

3. ZAVARLJIVOST VATRO OTPORNIH ČELIKA

3. 1. Općenito o zavarljivosti

Zavarivanje ne oksidirajućih čelika raznim vrstama postupaka često se primjenjuje u proizvodnji konstrukcija.

S obzirom da u grupu nerđajućih čelika pripadaju i vatro otporni čelici, razmotrit će se njihova zavarljivost.

Važno je primijetiti da vatro otporni čelici zbog svoje visoke legiranosti sa Cr, Ni, Al i dr. elementima nagnju raznim nepravilnostima pri postupku zavarivanja.

Osnovni problem pri zavarivanju visoko legiranih čelika predstavlja unos velike količine toplinske energije u osnovni materijal kroz zonu zavarivanja.

Unošena količina energije u zonu zavarivanja imat će za posljedicu drugačiju strukturu zavarenog spoja i njegove okoline u odnosu na osnovni materijal koji se zavaruje.

Naime, osnovni materijal u svojoj strukturi sadrži legirne elemente u obliku koji je najpovoljniji za postizanje antikorozivnih svojstava, te dobrih mehaničkih osobina.

Relativno visok unos topline u ZT i ZUT, te relativno brz postupak hlađenja nakon zavarivanja uzrokovat će pojavu raznih vrsta karbida, a s tim i pogrubljenе zrna koje je najčešće nepovoljno za tražena svojstva .

Zbog lošeg utjecaja unošenja veće količine topline pri zavarivanju vatro otpornih čelika, veća pažnja će se posvetiti onim postupcima koji pri zavarivanju unosi manju količinu topline te na taj naći manje utječe na nastalu strukturu.

Uzimajući u obzir strukturnu podjelu vatro otpornih čelika razlikuje se zavarljivost:

- feritnih vatro otpornih čelika
- austenitnih vatro otpornih čelika

3. 1. 1. Zavarljivost feritnih vatro otpornih čelika

Zavarivanje feritnih čelika sadrži određene specifičnosti o kojima treba voditi računa pri zavarivanju.

Ova grupa čelika sadrži između 16 – 30 % Cr uz običajno nizak sadržaj C između 0.05 i 0.25%.

Zbog visokog sadržaja Cr i niskog sadržaja C u strukturi čelika neće doći do stvaranja austenita, ili u krajnjem slučaju on će se javiti u jako malim količinama što će pri hlađenju uzrokovati pojavu martenzita koji nastaje u većoj mjeri 95 – 98 % i ne utječe značajno na tvrdoću ovih čelika.

Ferit kao strukturna faza nastaje pri samom početku skrućivanja i do potpunog ohlađivanja nema nikakvih transformacija. Takav ferit nazivamo « Delta ferit » (prostorno centrirana kubna rešetka).

Iz tih razloga feritne čelike ove vrste ne može se toplinski obraditi kaljenjem. Uobičajena struktura ovih čelika zbog prisutnosti ferita i male količine martenzita koji nastaje pri brzom ohlađivanju sastoji se samo od ferita + karbid.

S obzirom da se ove čelike ne može toplinski obraditi kaljenjem jer nemaju transformaciju pri brzom ohlađivanju može se steći dojam da su dobro zavarljivi.

Međutim, pri zavarivanju ovih čelika pojavljivat će se određene poteškoće. Jedan od najvećih nedostataka pri zavarivanju ovih čelika je sklonost ovakve strukture čelika, porastu zrna u materijalu zavarivanja u području ZUT iznad 900 °C.

Visok unos topline pri zavarivanju ove vrste čelika povećava mogućnost stvaranja grubo zrnate strukture, zbog sklonosti ferita pogubljenju svoje inače fino zrnate strukture prilikom dužeg izlaganja na višim temperaturama.

Povećanje zrna odvija se veoma brzo, što je ovisno o temperaturi koja se javlja u ZUT. Ta temperatura može prijeći i 1150 °C pri čemu kod nje dolazi do naglog povećanja brzine porasta zrna.

Pošto se povećanje zrna u zoni utjecaja topline javlja dosta brzo u tom se području može naći osim klasičnih grubih zrna i izrazito velika gruba zrna.

Ova pojava je u suprotnosti s fino zrnatom strukturom feritnih čelika, koji imaju relativno dobru istezljivost što se ne može reći za fazu nastalu u ZUT prilikom zavarivanja ovakve vrste čelika.

Prilikom ovakvog povećanja zrna u ZUT prijelazna temperatura udarne žilavosti znatno se povisi iznad sobne temperature, što znači da će ova faza u čeliku izazvati na sobnoj temperaturi krtost.

Nakon što je materijal postao grubo zrnat nije više moguće nikakvom toplinskom obradom materijal vratiti nazad u prvobitnu fino zrnatu strukturu.

Da bi se spriječilo povećanje zrna, zavarivanje treba izvoditi na takav način da osnovni materijal koji se nalazi neposredno uz zavar bude što kraće vrijeme izložen temperaturama iznad 1150 °C. To se može postići pravodobnim izborom postupka zavarivanja, koji će dati što manji unos topline, a time i brzo hlađenje osnovnog materijala (REL, EP, MAG).

Jedan od najčešćih postupaka je elektrolučno zavarivanje, jer omogućava zagrijavanje vrlo uskih područja pri zavarivanju čime se ograničava pretjerani unos topline i postiže bolja struktura.

S druge strane plinsko zavarivanje koje razvija puno više toplinske energije ne primjenjuje se pri zavarivanju feritnih vatro otpornih čelika, jer za sobom povlači puno nepravilnosti koje je kasnije teško popraviti.

Kod zavarivanja komada većih dimenzija poželjno je da se nakon zavarivanja predmet zagrije na 750 – 850 °C i naglo ohladi na zraku ili u vodi. Ovakav postupak toplinske obrade smanjuje krtost kojoj su feritni čelici skloni.

Teoretski je moguće poboljšati nastalu grubo zrnatu strukturu ZUT toplom deformacijom metala, tj. zagrijavanjem i čekićanjem prijelazne zone.

Međutim, ovo nije uvijek moguće, a i sam efekt čekićanja nije uvijek pouzdan, pa se zbog toga ovaj postupak i ne preporučuje.

Hladno čekićanje ZUT ne smije se nikako primijeniti, jer hladno deformiranje krte zone može dovesti do pojave unutrašnjih pukotina u području ZUT.

Skлонost porastu zrna može se smanjiti dodavanjem manje količine N u feritnu strukturu čelika. Negdje oko 0.1% N u materijalu znatno će usporiti porast zrna, a dodavanjem N u metal zavaća uzrokovat će skrućivanje ZT i ZUT u fino zrnatu strukturu.

S druge strane krtost koja je uzrokovana porastom zrna može se spriječiti primjenjujući austenitne elektrode npr. 18/8 (18 % Cr, 8 % Ni). Sadržaj Cr je u osnovnom materijalu isti kao u dodatnom materijalu, pa zbog toga nema opasnosti od stvaranja galvanskih članaka koji bi mogli izazvati elektrokemijsku koroziju.

Da bi se spriječilo izlučivanje karbida, sadržaj ugljika u osnovnom materijalu mora biti ispod 0.1 %, pri čemu ćemo tada koristiti jače legirane elektrode s 25 % Cr i 20 % Ni (25/20).

Porast zrna u feritnom čeliku može se spriječiti ili bar smanjiti legiranjem čelika na takav način da dobijemo strukturu s malo austenita, takve se čelike tada naziva feritno-austenitnim čelicima.

U slučaju dužeg zadržavanja feritnih čelika na temperaturama iznad 1000 °C javlja se sklonost prema interkristalnoj koroziji.

Slijedeća poteškoća pri zavarivanju feritnih čelika je stvaranje " σ -faze ". " σ -faza " je intermetalni spoj Cr i Fe koja ima veliku tvrdoću, krta je, nemagnetična i često slabo otporna na koroziju.

Također česta pojava pri zavarivanju feritnih čelika koja stvara poteškoće je pojava izlučenih kromovih karbida. Ukoliko neki od ovih čelika zadržavamo duže vrijeme na temperaturi između 400 °C i 540 °C doći će do pojave krtosti 475 °C.

Postupak zavarivanja feritnih čelika provodi se sa ili bez prethodnog predgrijanja osnovnog materijala. Da li će se neki materijal zagrijavati prije zavarivanja ili ne ovisit će uveliko o sadržaju C kod ove vrste čelika.

Kod čelika s visokim sadržajem Cr i relativno visokim sadržajem C oko 0.25 % provodit će se predgrijanje osnovnog materijala na temperaturu 200 °C. Kod čelika s nižim sadržajem C od 0.25 % postupak predgrijanja nije potreban.

Ukoliko je potrebno provesti zagrijavanje osnovnog materijala prije zavarivanja poželjno je da zagrijavanje i sam rad budu na temperaturi iznad M_s temperature tj. iznad početka martenzitne pretvorbe, počevši od pripajanja pa na dalje.

Ako se kojim slučajem dogodi da se u postupku pripajanja i dalje dogodi pothlađivanje ispod M_f temperature, tj. ispod svršetka martenzitne pretvorbe, stvorit će se krhka martenzitna struktura u ZT i ZUT.

Daljnijim zavarivanjem preko takvog prolaza uzrokovat će stvaranje pukotina u samom zavaru.

Odžarivanje se provodi na temperaturi od 750 - 850 °C i nakon toga brzo hlađenje. Takav postupak uzrokovat će povećanje istezljivosti prijelazne zone i poboljšanja otpornosti na interkristalnu koroziju.

Nakon provedenog zavarivanja u nekom slučaju javit će se unutrašnje napetosti koje će uzrokovati deformaciju zavarenog izratka.

Ukoliko prethodno nije dovoljno dobro predviđena ta deformacija moguće je nastalu deformaciju ispraviti pri temperaturi od 300 - 400 °C, jer se u tom temperaturnom području istezljivost čelika znatno povećava.

Unatoč svim navedenim mjerama, koje je potrebno izvoditi zavarivanje feritnih čelika ostaje još uvijek problematično, što ponajviše vrijedi za feritne čelike sa visokim sadržajem Cr npr. Oko 25 %.

3. 1. 2. Zavarljivost austenitnih vatro otpornih čelika

Kod zavarivanja austenitnih čelika osim slabe vodljivosti topline te povećanog električnog otpora, ne postoje druge poteškoće, koje se pojavljuju kod zavarivanja martenzitnih i feritnih čelika.

Međutim može doći do osjetljivosti na interkristalnu koroziju u ZUT i šire. Također je moguća pojava toplih pukotina, koje nastaju u toku ohlađivanja zavara uz djelovanje unutarnjih naprezanja.

Austenitni Cr Ni čelici sadrže 12 % do 25 % Cr i 8 % do 25 % Ni. Nikal je izrazito γ -geni element. Ne javljaju se fazne transformacije prilikom hlađenja, pa se struktura ne može toplinskom obradom zakaljivati, niti usitnjavati zrnima postupkom normalizacije.

Najpoznatiji predstavnik ove grupe čelika je čelik Cr Ni (18/8). U ovu grupu čelika pripadaju i vatro otporni čelici samo s nešto većim sadržajem Cr i Ni.

Austenitna grupa čelika ima relativno dobru istezljivost ($A_5 = 30 - 50 \%$) i žilavost u svim temperaturnim područjima višim od 0 °C. Ova vrsta čelika dobro je zavarljiva, nije sklona povećanju zrna u ZUT. Budući da im je postotak Cr viši od 12 % javlja se otpornost na koroziju i pri višim temperaturama otpornost na oksidaciju. Nisu skloni krtosti pri 475 °C.

Zavarivanje austenitnih čelika ne zahtjeva potrebno predgrijanje prije samog zavarivanja. Prilikom zavarivanja i nakon njega pojavit će se niz štetnih utjecaja koje možemo eliminirati na sljedeći način.

Izlučivanje Cr karbida u području od 450 - 580 °C na granicama zrna. Izlučeni karbidi sprečavaju dislokaciju na pravcima i ravninama klizanja plošno centrirane austenitne rešetke, što smanjuje istezljivost i žilavost austenitne strukture.

Uz prisutnost agresivnog medija uz površinu ovakvog čelika koji sadrži izlučene kromosome karbide doći će do pojave interkristalne korozije zbog nedostatka Cr koji je migrirao na granici zrna tvoreći Cr_{23}C_6 s 94.3 % Cr.

Nastalo izlučivanje karbida možemo spriječiti dodavanjem legiranih elemenata koji teže k stvaranju karbida (karbidotvorac: Nb, Ti, Ta). Njihova prisutnost uzrokovat će stvaranje stabilnih karbida na bazi navedenih karbidotvoraca što će onemogućiti izlučivanje Cr u obliku karbida.

Ovi stabilizirajući elementi (karbidotvorci) dodaju se prema sadržaju C u sljedećim omjerima:

- $\text{Ti/C} \geq 5$
- $\text{Nb/C} \geq 8$
- $\text{Ta/C} \geq 16$

Izlučivanje karbida može se smanjiti smanjenjem sadržaja ugljika < 0.03 %. Stvaranjem karbida u ovom slučaju je u manjim količinama, što će umanjiti sklonost prema interkristalnoj koroziji.

Gašenjem – toplinskom obradom na 1050 - 1100 °C, a zatim brzim hlađenjem kroz područje 850 - 450 °C postiže se austenitna struktura bez izlučenog Cr karbida.

Također malim unošenjem topline što znači da treba zavarivati u što hladnijem stanju, može se spriječiti nastajanje Cr karbida.

Pored karbida i nitrida kod austenitnih čelika moguća je pojava intermetalne faze koja ima drukčiju strukturu te na taj način smanjuje istezljivost.

” σ - faza ” su spojevi metala intermetalnog karaktera, tetragonalne strukture u kojoj su atomi pravilno raspoređeni. ” σ - faza ” nije feromagnetična. Postoji oko 50 raznih vrsta ” σ - faza ” od kojih je najpoznatija Fe – Cr ” σ - faza ” sa sadržajem Cr oko 48 %. Veoma je tvrda i krhka.

Genetika izlučivanja ” σ - faze ” veoma je važna za svojstva i pouzdan rad zavarenog spoja, bilo da se radi o toplinskoj obradi ili o dugotrajnom pogonu na visokim temperaturama.

Također pri hlađenju zavarenog spoja može doći do pojave ” σ - faze ”. Najvjerojatnije pojavljivanje ” σ - faze ” je pri temperaturi 600 - 830 °C i to uz držanje duže od 20 sati. Pojava ove ” σ - faze ” javlja se uz feritne faze.

No moguće je nastajanje " σ - faze " i iz čistog austenita, iako je izlučivanje " σ - faza " kod ferita brže nego kod austenita. " σ - faza " svojim pojavljivanjem u austenitnoj strukturi uzrokovat će pad žilavosti i istezljivosti.

Toplinskom obradom na 1200 °C dolazi do otapanja " σ - faze " koja prelazi u austenit, no međutim na ovako visokoj temperaturi može se očekivati pogrubljenje zrna. Pored " σ - faze " javljaju se razni intermetalni spojevi.

Poveći sadržaj Cr daje čeliku veću sklonost u stvaranju krhkih faza, no dodavanjem Ni i Co djelujemo usporavajući na to izlučivanje krhkih faza.

Vruće pukotine su također nuspojave štetnog karaktera koje se pojavljuju prilikom zavarivanja ove vrste čelika. Ukoliko se prilikom zavarivanja u zavarenom spoju pojavi austenitna struktura, pojavit će se sklonost prema vrućim pukotinama.

Da bi se spriječila pojava toplih pukotina poželjno je u austenitnoj strukturi posjedovati 3 % do 12 % delta ferita.

Prisustvo delta ferita određujemo pravo dobnim izborom odgovarajuće elektrode za zavarivanje austenitnih čelika. Izbor elektrode vrši se prema Schefflerovu dijagramu.

Razlikuju se slijedeće vrste toplih pukotina:

- kristalizacijske pukotine: nastaju pri isključivanju ZT kada je između dendritnih kristala još prisutna rastaljena faza,
- tople pukotine u ZUT-u: ove vrste pukotina nastaju kod zavarivanja u više prolaza,

osjetljivost na prisutnost S: prisutnost S i njegovih spojeva uz površinu čelika pri visokim temperaturama može uzrokovati stvaranje Ni fluida (Ni_3S_2)

3.1.2.1. Interkristalna korozija

Interkristalnu koroziju izazivaju karbidi kroma koji se izlučuju u kritičnom temperaturnom području u zonama uz zavar.

Ta zona, osjetljiva na izlučivanje karbida pruža se, na izvjesnoj udaljenosti paralelno uz zavar s obje strane.

Čelik u području neposredno uz zrna karbida, nema dovoljnu količinu karbida za potrebnu antikorozivnost, te stoga na tim mjestima čelik počinje korodirati.

Dakle, u grupu čelika koji nisu sklonih interkristalnoj koroziji pripadaju austenitni čelici sa niskim sadržajem ugljika, austenitno – feritni čelici i austenitni čelici stabilizirani sa Ti ili Nb kod kojih opasnost od interkristalne korozije ne postoji.

Ako se pak moraju zavarivati austenitni čelici skloni interkristalnoj koroziji, potrebno je nakon zavarivanja provesti toplinsku obradu da bi zavareni spoj mogao biti otporan na koroziju u određenim agresivnim sredinama.

Toplinska obrada nakon zavarivanja u načelu se sastoji od žarenja na temperaturi oko 1150 °C i hlađenja u vodi.

Ukoliko to nije moguće provesti radi dimenzija zavarenog predmeta ili zbog bojazni od deformacija do kojih može doći u toku toplinske obrade, morat će se zadovoljit samo popuštanjem na 850 °C u trajanju od 4 sata i hlađenjem na zraku.

Proces taljenja i skrućivanja metala samog zavara odvija se obično tako brzo da karbidi Cr nemaju vremena za stvaranje, pa zbog toga zavar nije osjetljiv na interkristalnu koroziju.

Međutim, naknadna zagrijavanja u blizini zavara (n.p. križanje dvaju zavara, završetak kružnog zavara na istom mjestu gdje je on i započet) mogu zagrijati zavar na kritičnu temperaturu, pa će i u samom zavaru nastati karbidi kroma ukoliko zavar po svom sastavu to omogućava.

Također dodatni materijal mora biti neosjetljiv na interkristalnu koroziju. To je najčešće austenit sa vrlo niskim sadržajem C ili pak mora biti stabiliziran sa Nb.

Ti kao stabilizator nije poželjan, jer u procesu zavarivanja izgara pa njegova količina može postati sumnjiva s obzirom na sigurnost stabilizacije.

Najbolje bi bilo uzeti za dodatni materijal takav sastav koji će nam u zavaru dati austenit i nešto ferita, čime suzbijamo pojavu toplih pukotina na račun antikorozivnosti koja je pri tome smanjena.

3. 1. 2. 2. Tople pukotine

Pojava stvaranja segregacija u području zavara na temperaturama većim od 1000 °C naziva se toplim pukotinama, a one nastaju uslijed intenzivnog taloženja legiranih elemenata u procesu skrućivanja zavara.

Mjesta gdje nastaju tople pukotine su obično nisko taljivi eutektikumi, koji u čitavoj masi materijala zadnji prelaze u kruto stanje.

To znači, da ta mjesta, u momentu kada je već ostala masa materijala kruta i kad već djeluju unutarnja naprezanja, nemaju dovoljne čvrstoće da bi se mogla oduprijeti tim naprezanjima pa s toga puknu neposredno nakon što su prešla u kruto stanje.

Utvrdeno je da se tople pukotine ne pojavljuju ukoliko u zavaru ima mala količina ferita. To se može objasniti činjenicom što ferit može u svoju rešetku primiti više legiranih elemenata, pa su s time smanjene mogućnosti pojave taloženja.

Osim toga, ferit je poželjan jer je na visokim temperaturama elastičniji nego austenit pa lakše podnosi unutrašnja naprezanja. Austenitno – feritne elektrode koje se najčešće primjenjuju

imaju određen sastav, te se pomoću njega može iz Schefflerovog dijagrama točno odrediti količina ferita.

Austenitno – feritni zavar može u nekim slučajevima biti opasan ako se duže vrijeme izlaže povišenim temperaturama jer iz ferita može nastati krhka "σ - faza".

Međutim, najčešća primjena ovih elektroda zbog smanjene antikorozivnosti zavora, nalazi se u području kaljivih austenitnih čelika koji nisu nehrđajući

3. 2. Izbor postupaka zavarivanja

S obzirom na navedene probleme, kod zavarivanja feritnih i austenitnih čelika izbor postupaka zavarivanja bazirat će se na količini unesene energije, koju svaki postupak za sebe unosi prilikom zavarivanja u osnovni materijal.

Istraživanja su pokazala da preveliki unos topline u osnovni materijal uzrokuje niz nepravilnosti, koje za sobom povlače lošije mehaničke i vatro otporne osobine.

Količinu unesene energije kod automatiziranih postupaka zavarivanja moguće je točno odrediti prema prikazanom izrazu.

Međutim, kod ručno izvodivih postupaka izračunavanje unesene količine topline nije precizno, zbog nepoznavanja točne vrijednosti brzine.

Brzina se kod ručnih postupaka određuje procjenom što daje okvirnu vrijednost unesene količine topline.

Količina unesene topline izračunava se prema sljedećem izrazu :

$$Q = \frac{I \cdot E}{v \cdot 1000} \cdot 60 \cdot \eta \quad (\text{kJ} / \text{mm}) \quad (3)$$

Q ...unos topline (kJ / mm)

I ...struja zavarivanja (A)

E ...napon zavarivanja (V)

v...brzina zavarivanja (mm / min)

η...stupanj iskoristivosti električnog luka (0.6 – 1)

Zavarivanje visoko legiranih vatro otpornih čelika moguće je provesti sa svim raspoloživim postupcima zavarivanja .

S obzirom na veličinu i oblik konstrukcije koja će se zavarivati najjednostavnije je koristiti elektrolučne postupke zavarivanja.

Neki od češćih postupaka zavarivanja vatro otpornih čelika su sljedeći postupci:

REL,

MAG,

MIG i

EPP.

3. 2. 1. Ručno elektrolučno zavarivanje (REL)

Princip:

Električni luk se uspostavlja kratkim spojem – kresanjem između elektrode i radnog komada, tj. priključaka na polove električne struje (istosmjerne – Direct Current ili izmjenične – Alternating Current).

Nakon toga slijedi ravnomjerno dodavanje elektrode u električni luk od strane zavarivača, te taljenje elektrode i formiranje zavarenog spoja.

Za zavarivanje je poželjna istosmjerna struja sa stabilnim električnim lukom. Jakost električnog luka određuje se na osnovu propisanih vrijednosti iz odgovarajućih standarda i mora biti tolika da omogući taljenje metala.

Elektroda može biti vezana za plus ili minus pol zavisno o vrsti elektrode. Rubovi koji se zavaruju moraju biti očišćeni od nečistoća koje sadrže ugljik te od uvijek prisutne vlage.

Sastav žice i obloge ima važnu ulogu u stvaranju kvalitetnog zavara.

Pri tome sadržaj dodatnog materijala mora odgovarati sadržaju osnovnog materijala uz relativno malu korekciju zbog izgaranja nekih elemenata pri zavarivanju.

Primjena:

REL postupak ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja većine metalnih materijala.

Ipak zbog ekonomičnosti (male brzine zavarivanja i orijentacijski 1,5 do 2 kg/depozita na sat) se primjenjuje za izvođenje kraćih zavara, obično debljine ne iznad 15 mm (20 mm) kod sučelnih zavarenih spojeva, te kraćih kutnih spojeva manje debljine zavara (gdje se obično ne traži pojačana penetracija u korijenu zavara).

Moguća je primjena za zavarivanje visoko legiranih vatro otpornih čelika pri čemu se najčešće primjenjuje austenitno - feritna elektroda bazičnog karaktera

Parametri:

Glavni parametri kod REL zavarivanja su:

- napon zavarivanja (U), koji se tijekom zavarivanja orijentacijski kreće od 18 do 26 V;
- jakost struje zavarivanja (I), koja se pri zavarivanju kreće ovisno o promjeru elektrode (orijentacijske vrijednosti $40 \cdot \phi$ elektrode, A),
- brzina zavarivanja (v), koja se kreće ovisno o primijenjenoj tehnici zavarivanja (povlačenje ili njihanje elektrode), promjeru elektrode i parametrima zavarivanja orijentacijski od 1,5 do 2,5 mm/s.

Napon praznog hoda je najčešće 60 V. Stupanj iskorištenja energije za taljenje 0,75 – 0,85.

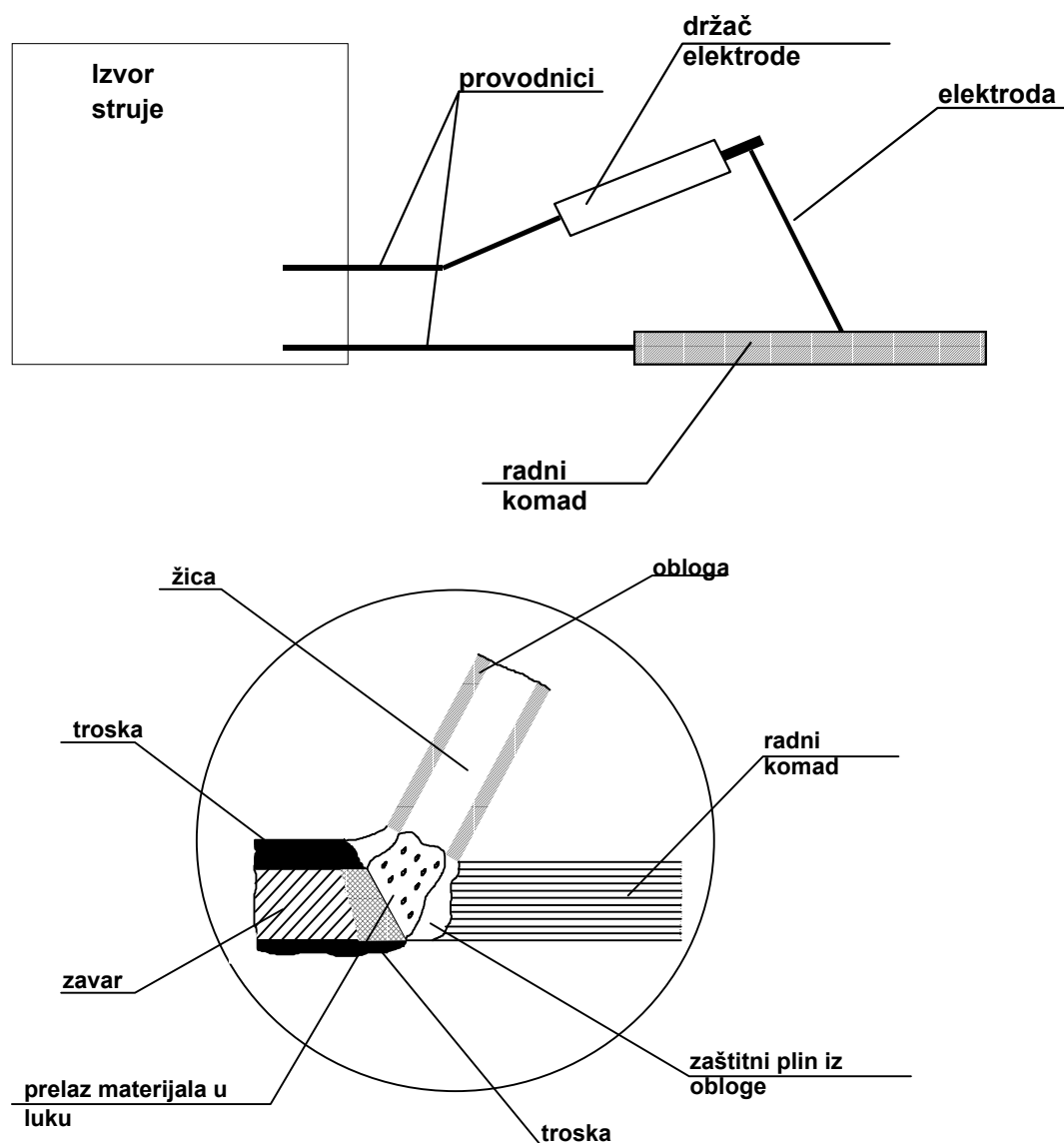
Prednosti:

- razvijen širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje,
- manja cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na MAG i EPP postupak zavarivanja,
- pogodan za manja proizvodna i reparaturna zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima zavarivanja,
- pogodan za rad na terenu, naročito tamo gdje nema električne energije (moguća primjena agregata),
- vrlo jednostavno rukovanje opremom,
- dobra mehanička svojstva zavara koja prvenstveno ovise o izvođaču zavara,

Nedostaci:

- mala brzina zavarivanja i niska produktivnost u odnosu na MAG i EPP,
- kvaliteta zavara značajno ovisi o vještini zavarivača - čovjeka,
- vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je dugo,
- neizbježan je otpad elektrode – »čik« (8-10 %), te gubitak materijala zbog prskanja u okolinu,
- teže čišćenje troske nakon zavarivanja i gubitak vremena zbog čišćenja troske,
- dolazi do jakog bljeskanja pri zavarivanju, razvijaju se štetni plinovi (potrebna dobra ventilacija prostora),
- dugotrajni rad može ostaviti štetne posljedice na zdravlju zavarivača (reuma,

oštećenja dišnog sustava...).



S1. III.1. - Shematski prikaz REL postupka zavarivanja [3]

3. 2. 2. Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (MIG)

Princip:

Električni luk se uspostavlja kratkim spojem – kresanjem između žice za zavarivanje i radnog komada, tj. priključaka na polove električne struje (istosmjerne – Direct Current ili izmjenične – Alternating Current).

Nakon uspostavljanja električnog luka slijedi ravnomjerno dodavanje žice za zavarivanje u električni luk (elektromotor, valjci za ravnanje i povlačenje ili potiskivanje žice), te taljenje žice i formiranje zavarenog spoja.

Žica prolazi određenom brzinom kroz sapnicu na pištolju, kroz koju također konstantno struji neutralni plin Argon, te na taj način ostvaruje zaštitu zavarenog spoja od moguće oksidacije.

Primjena:

MIG postupak ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja aluminijskih legura i visoko legiranih nerđajućih materijala i legura. On se uglavnom uspoređuje sa TIG postupkom.

Ima prednost pred TIG zavarivanjem sa stajališta ekonomičnosti (više kg / depozitu na sat). Primjenjuje se za zavarivanje limova i cijevi debljine od 1 mm obično do debljine 20 mm (u nekim slučajevima i daleko iznad tih debljina), kada je ekonomski i tehnološki opravdana primjena MIG postupka.

MIG postupak je izvorno polu automatski postupak, ali se vrlo često koristi kao automatski i robotizirani postupak zavarivanja.

Parametri:

Glavni parametri kod MIG zavarivanja su:

- napon zavarivanja (U), koji se tijekom zavarivanja orijentacijski kreće od 16 do 26 V;
- jakost struje zavarivanja (I), koja se pri zavarivanju kreće ovisno o promjeru žice za zavarivanje (orijentacijske vrijednosti 80 do 180, A),
- brzina zavarivanja (v), koja se kreće ovisno o primijenjenoj tehnici zavarivanja (povlačenje ili njihanje), promjeru žice za zavarivanje i parametrima zavarivanja orijentacijski od 2 do 4 mm / s.

Napon praznog hoda je najčešće 60 V. Stupanj iskorištenja energije za taljenje 0,75 – 0,85.

Prednosti:

- razvijen dovoljno širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje , manja cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na TIG postupak,
- pogodan za pojedinačnu i masovnu proizvodna, te reparaturna zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima zavarivanja,
- pogodan za automatizaciju i robotizaciju,

- daleko veća učinkovitost (kg depozita/h) u odnosu na TIG zavarivanje.

Nedostaci:

- kvaliteta zavara još uvijek ovisi o vještini zavarivača – čovjeka kod poluautomatskog zavarivanja,
- vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je kraće nego kod TIG zavarivanja (mada je praksa da MIG zavarivači prvo nauče REL postupak zavarivanja),
- kvaliteta zavarenog spoja je slabija u odnosu na kvalitetu TIG zavarenih spojeva (kako sa estetskog stajališta, tako i sa stajališta grešaka u zavarenom spoju i mehaničkih svojstava zavarenog spoja),
- dolazi do jakog bljeskanja pri zavarivanju, pri zavarivanju se oslobađaju plinovi (potrebna dobra ventilacija prostora),
- dugotrajni rad može ostaviti štetne posljedice na zdravlju zavarivača (reuma, oštećenja dišnog sustava...).

3. 2. 3. Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina (MAG)**Princip:**

Električni luk se uspostavlja kratkim spojem – kresanjem između žice za zavarivanje i radnog komada, tj. priključaka na polove električne struje (istosmjerne – Direct Current).

Nakon toga slijedi ravnomjerno dodavanje žice za zavarivanje u električni luk (elektromotor, valjci za ravnanje i povlačenje ili potiskivanje žice), te taljenje žice i formiranje zavarenog spoja.

Primjena:

MAG postupak ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja većine metalnih materijala.

Ima prednost pred REL zavarivanjem sa stajališta ekonomičnosti (više kg/depozita na sat, veća intermitencija pogona – nema zastoja za izmjenu elektroda kao kod REL postupka, manje čišćenje zavara).

Primjenjuje se za zavarivanje limova i cijevi debljine od 1 mm obično do debljine 20 mm (u nekim slučajevima i daleko iznad tih debljina, kada je ekonomski i tehnološki opravdana primjena MAG postupka).

Kod većih debljina osnovnog materijala i veće duljine zavarenih spojeva ekonomičnije je koristiti EPP postupak (samostalno ili u kombinaciji sa MAG ili REL postupkom, npr. za provarivanje korijena).

MAG postupak je izvorno poluautomatski postupak, ali se vrlo često koristi kao automatski i robotizirani postupak zavarivanja.

Značajan je udio robota za MAG zavarivanje u automobilskoj industriji.

Parametri:

Glavni parametri kod MAG zavarivanja su:

- napon zavarivanja (U), koji se tijekom zavarivanja orijentacijski kreće od 16 do 26 V;
- jakost struje zavarivanja (I), koja se pri zavarivanju kreće ovisno o promjeru žice za zavarivanje (orijentacijske vrijednosti 80 do 180, A)
- brzina zavarivanja (v), koja se kreće ovisno o primijenjenoj tehnici zavarivanja (povlačenje ili njihanje), promjeru žice za zavarivanje i parametrima zavarivanja orijentacijski od 2 do 4 mm/s.

Napon praznog hoda je najčešće 60 V. Stupanj iskorištenja energije za taljenje 0,75 – 0,85.

Napomena:

Postoji moderna varijanta MAG postupka tzv. TIME postupak gdje su vrijednosti napona, struje i brzine zavarivanja (ali i promjera žice za zavarivanje) značajno veće u odnosu na klasični MAG.

Tako su npr. za žicu promjera 2,5 mm registrirane srednje vrijednosti parametara zavarivanja:

$$U = 40 \text{ V}, I = 420 \text{ A}.$$

Prednosti:

- razvijen dovoljno širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje,
- manja cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na EPP postupak zavarivanja (ali ipak nešto veća u odnosu na REL),
- pogodan za pojedinačnu i masovnu proizvodnju, te reparaturna zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima zavarivanja,
- manji gubici vremena zavarivača (nema izmjene elektrode kao kod REL zavarivanja,

- manje čišćenje zavora),
- pogodan za automatizaciju i robotizaciju,
- kvalitetan zavar i dobra mehanička svojstva zavora,

Nedostaci:

- kvaliteta zavora još uvijek ovisi o vještini zavarivača – čovjeka kod poluautomatskog zavarivanja (ali ipak ne toliko kao kod REL zavarivanja),
- vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je kraće nego kod REL zavarivanja (mada je praksa da MAG zavarivači prvo nauče REL postupak zavarivanja),
- dolazi do jakog bljeskanja pri zavarivanju, pri zavarivanju se oslobađaju plinovi (potrebna dobra ventilacija prostora),
- dugotrajni rad može ostaviti štetne posljedice na zdravlju zavarivača (reuma, oštećenja dišnog sustava...)

3. 2. 4. Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom (EPP)**Princip:**

Električni se luk uspostavlja pomoću visokofrekventnog generatora (VF generator) koji se uključuje samo u djeliću sekunde, neposredno pred zavarivanje.

Nakon uspostavljanja električnog luka, VF generator se isključuje, žica za zavarivanje kontinuirano dolazi u električni luk, tali se i sudjeluje u formiranju zavarenog spoja. Proces se odvija pod zaštitnim praškom.

Prilikom ohlađivanja zavareno spoja javlja se osjetljivost na interkristalnu koroziju, pa zbog toga čelik uvijek mora imati niski sadržaj ugljika (mora biti stabiliziran).

Žica za zavarivanje mora biti od istog materijala kao osnovni materijal, no zbog izgaranja pojedinih elemenata poželjno je da sadržaj tih elemenata bude nešto viši .

Korekcija sastava zavarenog spoja može se izvršiti i pomoću praha koji prekriva u potpunosti rastaljenu kupku i usijani rastaljeni materijal, te vrh elektrode.

Zavarivanje pod prahom izvodi se sa visokim vrijednostima jakosti struje uslijed čega se postiže velika penetracija i jako otapanje osnovnog materijala, koji se pod prahom polagano hladi.

Zbog sporog ohlađivanja mogu se pojaviti razne nepravilnosti koje nastojimo spriječiti smanjenjem jakosti struje na najmanju moguću mjeru. Elektroda je vezana za + pol ukoliko se zavaruje sa istosmjernom strujom.

To je automatski postupak zavarivanja u horizontalnom položaju.

Primjena:

EPP postupak se koristi za zavarivanje i navarivanje gdje se traži velika količina deponiranog materijala (zavara) ili kod velikoserijske proizvodnje (npr. kružni zavareni spojevi na propan/butan bocama za domaćinstvo).

Primjenjuje se za zavarivanje limova debljine veće od 6 mm, u iznimnim slučajevima uz određene mjere opreza mogu se zavarivati debljine manje od 6 mm.

Zavarivanje se izvodi u horizontalnom položaju (iznimka Circomatic postupak – zavarivanje kružnih zavarenih spojeva na cilindričnim posudama pod tlakom u zidnom položaju).

Značajna je primjena ovog postupka kod zavarivanja debelostjenih posuda pod tlakom, te debelostjenih limova (npr. postolja lokomotiva, sekcije mostova).

Parametri:

Glavni parametri kod EPP postupka zavarivanja su:

- napon zavarivanja (U), koji se tijekom zavarivanja orijentacijski kreće od 26 do 40 V;
- jakost struje zavarivanja (I), koja se pri zavarivanju kreće ovisno o promjeru elektrode (od 100 A do 1000 A; prema nekim literaturnim podacima i do 5000 A).
- Zbog manje duljine slobodnog kraja žice moguće je iste promjere žice za zavarivanja opteretiti puno većim strujama nego kod REL postupka (gdje je duljina slobodnog kraja praktično duljina elektrode koja se koristi za zavarivanje).
- brzina zavarivanja (v), je značajno veća u odnosu na REL i MAG postupak (orijentacijske vrijednosti 200 do 600 mm/min).

Napon praznog hoda je 100 V (veći nego kod REL postupka iz razloga što se kod EPP postupka teže uspostavlja električni luk).

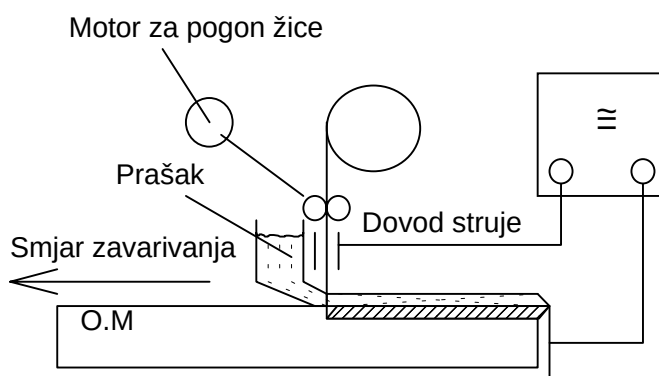
Prednosti:

- velike brzine zavarivanja i daleko veća produktivnost u odnosu na REL i MAG postupak zavarivanja,
- budući da se radi o automatskom postupku zavarivanja, kvaliteta ne ovisi o čovjeku – operateru (jednom uspostavljeni parametri zavarivanja daju konstantnu kvalitetu zavarenih spojeva),

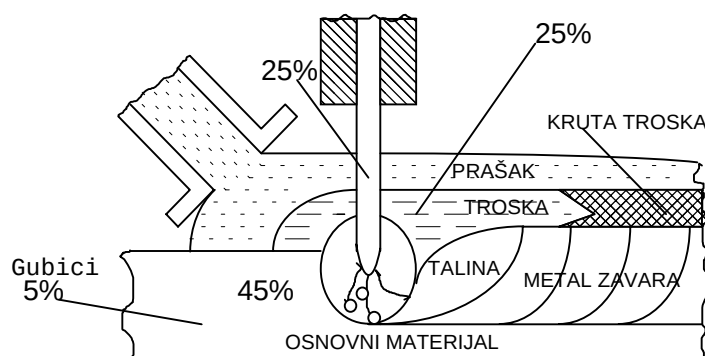
- visok stupanj iskorištenja energije za taljenje (0,9 - 0,95),
- kvalitetan estetski izgled zavara,
- nema otpada žice (»čik-a«), te gubitaka zbog prskanja kapljica u okolinu,
- lako čišćenje troske i mogućnost recikliranja troske,

Nedostaci:

- veća cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na MAG i EPP postupak zavarivanja,
- slabija mehanička svojstva zavarenog spoja u odnosu na REL i MAG zavarivanje (brže hlađenje veće količine deponiranog materijala),
- mala brzina zavarivanja i niska produktivnost u odnosu na MAG i EPP,
- kvaliteta zavara značajno ovisi o vještini zavarivača - čovjeka,
- vrijeme za izobrazbu operatera je mnogo kraće od izobrazbe dobrog zavarivača,
- nema vizualnog nadzora električnog luka tijekom zavarivanja (velike jakosti struje daju svjetlost velike intenzivnosti pa u obzir dolazi nadzor X-zrakama i video kamerama),
- u tehnološkoj liniji koja koristi EPP automate obično je potrebna dodatna mehanizacija (okretaljke, okretno-nagibni stolovi, pozicioneri, konzole, ...),
- ukoliko se ne vodi računa o što nižim vrijednostima jakosti struje može se dogoditi da se unese prevelika količina topline što će uzrokovati razne nepravilnosti uz zavarenom spoju



Sl. III.2. - Shema uređaja za zavarivanje [3]

Sl. III.3. - *Shematski prikaz EPP postopka zavarivanja* [3]

3.3. Predgrijavanje

Predgrijavanje je proces zagrijavanja metala obratka na temperaturu dovoljno visoku da ostvari kvalitetno zavarivanje bez pojave nepoželjnih nuspojava.

Postupkom predgrijanja u pravilu bi se trebalo smanjiti rizik pojave hladnih pukotina tako što ona utječe na mikro strukturu ZUT – a i materijala zavara, te pospješuje difuziju vodika iz zavarenog spoja.

Ponekad predgrijanje može pozitivno utjecati na sprečavanje pojave vrućih pukotina. Određivanje visine temperature predgrijanja provodimo temeljem proračuna, te ispitivanjem pukotina.

U pravilu neki čelik je potrebno predgrijavati prije zavarivanja ukoliko mu vrijednost C_{ekv} prelazi 0. 41 %. C_{ekv} određujemo prema izrazu međunarodnog instituta za zavarivanje, a navedeni izraz pomoću kojeg izračunavamo vrijednost izgleda ovako : [4]

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \% \quad (4)$$

Potrebno je istaknuti da temperatura predgrijavanja ne smije preći temperaturu M_s čelika koji se zavaruje. Ukoliko se pređe ta temperatura, može se pojaviti stabilizacija zaostalog austenita.

Kod visoko legiranih vatro otpornih čelika u pravilu prije zavarivanja predgrijavamo samo feritne vatro otporne čelike, dok kod austenitnih to nije potrebno.

Ovisno o vrsti feritnih vatro otpornih čelika vrijednost temperature predgrijanja kreće se u rasponu od 100 – 300 °C.

Ako se čelik predgrijava u navedenom temperaturnom rasponu, moguće je izbjeći u većoj mjeri navedene nepravilnosti.

3. 4. Izbor dodatnog materijala

Ovisno o postupku zavarivanja koji se primjenjuje kod zavarivanja pojedine vrste vatro otpornih čelika primjenjivat će se određene vrste dodatnog materijala. Dodatni materijal može biti u obliku obložene, pune ili praškom punjene žice.

Najčešće primjenjivani elektrolučni postupak zavarivanja koristit će sve vrste žica kao dodatni materijal. Zavisno o vrsti elektrolučnog postupka primjenjivat će se obložena ili puna elektroda, a samo u ponekim slučajevima koristit će se praškom punjena žica.

Kod REL postupka koji se kod nas još uvijek često primjenjuje koriste se obložene elektrode. Drugi pak elektrolučni postupci kao na primjer u zaštiti plina ili pod praškom mogu koristiti ovisno o vrsti materijala zavarivanja i o tipu postupka sve tri vrste žica.

Ukoliko je moguća primjena postupaka bez dodatnog materijala osigurat će se izbjegavanje pojedinih nepravilnosti koje mogu nastati pri dovođenju dodatnog materijala.

Međutim primjena takovih postupaka često puta nije moguća pa tada i postojeći postupci moraju zadovoljiti uvijete.

S obzirom na vrstu postupka koji se primjenjuje pri zavarivanju mogu se razlikovati slijedeće vrste dodatnog materijala:

- obložena žica,
- puna žica i
- praškom punjena žica.

3. 4. 1. Obložena žica

Obložena žica kao dodatni materijal primjenjuje se najčešće kod ručnog elektrolučnog postupka zavarivanja.

Sastoji se od materijala istog ili sličnog sastava kao i materijal zavarivanja, što ovisi o strukturi koju želimo postići pri zavarivanju, te od obloge koja se sastoji od raznih spojeva koji svojim izgaranjem podržavaju ostvareni električni luk, a istovremeno zaštićuju rastaljenu kupku od okoline.

Razlikujemo dvije vrste obloge koje se najčešće primjenjuju :

- bazična obloga
- rutilna obloga

Vrsta obloge ovisi o vrsti postupka koji se primjenjuje pri zavarivanju, a koji je opet ovisan o vrsti materijala zavarivanja.

Prednosti:

- jednostavnija izrada koja za sobom povlači manju cijenu elektroda,
- ovakva vrsta elektrode zahtjeva manje komplicirane postupke zavarivanja,

Nedostaci:

- prilikom zavarivanja razvijaju se plinovi štetni za zdravlje, pa je neophodna zaštita,
- ova vrsta elektrode primjenjuje se najčešće kod ručnih postupaka zavarivanja te na taj način kvaliteta zavara ovisi o uvježbanosti izvođača zavara,
- kao posljedica se javlja prskanje dodatnog materijala što utječe na izgled zavarenog spoja .

3. 4. 2. Puna žica

Pune žice kao dodatni materijal, najčešće se primjenjuju kod elektrolučnih postupaka koji koriste zaštitni plin pri zavarivanju.

Izuzev plinskog zavarivanja koji se nastoji izbjeći pri zavarivanju vatro otpornih čelika.

Puna žica je također istog ili pak sličnog sastava kao i dodatni materijal koji se zavaruje. Kod elektrolučnih postupaka česta je primjena kroz MIG i MAG postupak.

Prednosti :

- brzina dovođenja žice je manja nego kod dovođenja obložene ili pak kod praškom punjene žice,

- manja koncentracija topline pri zavarivanju,
- jednostavnija izrada ovakve vrste dodatnog materijala,
- jednostavnije pakiranje, te korištenje ove vrste elektroda jer nema bojazni od vlage iz zraka
- kvaliteta zavarenog spoja značajnije je bolja u odnosu na obložene elektrode,
- od mogućih postupaka koji se primjenjuju pri zavarivanju uz ovu vrstu dodatnog materijala, gotovo svi se mogu automatizirati

Nedostaci:

- veća srednja vrijednost jakosti struje u električnom luku u odnosu na praškom punjene žice,
- zahtijevaju se složeniji postupci za zavarivanje,
- osjetljivost pištolja za zavarivanje od mogućih oštećenja je velika,
- veća cijena izrade zavarenog spoja zbog skupljih i složenijih aparata za zavarivanje,

3. 4. 3. Praškom punjene žice

Ovu vrstu dodatnog materijala primjenjujemo kod elektrolučnih postupaka zavarivanja u zaštiti plina ili pod praškom.

U prošlosti primjena ove vrste dodatnog materijala bila je dosta ograničena zbog nemogućnosti izrade manjih promjera elektrode za zavarivanje.

Zbog dobrih svojstava koja se dobiju zavarivanjem ovom elektrodom primjena je u današnje vrijeme značajno porasla. Praškom punjena žica sastoji se od dva dijela.

Izvana je materijal koji se dodaje u kupku pri zavarivanju i on može biti istog ili sličnog sastava kao i osnovni materijal koji se zavaruje.

Iznutra elektroda može sadržavati punjenje praškom različitog sastava.

S obzirom na sastav i vrstu punjenja razlikujemo sljedeće vrste praškom punjenih žica:

- bazične PP žice,
- rutilne PP žice i
- žice punjene metalnim prahom.

Prema načinu izrade razlikujemo sljedeće vrste :

- žice zatvorenog oblika i
- bešavne žice

Razlozi primjene praškom punjenih žica:

- sigurnije upravljanje, neosjetljivost na greške vezivanja,
- dobro vezivanje, bez grubih prelaza, te glatka površina zavara,
- visoka sigurnost od pukotina,
- malo špricanje na osnovni materijal,
- fleksibilna mogućnost dodavanja legirnih i mikro legirnih elemenata

Pri izradi žice vodi se računa o sredstvu vezivanja samog praška unutar žice. Da bi spriječili segregacije mješavine praška tijekom trešnje, on se pomoću vodenog praška granulira u zrna točno određene veličine.

Nakon kontroliranog punjenja slijedi toplinska obrada s ciljem poboljšanja istezljivosti žice i reduciranja vlage iz praška.

3. 4. 3. 1. Rutilnim praškom punjene žice**Karakteristike:**

- dobro držanje u raznim položajima zavarivanja,
- jednostavno namještanje parametara zavarivanja,
- prijenos materijala u finim kapljicama,
- glatka i čista površina zavara, kompaktna a time i lako odstranjiva šljaka i dr.

Područje primjene:

- za sve prinudne položaje moguće je zavarivanje potpuno mehanizirati jer se rutilna šljaka brzo skrućuje.

3. 4. 3. 2. Bazičnim praškom punjene žice**Karakteristike:**

- odlična mehanička i tehnološka svojstva zavara, kako u zavarenom stanju tako i nakon toplinske obrade,

- zbog prijenosa topline srednjim i grubim kapljicama bez ograničenja primjenjiva su za zavarivanje korijena zavora,
- velika sigurnost protiv pukotina i dr.

Područje primjene:

Visoko zahtjevnici zavoreni spojevi bez ograničenja debljine kod zavarivanja.

3. 4. 3. 3. Metalnim prahom punjene žice**Karakteristike:**

- prijelaz rastaljenog materijala u vrlo finim kapljicama u području luka,
- pravilni oblik površine zavora bez šljake,
- široki stabilni električni luk s odličnim radnim karakteristikama i dr.

3.5. Toplinska obrada vatro otpornih čelika

Pod pojmom toplinske obrade podrazumijeva se zagrijavanje na dovoljno visoku temperaturu, te držanje na toj temperaturi izvjesno vrijeme, čime se nastoji eliminirati jednu ili ponekad i više nepravilnosti koje utječu na svojstva zavorenog spoja, a koje nastaju uslijed neke prethodne obrade.

Toplinska obrada za pojedine vrste materijala razlikuje se, što ovisi o vrsti nepravilnosti koja je nastala.

Dali će se toplinska obrada nad nekim materijalom provesti ovisi o vrsti nepravilnosti koja je nastala, te o njezinom stupnju nastajanja.

U pravilu kod vatro otpornih čelika toplinski obrađujemo samo feritne čelike, jer su oni skloni stvaranju raznih nepravilnosti.

Ponekad je moguće toplinsku obradu primijeniti i na austenitne vatro otporne čelike ali ne zbog samog zavarivanja, već kao posljedica neke druge obrade.

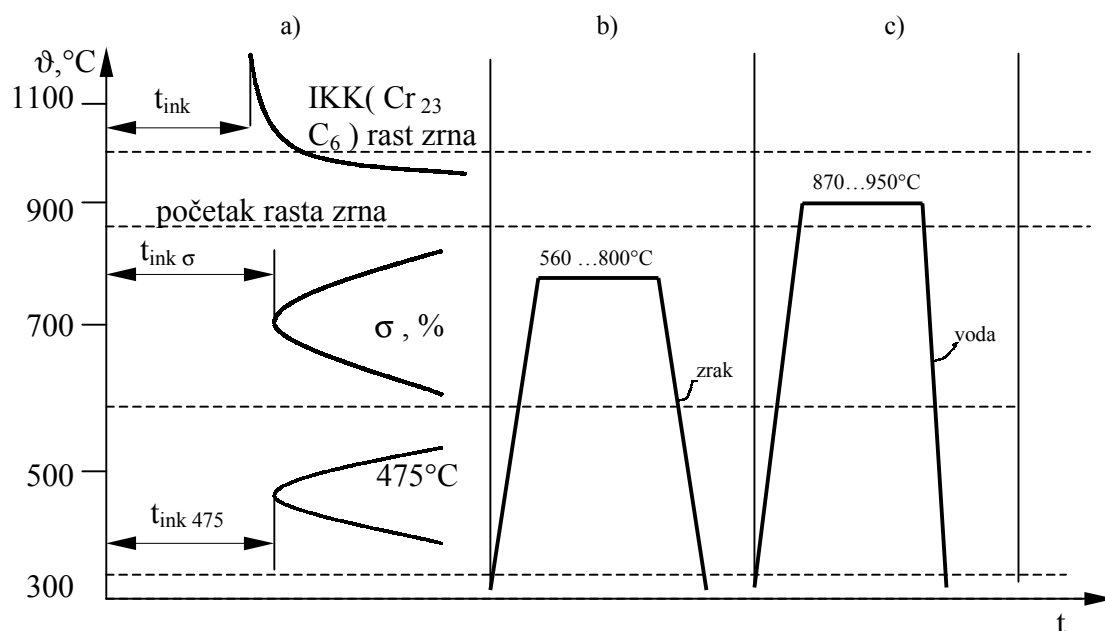
S obzirom na već gore navedenu strukturnu podjelu, razlikuje se toplinska obrada feritnih i austenitnih čelika.

3. 5. 1. Toplinska obrada feritnih vatro otpornih čelika

Postupci toplinskih obradi feritnih čelika izvode se samo u slučaju potrebe ispravljanja neke nehotečne ili neizbježne pogreške (npr. predgrijanja pri zavarivanju koje uzrokuje stvaranje predispozicije za interkristalnu koroziju).

Posebnu važnost treba posvetiti trajanju inkubacije pojedine anomalije i to prije svega za utvrđivanje vremenskog parametra toplinske obrade kako ne bi dotična anomalija nastupila ili se pojačala pri onoj obradi koja bi ju trebala smanjiti.

Tako bi žarenje pri 870 – 900 °C bilo efikasno kada bi se mogla izbjeći pojava grubog zrna. Zato se općenito, kako za korekciju prikazanih pogrešaka tako i za sniženje napetosti nakon zavarivanja radije primjenjuje žarenje pri 560 – 800 °C uz hlađenje na zraku. Navedene anomalije, te postupci eliminacije istih prikazani su dijagramski na slici 6.



Sl. III.4. - Shematski prikaz zbivanja u feritnim čelicima te dijagrami postupaka toplinskih obradbi u svrhu eliminacije pogrešaka. [3]

a) vrste anomalija

b) žarenje za eliminaciju krtosti 475

c) žarenje sa gašenjem za eliminaciju σ - krtosti

3. 5. 2. Toplinska obrada austenitnih vatro otpornih čelika

Provodi se najčešće sa ciljem eliminacije nastalih nepoželjnih pojava uslijed raznih vrsta obrada. Prilikom zavarivanja čistih austenitnih čelika u strukturi zavarenog spoja javlja se manja količina δ - ferita što može uzrokovati neželjene posljedice.

U pravilu o prisutnosti δ - ferita u austenitnoj strukturi mišljenja se razlikuju, neki smatraju da njegovo prisustvo smanjuje nastajanje toplih pukotina, no u duljem radu pri povišenim temperaturama on prelazi izotermički u " σ - fazu ", te tako utječe nepovoljno na žilavost i korozijsku postojanost.

Nastajanje ovih nepravilnosti daje za pravo nekim znanstvenicima da tvrde kako je prisustvo ferita nepoželjno.

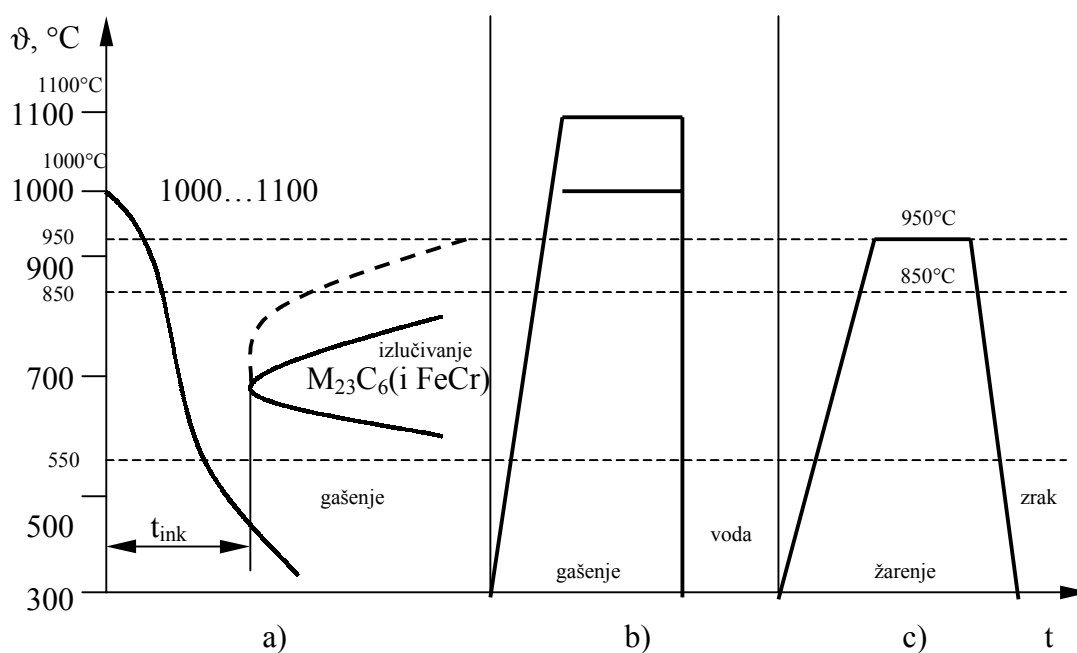
Osim pojave " σ - faze " u austenitnim se čelicima mogu pojaviti neželjena izlučivanja karbida Cr_{23}C_6 koji nataloženi po granicama austenitnih zrna uzrokuju osiromašenje periferije tih zrna na Cr te s tim stvaraju predispoziciju za interkristalnu koroziju.

Nastala senzibilizacija zrna može se otkloniti toplinskom obradom gašenjem ili se pak može izbjeći izborom stabiliziranih čelika.

Kod austenitnih čelika može se pojaviti krtost zbog različitih razloga kao što su izlučivanje karbidne faze po granicama zrna (sporim hlađenjem destabiliziranog čelika ili njegovim duljim držanjem pri izotermi između 550 – 850 °C).

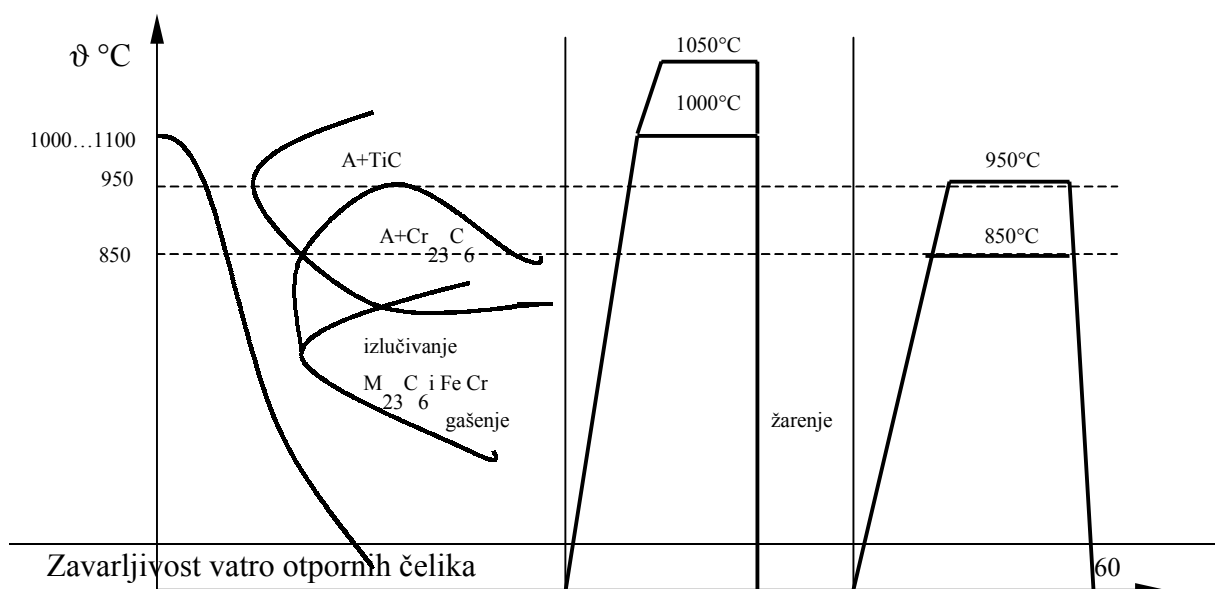
Krtost može biti posljedica hladnog očvrnuća i to bilo samo zbog unošenja novih dislokacija u čelik, bilo još dodatno i zbog stvaranja deformacionog (ϵ) – martenzita, odnosno α - martenzita.

Zavarivane spojeve vatro otpornih austenitnih čelika poželjno je podvrgnuti austenitizaciji na oko 1100 °C ili žarenju na temperaturi oko 900 – 950 °C radi uklanjanja unutarnjih napetosti. [4].



Sl. III 5. - Shematski prikaz događanja u austenitnim sterilnim ne stabiliziranim čelicima i dijagrami toka toplinskih obradbi s ciljem eliminacije pogrešaka. [3]

- a) izlučivanje
- b) gašenje
- c) žarenje



a)

b)

c)

Sl. III. 6. - *Shematski prikaz toplinske obrade stabiliziranih čelika.* [3]

a) *izlučivanje*

b) *gašenje*

c) *žarenje*