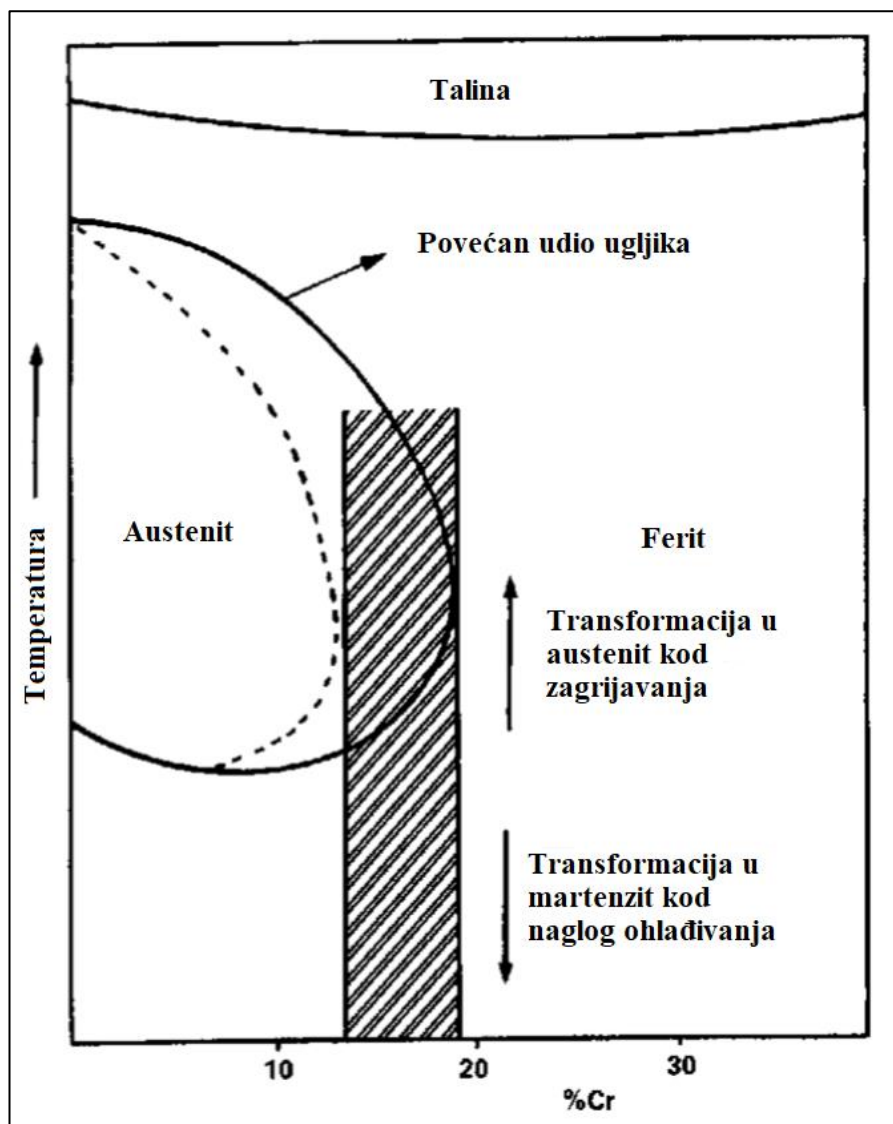
Ovaj učinak ugljika je ograničen snažnom sposobnošću kroma da održi feritnu strukturu, a zbog visokog afiniteta kroma prema ugljiku, formiraju se kromovi karbidi. Zbog toga udio kroma i ugljika mora biti uravnotežen. To osigurava potrebnu toplinsku transformaciju kristalne strukture i izbjegava se smanjenje pasivnosti zbog velikog udjela kroma koji se izdvaja iz matrice u obliku kromovih karbida. Udio kroma u martenzitnim nehrđajućim čelicima je ograničen na 12 do 18% kroma. Martenzitni nehrđajući čelici s manjim udjelom kroma imaju i manji udio ugljika. Martenzitni nehrđajući čelici imaju sljedeća svojstva: magnetični su, imaju srednju otpornost na koroziju, uvijek s legure Fe-Cr-C sa značajnim udjelom ugljika i relativno niskim maksimalnim udjelom kroma od čega je dio zaključan u kromovim karbidima pa ne pridonosi pasivnosti i mogu se kaliti. Martenzit ima visoku čvrstoću i tvrdoću, ali je krhak i ima nisku žilavost i rastezljivost. Zbog toga se mora toplinski obraditi (popuštanje) na temperaturi ispod austenitnog područja. Temperatura poboljšavanja ovisi o zahtijevanoj kombinaciji čvrstoće, tvrdoće, rastezljivosti i žilavosti. Toplinskom obradom nehrđajućih martenzitnih čelika se također dobiva najbolja moguća otpornost na koroziju. [3]



Slika 30: Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika [26]

Martenzitni nehrđajući čelici								
Norma			Kemijski sastav [%] (maksimalni udio)					
AISI	EU	ISO	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ostalo
403	1.4000	X6Cr13	0.15	13.00	-	1.00	0.50	-
410	1.4006	X12Cr13	0.15	13.50	-	1.00	1.00	-
416	1.4005	X12CrS13	0.15	14.00	-	1.25	1.00	0.60 Mo
420	1.4021	X20Cr13	0.15 (min.)	14.00	-	1.00	1.00	-
431	1.4057	X17CrNi16-2	0.20	17.00	2.50	1.00	1.00	-

Tablica 5: Martenzitni nehrđajući čelici [23]

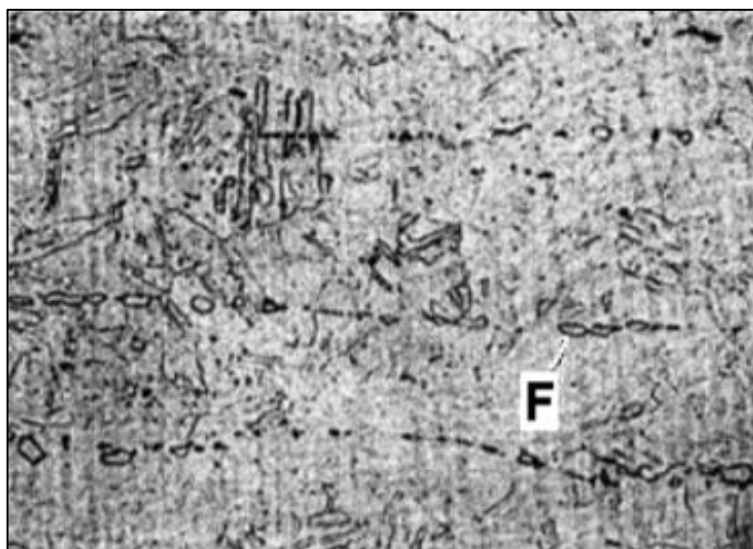


Slika 31: Shematski prikaz utjecaja ugljika na proširivanje austenitnog područja dozvoljavajući pretvorbu austenita u martenzit [3]

4.5. Precipitacijski očvršnuti nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici se ne mogu toplinski obrađivati i imaju malu čvrstoću, ali imaju odličnu korozivnu postojanost i obradivost. Martenzitni nehrđajući čelici se mogu toplinski obrađivati da bi im se povećala čvrstoća, ali to ograničava njihovu obradivost, pogotovo zavarljivost i imaju srednju korozivnu postojanost. Da bi se prešlo preko tih ograničenja razvijeni su precipitacijski očvršnuti nehrđajući čelici. Postoje tri vrste precipitacijski očvršnutih nehrđajućih čelika, a to su austenitni, poluaustenitni i martenzitni. Ovi pojmovi se ne smiju pomiješati s pojmovima za klasifikaciju nehrđajućih čelika. Točna ravnoteža kemijskog sastava je jako važna da se osigura nastanak faza i precipitata potrebnih za postizanje željenih svojstava. Elementi kao što su aluminij, bakar, titan i molibden se dodaju da dođe do precipitacijski

očvršćujuće reakcije. Precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici imaju slična ili bolja mehanička svojstva od martenzitnih nehrđajućih čelika i korozijsku postojanost koja je slična austenitnom nehrđajućem čeliku 1.4301. Toplinske obrade i postupci zavarivanja, koji su potrebni za razvoj i zadržavanje svojstava ovih nehrđajućih čelika, se moraju dopustiti kod svih primjena ovih nehrđajućih čelika. Toplinska obrada potrebna za precipitacijsko očvršćivanje ovisi o vrsti legure. [3]



Slika 32: Mikrostruktura precipitacijski očvrsnutog nehrđajućeg čelika [28]

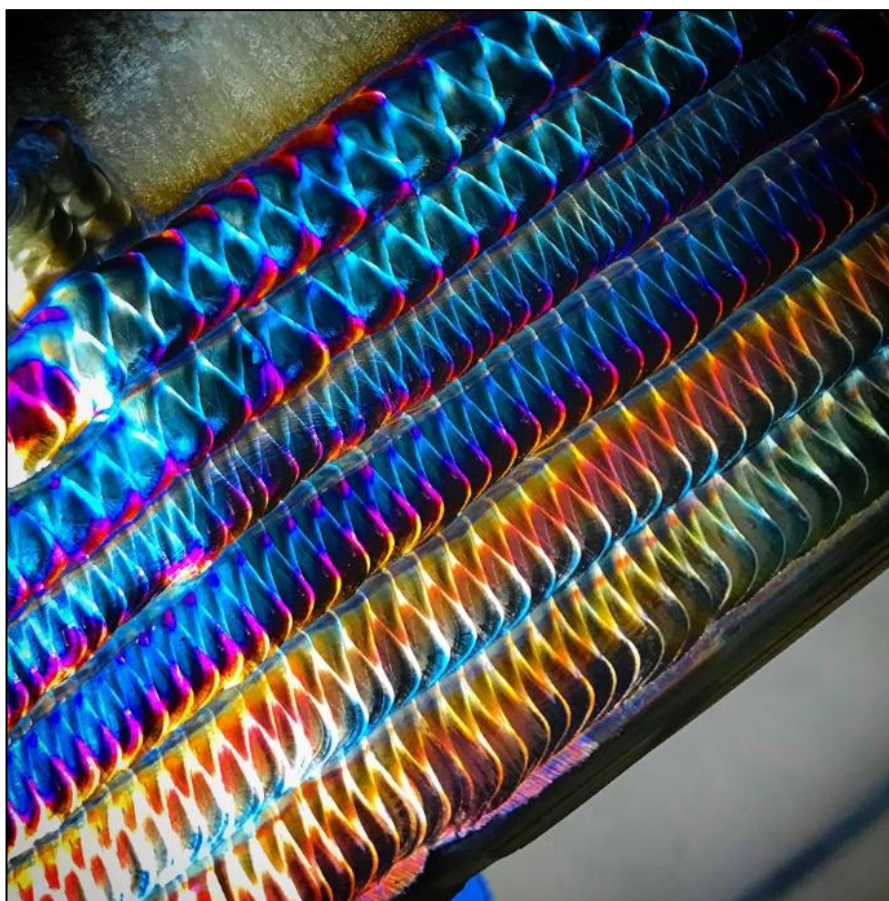
Precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici								
Norma			Kemijski sastav [%] (maksimalni udio)					
AISI	EU	ISO	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ostalo
-	1.4534	X3CrNiMoAl13-8-2	0.05	13.25	8.50	0.10	0.10	2.50 Mo 1.35 Al
-	1.4545	X5CrNiCu15-5	0.07	15.50	5.50	1.00	1.00	4.50 Cu
-	1.4542	X5CrNiCuNb16-4	0.07	17.50	5.00	1.00	1.00	5.00 Cu 0.35 Nb
-	1.4564	X7CrNiAl17-7	0.09	18.00	7.75	1.00	0.04	1.50 Al

Tablica 6: Precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici [29]

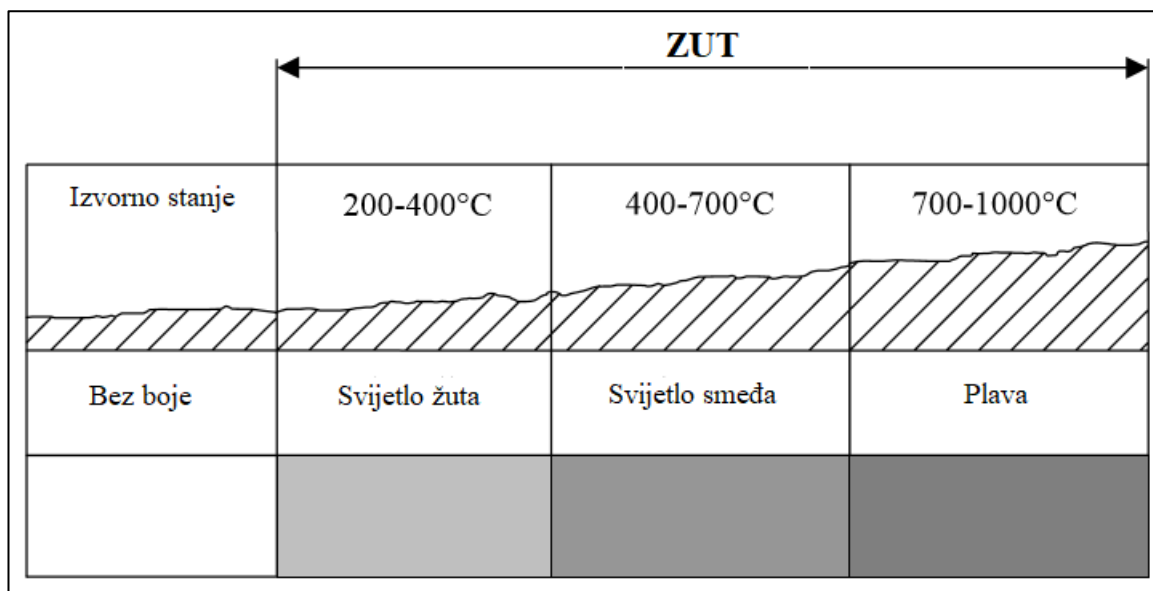
5. Zavarivanje i obrada nehrđajućih čelika

5.1. Zavarivanje nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici se mogu zavarivati koristeći izmjeničnu i istosmjernu struju, sa što kraćim električnim lukom. Toplinski input, koji može utjecati na korozijsku otpornost i dovesti do izobličenja materijala, treba biti ograničen. Kod zavarivanja nehrđajućih čelika dolazi do obojenosti zavora i područja oko zavora zbog oksidacije (slika 33), dolazi do stvaranja debelog sloja kromovog oksida što uzrokuje osiromašenje površine kromom. Zbog toga dolazi do stvaranja korozije. Kod viših temperatura dolazi do stvaranja debljeg sloja oksida. Što je sloj oksida deblji to je boja tamnija (slika 34). Tu obojenost je potrebno, nakon zavarivanja, ukloniti mehanički ili kemijski da bi se vratilo svojstvo korozijske postojanosti. Postoji mnogo postupaka zavarivanja, ali osnovni postupci zavarivanja su REL, MIG, TIG, plazma i laser. [29, 30, 31]



Slika 33: Obojenost nehrđajućeg čelika nakon zavarivanja [32]



Slika 34: Ovisnost boje oksida o njegovoj debljini i temperaturi [33]

5.1.1. REL zavarivanje

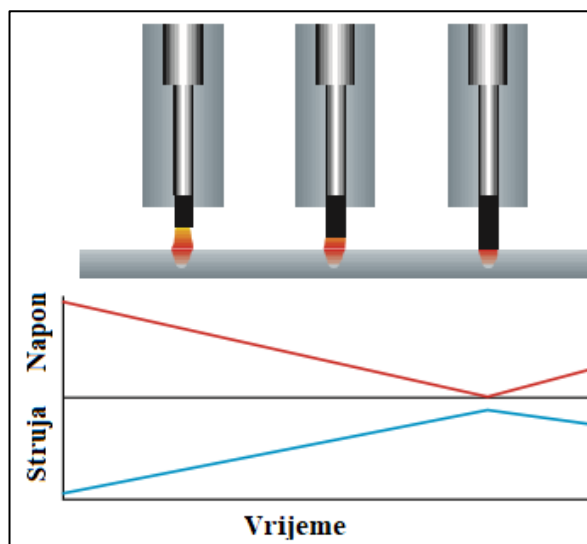
REL zavarivanje je star postupak, ali se koristi zbog svoje fleksibilnosti i jednostavnosti upotrebe. Elektroda se sastoji od metalne jezgre koja je prekrivena oblogom. Metalna jezgra je šipka od nehrđajućeg čelika. Obloga ima tri osnovne funkcije: električnu, fizikalnu i metaluršku. Električna funkcija utječe na stabilnost električnog luka, fizikalna utječe na zaštitu taline od zraka, a metalurška utječe na legiranje metala zavara i deoksidaciju taline. Najčešće korištene elektrode su bazična i rutilna. Glavni sastavni dio obloge kod bazične elektrode je vapnenac zbog poželjnih svojstava stabilizacije električnog luka i dobrih metalurških svojstava, a prilikom zavarivanja se razvija ugljikov dioksid koji služi kao zaštitni plin. Nedostatak vapnenca je što ima visoko talište pa se zbog toga dodaje fluorit (CaF_2). Bazične elektrode se mogu koristiti kod zavarivanja istosmjernom strujom i spajaju se na (+) pol. Formiranje troske je glavni zaštitni mehanizam kod rutilnih elektroda. Njima se lako rukuje i dobivena površina zavara je glatka. Troska koja je nastala za vrijeme zavarivanja se lako uklanja. Rutilne elektrode se mogu koristiti kod zavarivanja istosmjernom i izmjeničnom strujom. [34]



Slika 35: REL zavarivanje [35]

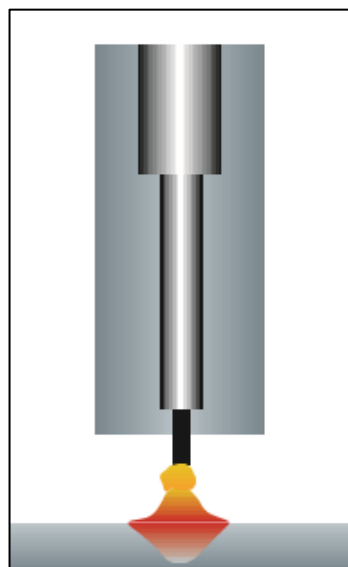
5.1.2. MIG zavarivanje

Kod MIG zavarivanja električni luk nastaje između žice i radnog komada pod zaštitnim plinom. Žica se nalazi na kolutu i ona se kontinuirano dovodi preko automatskog sustava za dovodenje. Nehrđajući čelici se uvijek zavaruju istosmjernom strujom, a žica je uvijek spojena na (+) pol. Može se zavarivati ručno i automatski. Postoje četiri bitna principa prijenosa metala, a to su prijenos kratkim spojevima (slika 36), gravitacijski prijenos (slika 37), prijenos štrcajućim lukom (slika 38) i prijenos pulsnim štrcajućim lukom. Kod prijenosa kratkim spojevima jakost struje je između 40 i 275 ampera, a napon između 14 i 21 volt. Ovaj prijenos metala je povoljan za zavarivanje limova zbog malog toplinskog inputa. Kod prijenosa kratkim spojevima, žica se tali i nastane kapljica. Kad kapljica dotakne radni komad nastane kratki spoj, dođe do naglog porasta jakosti struje i električni luk se gasi. Zbog površinske napetosti kapljica se odvaja od žice i električni luk se ponovno pali. Taj proces se odvija 20 do 200 puta u sekundi. [34, 36, 37]



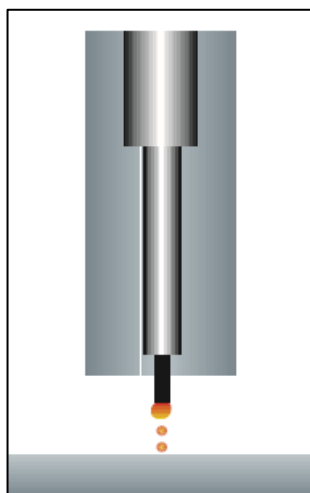
Slika 36: Prijenos metala kratkim spojem [36]

Do gravitacijskog prijenosa dolazi kada su napon i jakost struje veći nego kod prijenosa kratkim spojevima, a manji nego kod prijenosa štrcajućim lukom. Kod gravitacijskog prijenosa, žica se tali i nastaje velika kapljica koja se odvaja kad joj je masa dovoljno velika da nadvlada sile površinske napetosti. Ovaj princip prijenosa metala se ne preporuča zbog svoje neefikasnosti. Kod ovog postupka dolazi do najvećeg prskanja i električni luk je nestabilan. Ovisno o jakosti struje i zaštitnom plinu, može se izgubiti između 10 do 15% materijala. Zbog neefikasnosti procesa brzine zavarivanja su male. [36]



Slika 37: Gravitacijski prijenos metala [36]

Kod prijenosa štrcajućim lukom jakost struje iznosi od 175 do 400 ampera, a napon od 24 do 30 volta. Kod prijenosa štrcajućim lukom žica se tali i nastaju male kapljice koje padaju na radni komad. Ovaj proces je jako čist i visoko efikasan. Skoro da nema prskanja, a iskoristivost dodatnog materijala je od 97 do 98%. Kod prijenosa štrcajućim lukom žica se i nastaju male kapljice koje se odvajaju i ubrzavaju magnetskih poljem i padaju na radni komad. Te male kapljice se apsorbiraju u kupku pa ne uzrokuju prskanje. [36]

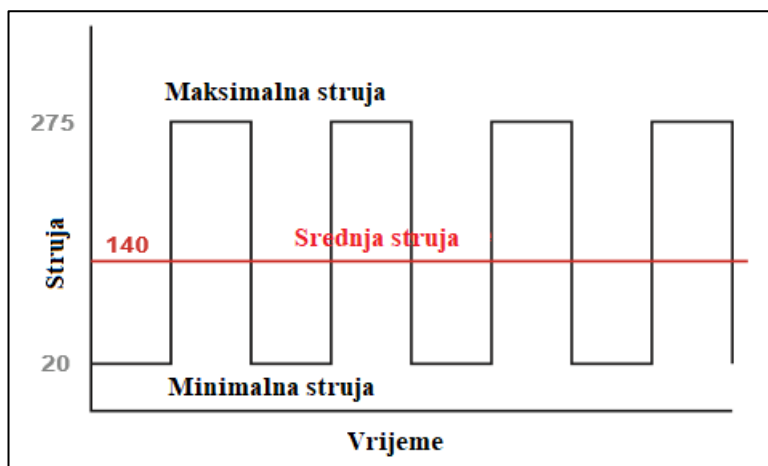


Slika 38: Prijenos metala štrcajućim lukom [36]

Prijenos pulsno štrcajućim lukom kombinira manji toplinski input kao što je kod prijenosa kratkim spojem i dobru penetraciju i čistoću kao što je kod prijenosa štrcajućim lukom. Jakost struje je od 20 do 275 ampera. Struja od 20 ampera služi za održavanje električnog luka, a struja od 275 ampera služi za taljenje žice. Graf na slici 38 pokazuje jakost struje u ovisnosti o vremenu. Kod MIG zavarivanja je potrebno koristiti zaštitni plin da ne bi došlo do oksidacije u električnom luku i time se izgubila korozijska postojanost. Argon sa 2% kisika daje stabilni električni luk i pogodan je za mnoge primjene. Argon sa 3% ugljikova dioksida daje iste rezultate. Brzina zavarivanja i penetracija se ponekad mogu povećati dodavanjem helija i vodika. [36, 37]

Postupak zavarivanja	Zaštitni plinovi
MIG	98% Ar + 2% O ₂
	97% Ar + 3% CO ₂
	95% Ar + 3% CO ₂ + 2% H ₂
	83% Ar + 15% He + 2% CO ₂

Tablica 7: Zaštitni plinovi kod MIG zavarivanja [34]



Slika 39: Graf I-t kod prijenosa metala pulsnim štrcajućim lukom [36]



Slika 40: MIG zavarivanje [38]

5.1.3. TIG zavarivanje

Toplina potrebna za taljenje dolazi od električnog luka koji se održava između netaljive elektrode od volframa (sa 2 % torija) i radnog komada pod zaštitnim plinom. Torij poboljšava postojanost pri visokim temperaturama i daje stabilnost električnom luku. Zaštitni plin se koristi da ne dođe do oksidacije. Nehrdajući čelici se uvijek zavaruju koristeći istosmjernu struju, a volframova elektroda je spojena na (-) pol. To omogućava bolju penetraciju, a elektroda se sporije troši. Penetracija također ovisi o kutu vrha elektrode. Uski kut od 15 do 30° daje širok električni luk i malu penetraciju, a širok kut od 60 do 75° daje uski električni luk i dublji penetraciju (slika 42). Može se zavarivati bez i sa dodatnim materijalom. Dodatni materijal dolazi u obliku šipki bez

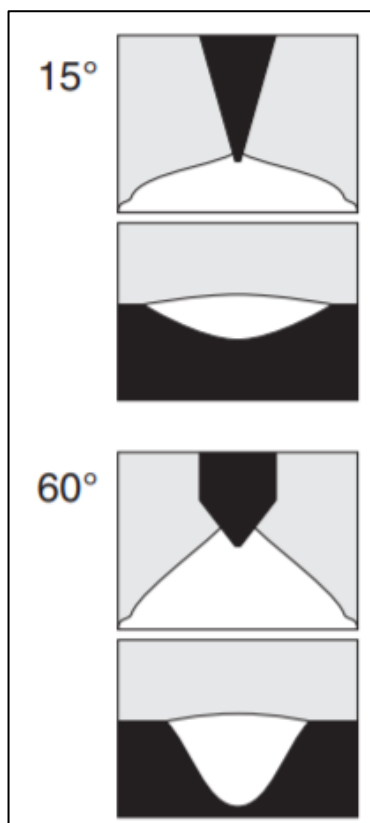
obloge. Kvaliteta zavarenog spoja može biti vrlo visoka, ali ona ovisi o vještini zavarivača. Zavarivanje se može izvoditi u svim položajima. To je posebno korisno kod orbitalnog zavarivanja cijevi. Volframova elektroda ne smije doći u kontakt sa kupkom za vrijeme zavarivanja da ne bi došlo do kontaminacije zavara. TIG postupak je ručni postupak, ali se koristi i kao automatski i kao robotizirani postupak zavarivanja. Napon zavarivanja je od 12 do 20 V i ovisi o jakosti struje i korištenom zaštitnom plinu. Zaštitni plin omogućava održavanje stabilnog električnog luka. Ovisno o osnovnom materijalu, zaštitni plin je uglavnom mješavina argona, helija i vodika. Najčešće se koristi za zavarivanje cijevi. [34, 37, 39]



Slika 41: TIG zavarivanje [40]

Postupak zavarivanja	Zaštitni plinovi
TIG	Ar
	Ar + H ₂ (do 20%)
	Ar + He (do 70%)
	Ar + He + H ₂

Tablica 8: Zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja [34]



Slika 42: Ovisnost električnog luka i penetracije o kutu vrha elektrode [39]

5.1.4. Zavarivanje plazmom

Plazma je plin koji je zagrijan do ekstremno visokih temperatura i ioniziran da postane električki vodljiv. Zavarivanje plazmom je slično TIG zavarivanju. Za stvaranje plazme električni luk se uspostavlja između elektrode koja je spojena na (-) pol i radnog komada. Plazmeni luk je sužen sapnicom da bi se dobio visokoenergetski tok plazme koji doseže temperature do 20 000°C. Plazmeni luk je jako uzak pa ne može osigurati potrebnu zaštitu kupke, pa se zbog toga koriste zaštitni plinovi. Može se zavarivati sa i bez dodatnog materijala. Plinovi koji se koriste kao zaštitni plinovi se koriste i za dobivanje plazme. To može biti čisti argon, mješavina argona i vodika (do 20%) ili mješavina argona, helija i vodika. [34, 41]

Postupak zavarivanja	Zaštitni plinovi
Plazma	Ar
	Ar + H ₂ (do 20%)
	Ar + He (do 70%)
	Ar + He + H ₂

Tablica 9: Zaštitni plinovi kod plazma zavarivanja [34]

5.1.5. Zavarivanje laserom

Laser je koncentrirana zraka svjetlosti koja nastaje tijekom stimuliranog i kontroliranog prijelaza elektrona atoma i molekula iz višeg u niže energetske stanje. Najčešće korišteni laseri za zavarivanje su CO₂ i YAG (Yttrium-aluminium garnet) laseri. YAG laseri se koriste za zavarivanje tanjih limova od nehrđajućeg čelika dok se CO₂ laseri koriste za zavarivanje debljih limova. Kao zaštitni plinovi se koriste argon ili helij. Zavar i ZUT su vrlo uski, unos toplinske energije je mali pa su i deformacije male, zavarivanje je brzo i neovisno o položaju. [34]

Postupak zavarivanja	Zaštitni plinovi
Laser	He
	Ar

Tablica 10: Zaštitni plinovi kod laserskog zavarivanja [34]

5.1.6. Zavarivanje feritnih nehrđajućih čelika

Kod zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika potrebno je predgrijati materijal. Temperatura predgrijavanja se određuje prema sastavu, željenim mehaničkim svojstvima i debljini zavarivanog predmeta. Uobičajena temperatura predgrijavanja iznosi najviše 200°C. Kod nekih feritnih nehrđajućih čelika može doći do formiranja kromovih karbida na granicama zrna za vrijeme zavarivanja. Za njih je potrebna naknadna toplinska obrada na temperaturi od 700 do 800°C koja im vraća svojstvo korozijske postojanosti. Kod blagih korozijskih uvjeta i gdje se može tolerirati prisustvo nikla, preporuča se korištenje elektrode od austenitnih nehrđajućih čelika. Time se može izbjeći potrebna za naknadnim toplinskim obradama. [29, 30]

5.1.7. Zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika

Kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika može doći do stvaranja sekundarne feritne faze na granicama austenitnih zrna u zoni zavara i zoni utjecaja topline. Veličina formacije ovisi o sastavu nehrđajućeg čelika, dodatnom materijalu i toplinskom inputu. Formiranje delta ferita može imati negativne utjecaje na korozijsku postojanost, ali je nužan u dodatnom materijalu da se izbjegnu tople pukotine. Dodatni materijal obično sadrži od 4 do 12% delta ferita. Udio ugljika kod austenitnih nehrđajućih čelika se drži na niskim razinama da bi se izbjeglo nastajanje kromovih karbida na granicama zrna i time bi nastalo područje osiromašeno kromom i time

podložno interkristalnoj koroziji. Austenitni nehrđajući čelici imaju 50% veći koeficijent rastezanja od ugljičnih čelika pa je izobličenje materijala problem kod zavarivanja. Zbog toga jakost struje kod zavarivanja treba biti što manja s velikim brzinama zavarivanja. Ne smije se predgrijavati, a naknadne toplinske obrade su rijetko potrebne nakon zavarivanja. Obično se zavaruju elektrodama sličnog sastava kao i osnovni materijal. [29, 30]

5.1.8. Zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika

Martenzitni nehrđajući čelici, zbog svog sastava, mogu očvrsnuti ohlađivanjem na zraku, pa zbog toga treba poduzeti posebne mjere opreza kod zavarivanja da se izbjegne nastajanje pukotina. Nastanak hladnih pukotina zbog vodika, koje nastaju kod niskolegiranih čelika, također se mogu pojaviti kod martenzitnih nehrđajućih čelika i zbog toga se mora koristiti dodatni materijal kojeg se kontrolira udio vodika. Zbog niskog udjela kroma i osjetljivosti na toplinske obrade imaju ograničenje kod upotrebe gdje je potrebna korozijska postojanost, ali se koriste gdje je potrebna visoka čvrstoća i tvrdoća. Ovi čelici se moraju predgrijavati na temperaturu od 200 do 300°C i nakon zavarivanja se moraju sporo hladiti. Ako je moguće, potrebno je naknadno toplinski obraditi. Za zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika obično se koristi dodatni materijal od austenitnih nehrđajućih čelika. [29, 30]

5.1.9. Zavarivanje duplex nehrđajućih čelika

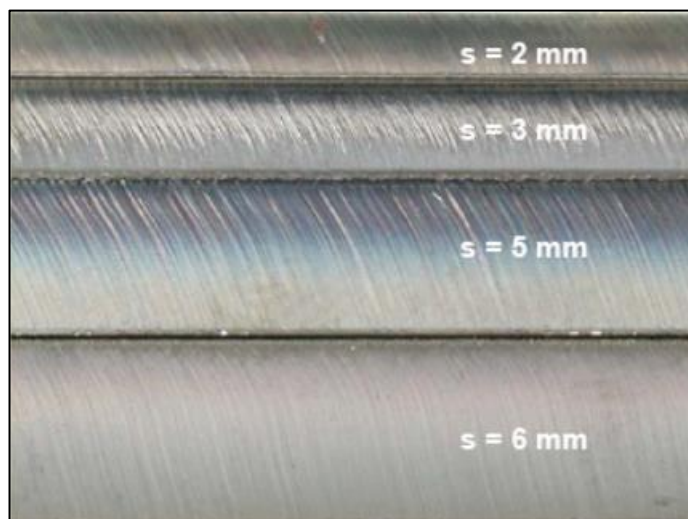
Kod duplex nehrđajućih čelika korozijska postojanost i mehanička svojstva jako ovise o austenitno-feritnoj ravnoteži. Najveća otpornost na koroziju i najbolja mehanička svojstva se dobiju ako je omjer ferit:austenit jednak 50:50. Međutim takav omjer je teško postići kod zavarivanja. Iskustvo zajedno sa pokusima je pokazalo da duplex nehrđajući čelici imaju optimalnu korozijsku postojanost i mehanička svojstva ako se udio ferita u depozitu kod zavarivanja održava između 35 i 60%. Duplex nehrđajući čelici ne smiju biti vlažni prije zavarivanja pa se predgrijevaju na maksimalnu temperaturu od 75°C da se ukloni vlaga. Međutim, u nekim je slučajevima potrebno dopustiti osnovnom materijalu da se ohladi na sobnu temperaturu prije zavarivanja. Obično se predgrijavanje ne preporuča neposredno prije zavarivanja jer može imati negativan utjecaj na brzinu ohlađivanja koja je potrebna da se postigne optimalna fazna ravnoteža. Najveća preporučena temperatura međuprolaza je 150°C. Kod većih temperatura međuprolaza može doći do krhkosti materijala. Naknadna toplinska obrada obično nije potrebna, ali ako nastanu nepoželjne intermetalne faze, onda je potrebna. Da bi se zadržala korozijska postojanost, nakon zavarivanja je potrebno počistiti zavar. [42]

5.2. Rezanje nehrđajućih čelika

Rezanje nehrđajućih čelika može uključivati probijanje, piljenje i toplinsko rezanje poput rezanja plazmom ili laserom. Osnovna razlika između rezanja mekog ugljičnog čelika i nehrđajućeg čelika je u tome što su za rezanje nehrđajućih čelika potrebne veće sile, ali se mogu koristiti iste metode rezanja kao i kod mekih ugljičnih čelika. Glavni problem kod probijanja i piljenja je trošenje alata što može imati veliki utjecaj na kvalitetu reznog ruba. Veličina srha bi trebala biti što manja, a parametri koji na to utječu su trošenje alata, sila rezanja i brzina rezanja. Kod toplinskog rezanja, na veličinu srha utječe vrsta zaštitnog plina i toplinski input. [19]

5.2.1. Rezanje plazmom

Plazma postupak rezanja temelji se na principu prolaska plazmenog plina kroz električni luk pri čemu dolazi do ionizacije plina. Time se oslobađa velika količina topline što uzrokuje pojavu temperature do 20 000°C. Zbog toga se gorionici hlade vodom. Prolaskom plazme materijal se tali, a onda se vrtložnim plinom otpuhuje. Čimbenici koji utječu na kvalitetu reza su stanje potrošenosti sapnice, struja i brzina rezanja, plazmeni i vrtložni plinovi, položaj materijala koji se reže i geometrija gorionika. Korištenjem plazmenih plinova Ar/H₂ i vrtložnog plina N₂ dobivaju se glatke i sjajne površine reza i smanjuje se nastajanje srha. Korištenjem zraka kao plazmenog i vrtložnog plina dobivaju se hrapave i oksidirane površine reza i mali srh. [43]



Slika 43: Izgled površine reza kod plazma rezanja nehrđajućeg čelika 1.4301 [44]

Plinovi za plazma rezanje				
Plazmeni plin	Ar/H ₂	N ₂	Zrak	O ₂
Vrtložni plin	N ₂	N ₂	Zrak	Zrak

Tablica 11: Plinovi za plazma rezanje [43]

5.2.2. Rezanje laserom

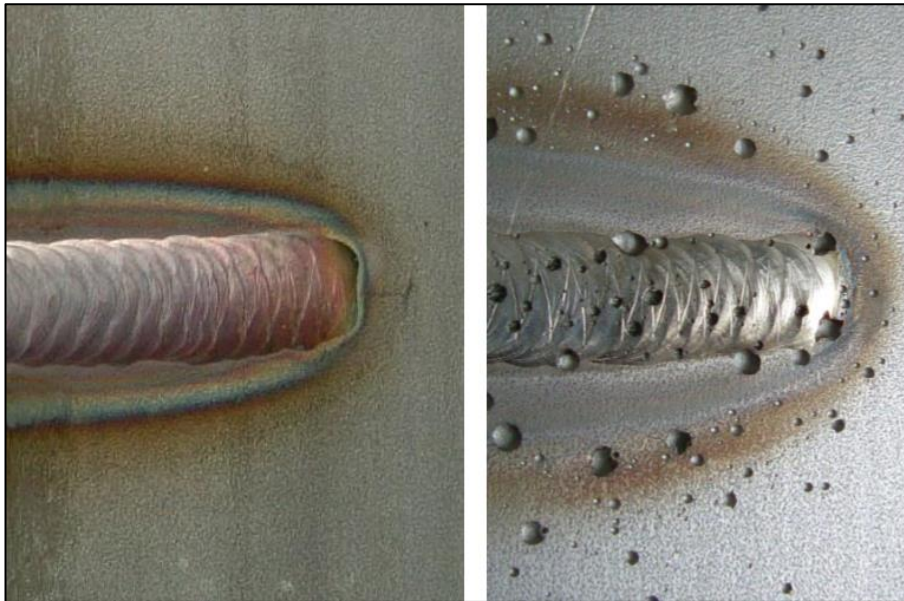
Rezanje laserom se sastoji od fokusiranja laserske zrake velikog intenziteta na vrlo malu površinu. Prilikom toga se razvija visoka temperatura koja služi za rezanje materijala. Penetracija laserske zrake u nehrđajući čelik ovisi o njegovoj debljini, a može biti od nekoliko sekundi pa do čak 15 sekundi. Primjenom inertnog plina, otopljeni metal se otpuhuje s površine odnosno s reza čime se povećava kvaliteta rezanja. Kao pomoćni plinovi se primjenjuju kisik i dušik. Brzina rezanja ovisi o snazi laserske zrake i pomoćnom plinu koji se koristi. [45]

Debljina nehrđajućeg čelika	Brzina rezanja (kisik) [m/min]	Brzina rezanja (dušik) [m/min]
1.00	9.00	8.00
2.00	5.00	3.50
3.00	3.00	2.00
6.00	1.50	0.50

Tablica 12: Ovisnost brzine rezanja o debljini materijala i pomoćnom plinu [45]

5.3. Naknadna obrada nehrđajućih čelika

Kao što je već prije spomenuto, kod zavarivanja nehrđajućih čelika dolazi do obojenosti zavora i područja oko zavora zbog oksidacije. Time se uništava pasivni sloj koji štiti nehrđajuće čelike od korozije, pa se time narušava njihovo svojstvo korozijske postojanosti. Zbog toga je potrebno tu oksidaciju očistiti da ne dođe do pojave korozije (slika 44). Najčešće dolazi do točkaste, napetosne ili korozije u procjepu. Ta se oksidacija može očistiti mehanički, kemijski ili elektrokemijski. Mehanička obrada se često kombinira sa kemijskom ili elektrokemijskom obradom. [46, 47]



Slika 44: Nastanak točkaste korozije zbog obojenosti [13]

5.3.1. Mehanička obrada

Prije početka mehaničke obrade, potrebno je očistiti površinu od masnoće, prašine i ostalih nečistoća. Postupak čišćenja ovisi o veličini dijela, onečišćenosti i pristupačnosti dijelu koji se čisti. Za manja onečišćenja na lako dostupnim mjestima koriste se kupke i pamučne tkanine za brisanje. Za čišćenja velikih površina koriste se vodeni mlazovi pod visokim pritiskom, a za uklanjanje tvrdokornih onečišćenja se koriste razni deterdženti i para. Nakon što se očišćena površina potpuno osuši, može se pristupiti mehaničkoj obradi. Mehanička obrada se obično koristi za uklanjanje obojenosti zavora i područja oko zavora i za uklanjanje nadvišenja zavora. U ove se postupke ubrajaju brušenje, obrada mlazom i četkanje. Brušenje je često najpogodnija metoda za uklanjanje pogrešaka u zavarenim spojevima i uklanjanje dubokih pukotina. Najčešće se koristi brusilica sa kružnom brusnom pločom. Kod brušenja treba paziti da se brusni alat koristi samo za nehrđajuće čelike, da se površina ne pregrije, treba izbjegavati pregrube brusne ploče i treba ukloniti cijelu pogrešku. Kod obrade mlazom se kao abraziv koriste zrnca pijeska ili staklene kuglice. Prikladno je za uklanjanje oksida nastalih pri povišenim temperaturama. Primjenom ovog postupka nastaju tlačna naprezanja na površini koja pozitivno utječu na otpornost napetosnoj koroziji. Četka se sa četkama koje imaju žice od nehrđajućeg čelika. Pošto slabo utječu na stanje površine, ne garantiraju potpuno uklanjanje površinskog sloja. Četke za četkanje nehrđajućih čelika ne smiju biti korištene za četkanje nelegiranih ili niskolegiranih čelika. Bitno je prilikom obrade paziti da se ne unosi prevelika toplina koja bi mogla uzrokovati strukturne promjene u materijalu i pogodovati razvoju točkaste ili napetosne korozije. Mehanička obrada ponekad služi kao predobrada za kemijsku ili elektrokemijsku obradu. [47, 48]



Slika 45: Brusni alati i četka [49]

5.3.2. Kemijska obrada

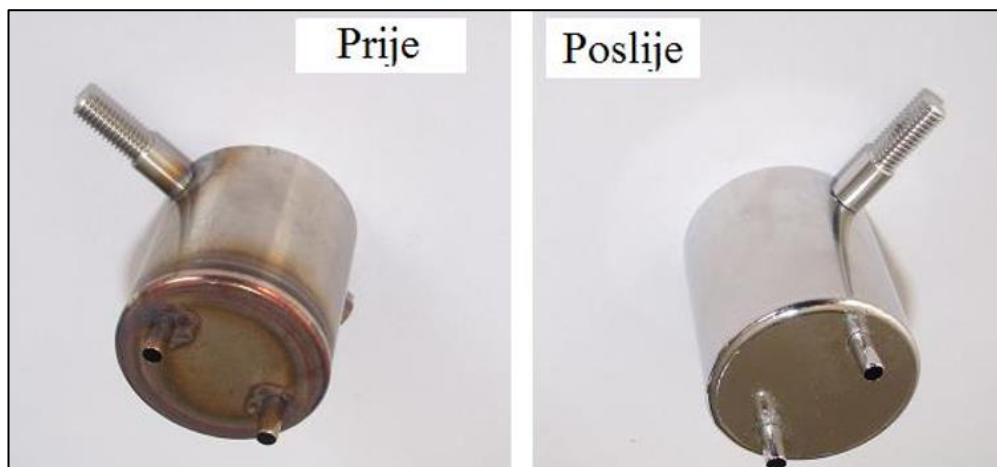
Kemijska obrada se temelji na kontroliranom otapanju nehomogenih površinskih slojeva te ponovnoj uspostavi pasivnog sloja. Najčešće korištene kemikalije su dušična kiselina i fluorovodična kiselina. One uzrokuju kontroliranu koroziju u površinskom sloju odnoseći pri tome korozijski nepostojana područja kao što su slobodno željezo ili kromom osiromašena područja. Koncentracija kiseline, temperatura i vrijeme tretiranja ovise o vrsti nehrđajućeg čelika, hrapavosti površine i debljini oksidnog sloja. Što je čelik više legiran to su vremena nagrizanja dulja. Vremena tretiranja su obično između 15 i 60 minuta na temperaturi od 20 do 60°C. Metode nagrizanja koje se koriste su premazivanje kiselim pastama, naštrecavanje i uranjanje u kupku. Za uklanjanje obojenosti zavara i područja oko njega, najčešće se koriste paste koje se nanose kistom. Tretiranu površinu je nakon kemijske obrade potrebno isprati deioniziranom ili pročišćenom vodom (slika 46). [48, 50]

Pasivni sloj kromovog oksida će se sam obnoviti ako je nehrđajući čelik izložen kisiku, ali je za to potrebno vremena. Da bi se ta reakcija ubrzala provodi se proces pasivizacije (slika 42). Pasivacija se provodi na isti način kao i nagrizanje, ali se koristi dušična ili limunska kiselina koja se nanosi uranjanjem ili naštrecavanjem. Ovim postupkom se osnažuje pasivni sloj koji daje korozijsku postojanost nehrđajućim čelicima (slika 47). Postupak pasivacije dušičnom kiselinom je jedan od najefikasnijih procesa pasivacije. Udio dušične kiseline u otopini se kreće od 15 do

30%. Potrebno je osigurati kontakt s površinom nehrđajućeg čelika u trajanju od najmanje 30 minuta. U praksi se uz hladni postupak koriste i topli postupci pri temperaturama od 50 do 60°C s različitim koncentracijama dušične kiseline. Dušična kiselina je jako agresivna i opasna za ljude i okoliš. Postupak pasivacije limunskom kiselinom je znatno blaži od postupka s dušičnom kiselinom. Uglavnom se koristi gdje se postupak dušičnom kiselinom smatra preagresivnim. Udio limunske kiseline je 2% i dodaje se amonijev monocitrat čiji je udio 5%. Temperatura otopine je 80°C, a površina se minimalno tretira 30 minuta. Preporuča se izvođenje pasivacije nakon mehaničke obrade, a u nekim slučajevima i nakon kemijske obrade nagrivanjem. U farmaceutskoj industriji se obavezno koristi kemijsko čišćenje i pasivacija pri obradi površine nehrđajućih čelika koji su u kontaktu s radnim medijem [48, 50]



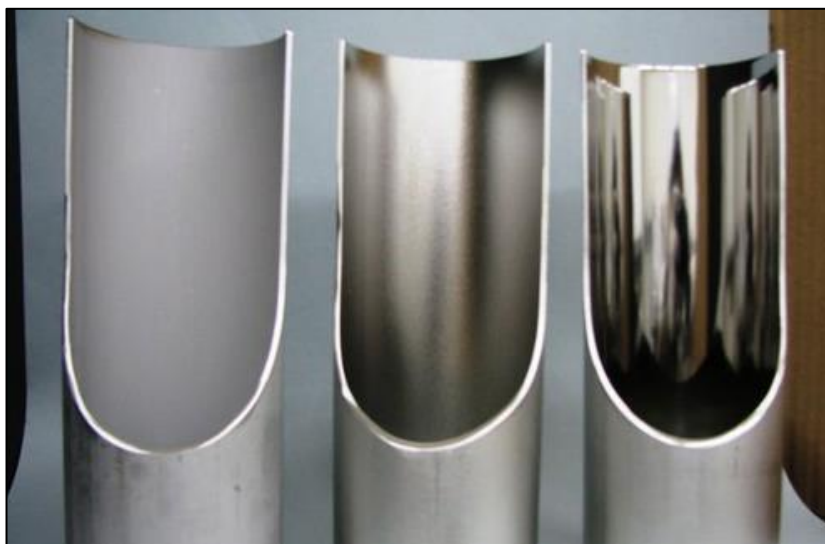
Slika 46: Izgled zavora prije (lijevo) i poslije (desno) nagrivanja [46]



Slika 47: Proizvod prije i poslije pasivacije [51]

5.3.3. Elektrokemijska obrada

Elektrokemijskom obradom postiže se optimalna korozijska postojanost. Slična je kemijskoj obradi, a glavna razlika je u tome što se kod ove obrade koristi izmjenična ili istosmjerna električna struja niskog napona (od 8 do 50V). Kao kemikalija se koristi mješavina sumporne i fosforne kiseline. Ako se koristi izmjenična struja onda se s površine otapaju prisutna oštećenja, prvenstveno obojanost površine, ostavljajući zaglađenu površinu koja je korozijski otpornija. Ako se koristi istosmjerna struja onda se tretirana površina može dovesti do visokog sjaja (elektropoliranje). Elektropoliranjem je moguće postići jako malu hrapavost površine, čak do 0.02 μm . Elektropoliranje u kupkama podrazumijeva izravnavanje i zaglađivanje površine. Elektrokemijska obrada je najefikasnija obrada i koristi se tek nakon mehaničke obrade. Dobiva se najkvalitetnija površina, ali je zato i najskuplja obrada. Elektrokemijskom obradom se eliminiraju površinske mikro pukotine, dobije se svijetlo glatka i čista površina bez napetosti (slika 43). Ova obrada se može primijeniti i na složenim oblicima. Nakon ove obrade također je potrebno isprati tretiranu površinu deioniziranom ili pročišćenom vodom. Iako daje izvrsne rezultate površinske hrapavosti i jednoličnost površine, te ispunjava visoke higijenske zahtjeve prisutne u farmaceutskoj industriji, nakon nje je potrebno provesti pasivaciju. Jedini nedostati su visoka cijena i štetan utjecaj na okoliš. [47, 50]



Slika 48: Izgled unutrašnjosti cijevi od nehrđajućeg čelika u izvornom stanju (lijevo), nakon mehaničke obrade (sredina) i nakon elektropoliranja (desno) [52]

6. Zaključak

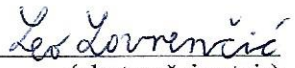
Nehrđajući čelici su otkriveni 1913. godine. Razvoj u proizvodnji čelika 1940-ih i 1960-ih potaknuo je njihov razvoj i primjenu. Njihovo najvažnije svojstvo je otpornost na koroziju i otpornost na oksidaciju kod povišenih temperatura. Razvojem AOD postupka revolucionizirala se proizvodnje nehrđajućih čelika. Iako se zovu nehrđajući čelici, podložni su nekim specifičnim oblicima korozije u posebnim uvjetima. Na primjer: interkristalna, napetosna, točkasta, korozija u procjepu. Nehrđajući čelici se dijele na feritne, austenitne, duplex, martenzitne i precipitacijski očvrsnute nehrđajuće čelike. Svaki od njih ima svoje prednosti i mane, pa se s obzirom na zahtjeve odabire najpovoljnija vrste nehrđajućeg čelika. Najčešće se zavaruju MIG i TIG postupkom. Nakon zavarivanja, nehrđajuće čelike je potrebne naknadno obraditi da bi im se vratila korozijska postojanost i time produžio vijek trajanja.

U Varaždinu, _____,
(datum) (vlastoručni potpis)

Sveučilište
SjeverSVEUČILIŠTE
SIEVERIZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

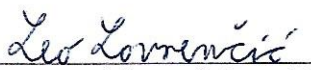
Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Leo Lovrenčić pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom *Nehrđajući čelik – zavarivanje i naknadne površinske obrade* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
Leo Lovrenčić
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Leo Lovrenčić neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom *Nehrđajući čelik – zavarivanje i naknadne površinske obrade* čiji sam autor.

Student/ica:
Leo Lovrenčić
(vlastoručni potpis)

7. Literatura

- [1] M. Gojić: Metalurgija čelika, Sisak, 2006.
- [2] <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2018/world-steel-in-figures-2018.html>, 29.7.2019.
- [3] <https://www.scribd.com/document/372705781/Steel-Metallurgy>, 10.8.2019.
- [4] <https://sassda.co.za/the-global-and-local-stainless-steel-primary-product-market/>, 22.9.2019.
- [5] R. J. Fruehan, Steelmaking and Refining Volume, AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA, 1998.
- [6] https://www.researchgate.net/figure/LD-BOF-Mixed-Blowing-BOFs-and-Bottom-Blown-BOF-Q-BOP-16-partly-modified_fig2_270787222, 5.8.2019.
- [7] Ž. Kondić, Ponavljanje korozija i AKZ, prezentacija
- [8] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2002.
- [9] G. A. Rana, Practical approach to cathodic protection, 2005.
- [10] <https://www.scribd.com/document/372695910/Introduction-to-Stainless-Steels>, 7.9.2019.
- [11] https://bib.irb.hr/datoteka/749414.Mehanizmi_zatite_od_korozije_-_skripta_2015.pdf, 22.9.2019.
- [12] M. Novosel, D. Krumes, Posebni čelici, Slavonski Brod, 1998.
- [13] https://www.fsb.unizg.hr/korozija/PROIZVODNI_POSTUPCI.pdf, 5.8.2019.
- [14] https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrokemijska_korozija#/media/Datoteka:Rust_Bolt.JPG, 5.8.2019.
- [15] <https://www.scribd.com/document/372696305/Stainless-Steel-Vs-Corrosion>, 8.8.2019.
- [16] <http://tekol-teri.hr/images/akz3V.jpg>, 5.8.2019.
- [17] Z. Ahmad, Principles of corrosion engineering and corrosion control, 2006.
- [18] <https://www.scribd.com/document/287643491/Outokumpu-Stainless-Steel-Handbook>, 9.9.2019.
- [19] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1429524863-0-im_korozija_15compatibilitymode.pdf, 5.8.2019.
- [20] https://bib.irb.hr/datoteka/843434.KEMIJSKA_POSTOJANOST.pdf, 19.9.2019.
- [21] http://www.davidnfrench.com/Dot_page.asp?Dotid=77, 7.9.2019.
- [22] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/ferritic-stainless-steel>, 8.9.2019.
- [23] https://www.nickelinstitute.org/media/1667/designguidelinesfortheselectionanduseofstainlesssteels_9014_.pdf, 8.9.2019.
- [24] M. Y. Demeri, Advanced High-Strength steels, ASM International, 2013.
- [25] https://www.doitpoms.ac.uk/miclib/micrograph_record.php?id=771, 8.9.2019.
- [26] <https://www.hawkins.biz/insights/insight/stainless-steels>, 8.9.2019.
- [27] <https://www.bssa.org.uk/topics.php?article=606&featured=1>, 8.9.2019.
- [28] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357913914-0-ssnc_11_pred_tekst.pdf, 19.9.2019.
- [29] <https://www.scribd.com/document/136155402/Welding-Book>, 11.9.2019.
- [30] <https://www.scribd.com/document/101919731/Welding-Consumables-stainless-Steel>, 11.9.2019.
- [31] <https://technoweld.com.au/2019/06/03/why-do-we-use-colour-in-welding/>, 19.9.2019.

- [32] https://www.reddit.com/r/pics/comments/9appnr/the_colours_from_oxidation_in_this_stainless/, 19.9.2019.
- [33] <https://www.scribd.com/document/389318098/Weld-Discoloration-Pharmaceutical-Engineering-2011>, 26.9.2019.
- [34] http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_EN.pdf, 25.9.2019.
- [35] <http://gowelding.org/welding/stick-smaw/>, 26.9.2019.
- [36] <https://www.scribd.com/document/62105484/GMAW-of-Stainless-Steel>, 29.9.2019.
- [37] <https://www.scribd.com/document/372705845/Welding-of-Stainless-Steels>, 26.9.2019.
- [38] <https://www.thefabricator.com/article/consumables/shielding-gas-blends-for-carbon-steel-gmaw>, 26.9.2019.
- [39] http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS&COMPONENTS/Pressure_vessels/ss_weld_manual_avesta.pdf, 29.9.2019.
- [40] <https://www.weldingis.com/gtaw-tig-welding/>, 26.9.2019.
- [41] <http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml>, 26.9.2019.
- [42] <https://www.scribd.com/document/235917178/Welding-of-Duplex-Stainless-Steel>, 12.9.2019.
- [43] <https://servus.hr/strucni-clanci/plazma-rezanje-nehrđajućih-čelika-dio-1/>, 19.9.2019.
- [44] <https://servus.hr/strucni-clanci/plazma-rezanje-nehrđajućih-čelika-dio-2/>, 19.9.2019.
- [45] <http://www.laser-ing.hr/blog/na-sto-treba-pripaziti-kod-laserskog-rezanja-inox/>, 19.9.2019.
- [46] <https://www.scribd.com/document/348129972/Pickling-Heat-Tint-for-SS>, 19.9.2019.
- [47] S. Brkić, *Nehrđajući čelici u farmaceutskoj, prehrambenoj i kemijskoj industriji*, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2007.
- [48] Strojopromet Zagreb: *Priručnik: Nehrđajući čelici – potrebe njihove naknadne obradbe*, Zagreb, 2000.
- [49] <http://www.trgostal-lubenjak.hr/strojevi.php?s=alati&grupa=32>, 19.9.2019.
- [50] Alar, V.: *Kemijsko i elektrokemijsko čišćenje zavarenih konstrukcija od nehrđajućih čelika*, Seminar: Nehrđajući čelici, Zagreb, 2011.
- [51] <https://www.nitty-gritty.it/stainless-steel-passivation-process/?lang=en>, 19.9.2019.
- [52] <https://www.indiamart.com/surface-creator/electropolishing-and-passivation.html#pickling-of-stainless-steel>, 22.9.2019.

8. Popis slika

Slika 1: Svjetska proizvodnja nehrđajućeg čelika

Slika 2: Shematski prikaz AOD konvertora

Slika 3: Shematski prikaz AOD-VCR konvertora

Slika 4: Shematski prikaz KCB-S konvertora

Slika 5: Shematski prikaz K-BOP konvertora

Slika 6: Shematski prikaz MRP-L procesa

Slika 7: Shematski prikaz CLU konvertora

Slika 8: Shematski prikaz VOD procesa

Slika 9: Mehanizam samoobnavljanja pasivnog sloja kromovih oksida

Slika 10: Kemijska korozija

Slika 11: Elektrokemijska korozija

Slika 12: Opća korozija

Slika 13: Točkasta korozija

Slika 14: Mehanizam nastanka interkristalne korozije

Slika 15: Interkristalna korozija

Slika 16: Utjecajni čimbenici napetosne korozije

Slika 17: Načini širenja napetosne korozije

Slika 18: Napetosna korozija

Slika 19: Korozija u procjepu

Slika 20: Mikrobiološki potaknuta korozija

Slika 21: Erozijska korozija

Slika 22: Podjela nehrđajućih čelika

Slika 23: Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika

Slika 24: BCC kristalna rešetka

Slika 25: Shematski prikaz udjela kroma kod feritnih nehrđajućih čelika

Slika 26: Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika

Slika 27: FCC kristalna rešetka

Slika 28: Shematski prikaz utjecaja udjela nikla na proširivanje austenitnog područja kod austenitnih nehrđajućih čelika

Slika 29: Mikrostruktura duplex nehrđajućih čelika

Slika 30: Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika

Slika 31: Shematski prikaz utjecaja ugljika na proširivanje austenitnog područja kod martenzitnih nehrđajućih čelika dozvoljavajući pretvornu austenita u martenzit

Slika 32: Mikrostruktura precipitacijski očvrnutog nehrđajućeg čelika

Slika 33: Obojenost nehrđajućeg čelika nakon zavarivanja

Slika 34: Ovisnost boje oksida o njegovoj debljini i temperaturi

Slika 35: REL zavarivanje

Slika 36: Prijenos metala kratkim spojevima

Slika 37: Gravitacijski prijenos metala

Slika 38: Prijenos metala štrcajućim lukom

Slika 39: Graf I-t kod prijenosa metala pulsним štrcajućim lukom

Slika 40: MIG zavarivanje

Slika 41: TIG zavarivanje

Slika 42: Ovisnost električnog luka i penetracije o kutu vrha elektrode

Slika 43: Izgled površine reza kod plazma rezanja nehrđajućeg čelika 1.4301

Slika 44: Nastanak točkaste korozije zbog obojenosti

Slika 45: Brusni alati i četka

Slika 46: Izgled zavara prije (lijevo) i poslije (desno) nagrivanja

Slika 47: Proizvod prije i poslije pasivacije

Slika 48: Izgled unutrašnjosti cijevi od nehrđajućeg čelika u izvornom stanju (lijevo), nakon mehaničke obrade (sredina) i nakon elektropoliranja (desno)

9. Popis tablica

Tablica 1: Postupci proizvodnje nehrđajućih čelika

Tablica 2: Feritni nehrđajući čelici

Tablica 3: Austenitni nehrđajući čelici

Tablica 4: Duplex nehrđajući čelici

Tablica 5: Martenzitni nehrđajući čelici

Tablica 6: Precipitacijski očvršnuti nehrđajući čelici

Tablica 7: Zaštitni plinovi kod MIG zavarivanja

Tablica 8: Zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja

Tablica 9: Zaštitni plinovi kod plazma zavarivanja

Tablica 10: Zaštitni plinovi kod laserskog zavarivanja

Tablica 11: Plinovi za plazma rezanje

Tablica 12: Ovisnost brzine rezanja o debljini materijala i pomoćnom plinu