

**MATERIJAL ZA PREDAVANJA IZ PREDMETA**

**REPARACIJA MAŠINSKIH DELOVA I**  
**KONSTRUKCIJA**

***Navarivanje***  
***(Handout 2)***

*Prof. dr Miloš Đukić*

**Beograd, 2022**

## Navarivanje

Radni uslovi opreme mogu da budu veoma nepovoljni i da se kao rezultat delovanja korozije, erozije, cikličnih promena opterećenja i mehaničkih i termičkih napona, javljaju značajna oštećenja materijala koja mogu da budu i tako velikog stepena da u jednom trenutku mogu da izazovu lom. Nastala oštećenja, pa čak i delimično ili potpuno razdvojene površine mogu u najvećem broju slučajeva da se saniraju postupcima reparaturnog zavarivanja u koje spada i navarivanje.

***Navarivanje je proces nanošenja slojeva metala na radne površine nekih delova radi njihove regeneracije ili radi povećanja njihovih mehaničkih ili hemijskih osobina.*** Zasniva se na polaganju slojeva dodatnog materijala na podlogu koja se od dodatnog materijala, manje ili više, razlikuje po hemijskom sastavu.

Navarivanje se primenjuje za:

1. Regeneraciju delova i opreme nanošenjem metala na površine oštećene trenjem, kavitacijom, korozijom ili lomom. Vek trajanja mnogih mašina i uređaja je ograničen usled habanja samo pojedinih delova. Umesto proizvodnje novih rezervnih delova, mnogo je ekonomičnije organizovati radionice za navarivanje. Navareni delovi imaju veću otpornost na habanje, a cena navarivanja je znatno niža od cene novog dela.
2. Postizanje traženih fizičkih, mehaničkih ili hemijskih osobina (tvrdoća, otpornost na habanje, korozija, otpornost na udarna opterećenja) na površinama pojedinih delova opreme ili njihovim segmentima.

Primenom navarivanja, moguće je postići da se tražene osobine radnih površina dobijaju nanošenjem skupljih materijala na jeftiniji, osnovni materijal.

Pri izboru materijala za navarivanje mora da se vodi računa o uslovima /parametrima kojima je tokom rada izložen osnovni materijal, odnosno o:

- otpornosti na koroziju
- postojanosti prema pritiscima (navareni sloj mora da ima istu ili bolju otpornost prema delovanju pritiska od osnovnog materijala)
- potrebnom povećanju tvrdoće
- povećanoj otpornosti prema eroziji, abraziji i kavitaciji u hladnom i toplom stanju
- otpornosti prema povišenim temperaturama
- smanjenju mogućnosti zaribavanja, ako je reč o kontaktnim površinama (mali koeficijent trenja)
- mogućnosti realizacije u proizvodnim uslovima.

Navarivanjem se ostvaruje nerazdvojiva veza između navarenog sloja i metalne osnove, pri čemu se koriste uobičajeni postupci zavarivanja. Interesantno je istaći da se postupak navarivanja u početku koristio samo za popravke oštećenih delova. Međutim, kasnije kada su se shvatile sve mogućnosti koje pruža ovaj postupak, prevashodna primena navarivanja je postala nanošenje prevlaka u cilju zaštite od habanja i korozije. Kao primer mogu da se navedu mlinovi čekićari, slika 1, koji sadrže udarna tela – čekiće koji su pri obavljanju svoje funkcije izloženi ekstremnim uslovima habanja, usled čega veoma često moraju da se menjaju. Međutim, nanošenjem prevlaka veće tvrdoće navarivanjem moguće im je značajno produžiti radni vek.

Dodatni materijali se, u zavisnosti od postupka, izrađuju u obliku obloženih elektroda, žica, traka, praška, punjene žice, sinterovanog praška različitog oblika. Ako se dodatni i osnovni materijal razlikuju po hemijskom sastavu, potrebno je da dubina uvarivanja bude što manja, jer je u protivnom vrlo teško dobiti navar traženog hemijskog sastava. Zbog toga se u većini slučajeva tehnika navarivanja razlikuje od zavarivanja, iako su obe metode u principu iste. Šematski prikaz geometrijskih karakteristika navara je dat na slici 2.



Slika 1. Prevlake nanete navarivanjem na čekice u cilju sprečavanja habanja

Prvi korak u svakom konkretnom slučaju navarivanja je izbor postupka i tehnike navarivanja, zatim sledi izbor dodatnog materijala. Na izbor postupka navarivanja utiču: veličina i oblik radnog dela, zahtevi koji se postavljaju za kvalitet radne površine i osobine osnovnog materijala (hemijski sastav, interval očvršćavanja, koeficijent linearnog širenja). Za navarivanje mogu da se koriste gotovo svi postupci zavarivanja topljenjem (gasno, E, MIG, MAG, EPP, EPT, plazmom, lasersko), sa različitom produktivnošću (0,5 – 30 kg/h nanetog materijala). Svaki od navedenih postupaka, čime nisu iscrpljeni svi postupci, ima svoje prednosti i nedostatke i može se sa većim ili manjim uspehom primenjivati za nanošenje tvrdih slojeva i obnavljanje površina.

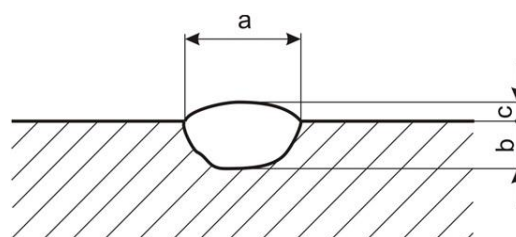
a – širina navara

b – provar

c – nadvišenje navara

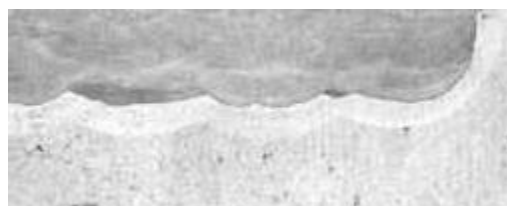
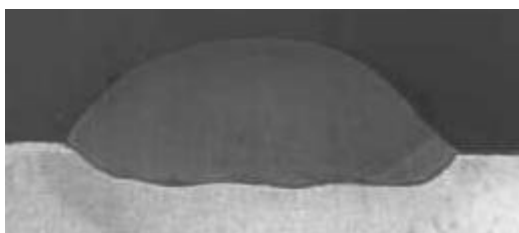
d – koeficijent oblika  $d = \frac{a}{c}$

e – koeficijent provara  $e = \frac{a}{b}$



Slika 2. Šematski prikaz geometrijskih karakteristika navara u poprečnom preseku

Navarivanje može da se izvodi u jednom ili više slojeva, slika 3 (a,b). Generalno, maksimalna tvrdoća ne može da se postigne izvođenjem samo jednog sloja navara, iako postoje legure – dodatni materijal za navarivanje čijom primenom je moguće dobiti optimalan rezultat tvrdoće i sa samo jednim slojem. Nekada je između osnovnog materijala i prvog navara neophodno naneti podsloj, čija je uloga da "premosti" razlike u hemijskom sastavu između osnovnog materijala i navara ukoliko su one velike, ili da obezbedi bolje mešanje bez pojave prslina.

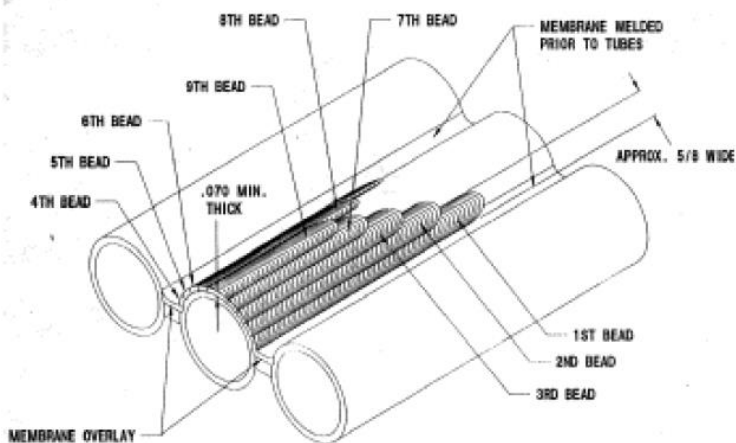


Slika 3. Navarivanje u jednom sloju (a), višeslojno (b)

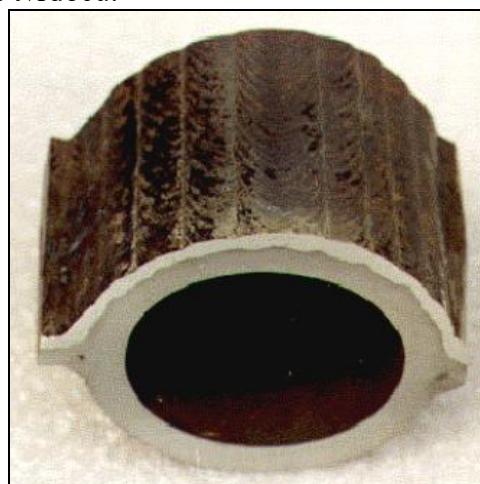
Takođe, pri navarivanju je neophodno izvođenje termičke obrade i pre (predgrevanje) i posle navarivanja, posebno kod masivnih i krutih delova. Kvalitet površine pri navarivanju je dosta grub, zbog čega skoro uvek mora da se u završnici izvodi naknadna mehanička obrada.

Navarivanje se uspešno izvodi i na ravnim i na zakrivljenim površinama. Ravne površine se navaruju postupkom odvojenih gusenica i njihanjem, dok se kod zakrivljenih površina može izvesti navarivanje po izvodnicama, slika 4, po spirali i koncentričnim krugovima. Debljina navara uobičajeno iznosi do 3mm, ali ako su neophodni deblji navari (npr. da se popune duboki žlebovi), nanosi se više slojeva.

Osobine navarenog sloja zavise uglavnom od legure koja se koristi kao dodatni materijal. Ostali uticajni faktori su: sastav osnovnog materijala, postupak i parametri navarivanja i broj slojeva. Hemijski sastav navara zavisi od hemijskog sastava čistog metala navara, sastava osnovnog metala i stepena mešanja. Stepenn mešanja je određen režimom i parametrima navarivanja kao što su jačina struje navarivanja, polaritet, napon el. luka, ugao el. luka prema osnovnom materijalu, broj prolaza. Na tvrdoću navara, pored hemijskog sastava, utiče i brzina hlađenja, tako da navareni slojevi sa istim hemijskim sastavom mogu da imaju različitu tvrdoću.



Slika 4a. Šematski prikaz sekvenci nanošenja navara od nerđajućeg čelika na membranske cevi kotla



Slika 4b. Poprečni presek kotlovske cevi sa navarenim slojem

Ovo ukazuje na to da se određena svojstva navarenog sloja dobijaju u veoma ograničenom dijapazonu režima navarivanja, o čemu mora da se vodi računa pri navarivanju specifične opreme.

Povećanjem procentualnog udela osnovnog materijala u navaru ("odnos mešanja") opadaju korisne osobine navara. Za dati osnovni i pomoćni materijal i usvojeni postupak navarivanja, procenat mešanja zavisi od broja nanetih slojeva (jer u svakom višem sloju navara, ulogu osnovnog materijala preuzima prethodni navar) i parametara navarivanja.

## 1. Navarivanje gasnim plamenom

Ovim postupkom mogu da se navaruju slojevi debljine 1,6 - 4,8 mm, relativno male hrapavosti. Usled malog stepena mešanja (2 - 20%) često se potrebna tvrdoća postiže već u prvom sloju, što čini ovaj postupak pogodnim za navarivanje raznih alata kod kojih je potrebno nanošenje tanjih slojeva.

Navarivanje se izvodi redukujućim plamenom, obično sa odnosom  $O_2 : C_2H_2 = 0,8 : 0,9$ . Tehnikom vođenja plamena ulevo uz nagib žice od oko  $45^\circ$  i plamenika oko  $30^\circ$  postiže se veće zagrevanje dodatnog materijala, a manje osnovnog materijala, usled čega se ostvaruje mali stepen

mešanja. Kapanjem istopljenog dodatog materijala na osnovni materijal bez dodirivanja ili uranjanja žice u istopljeni osnovni materijal smanjuje se opasnost od nastajanja poroznosti.

Za masivnije delove primenjuje se predgrevanje pre navarivanja, dok je za manje delove dovoljna i toplota uneta navarivanjem. Prevelika količina unete toplote, povećana deformacija delova koji se navaruju, mala brzina navarivanja, mala količina istopljenog materijala (0,15 - 0,3 kg/h) i skromna mogućnost mehanizacije čine da ovaj postupak ne nalazi širu primenu u serijskoj proizvodnji.

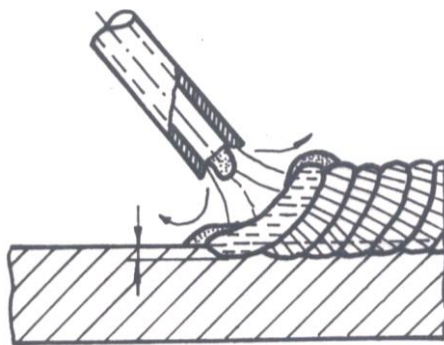
## **2. Elektrolučno navarivanje obloženom elektrodom**

Elektrolučno navarivanje obloženom elektrodom je postupak navarivanja pri kojem se topljenje osnovnog materijala ostvaruje toplotom koja se oslobađa u el. luku. Dodatni materijal – elektroda je šipka sa metalnim jezgrom - žicom koja je obložena specijalnom oblogom organskog ili mineralnog porekla. Obično se koriste elektrode prečnika 3-6 mm, s tim što izbor određenog prečnika zavisi od dimenzija predmeta koji se navaruje, veličine reparature (ako se vrši popravka) i od zahtevane debljine sloja (ako se vrši zaštita).

Uobičajeno je da se za sloj čija je debljina manja od 1.5 mm upotrebljavaju elektrode prečnika 3 mm (jačina struje 80-110 A za navarivanje u horizontalnom položaju), a za obrazovanje sloja debljine preko 6 mm i za masivne komade upotrebljavaju se elektrode prečnika 6 mm (jačina struje 180-300 A za navarivanje u horizontalnom položaju). Zaštita rastopljenog kupatila se obezbeđuje troskom nastalom topljenjem obloge. Da bi se ostvarilo što manje topljenje osnovnog materijala, navarivanje treba da se izvodi što kraćim lukom i što manjom jačinom struje. Produktivnost E-postupka navarivanja je 0.3 – 20 kg/h.

E-postupak navarivanja odlikuje se visokim stepenom mešanja osnovnog materijala i navarenog sloja (20-35%), tako da se, veoma često, potrebna tvrdoća dobija tek u trećem sloju. Posebnom tehnikom rada, slika 5, može da se postigne niži stepen mešanja osnovnog i dodatnog materijala, ali usled vođenja luka najvećim delom preko prethodno navarenog sloja, povećava se opasnost od nastajanja grešaka u vezivanju – nespojenog mesta između osnovnog materijala i navara.

Uređaj za navarivanje E-postupkom sa obloženom elektrodom sastoji se od izvora struje i dva provodnika: za kontakt sa masom (osnovni materijal) i za kontakt sa držačem (zavarivačka klešta). Koriste se izvori i naizmernične i jednosmerne struje. Glavni nedostaci E-postupka navarivanja su niska produktivnost, teški uslovi rada (neophodno je obezbediti specijalnu ventilaciju radnog mesta i zaštitu od zračenja luka) i neujednačeni kvalitet navarivanih slojeva.



Slika 5. Šematski prikaz E-postupka navarivanja

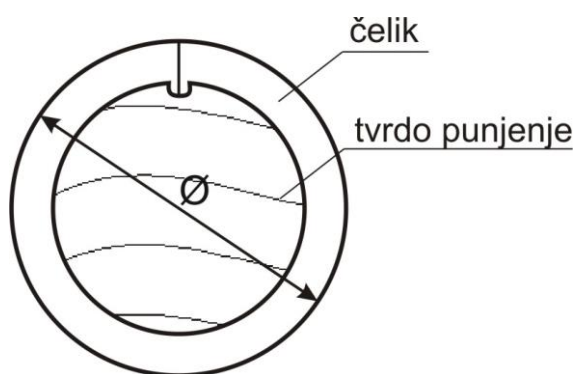
## **3. Navarivanje u zaštiti gasova elektrodom žicom (MIG/MAG)**

Kod ove vrste navarivanja, elektroda ima dvostruku ulogu – služi kao dodatni materijal i kao provodnik struje. Zaštitni gas kod MIG postupka navarivanja je argon, a kod MAG postupka aktivni gas CO<sub>2</sub>. Koristi se jednosmerna struja velike gustine sa elektrodom vezanom za pozitivan pol

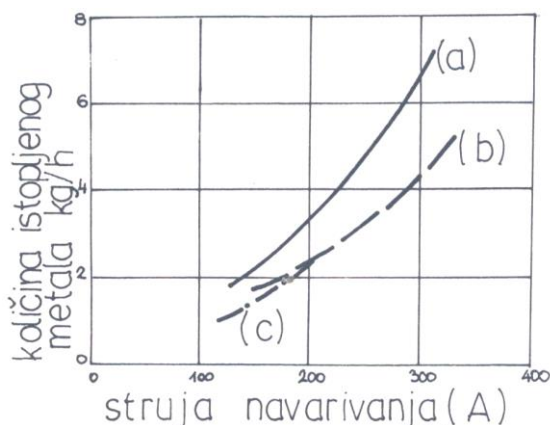
izvora struje. Velika količina istopljenog metala (1,5 - 6,0 kg/h) i mogućnost mehanizacije su osnovne prednosti MIG/MAG navarivanja. Stepent mešanja se kreće u širokim granicama (10 - 30%) i zavisi od tehnike rada i primenjenog zaštitnog gasa, pa se i tvrdoća kreće u širokim granicama.

Navarivanjem kratkim lukom ostvaruju se navari sa manjim stepenom mešanja, za razliku od navarivanja sa prelaskom kapljica u mlazu u električnom luku. Slično se postiže i pri korišćenju mešavine zaštitnih gasova (npr. argon sa dodatkom 1 - 2% O<sub>2</sub>) kada se dobija ravnomerniji navar, ali i veći stepent mešanja kao i bolje obrazovanje navara.

Puna elektrodna žica pri MIG/MAG navarivanju se koristi za: navarivanje srednje tvrdih navara, navara otpornih prema koroziji i navara od bronce otporne na habanje. Zavisno od kvaliteta dodatnog materijala, kao zaštitni gasovi koriste se Ar i CO<sub>2</sub> i mešavina gasova (Ar + CO<sub>2</sub>; Ar + O<sub>2</sub>; Ar + CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>). Za navarivanje slojeva veće tvrdoće koriste se, pretežno, punjene žice (slika 6) kojima se postiže veća produktivnost ili manje mešanje u istoj količini istopljenog metala u odnosu na primenu pune elektrodne žice ili obložene elektrode, slika 7.



Slika 6. Šematski prikaz poprečnog preseka punjene žice



Slika 7. Količina istopljenog metala kod primene različitih dodatnih materijala:

- a – punjena elektrodna žica
- b – puna elektrodna žica
- c – obložena elektroda

Navarivanje punjenom i punom elektrodnom žicom našlo je masovnu primenu kako u obnavljanju istrošenih delova tako i u izradi i zaštiti novih elemenata.

#### 4. Navarivanje u zaštiti inertnih gasova netopljivom elektrodom - TIG postupak

Uređaj za navarivanje TIG postupkom je isti kao i za zavarivanje ovim postupkom: kao provodnik struje koristi se elektrodna žica od volframa, a kao zaštitni gas helijum, argon ili njihove mešavine. Što se tiče struje, ona može da bude i jednosmerna (obe polarnosti) i naizmjenična. Navarivanje metala i legura visoke temperature topljenja se izvodi primenom jednosmerne struje sa direktnom polarnošću.

Pri navarivanju ovim postupkom postižu se debljine navara do 3 mm u jednom prolazu uz relativno mali stepent mešanja (2-20 %) i nešto nižu tvrdoću (za 2 - 3HRC) nego kod navarivanja gasnim plamenom. Za navarivanje se koriste pune ili punjene žice i najčešće argon (Ar) normalne čistoće, s tim što jačina struje treba da bude što manja. Primenom jednosmerne struje i što je moguće većeg prečnika elektrode (w) izbegava se opasnost od pojave uključaka na bazi volframa u metalu navara.

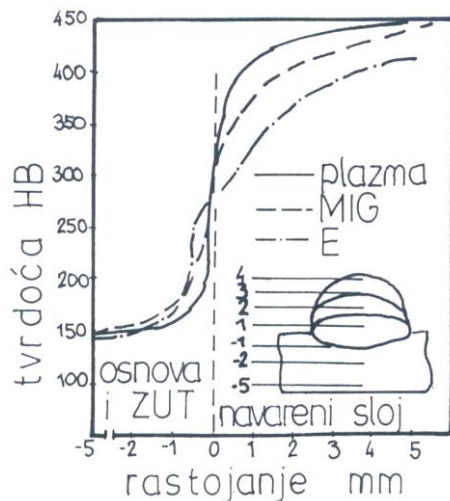
Iako je količina istopljenog metala mala (0,3 - 0,8 kg/h), mogućnost automatizacije je uticala da ovaj postupak nađe primenu pri navarivanju manjih delova (osovine malih prečnika, male kontaktne površine i sl.) i nepristupačnih mesta za gorionike plazma uređaja.

## 5. Navarivanje plazmom

Tehnika navarivanja plazmom može da se izvede na dva načina: navarivanje uz primenu praška kao dodatnog materijala (PTA) ili navarivanje uz primenu strujno opterećene elektrodne žice (PHA).

Navarivanje plazmom uz primenu praška se odlikuje velikom količinom istopljenog metala (2-10 kg/h). Visina navara može da se ostvari u širokim granicama (0,25-6,5 mm). S obzirom na nizak stepen mešanja (3-15%), potreban sadržaj legirajućih elemenata, odnosno tvrdoća se postižu već u prvom navaru. Pravilnim izborom parametara, stepen mešanja može da se održi i ispod 5%. Zbog niskog stepena mešanja, tvrdoća navara ostvarena ovim postupkom je nešto viša nego kod E- i MIG/MAG postupaka, slika 8. Sam postupak je našao veliku primenu u proizvodnji armatura.

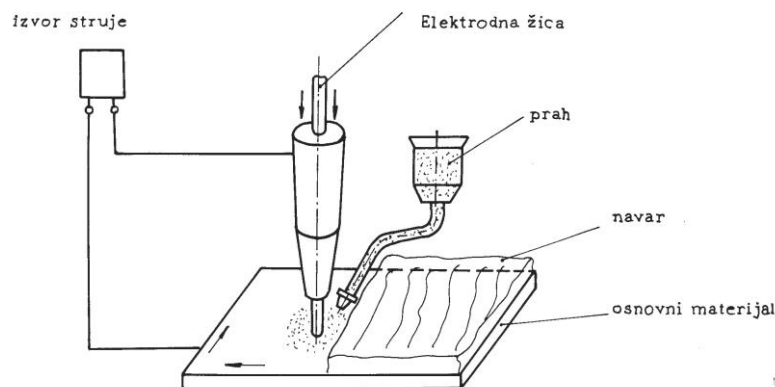
Pri navarivanju plazmom uz upotrebu strujno opterećene elektrodne žice postiže se širina navara između 20 i 50 mm. Mešanje osnovnog materijala i navara kreće se u širokim granicama (5-70%). Visina jednog sloja ostvaruje se u rasponu od 3-7mm. Posebna odlika ovog postupka je visoki učinak (do 37kg/h) i to ga čini neprihvatljivim u navarivanju većih površina.



Slika 8.  
Promena tvrdoće navara u zavisnosti od postupka navarivanja: E- postupka, MIG/MAG i plazma postupka

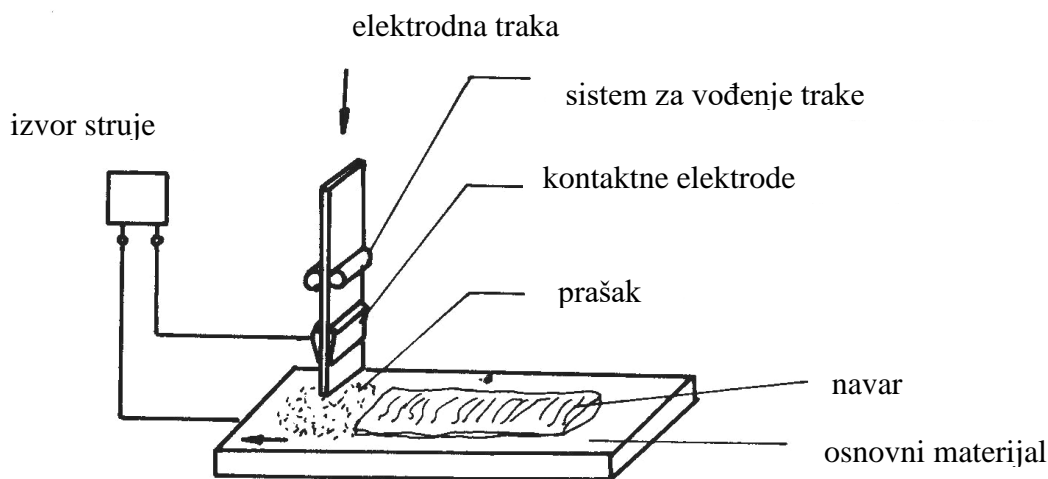
## 6. Navarivanje pod zaštitom praška (EPP)

Postupak navarivanja pod zaštitom praška se izvodi kontinualnim dovođenjem elektrodne žice, slika 9 ili elektrodne trake, slika 10, koje imaju ulogu i elektrode i dodatnog materijala. Sam postupak navarivanja pod zaštitom praška primenjuje se u više varijanti: sa punom elektrodnom žicom, sa većim brojem serijski vezanih žica, sa jednostrukom trakom različitih širina ili sa duplom trakom.



Slika 9. EPP navarivanje sa žicom

Prah kod ovog postupka ima istu ulogu kao i obloga elektrode kod E-postupka. Prah ima i zaštitnu ulogu (štiti metalno kupatilo od gasova iz okruženja) i metaluršku (prečišćava i legira metal šav), i električnu ulogu (stabilizuje i štiti električni luk). Pored toga, prah ima i nisku toplotnu provodljivost, pa iz tog razloga ima svojstvo da zadržava toplotu koja se koristi za topljenje metala, ali isto tako obezbeđuje i uslove za relativno sporo hlađenje navara (smanjenje napona, sprečava pojavu nepovoljnih struktura). Zbog velike zapremine (količine) i rastopljenog metala i tečne troske, navarivanje može da se izvodi samo u horizontalnom ili blago nagnutom položaju, jer bi u protivnom došlo do njihovog isticanja.



Slika 10. EPP navarivanje sa trakom

Kada se kao elektroda koristi traka npr. male debljine i velike širine, onda je oprema za navarivanje pod zaštitom praška još jednostavnija u poređenju sa standardnim uređajem za EPP postupak. Prelazeći sa jedne ivice trake na drugu, luk ravnomerno topi njen vrh. Pri tome se postiže veći koeficijent navarivanja nego pri korišćenju žice, jer je dubina uvarivanja manja a udeo osnovnog materijala niži, što je širina trake veća. Razlog za ovakvu karakteristiku navarivanja je što se sam luk kod ove varijante navarivanja odlikuje većom stabilnošću. Naime, luk se ne uspostavlja po celoj širini trake istovremeno, već samo mestimično, tako da se ostvaruju stabilni lokalni lukovi. Električni lukovi ne ostaju dugo na jednom mestu, već se kreću brzo po celoj širini trake, pa tako električni luk ne izaziva dublje topljenje osnovnog materijala.

Drugi faktor koji doprinosi prednosti navarivanja pod zaštitom praška i elektrodom u vidu trake u odnosu na standardni postupak sa žicom je što se ostvaruje manja brzina navarivanja. Pri maloj brzini navarivanja, rastopljeni metal se podliva između električnog luka i osnovnog metala i na taj način smanjuje duboko uvarivanje. Opisani postupci navarivanja pod praškom su veoma efikasni u slučaju popravke ili zaštite predmeta velikih dimenzija.

Za razliku od navarivanja E- postupkom, navarivanje pod praškom se odlikuje el. lukom veoma velikog intenziteta (struja navarivanja do 3000 A), čime je omogućeno mnogo brže navarivanje sa većom dubinom provarivanja. Međutim, ovako veliki intenzitet struje izaziva pretapanje velike količine osnovnog materijala uz jako rasprskavanje, koje je nemoguće regulisati. Stoga se u praksi primenjuje jačina struje od 1000 – 1500 A, s tim što jačina struje veoma retko prelazi 2000 A.

Navarivanje pod zaštitom praška sa elektrodom žicom je postupak koji je našao veliku primenu u navarivanju valjaka (popravka, povećanje otpornosti na habanje, postizanje geometrijskih i dimenzionih karakteristika). Odlikuje se velikom visinom navara, do 10 mm, ali i znatnim mešanjem osnovnog i dodatnog materijala (30-50%). Efektivna količina nanesenog materijala je relativno velika (3-8 kg/h).

Primenom većeg broja žica (npr. 6x1,6mm) smanjuje se stepen mešanja osnovnog materijala i navara (15 – 20 %) i povećava efikasnost (do 40 kg/h) ali se primena, zbog velike količine istopljenog materijala, ograničava na ravne ili blago zakrivljene površine.

## **7. Navarivanje pod troskom**

Toplotna energija potrebna za topljenje osnovnog i dodatnog materijala stvara se električnom strujom koja protiče kroz elektroprovodljivu tečnu trosku. Dodatna žica ili metalna traka se topi u rastopu troske obrazujući metalno kupatilo. Kalupi, hladeni vodom, izrađeni su od bakra a uloga im je da potpomažu kristalizaciju i sprečavaju isticanje rastopljenog metal šava i tečne troske. Dubina uvarivanja osnovnog materijala ovim postupkom navarivanja zavisi od mnogo faktora, posebno od ravnomernosti zagrevanja tečne troske.

Postupak navarivanja pod troskom se odlikuje određenim prednostima u odnosu na elektrolučne postupke navarivanja. Preimućstva navarivanja pod troskom su: veoma velika produktivnost, sigurnost procesa, mala sklonost prema porama i prslinama, mogućnost dobijanja čiste glatke površine sa malim ispustima za obradu. Pored navedenih prednosti, ovaj postupak ima izvesne nedostatke: otežano je dobijanje navarenog sloja debljine ispod 20 mm, pošto se pri maloj zapremini istopljena troska lako pregreva i ključa, što narušava proces pod troskom.

## **8. Navarivanje livenjem**

Postupak navarivanja livenjem je veoma jednostavan i ne zahteva skupu i komplikovanu opremu. Primenjuje se i za popravku oštećenih delova (posebno ako je reč o visokougleničnim konstrukcionim čelicima koji nisu zavarljivi) i za nanošenje prevlaka u cilju zaštite od korozije ili povećanja otpornosti na habanje. Ako se vrši popravka, odnosno navarivanje oštećenih površina livenjem, onda se, bez posebne pripreme površina (grubo čišćenje površina metalnom četkom) koje treba da se navare istovremeno predgreva deo koji se popravlja (u zavisnosti od veličine komada ili u peći ili indukciono) i rastapa u peći dodatni materijal kojim će se popuniti oštećeno mesto. Kada je faza pripreme završena, pristupa se ulivanju tečnog metala u oblast oštećenja posle njenog ponovnog čišćenja nakon zagrevanja. Svakako, neophodno je obezbediti i potrebne uslove hlađenja što se postiže prekrivanjem metalnog kupatila postavljanjem odgovarajućih zaštita.

Ako se na radnu površinu nanosi prevlaka u cilju zaštite onda se umesto postupka ulivanja primenjuje postupak potapanja. Faze postupka nanošenja prevlake potapanjem npr. u cilju zaštite od korozije su: 1- izbor nekog austenitnog nerđajućeg čelika kao materijala prevlake pošto je potrebno ostvariti korozionu postojanost površinskih slojeva dela koji se navaruje, 2 – njegovo zagrevanje u peći do prelaska u tečno stanje (u otvorenim pećima temperatura može da bude viša i od 3000 °C), 3 - zagrevanje dela na koji se nanosi prevlaka (uglavnom se radi o čelicima, pa je temperatura zagrevanja ~ 700 °C), 4 - vađenje komada iz peći i čišćenje njegovih površina čeličnom četkom, 5 - potapanje (uranjanje) dela koji se prevlači do određene dubine u kupatilo sa rastopljenom legurom prevlake. Nakon potapanja dolazi istovremeno i do vrlo aktivne difuzije u graničnoj oblasti zagrejani deo – rastopljena prevlaka (velika čvrstoća veze) i do kristalizacije rastopljene prevlake. Prevlaka dobijena na ovaj način može da ima debljinu oko 10 – 15 mm. Nakon nanošenja prevlake livenjem nije potrebna nikakva naknadna obrada.

## **9. Izbor materijala za navarivanje**

Prilikom izbora materijala za navarivanje, posebno ako je reč o popravkama delova kod kojih je do oštećenja došlo usled habanja ili kada treba da se izvrši zaštita površina od habanja, treba početi sa ispitivanjem uslova rada navarenog komada, tj. treba utvrditi kakva će biti uloga tog navara u procesu rada i koji tip habanja će da se javi. Naime, nisu svi materijali za navarivanje na isti način otporni prema različitim vidovima habanja, posebno ako je i radna sredina agresivna, pa se pored habanja javlja i korozija. Uslovi oštećivanja habanjem se usložnjavaju ako u procesu rada deluje više različitih vidova habanja istovremeno. U takvim slučajevima, neophodno je proceniti međusobni odnos različitih vidova habanja, pa se izbor materijala javlja kao kompromisno rešenje.

Geometrija radnog komada, cena navarivanja, pojava prslina, brzina habanja i zahtev za kvalitetom nanetog sloja su takođe bitni faktori koji diktiraju izbor materijala.

## 10. Materijali za navarivanje

Materijali za navarivanje, koji treba da obezbede povećanu otpornost na habanje, predstavljaju legure različitih hemijskih elemenata. Dugo vremena su se za ovu svrhu koristile legure Co-Cr-W (steliti), koje se odlikuju dobrom korozionom otpornošću, ali pre svega i dovoljno visokom tvrdoćom na povišenim temperaturama (45-55 HRC). Međutim, i pored izvanrednih svojstava kojima se odlikuju ovi materijali, potrebno je istaći i neke njihove nepovoljnosti, kao što su visoka cena materijala ali i ograničenje njihove primene pri popravkama npr. nuklearnih postrojenja, zato što kobalt u stelitima (35-55%), usled zračenja, prelazi u radioaktivni izotop Co60, koji svojim zračenjem nepovoljno utiče na rad nuklearnog postrojenja.

Za alternativne materijale za navarivanje, u cilju poboljšanja otpornosti na habanje, je karakteristično da ne mogu da postignu potreban nivo tvrdoće (kao kod stelita) bez termičke obrade. Veliki broj radova, prema podacima iz svetske literature, je posvećen utvrđivanju svih relevantnih karakteristika (otpornosti na koroziju, tvrdoće, triboloških karakteristika) nerđajućih čelika različitih klasa (feritni, austenitni, martenzitni, dupleks) sa variranjem sadržaja hroma od 18 – 30% i sadržaja nikla od 5 – 16% i sa manjim dodacima mangana, azota, silicijuma i molibdena, kao konkurentnih materijala za ovu svrhu. Jedan od prvih materijala, koji je pokazao najveću otpornost prema habanju, je bio čelik sastava: 0,11%C, 5,0%Si, 6,5%Mn, 21,3%Cr i 7,8%Ni (sadržaj feritne faze – do 40%).

Na osnovu ovog materijala razvijena je i jedna od prvih elektroda za navarivanje FOX ANTINID DUR 300 i punjena žica ANTINID DUR 300 FD, tabela 1. Kasnije je usledio razvoj brojnih i različitih elektroda za navarivanje i punjenih žica, čiji sastavi, osobine i primena mogu da se pronađu u katalogima različitih proizvođača elektroda.

Karakteristično za čist navar ovih materijala je da pored hroma, nikla, mangana i ugljenika, imaju i dosta visok sadržaj silicijuma. Ovaj hemijski sastav uslovljava pojavu austenitno-feritne (dupleks) mešovite strukture, sa sadržajem ferita od 38 – 50%.

Tabela 1: Hemijski sastav dodatnog materijala (čistog navara)

oznaka dodat. mater.	Hemijski sastav, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Co	Fe
FOX 300	0.1-0.15	5.0	6-6,5	0.01	0.02	19-22	7-9	0.01	ostalo
FD 300	0.07-0.15	4.5 -6.5	5.5-7.5	0.01	0.02	19-22	7-9	0.01	ostalo

Porast sadržaja ferita ne može da se postigne bez promene u prethodnoj termičkoj obradi, zbog sklonosti ka pojavi prslina. Pri termičkoj obradi, silicijum povoljno utiče na obrazovanje intermetalnih faza čijim izdvajanjem se povećava tvrdoća i otpornost na habanje.

Korak dalje u razvoju drugih materijala za tvrdo navarivanje (materijali bez Co) je bio kada je razvijen materijal koji obezbeđuje povišenu tvrdoću, na nivou stelita (45 – 55 HRC) – punjena elektrodna žica za prevlačenje zaptivnih površina armatura "Böhler ANTINID 500 FD". Ovaj materijal sadrži isključivo metalne komponente bez mineralnih. Da bi se obezbedila ravnomerna raspodela legirajućih elemenata u šavu, izvršeno je prethodno topljenje komponenti za punjenje, a zatim mlevenje i prevođenje u praškasto stanje, tabela 2.

Tabela 2: Hemijski sastav dodatnog materijala (čistog navara)

oznaka dodat. mater.	Hemijski sastav, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Co	Fe
Antinid DUR 500 FD	max 0.12	3.8 – 5.2	3.0 - 5.0	17 - 19	8.0 – 10.0	0.5 – 1.2	0.01	ostalo

Zavarivanje može da se izvede MIG, MAG ili TIG postupkom kao i pod praškom ili plazmom. Kao zaštitni gas pogodan je čist argon ili smeša argon + kiseonik. Za zavarivanje pod praškom koriste se bazni prahovi.

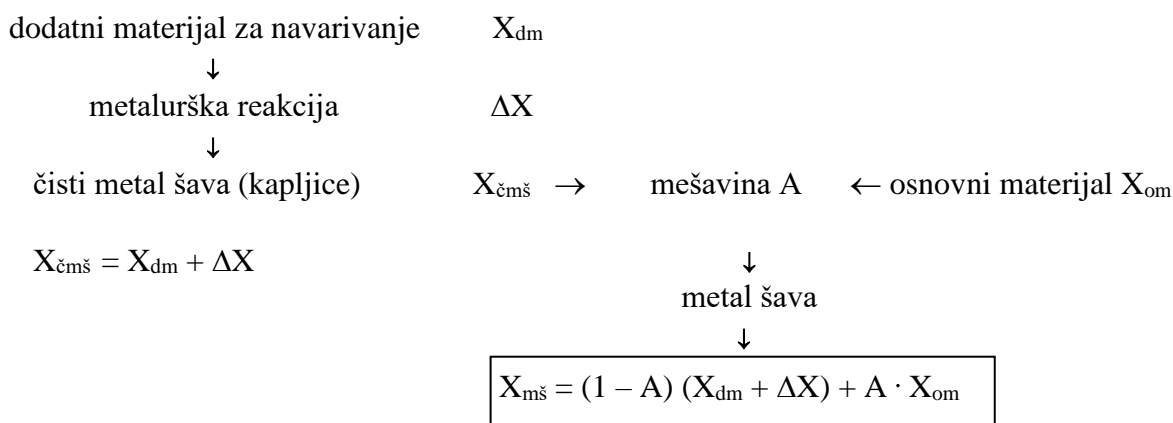
Da bi se postigla zahtevana tvrdoća metala navara (šava) od 48 do 55 HRC treba posle navarivanja izvesti naknadnu termičku obradu koja se sastoji od zagrevanja na 550 °C, hlađenja u peći do 200 °C i konačnog hlađenja na vazduhu. Da bi se dobio navar bez prslina, mora da se obrati pažnja da temperatura predgrevanja međuprolaza bude najmanje jednaka 500 °C.

## 11. Faktori koji utiču na osobine navara

### 11.1 Uticaj mešanja

Osobine navara direktno zavise od strukture metala navara. Struktura navara zavisi od uslova navarivanja i termičkog tretmana, kao i od hemijskog sastava. Sastav i osobine dodatnog materijala za navarivanje razlikuju se od osnovnog materijala, pa se sastav navara menja u zavisnosti od stepena mešanja (procentualni udeo osnovnog materijala u navaru).

#### Šema mešanja osnovnog i dodatnog materijala za vreme navarivanja



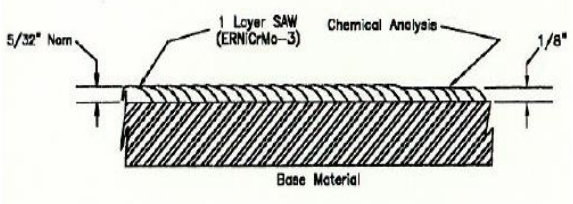
Stepen mešanja osnovnog i dodatnog materijala zavisi od parametara i vrste navarivanja, kao i od broja navara, jer kod narednog navara ulogu osnovnog materijala preuzima prethodni navar. Što je veće mešanje, veći je i uticaj osnovnog materijala. Neophodno je obezbediti dobar i kompletan spoj između osnovnog metala i tvrdog navara, ali pri tome treba obezbediti što manje mešanje, jer duboka penetracija nije tako važna kod navarivanja kao kod zavarivanja.

Ako se vrši jednoslojno navarivanje, javiće se veliko mešanje osnovnog i dodatnog materijala (stepen mešanja zavisi od primenjene tehnike navarivanja), odnosno javiće se direktan uticaj osnovnog materijala na osobine navara (šava). Međutim, navarivanje se najčešće izvodi u više slojeva, tako da u tom slučaju osnovni materijal ima vrlo mali i to indirektan uticaj na osobine navara. Tražene osobine se najčešće postižu već u drugom navaru. Prvi sloj osigurava prijanjanje za osnovni materijal, a drugi obezbeđuje tražene mehaničke ili hemijske osobine.

### 11.2 Hemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala

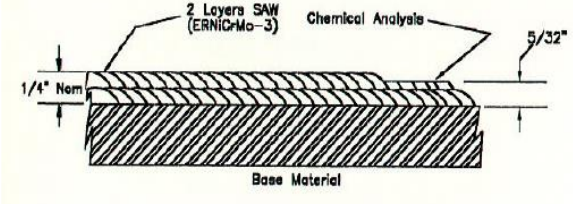
Uticaj osnovnog materijala se posebno ogleda u prvom navaru, zbog čega je on od izuzetne važnosti kod jednoslojnih navara. Taj uticaj posebno dolazi do izražaja kada se osnovni i dodatni materijal značajno razlikuju po hemijskom sastavu. Uticaj dodatnog materijala treba posmatrati kroz pojavu mešanja sa osnovnim materijalom. U opštem slučaju, ako se ne menjaju hemijski sastav osnovnog materijala i stepen mešanja, onda hemijski sastav dodatnog materijala ima kvalitativno i kvantitativno odlučujući uticaj na osobine navarenog sloja.

Tabela 3a: Hemijski sastav prvog navarenog sloja

Navarivanje: jedan sloj sa ERNiCrMo-3	Tehnika: SAW sa prečnikom žice 1/16"				
	Lokacija: 1/8" iznad fuzione linije				
	Hemijski sastav, %				
	max C	Mn	max Si	max S	max P
	0.15	0.75	0.75	0.003	0.008
	min Cr	min Ni	min Mo	max Fe	
	16.00	45.00	6.00	25.00	
Nb+Ta	Ti	Co	Al		
2.00	< 0.20	< 0.08	< 0.10		
Piting indeks: $PI = Cr + (3.3 \times \%Mo) = 35,8 \text{ min}$					

Najveći uticaj hemijskog sastava osnovnog materijala na osobine navara je kod jednoslojnog navarivanja, tabela 3a. Kod višeslojnog navarivanja, ulogu osnovnog metala preuzima prethodni navar, tako da je odlučujući uticaj hemijskog sastava dodatnog materijala, tabela 3(b), s tim što hemijski sastav može unekoliko da varira od gusenice do gusenice, Praktično, već u drugom navaru uloga osnovnog materijala je svedena na minimum, a u trećem sloju se najčešće ostvaruje "čist navar".

Tabela 3b: Hemijski sastav drugog navarenog sloja

Navarivanje: 2 sloja sa ERNiCrMo-3 elektr.	Tehnika: SAW sa prečnikom žice 1/16"				
	Lokacija: 5/32" iznad fuzione linije				
	Hemijski sastav, %				
	max C	Mn	max Si	max S	max P
	0.10	0.75	0.75	0.003	0.008
	min Cr	min Ni	min Mo	max Fe	
	18.00	55.00	7.00	15.00	
Nb+Ta	Ti	Co	Al		
2.50	< 0.20	< 0.08	< 0.10		
Piting indeks: $PI = Cr + (3.3 \times \%Mo) = 41,1 \text{ min}$					

### 11.3 Mikrostruktura čistog navara u funkciji hemijskog sastava

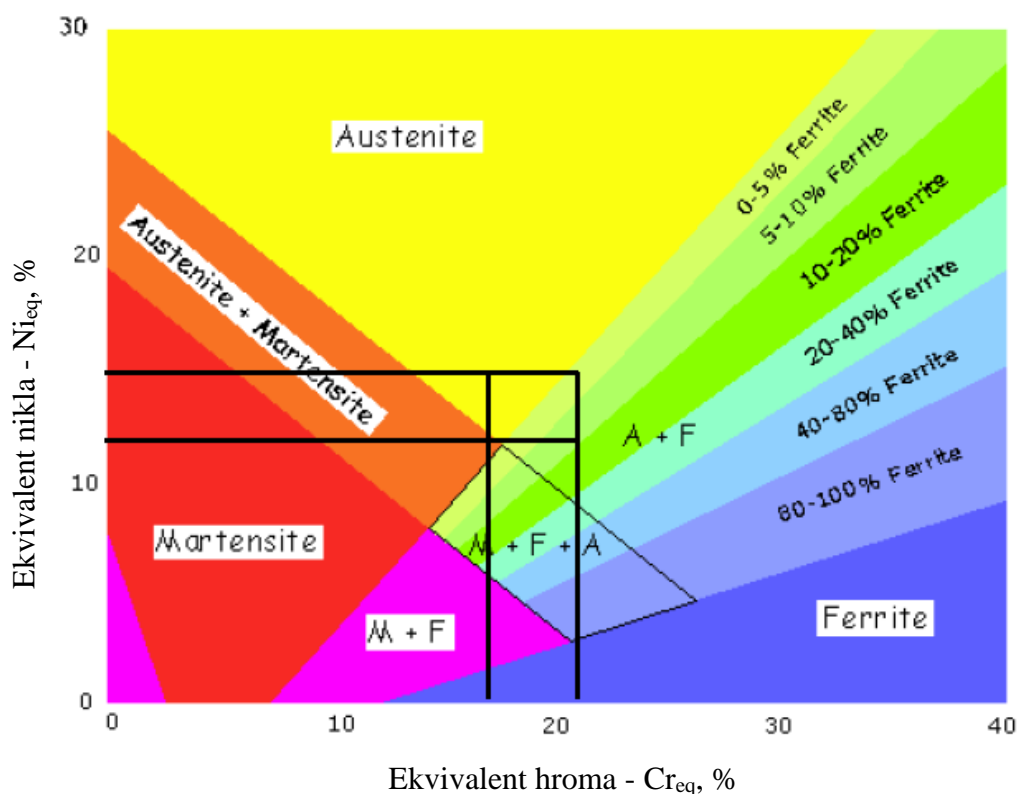
Dodatni materijal za navarivanje, koji se često koristi posebno zbog svoje otpornosti prema koroziji, po hemijskom sastavu pripada grupi visokolegiranih Cr-Ni čelika, odnosno klasi austenitnih čelika, jer visok sadržaj nikla izrazito snižava temperaturu početka martenzitne transformacije (-190 °C). Austenitni čelici za navarivanje se odlikuju izuzetnim mehaničkim osobinama i pri visokim i pri niskim temperaturama (čvrstoća loma ovih čelika je relativno visoka i na 800 °C).

Vrsta strukture određuje osobine materijala. Postoji nekoliko načina matematičkog određivanja strukture (analitički i grafički), mada je jednostavnije koristiti grafički prikaz koji je dat u obliku poznatog Šeflerovog (Šefler – De Longovog) dijagrama slika 11. Velika pogodnost ovog dijagrama je što je Šefler pri izradi dijagrama mikrostruktura uzeo u obzir i "gamageni" (elementi koji šire područje stabilnosti gama faze i pogoduju izdvajanju ugljenika u vidu grafita – grafitoobrazujući elementi) i "alfageni" (elementi koji šire područje stabilnosti alfa faze i pogoduju izdvajanju ugljenika u vidu karbida – cementita, karbidoobrazujući elementi) uticaj različitih elemenata koji ulaze u sastav legura.

S obzirom da austenitni čelici za navarivanje sadrže više od 17 %Cr, a imajući u vidu da je donja granica hroma kod nerđajućih čelika u cilju obezbeđenja korozione postojanosti 12 %, proizilazi da su ovi čelici potpuno otporni na koroziju. Nerđajući čelici se bez velikih problema proizvode sa čvrstoćama u opsegu od 100 MPa do 1 GPa.

Zbog uticaja koji ostali legirajući elementi, u zavisnosti od vrste i količine, imaju na kristalnu strukturu osnovnog nerđajućeg čelika, a time i na njegove osobine i ponašanje u eksploataciji, svi nerđajući čelici su podeljeni u četiri osnovne familije, i to: 1- Feritne nerđajuće čelike; 2 - Martenzitne nerđajuće čelike; 3 - Austenitne nerđajuće čelike; 4 - Dupleks nerđajuće čelike.

Većina nerđajućih čelika je zasnovana na Fe-Cr-C i Fe-Cr-Ni-C sistemima, s tim što ni uticaj drugih legirajućih elemenata ne treba zanemariti. Svaki od navedenih glavnih legirajućih elemenata ima različit uticaj na kristalnu strukturu železa kao osnovnog elementa u leguri. Poznato je da se železo i njegove legure sa ugljenikom javljaju u nekoliko kristalografskih oblika (fazna transformacija) u zavisnosti od temperature, od kojih su najpoznatiji prostorno centrirani kubni i površinski centrirani kubni oblik. Zbog različitih osobina ovih kristalnih struktura, od najvećeg je značaja poznavanje uslova njihove stabilnosti.



Slika 11. Šefler – De Longov dijagram

Pošto su Cr i Ni glavni legirajući elementi u nerđajućim čelicima, oni istovremeno i predstavljaju referentni nivo u odnosu na koji se klasifikuje uticaj ostalih legirajućih elemenata: oni koji kao i Cr promovišu feritnu strukturu su označeni kao feritni stabilizatori, a oni koji deluju kao Ni – austenitni stabilizatori. Grubi pokazatelj uticaja individualnih legirajućih elemenata, koji deluju kao feritni, odnosno austenitni stabilizatori, kada se porede sa odgovarajućim uticajem Cr i Ni, može da se predstavi jednačinama (1) i (2), s tim što su sadržaji svih elemenata izraženi u tež. %:

$$Cr_{eq} = Cr + 2Si + 1.5Mo + 5V + 5.5Al + 1.75Nb + 1.5Ti + 0.75W \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = Ni + Co + 0.5Mn + 0.3Cu + 25N + 30C \quad (2)$$

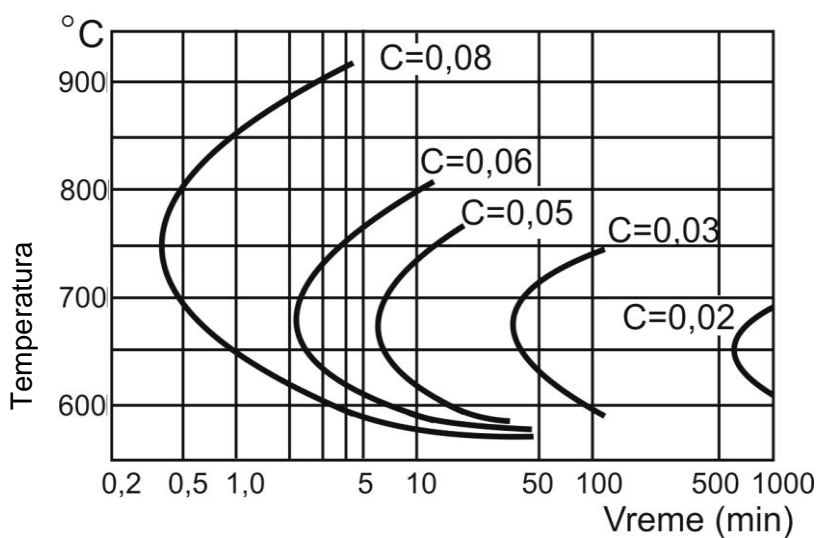
Ekvivalenti hroma i nikla se koriste i u industriji zavarivanja da bi se odredile mikrostrukture koje se dobijaju kada se dodatni materijal pri očvršćavanju hladi do sobne temperature – Šeflerov dijagram (Šefler De Longov), slika 11. Šeflerov dijagram je od posebnog

značaja pri zavarivanju raznorodnih čelika. Međutim, bez obzira na njegovu popularnost, ipak treba imati na umu da to nije dijagram fazne transformacije već mikrostrukturni dijagram koji omogućava da se, za određene ekvivalente Cr i Ni, odrede mikrostrukture (a time i osobine, uključujući i korozionu postojanost) zavarenog spoja, koje će da se obrazuju pri hlađenju.

Pored austenita i ferita kao čvrstih rastvora i to legiranih, u strukturi nerđajućih čelika postoje i karbidi, nitridi i intermetalna jedinjenja. Sekvence taložno izdvojenih čestica su veoma kompleksne u izrazito legiranim feritnim i austenitnim čelicima, koji se koriste u energetskim postrojenjima. Od intermetalnih jedinjenja veoma je značajna sigma faza, koja se kod austenitnih čelika izdvaja pri njegovom dužem držanju u temperaturnom intervalu 750 – 800 °C. Sigma faza je tvrdo i krto jedinjenje zbog čijeg prisustva dolazi do smanjenja otpornosti na koroziju, udarne žilavosti, kao i plastičnosti metala. Izdvajanje sigma faze pospešuje veći sadržaj karbidoobrazujućih elemenata, koji pri navarivanju / zavarivanju može da bude prisutan u navaru / zavarenom spoju.

Izdvajanje karbida u kritičnoj temperaturnoj oblasti između 500 – 800 °C pri visokom sadržaju ugljenika izaziva pojavu interkristalne korozije, zbog osiromašenja osnovnog čvrstog rastvora na hromu. Hrom se vezuje sa ugljenikom stvarajući složene karbide na bazi hroma koji se izdvajaju na granicama zrna, a ako je vreme držanja na temperaturi duže, karbidi hroma se izdvajaju i u metalnoj osnovi.

Zbog velikog uticaja na strukturne faze koje mogu da se izdvoje, sadržaj ugljenika je veoma bitan pri navarivanju dodatnim materijalima od nerđajućih čelika, odnosno pri zavarivanju austenitnih čelika. Na dijagramu, slika 12, prikazana je promena korozione otpornosti u zavisnosti od sadržaja ugljenika, temperature i vremena držanja na njoj, sa kojeg se jasno vidi da se pri manjim sadržajima ugljenika i nižim temperaturama koroziona otpornost povećava.



Slika 12. Koroziona otpornost nerđajućih čelika u funkciji sadržaja ugljenika, temperature i vremena držanja na datoj temperaturi

Zavarljivost austenitnih čelika je zadovoljavajuća, iako pri njihovom zavarivanju treba voditi računa o hemijskom sastavu osnovnog i dodatnog materijala, količini unete toplote i zadržavanju u nepovoljnom temperaturnom intervalu, koje treba da bude što kraće, upravo da ne bi došlo do neželjenih propratnih pojava.

Dobar pokazatelj, koji služi za procenu sklonosti nerđajućih čelika ka piting koroziji, je piting indeks (PI) koji je empirijski određen za austenitne ( $PI = Cr + 3,3Mo + 30N$ ), odnosno dupleks nerđajuće čelike ( $PI = Cr + 3,3Mo + 16N$ ).

Najvažniji pojedinačni faktor, u čijem prisustvu dolazi do inicijacije tzv. korozije u zazorima, predstavljaju joni hlora, mada na povišenim temperaturama već i prisustvo kiseonika, lako redukujućih jona i kiselih rastvora pogoduje pojavi ove vrste korozije.

Ukoliko radna sredina ne može da se kontroliše, smanjenjem kiselosti ili sadržaja hlorida, ili povećanjem brzine rastvora, neophodna je upotreba kvalitetnijih nerđajućih čelika sa aspekta korozije, odnosno nerđajućih čelika koji su više legirani.

## 12. Tehnološki postupak navarivanja

### 12.1. Izbor postupka navarivanja

Izbor postupka navarivanja se zasniva na primeni brojnih kriterijuma koji se uzimaju u obzir u zavisnosti od konkretnog slučaja. U opštem slučaju, najčešće se razmatraju dve grupe činilaca koji se odnose na:

- zahteve za postizanje kvaliteta navara, i
- zahteve ekonomičnosti navarivanja.

U zahteve koji treba da se obezbede da bi bio postignut kvalitet navara se ubrajaju:

- ostvarivanje navara bez grešaka homogenosti i oblika,
- ujednačen i ograničen stepen mešanja osnovnog i dodatnog materijala,
- povoljne strukturne karakteristike metala navara i ZUT-a,
- postizanje ujednačenog legiranja
- postizanje ujednačene tvrdoće.

Sa ekonomskog stanovišta, zahtevi su:

- minimalna mehanička obrada u pripremi za navarivanje
- postizanje geometrije navara za koju je potrebna minimalna obrada
- mogućnost mehanizacije postupka i
- mogućnost realizacije procesa sa raspoloživom opremom i alatima.

Treba istaći i to da je u svim slučajevima dubina uvarivanja, a time i stepen mešanja osnovnog i dodatnog materijala, element o kome treba voditi računa. Veći stepen mešanja izaziva «razblaženje» hemijskog sastava navara po mehanizmu prikazanom na slici 11. S druge strane, smanjenjem stepena mešanja, raste opasnost od nastajanja grešaka u vezivanju koje se kod mešanja ispod 5% često sreću.

### 12.2. Metodološki pristup tehnologiji navarivanja

Izrada jednoznačnog tehnološkog postupka navarivanja podrazumeva da je prethodno neophodno znati:

- geometrijski oblik dela koji se navaruje,
- uslove kojima je deo opreme izložen tokom rada,
- kvalitet materijala od kojeg je deo izrađen i
- odabrani način navarivanja.

#### 12.2.1. Priprema i čišćenje površina za navarivanje

Priprema površina za navarivanje podrazumeva: čišćenje i dovođenje nekih površina radnih komada na podesan geometrijski oblik. Površine za navarivanje moraju da budu bez:

- oksidnih naslaga
- antikorozijskih premaza i boja
- masnoća i
- površinskih prslina

Prva grupa nečistoća se najčešće uklanja mehaničkim sredstvima: specijalizovanim brusilicama i peskarenjem (korundom ili čeličnim opiljcima). Masnoća se odstranjuju organskim rastvaračima pri čijem izboru treba imati u vidu da su:

- alkohol, aceton i benzin lako isparljive materije sa niskom temperaturom paljenja,

- trihloretilen ( $\text{CHCl}_3$ ), ugljentetrahlorid ( $\text{CCl}_4$ ) i tetrahloretilen ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_4$ ) nezapaljivi, ali su lako isparljivi i mogu da izazovu profesionalna oboljenja.

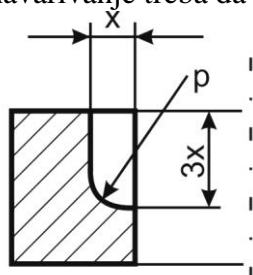
Površinske prsline se najčešće odstranjuju brušenjem, ređe glodanjem. Sve navedene nečistoće mogu da se uklone i gasnim plamenom, zagrevanjem komada do temperatura od oko 200 - 250 °C. Jedna od prednosti primene gasnog plamena u pripremi - čišćenju površina - se ogleda i u tome što pod uticajem dobro kontrolisane unete količine toplote lakše mogu da se uoče površinske prsline (ili površinska poroznost), odnosno greške koje obavezno moraju da se odstrane kako bi se sprečilo eventualno širenje prslina u masi komada tokom toplotnog izlaganja – navarivanja. Površinske greške se pouzdano otkrivaju metodom ispitivanja penetrirajućim tečnostima.

### 12.2.2. Mehanička obrada površina

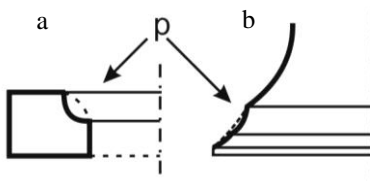
Mehaničkom obradom površina radnog komada uklanjaju se svi potencijalni koncentratori napona. To znači da je neophodno zaobliti sve oštre uglove na stranicama koje se navaruju. Poluprečnici zaobljenja treba da budu najmanje 3,0 mm.

Procena potrebe i obima mehaničke obrade, zavisi od vrednosti napona kojem će tokom radnog veka biti izložen navareni deo. Ako su neke ugaone površine, tokom rada, izložene delovanju vrlo velikih opterećenja kao što je to npr. slučaj sa matricama alata za kovanje ili presovanje, tada se pri mehaničkoj obradi površina (priprema žleba), pored povećanog poluprečnika zaobljenja, "mora" da poveća i zapremina prostora koji se navaruje.

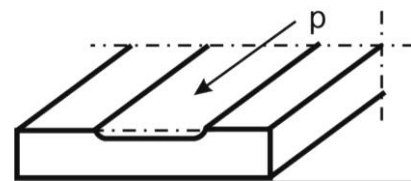
Slika 13 prikazuje tipičan primer obrade površina na mestima velikih udarnih napona. Suprotno tome, kada su radni naponi relativno mali, zapremina žleba, odnosno prostor za navarivanje treba da se smanji.



Slika 13.  
Obrada površina za navarivanje na mestima velikih udarnih opterećenja



Slika 14.  
Obrada površina za navarivanje na mestima neznatnih opterećenja  
a - sedište ventila; b - ventil



Slika 15.  
Obrada delova za navarivanje ravnih površina

Navarivanje sedišta ventila (slika 14a), kao i samog ventila (slika 14b) su tipični primeri za izneto stanovište. I pri navarivanju dela neke ravne površine treba izvršiti mehaničku obradu površina, koja bi generalno izgledala kao ona prikazana na slici 15. Pri izvođenju navarivanja ne zahteva se visok stepen obrade površina, odnosno prihvatljiva su sva ravanska odstupanja izazvana ručnom obradom – brušenjem.

### 12.2.3. Predgrevanje

Predgrevanje se, u najvećem broju slučajeva izvođenja navarivanja, vrši sa ciljem da se:

- smanji prokaljivost metala navara i poveća njegov kapacitet deformabilnosti, koji je u većini slučajeva manji od kapaciteta deformabilnosti osnovnog metala,
- smanji prokaljivost osnovnog metala,
- smanji napon usled navarivanja i/ili smanje deformacije radnog komada (osnovnog metala),
- ubrza odstranjivanje vodonika iz metala navara i ZUT-a,
- spreči nastanak gasnih mehurova u metalu navara,

- smanji mešanje metala navara, odnosno poveća sposobnost vezivanja nanetog i osnovnog metala prijanjanjem.

Znači, može da se kaže da se predgrevanje, pre svega, vrši u cilju smanjenja sklonosti materijala prema nastanku prslina, odnosno u cilju sprečavanja pojave prslina u metalu navara i ZUT-u. Temperatura predgrevanja zavisi od:

- načina navarivanja,
- kvaliteta metala za navarivanje,
- kvaliteta osnovnog metala (radnog komada),
- dimenzija radnog komada, posebno njegove debljine,
- veličine navarene površine i debljine navara u odnosu na dimenzije radnog komada.

Drugim rečima, potreba za predgrevanjem zavisi od:

- prokaljivosti legure za navarivanje i osnovnog metala, odnosno sadržaja ugljenika i legirajućih elemenata (ekvivalenta ugljenika),
- krutosti radnog komada i
- uslova za nastanak i količine vodonika u metalu navara i ZUT-u.

U literaturi i raznim preporukama i standardima mogu da se nađu brojni pristupi koji se primenjuju za određivanje temperature predgrevanja, s tim što se vrlo često koristi empirijska formula (jed. 3) japanskih istraživača Itta i Bessya, prema kojima je:

$$T_{\text{pred}} (^{\circ}\text{C}) = 1440 \times P_w - 392, \quad (3)$$

u kojoj je  $P_w$  parametar koji karakteriše krutost i koji zavisi od tri činioca koji ukazuju na sklonost materijala prema nastanku prslina (jed. 4):

$$P_w = P_{cm} + \frac{H}{60} + \frac{K}{40 \times 10^4} \quad (4)$$

gde je:  $P_{cm}$  – parametar koji zavisi od hemijskog sastava materijala,  $H$  - sadržaj difundovanog vodonika u metalu navara a  $K$  - veličina koja zavisi od debljine osnovnog materijala (pokazatelj krutosti).

$P_{cm}$  i  $K$  se izračunavaju na osnovu jednačina (5) i (6):

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Mo + V}{15} + \frac{Ni}{60} + 5B \quad (5)$$

$$K = K_o \cdot d \quad (6)$$

gde je  $K_o$  - konstantna vredost koja za čelike iznosi  $K_o = 69$ , a  $d$  – debljina materijala u mm.

Kada se komponenta opreme reparira navarivanjem istorodnim dodatnim materijalom, tada prikazano izračunavanje temperature predgrevanja obezbeđuje pouzdan podatak te temperature praktično za sve ugljenične i niskolegirane čelike.

Međutim, veliki broj tvrdih legura za navarivanje su odlivci neželjeznih materijala za koje ne važe navedene empirijske jednakosti, pa se u tom slučaju za određivanje temperature predgrevanja zahteva prethodno ispitivanje na simuliranim uzorcima ili, što je još studioznije, ispitivanje po nekoj od konvencionalno usvojenih metoda Međunarodnog instituta za zavarivanje (MIZ). U takvim slučajevima za određivanje temperature predgrevanja može da se koristi metoda Seferijana, koja sledi iz formule za određivanje ekvivalentnog ugljenika (jed. 7):

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn + Cr}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Mo}{13} \quad (7)$$

gde su C, Mn, Cr, Ni i Mo sadržaji odgovarajućih hemijskih elemenata u %. Dalje, potrebno je odrediti koeficijent C koji zavisi od  $C_{ekv}$  i debljine komada (jed. 8):

$$C = C_{ekv}(1 + 0.005d) \quad (8)$$

gde je d - debljina radnog dela u mm.

Na osnovu dobijene vrednosti koeficijenta C, određuje se računski temperatura predgrevanja (jed. 9):

$$T_p = 350\sqrt{C - 0.25}, (\text{°C}) \quad (9)$$

Potrebna temperatura predgrevanja se postiže zagrevanjem:

- gasnim plamenom,
- električnim otporom,
- električnom indukcijom i
- u pećima.

Prvi način je veoma podesan za komade malih masa koji bi se i navarivali gasnim plamenom. Zagrevanje treba da se izvodi neprekidnim podužno-poprečnim kretanjem jezgra plamena po čitavoj masi komada, s ciljem da se izbegne neželjena lokalna akumulacija toplote. Svakako, treba imati u vidu i raspodelu temperature duž plamena, pa je zato neophodno da se jezgro plamena udalji na rastojanje koje je veće od 5 cm od površine dela koji se predgrevava, u cilju sprečavanja neželjeno velike brzine zagrevanja (veće od 1000 °C/h). Kontrola temperature se vrši na onom delu komada koji ima najveću debljinu (ako deo koji se navaruje ima promenljivu debljinu), odnosno na mestu koje je najviše udaljeno od početka navarivanja. Samo merenje se izvodi pomoću mernih instrumenata povezanim sa termoparovima, mada se zadovoljavajuća tačnost merenja postiže i termo kredama.

Druga dva načina zagrevanja radnog dela koji se navaruje obezbeđuju kontrolisan, kontinualan i ravnomeran porast temperature, ukoliko su delovi relativno malih masa, odnosno debljina. Zagrevanje električnim otporom ne zahteva specijalizovane električne uređaje, dok indukciono zagrevanje zahteva specijalizovani uređaj sa pretvaračem učestanosti. Kontrola temperature se vrši termoparovima postavljenim na najmanje tri merna mesta za koje se pretpostavlja da će se najsporije zagrejati na željenu temperaturu predgrevanja.

Navedeni načini zagrevanja su najčešće kombinovani sa postavljanjem toplotno izolacionih materijala, sa ciljem da se povećava energetska korisnost, tj. da se skрати vreme zagrevanja.

Predmeti velikih masa (i debljina), kod kojih se moraju ostvariti i više temperature predgrevanja (više od 500 °C), zagrevaju se u pećima zagrevanim električnim grejačima ili toplotom koja se dobija sagorevanjem gasova. Brzina zagrevanja i željena temperatura predgrevanja moraju ne samo da se kontrolišu, već treba i da se dokumentuju dijagramom (T-t) koji se dobija pomoću pisara koji se postavljaju na najmanje tri merna mesta. Iako je najbolji, ovaj vrlo kvalitetan način zagrevanja je najmanje ekonomičan.

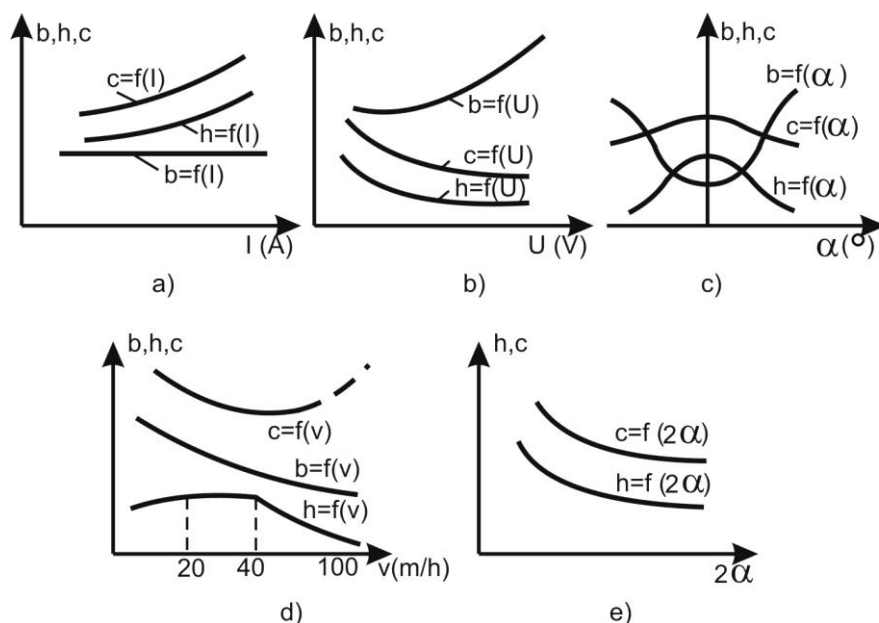
#### 12.2.4. Parametri navarivanja

Pod osnovnim parametrima navarivanja se podrazumevaju energetske veličine koje direktno utiču na oblik i veličinu navara. Svi postupci navarivanja kod kojih se kao toplotni izvor koristi električni luk se odlikuju istom vrstom osnovnih parametara:

- jačinom struje navarivanja (I)
- naponom električnog luka (U); za E i TIG navarivanje češće se koristi dužina električnog luka
- uglom toplotnog izvora prema liniji spajanja i
- brzinom navarivanja (V).

Karakteristične veličine oblika navara dobijenog topljenjem, koje su i šematski prikazane na slici 16 za postupke elektrolučnih zavarivanja, u zavisnosti od parametara navarivanja su:

- širina navara ( $b$ ),
- dubina uvarivanja ( $h$ ) i
- visina nadvišenja ( $c$ ).



Slika 16. Uticaj parametara navarivanja na oblik i veličinu navara: a – uticaj jačine struje; b – uticaj napona električnog luka; c – uticaj ugla toplotnog izvora; d – uticaj brzine navarivanja; e – njihanja elektrode pri podužno-poprečnom kretanju toplotnog izvora

Sve navedene veličine kao i koeficijenti oblika su dogovorno usvojeni od strane MIZ-a, pa se:

- uvarivanje dobija iz odnosa širine navara i dubine uvarivanja,  $b/h$
- nadvišenje dobija iz odnosa širine navara i visine nadvišenja,  $b/c$

Da bi se izvršio kvalitetan i zadovoljavajući izbor vrednosti pojedinih parametara treba imati u vidu da se navarivanjem želi da ostvari što manja dubina uvarivanja, odnosno što manje mešanje, s ciljem da se u što većoj meri očuvaju osobine navara, po pravilu različite od kvaliteta materijala radnog komada. U tom cilju treba da se koristi i mogućnost koju pruža način izvođenja navara. Tako je na slici 16e prikazan uticaj njihanja elektrode pri podužno-poprečnom kretanju toplotnog izvora na dubinu uvarivanja (mešanja). Dobar način za smanjivanje dubine uvarivanja je ipak ograničen pojavom prslina u prelaznoj zoni (počev od zareza) pod uticajem poprečnih napona usled skupljanja metala navara.

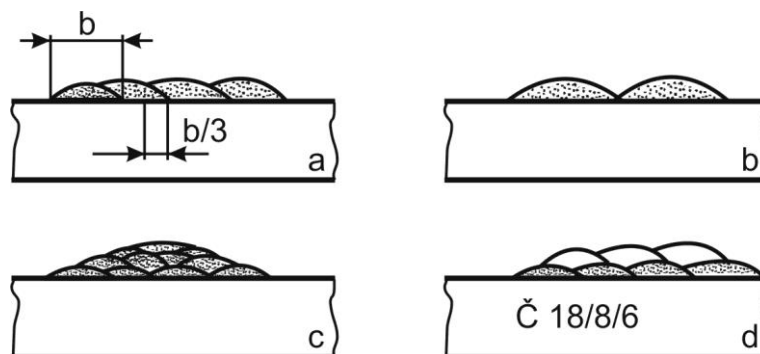
#### 12.2.5. Način izvođenja navara

Navari, izvedeni postupcima topljenjem, ostvaruju se na isti način kao i zavari pri izvođenju zavarivanja. Posle izvođenja probnih navara, konačno usvojenih vrednosti parametara rada, navari se izvode na sledeći način:

- elektrolučnim postupcima navarivanja,
- višeslojnim navarivanjem,
- navarivanjem gasnim plamenom,
- nanošenjem navara plazmom, laserom ili nekim drugim odgovarajućim postupkom.

Najčešće se primenjuju elektrolučni postupci navarivanja i višeslojno navarivanje.

Kod elektrolučnog navarivanja toplotni izvor se nalazi u ravni normalnoj na ravan radnog dela pod uglom usvojenim u odnosu na liniju toplote. Izvođenje navara se obično obavlja ravnomernom brzinom pomeranja toplotnog izvora podužnim kretanjem u smeru navarivanja. Da bi se izbegla udubljenja između navara, odnosno da bi se dobila jednoobrazna debljina navarenog sloja, topljenje susednog navara treba da se obavlja na 1/3 širine prethodno izvedenog navara, slika 17 (a, c, d).



Slika 17. Postupak nanošenja navara: a – dobro; b – loše; c – višeslojno; d - višeslojno

Pri izvođenju svakog navara troska se obavezno uklanja zavarivačkim čekićem i čeličnom četkom i to tek posle njenog spontanog odvajanja sa lica navara.

Višeslojno navarivanje, istorodnim dodatnim materijalom vrši se u cilju ostvarivanja željene debljine navarenog sloja. Pri izvođenju drugog (i n-tog) sloja navara treba voditi računa da srednje linije topljenja budu približno iznad linija rastapanja navara u prvom sloju, (slika 17c). Ovakvim načinom nanošenja narednih navara se postiže da se pretapanjem uklanjaju sva geometrijska odstupanja navara prvog sloja.

Da bi se smanjila i otklonila sklonost osnovnog materijala prema nastanku prslina, navarivanje se često izvodi sa međuslojem. Uloga međusloja je da spreči nastanak prslina pri izvođenju drugog navara legurom za tvrdo navarivanje. Međusloj se često izvodi dodatnim materijalom koji ima austenitnu strukturu kao što je slučaj sa čelikom 18-8-6, slika 17d.

#### 12.2.6. Redosled izvođenja navara

Naponi usled navarivanja mogu da se svedu na najmanju meru nanošenjem navara po odgovarajućem redosledu. Osnovna načela za definisanje redosleda nanošenja navara mogu da se svedu na sledeće:

- toplotu unositi što ravnomernije, odnosno na način da se izbegnu lokalni termički naponi,
- unošenje toplote obavljati u smeru rasprostiranja ka središtu mase radnog dela, sa ciljem da se izbegne akumulacija toplote na krajevima radnog komada,
- radni deo promenljive debljine treba navarivati od oblasti veće debljine ka oblasti manje debljine, u cilju svođenja termičkih napona elemenata manje krutosti na najmanju meru.

#### 12.2.7. Termička obrada

Potreba za termičkom obradom posle navarivanja zavisi od kvaliteta osnovnog i dodatnog materijala i od fizičko-hemijskih transformacija koje oni trpe tokom navarivanja. Dosadašnja ispitivanja dozvoljavaju da se ukaže na način termičke obrade nekih kvaliteta materijala:

- ugljenični čelici (metal navara i osnovni materijal) se posle navarivanja kale u ulju (počev od temperatura 875° C)
- niskolegirani čelici (metal navara i eventualno osnovni materijal) se posle navarivanja žare, u području temperatura od 700-750° C, u trajanju od 2-3 sata. Da bi se hlađenje obavljalo

sporo, neophodno je da se radni komad izoluje toplotno izolacionim materijalom, slika 18 ili hladi u peći

- neželezne legure (stelit - metal navara) se posle navarivanja termički ne obrađuju, ali radni komad mora sporo da se hladi, najčešće kontrolisanom brzinom hlađenja (u peći)
- 12-14% manganski čelik (metal navara i osnovni materijal) se posle kratkotrajnih izlaganja toploti, tokom navarivanja intenzivno hladi.

Neke od tvrdih legura zahtevaju i zagrevanje posle navarivanja na temperature 500-600 °C u trajanju i do 2h, u cilju bržeg i potpunijeg odstranjivanja vodonika iz metala navara i ZUT-a.



A 10-million BTU burner is being used for a refractory dry-out of a gas-fired pressure vessel



A turbine warming system installed on a steam turbine



Slika 18.

Postupak zaštite radnog dela posle popravke a pri izvođenju naknadne termičke obrade

### 13. Kontrola kvaliteta navarenih slojeva

Kontrola kvaliteta navarenih slojeva obuhvata:

- kontrolu pre navarivanja,
- kontrolu u toku procesa navarivanja, i
- kontrolu posle navarivanja.

Kontrola pre navarivanja obuhvata kontrolu pripreme ivica i čistoće žleba, kao i kontrolu postavljanja elemenata u položaj za navarivanje. Kontrola aksijalnosti i saosnosti elemenata za navarivanje je takođe bitan činilac ove kontrole. Kontrola pre navarivanja, takođe obuhvata proveru:

- osnovnog materijala (kvalitet),
- dodatnog materijala (kvalitet, prečnik),
- pomoćnog materijala (vrsta, kvalitet).

U reparaturnom navarivanju važnu i neophodnu ulogu ima kontrola pre početka navarivanja, tzv. defektaža, koja se izvodi u cilju identifikacije materijala i uslova rada kao i definisanja veličine i položaja greške.

Kontrola u toku navarivanja. U procesu navarivanja treba da se sprovedi kvalifikovana tehnologija navarivanja, odnosno kontrola redosleda navarivanja, broja prolaza, parametara navarivanja (struja, napon, brzina/navarivanja). U ovu vrstu kontrole spada i kontrola temperature zagrevanja i međuslojne temperature primenom termo kreda, kontaktnih pirometara ili sonde sa uređajem za registrovanje temperaturnih promena zapisima.

Kontrola posle navarivanja. Posle završenog navarivanja prvo se obavlja vizuelna kontrola. Očnim pregledom ili pomoću lupe otkrivaju se površinske greške na licu navara kao i unutrašnje greške ako izlaze na površinu. Unutrašnje površine (npr. unutrašnja površina cevi) mogu vizuelno da se kontrolišu pomoću uređaja, *endoskopa*. Vizuelnom kontrolom mogu da se otkriju greške kao

što su nedozvoljeno nadvišenje, utonulost, nejednakost spoja, zajedi, uključci troske, pore, otvoreni krater, razbrizgavanje dodatnog materijala, mesto paljenja luka, prsline itd. Cilj *dimenzione kontrole* je provera dimenzija (oblika i mera) i geometrije navarenih slojeva.

Posle vizuelne i dimenzione kontrole primenjuju se *ispitivanja metodama bez razaranja* (IBR) kojima je moguće otkriti površinske i potpovršinske greške. U ovu grupu metoda spadaju: ispitivanja prodirućim tečnostima - penetrantima (ova metoda može da se koristi i kod materijala koji se ne odlikuju svojstvom magnetičnosti kao što su npr. austenitni čelici), ispitivanje magnetnim česticama, ispitivanje ultrazvukom i radiografska metoda kontrole.

Penetrantska metoda kontrole. Penetrantskom metodom kontrole otkrivaju se površinske prsline, lunkeri, zone međukristalne korozije. Princip ove metode se zasniva na prodiranju penetrantskih tečnosti u zonu greške, pri čemu naknadnim nanošenjem razvijaača dolazi do promene boje na tom mestu. Dužina greške određuje se neposredno merenjem, dok se dubina greške ne može da odredi, ali se obično iskustveno procenjuje.

Ova metoda ima veliku primenu za ispitivanje nepropusnosti odlivaka. Prodiranjem penetrantskih tečnosti uz korišćenje razvijaača sa suprotne strane, može se ispitati nepropustljivost navarenog spoja, odnosno može da se utvrdi da li postoje greške tipa prsline po celom preseku, kao i vezana poroznost. Radi boljeg uočavanja greške koriste se luminiscentne tečnosti koje svetle pri ozračavanju ultraljubičastim svetlom.

Magnetna metoda kontrole. Magnetnom metodom kontrole otkrivaju se površinske i podpovršinske (dubine 2,5-3mm) greške tipa prsline i poroznosti u materijalu. Ova metoda kontrole se bazira na principu skupljanja magnetnog praha na mestima prostiranja greške, usled rasejavanja magnetnih linija sila u namagnetisanom delu, što znači da ova metoda može da se primenjuje samo kod feromagnetnih materijala. Dužina greške određuje se neposredno merenjem (grubo). Da bi se poboljšalo otkrivanje grešaka koriste se fluorescentni prahovi i UV lampe, kao i crni prahovi na beloj podlozi.

Ultrazvučna metoda kontrole. Ultrazvučnom metodom kontrole otkrivaju se u materijalu i navarenim spojevima unutrašnje greške tipa uključaka, unutrašnjih šupljina, prsline, greške vezivanja i slično. Otkrivaju se greške koje se prostiru normalno na pravac ultrazvučnih talasa. Ova metoda se bazira na odbijanju ultrazvučnog talasa od greške, s tim što nema ograničenja u debljini dela koji se ispituje.

Radiografska metoda kontrole. Radiografskom metodom kontrole ne mogu da se otkriju prsline u osnovnom materijalu, ZUT-u i metalu šava zavarenog spoja koje su orijentisane u pravcu zraka. Pored prsline, mogu da se otkriju greške tipa poroznosti, šupljina, uključci troske, greške vezivanja. Ova metoda se zasniva na različitoj apsorpciji X- ili  $\gamma$ - zraka pri njihovom prolazu kroz homogene i nehomogene sredine, odnosno pri njihovom prolazu kroz materijale ili zone materijala različite gustine. Radiografska metoda se primenjuje uz korišćenje izvora X-zraka kod materijala manjih debljina, dok je  $\gamma$ - zracima moguće izvršiti prozračavanje materijala većih debljina.

Ispitivanja *mikrostrukture metodom replika* (smatra se metodom ispitivanja bez razaranja) i *tvrdće* daju podatke o strukturi materijala i njegovom termičkom stanju. Navedene metode kontrole imaju posebnu primenu u identifikaciji kvaliteta materijala pre izvođenja navarivanja, što je u slučaju reparaturnog navarivanja od velikog značaja. Primenom metalografskih ispitivanja, uzimanjem replika sa površine može da se proceni vrsta čelika, odnosno sadržaj ugljenika u ugljeničnim čelicima, a takođe i stanje posle termičke obrade.

Posle navarivanja najčešće je zastupljena kontrola *tvrdće* kako u metalu šava tako i u ZUT-u. Ispitivanjem tvrdće može da se utvrdi da li je došlo do pojave neželjenih krtih struktura u ZUT-u, kao i da li je postignuta željena tvrdća navarenog spoja odnosno metala šava.

Na osnovu ovako dobijenih podataka može da se sazna da li treba izvršiti izmene u tehnologiji navarivanja, kao i to da li je navarivanje izvedeno u skladu sa propisanom, odnosno kvalifikovanom tehnologijom. Operacije vezane za obezbeđenje kvaliteta navarivačkih radova pri reparaturi, ponekad su veoma značajne jer ono što se propusti tokom ovih operacija, gotovo je nemoguće nadoknaditi ili popraviti drugim načinima: čak i ako se izvodi ponovljeni proces reparacije dolazi do skraćanja radnog veka repariranog dela.

## 14. Kratak pregled čelika koji mogu da se navaruju i neke karakteristične napomene

Nelegirani čelici su generalno osetljivi na pojavu hladnih prslina iz kog razloga se u mnogim slučajevima pri navarivanju zahteva predgrevanje da bi se obezbedila dobra zavarljivost:

C<0.2%	C: 0.2 – 0.5%	C > 0.5%
bez predgrevanja do 30 mm ili do 100 °C zbog vlažnosti	temperatura predgrevanja 100 – 300 °C	temperatura predgrevanja 300 – 350 °C

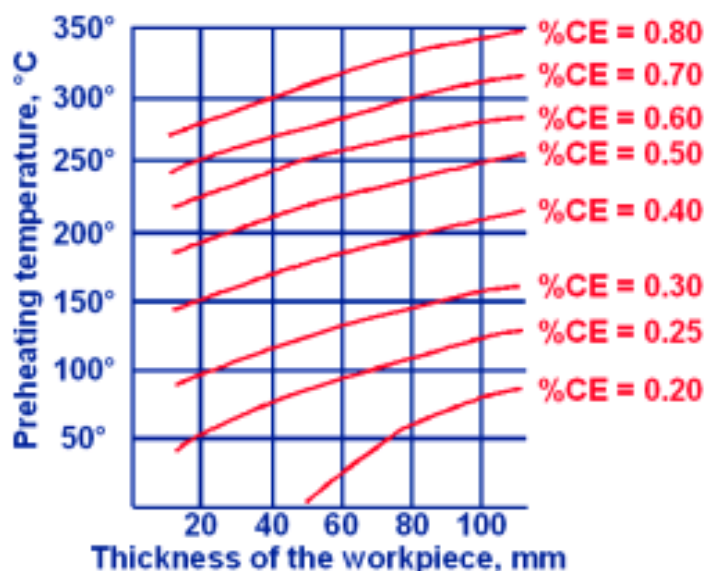
Stoga je kod njih mogući naknadni termički tretman

- žarenje radi uklanjanja unutrašnjih napona
- normalizacija.

Nisko legirani čelici su takođe osetljivi na pojavu hladnih prslina iz kog razloga se u mnogim slučajevima zahteva predgrevanje da bi se obezbedila dobra zavarljivost. Temperatura predgrevanja može da se odredi na osnovu Seferijanovog dijagrama, slika 19.

Kod ovih čelika je moguć naknadni termički tretman

- žarenje radi uklanjanja unutrašnjih napona
- kaljenje i otpuštanje.



Slika 19. Seferijanov dijagram za određivanje temperature predgrevanja u zavisnosti od debljine radnog dela koji se zavaruje / navaruje i sadržaja ugljenika

Finozrni čelici su osetljivi na pojavu hladnih prslina zbog apsopcije vodonika. Oni treba da se lagano prethodno zagrevaju i da se zavaruju / navaruju sa relativno malom specifičnom energijom, da bi se smanjila širina ZUT-a. Prethodno zagrevanje u zavisnosti od čelika treba izvoditi na 100 °C (max 200 °C). Naknadna termička obrada nije neophodna.

Austenitni Mn-čelici sa sadržajem Mn od 14% (Hatfildov čelik) imaju tendenciju da obrazuju krte taloge u vidu karbida. Neophodno je navarivati ih bez predgrevanja, čak i sa dodatnim hlađenjem i održavati unos specifične toplote na niskom nivou. Termička obrada nakon navarinja se ne izvodi.

Austenitni nerđajući čelici su osetljivi na pojavu toplih prslina i stoga moraju da se čiste i zavaruju sa malom specifičnom energijom. Ako je sadržaj ugljenika veći od 0.04% može da dođe do izdvajanja karbida hroma po granicama zrna u kom slučaju im je zavarljivost otežana. Kao dodatni materijal može da se koristi samo onaj čiji sadržaj ugljenika ne prelazi 0.04%. Predgrevanje

se obično ne izvodi, a ako je potrebna naknadna termička obrada onda se izvodi rastvarajuće žarenje. Kod navarivanja ovog tipa čelika mora da se posebno vodi računa o tome da površina ne sme da bude u kontaktu sa bilo kakvim uljima i masnoćama, s tim što se čišćenje površine uvek mora da izvodi pomoću četki od NRC.

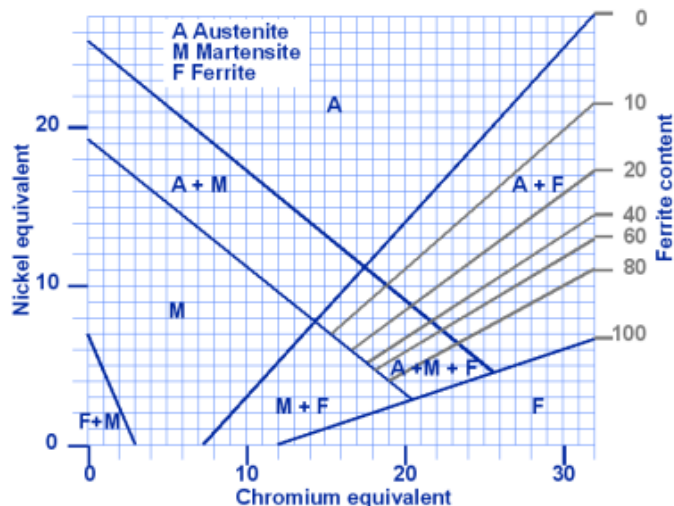
Martenzitni hromni čelici se odlikuju ograničenom zavarljivošću zbog čega moraju da se predgrevaju, obično na 250 – 450 °C u zavisnosti od sastava. Takođe, neophodna je i naknadna termička obrada koja obuhvata: lagano hlađenje do 120 °C (martenzitna transformacija) nakon navarivanja i žarenje na 750 °C ili ojačavanje (generalno 1000 °C/ulje) i otpuštanje (generalno 750 °C/ulje). Kod ovih čelika postoji opasnost od izdvajanja karbida hroma između 500 i 600 °C zbog čega treba voditi računa o brzini hlađenja u ovom temperaturnom intervalu.

Šeflerov dijagram, slika 20, kao što je već rečeno, ukazuje na pojavu mogućih struktura za zavarene i navarene spojeve visoko legiranih čelika koji sadrže elemente kao što su Ni, Mn, Cr, Mo, Nb, W, V, Cu, čiji je ukupan sadržaj veći od 5%.

Kao što je već istaknuto, prema drugom pristupu, Cr-ekvivalent se izračunava primenom težinskih procenata hemijskih elementa koji stabilišu ferit, ali je u nastavku data empirijska relacija koja se unekoliko razlikuje od relacije date jed. 1.

Ni-ekvivalent se izračunava primenom težinskih procenata hemijskih elementa koji stabilišu austenit, a u nastavku data empirijska relacija koja se unekoliko razlikuje od relacije date jed. 2.

Jačina stabilizacije svakog elementa je iskazana odgovarajućim koeficijentom u jednačinama (10) i (11).



Slika 20. Šeflerov dijagram

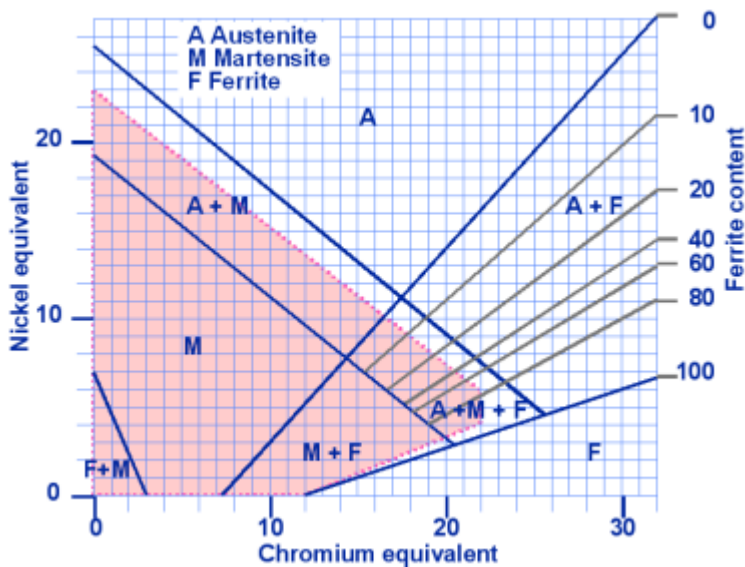
$$\text{Cr-eq} = \% \text{Cr} + 1.5 \times \% \text{Si} + \% \text{Mo} + 0.5 \times \% (\text{Ta} + \text{Nb}) + 2 \times \% \text{Ti} + \% (\text{W} + \text{V} + \text{Al}) \quad (10)$$

$$\text{Ni-eq} = \% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0.5 \times \% \text{Mn} + 0.5 \times \% \text{Co} \quad (11)$$

Hladne prsline ili prsline indukovane vodonikom su termini za isti fenomen. Poznati tipovi hladnih prsline su prsline ispod kupatila (osnovni metal), prsline u korenu, mikroprsline ili podužne prsline u zavarenom spoju, slika 21. Martenzitna struktura ima, zajedno sa prisustvom vodonika i zaostalim napona, sklonost ka pojavi hladnih prsline, slika 22. Hladne prsline se obično javljaju tokom hlađenja ispod 200°C.

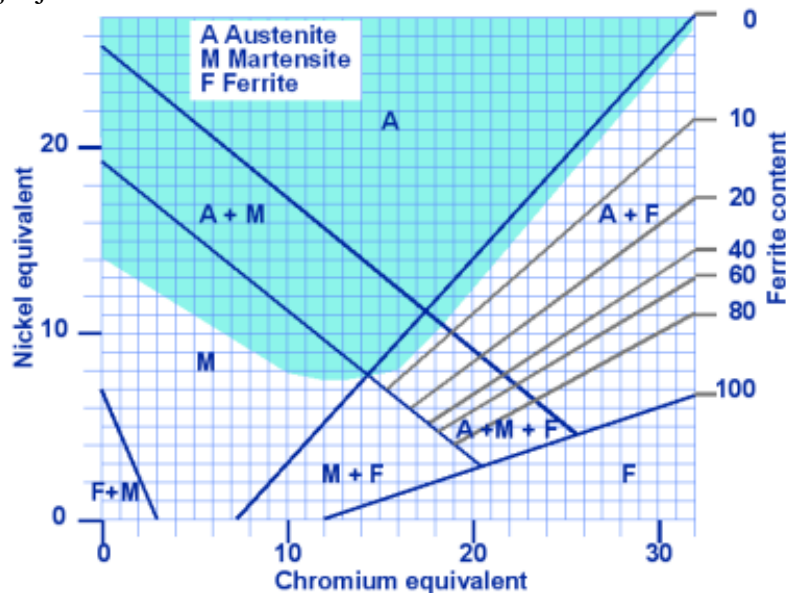


Slika 21. Hladne prsline



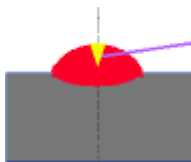
Slika 22. Šeflerov dijagram. Oblast pojave hladnih prslina

**Tople prsline:** Austenitna struktura ima tendenciju ka pojavi toplih prslina, slika 23. Tople prsline se javljaju neznatno iznad temperature topljenja konstituenta / faze sa najnižom temperaturom topljenja.



23. Šeflerov dijagram, oblast pojave toplih prslina

U tom trenutku, u procesu očvršćavanja pri navarivanju, dendriti su okruženi oblastima koje sadrže interdendritni nisko-topljiv rastop. Deformacija izaziva lom "mostića" koji su već u čvrstom stanju.

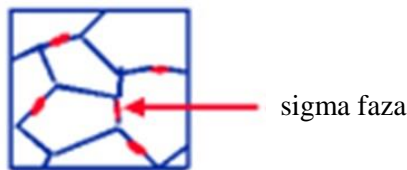


- Da bi se izbegla pojava nisko topljivih konstituenata
- izbor dodatnog materijala sa najmanje 5 zap.% ferita u mikrostrukturi posle zavarivanja
- mali unos toplote pri zavarivanja

Čuvati od ulja i masti, očistiti lagano posle navarivanja upotrebom četki od nerđajućih čelika.

**Krtost usled izdvajanja intermetalnih faza: sigma faza.** Intermetalne faze (sigma faza) mogu da se obrazuju na temperaturama između 500 i 900°C kod feritnih nerđajućih čelika koji sadrže više od 14% Cr, slika 24. Kao rezultat ovog procesa dolazi do: povećanja tvrdoće (u

izvesnim slučajevima može da bude i korisno), pada plastičnosti i žilavosti, kao i smanjenja korozijske otpornosti.

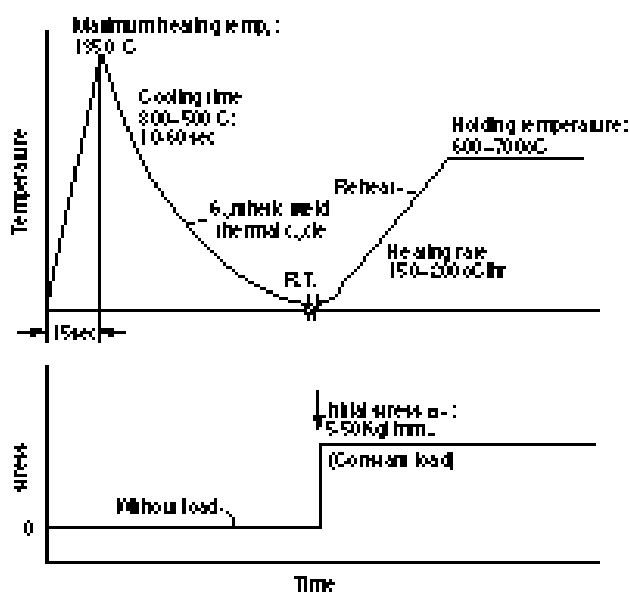


24. Šematski prikaz izdvajanja sigma faze po granicama feritnih zrna

## 15. Prsline pri naknadnoj termičkoj obradi

Prsline pri naknadnom zagrevanju se javljaju duž granica zrna grubozrne ZUT u blizini fuzione zone tokom naknadne termičke obrade kod HT80 klase čelika ili kod Cr-Mo-V čelika. Što se tiče uzroka njihovog nastanka, postoje dva suprotstavljena mišljenja. Prema jednim, tokom izvođenja naknadne termičke obrade interkristalne oblasti ojačavaju finim česticama taloga (taložno ojačavajućih elemenata), pa se klizanje prevashodno javlja u granicama zrna što dovodi do pojave prslina. U drugom pristupu daje se prednost interkristalnoj segregaciji nečistoća, koja izaziva efekat sličan kao kod otpusne krstosti, zbog čega dolazi do pada kohezivne čvrstoće, odnosno do pojave prslina. Stvarno, pojavu prslina pri naknadnoj termičkoj obradi treba razmatrati kao posledicu kombinovanog delovanja oba faktora.

Eksperimentalnim istraživanjima i simulacijama je pokazano da se prsline tokom termičke obrade javljaju kada delujuće opterećenje na materijal, koji je u procesu naknadne termičke obrade, postane veće od deformacione sposobnosti materijala. Da se to ne bi javilo, neophodno je odrediti kontinualnu relaksaciju napona i veličinu deformacije tokom procesa zagrevanja i držanja na temperaturi naknadne termičke obrade. Stoga je u prikazanom eksperimentu simuliran termički ciklus u blizini fuzione zone (ispitivani uzorak je sa zarezom po obimu, spoljašnji prečnik uzorka 10 mm, dubina zarez 1 mm, radijus zaobljenja zarez 0.25 mm, faktor koncentracije napona  $K = 3.4$ ): uzorak je zagrevan konstantnom brzinom (150 – 200 °C/h) do specificirane temperature (600 – 720 °C) posle primene inicijalnog opterećenja na sobnoj temperaturi, a zatim držan fiksiran period vremena (1 do 2 časa) i ispitivan na prsline, slika 25. Kritično pomeranje ili kritični napon za pojavu prslina je određen, i ta vrednost je uzeta kao indeks za osetljivost na pojavu prslina pri naknadnoj termičkoj obradi.



Slika 25. Šematski prikaz dijagrama termičkog i naponskog ciklusa pri naknadnoj termičkoj obradi