

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

### 5. 1. Uvod u eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu predviđeno je ispitivanje zavarljivosti jednog vatro otpornog čelika.

Ispitivanje zavarljivosti provedeno je na feritnom tipu čelika, kojem je oznaka po DIN – u X 10 Cr Al 18.

Ovaj čelik pripada grupi čelika koji su problematični pri zavarivanju, a mogući problemi koji pri tome nastaju detaljno su opisani u poglavlju 3.

Eksperimentom je predviđeno zavarivati 5 komada ploča dimenzija  $150 \times 75 \times 5$  mm pod različitim uvjetima REL postupkom.

Zbog mogućnosti nastajanja ozbiljnih problema pri zavarivanju, provest će se ispitivanje zavarljivosti dotičnog materijala u 4 primjerka, izvan propisane tehnologije zavarivanja. Tek na 5. uzorku provest će se zavarivanje po propisanoj tehnologiji.

Za zavarivanje koristi se sučeonni oblik zavarenog spoja s više prolaza, koji se izvodi pomoću aparata tipa INVERTIG 270 GW.

Da bi se dobila tražena kvaliteta zavarenog spoja, zavarivanje je provedeno po unaprijed detaljno razrađenom tehnološkom planu.

Nakon zavarivanja provest će se uspoređivanje dobivenih rezultata iz ispitivanja na savijanje, makro, mikro strukture i tvrdoće.

Dobiveni rezultat pokazat će da li je moguće u nekim uvjetima izbjeći predgrijavanje i naknadnu toplinsku obradu pri zavarivanju ovog čelika, što bi moglo donekle pojeftiniti izvođenje zavarivačkih radova pri gradnji konstrukcija.

### 5. 2. Zavarivanje uzoraka

Prema planu predviđeno je zavarivanje po 2 epruvete za svaki od 5 uzoraka. Svaki od uzoraka zavarivani su na poseban način primjenom istog postupka zavarivanja.

Proces zavarivanja svakog uzorka predviđa sljedeći postupak:

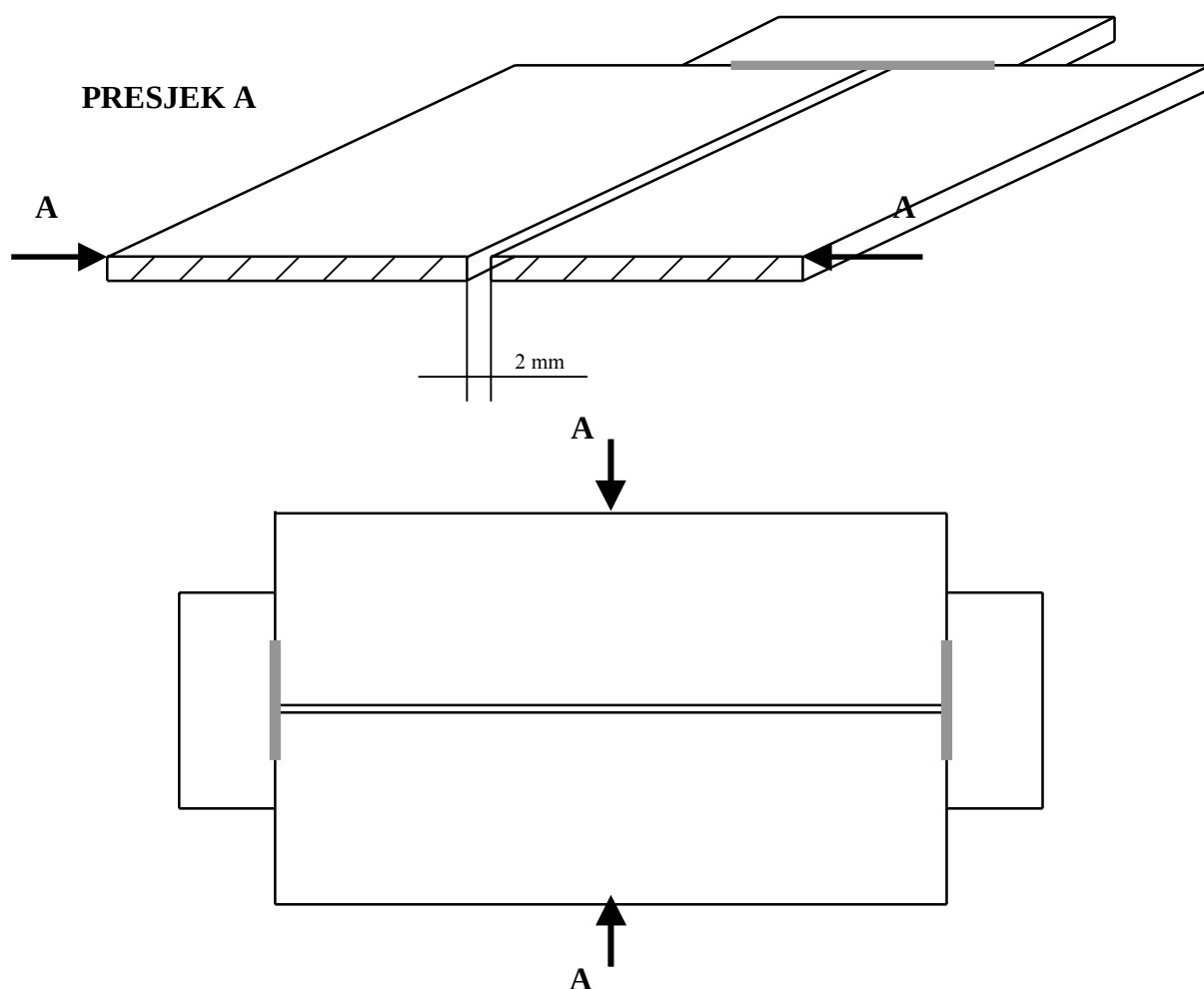
- uzorak 1 zavaruje se bez predgrijavanja i bez naknadne toplinske obrade,
- uzorak 2 zavaruje se uz predgrijavanje od  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  i bez naknadne toplinske obrade,
- uzorak 3 zavaruje se uz predgrijavanje od  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  i bez naknadne toplinske obrade,

- uzorak 4 zavaruje se uz predgrijavanje od 200 °C sa naknadnom toplinskom obradom, ali sa sporim hlađenjem i
- uzorak 5 zavaruje se uz predgrijavanje od 200 °C sa naknadnom toplinskom obradom, ali sa brzim hlađenjem.

### 5. 2. 1. Zavarivanje 1 uzorka

Uzorak 1 zavaruje se bez potrebnog predgrijavanja pri okolišnoj temperaturi mjereno 18.5 °C.

Prije nego se krene sa zavarivanjem provedena je priprema zavarenog spoja. Priprema se sastoji od čišćenja djela osnovnog materijala na kome će se formirati zavareni spoj, te učvršćivanja ploča na postolje pomoću pločica od istog materijala na zadani razmak između ploča od 2 mm. Pripremljeni zavareni spoj prikazan je na Sl. V. 1.



Sl. V. 1. - Prikaz pripreme zavarenog spoja

Zavarivanje pripremljenih ploča provedeno je s jedne i druge strane u dva prolaza.

Prvi prolaz izveden je bazičnom elektrodom promjera  $\phi$  2.5 mm uz srednju vrijednost jakosti struje od 80 A.

Drugi prolaz izveden je također sa bazičnom elektrodom promjera  $\phi$  3.2 mm uz srednju vrijednost jakosti struje od 100 A, ali pri među prolaznoj temperaturi od 162 °C.

Između prvog i drugog prolaza izvršeno je čišćenje i žlijebljenje metodom brušenja zavarenog spoja kako bi u zoni zavarivanja ostao samo čisti zavar bez vidljivih uključaka i grešaka.

Nakon drugog prolaza zavora s prve strane izvršen je vizualni pregled gotovog zavarenog spoja.

Pošto je zavarena jedna strana provedeno je odvajanje uzorka od držača, te okretanje uzorka zavarivanja kako bi se provelo zavarivanje korijena zavora.

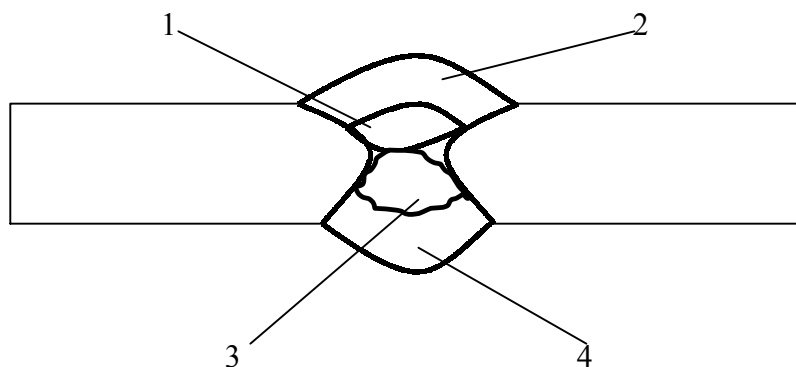
Prije početka zavarivanja pripaja se uzorak na postolje pomoću držača, te se brusi korijen zavora nastao iz prvog prolaza.

Vremenski period izvođenja ovih operacija je kratak tako da je međutemperatura ostala na vrijednosti mjereno 135 °C.

Mjerenje međutemperature provedeno je sa termometrom tipa K CA 860 prije početka svakog prolaza pri zavarivanju, te za mjerenje temperature predgrijavanja.

Zavarivanje s druge strane provodi se na isti način kao i sa prve strane pridržavajući se tehnološkog plana pri zavarivanju.

Međutemperatura između trećeg i četvrtog prolaza iznosi 181 °C. Nakon završenog zavarivanja s druge strane proveden je vizualni pregled zavarenog spoja, te se predmet odvaja sa postolja i na zraku hladi. Redoslijed nanošenja slojeva pri zavarivanju prikazan je na Sl. V. 2.



Sl. V. 2. - Prikaz redosljeda polaganja slojeva pri zavarivanju

Tablica 9. *Prikaz međuslojnih temperatura s obzirom na pojedini prolaz pri zavarivanju 1 uzorka*

| Broj prolaza | Promjer elektrode $\phi$ | Jakost struje I [A] | Temp. predgrija. $T_p$ [°C] | Međuslojna temp. $T_m$ [°C] |
|--------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1.           | 2,5                      | 66 – 80/DC+         | RT 18,5                     | ----                        |
| 2.           | 3,2                      | 98 - 105/DC+        | ----                        | 162                         |
| 3.           | 2,5                      | 70 – 80/DC+         | ----                        | 135                         |
| 4.           | 3,2                      | 95 – 105/DC+        | ----                        | 181                         |

U tablici 9. prikazuju se vrijednosti pojedinih međuslojnih temperatura pri nanošenju svakog prolaza.

Originalan dokument s parametrima zavarivanja i vrijednostima međuslojnih temperatura nalazi se u prilogu.

### 5. 2. 2. Zavarivanje 2 uzorka

Zavarivanje drugog uzorka provedeno je uz predgrijavanje na 100 °C, pri čemu se predgrijavanje izvodilo pomoću plinskog plamenika, gdje se zagrijavao cijeli uzorak prije zavarivanja. Priprema 2 uzorka za zavarivanje je identična kao i za 1 uzorak što je prikazano na Sl. V.1.

Tehnologija zavarivanja drugog uzorka identična je tehnologiji zavarivanja prvog uzorka, samo s razlikom predgrijavanja, te sa različitim među temperaturama između pojedinih prolaza.

Način nanošenja pojedinih prolaza pri zavarivanju identičan je kao u slučaju zavarivanja 1 uzorka što je prikazano na Sl. V. 2. .

Vrijednosti pojedinih među temperatura navedene su u Tablici 10, dok se originalne vrijednosti nalaze u dokumentu priloženom u poglavlju Prilozi.

Tablica 10. *Prikaz međuslojnih temperatura s obzirom na pojedini prolaz pri zavarivanju 2 uzorka*

| Broj prolaza | Promjer elektrode $\phi$ | Jakost struje I [A] | Temp. predgrija. $T_p$ [°C] | Međuslojna temp. $T_m$ [°C] |
|--------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1.           | 2,5                      | 80/DC+              | 120                         | -----                       |
| 2.           | 3,2                      | 103/DC+             | -----                       | 135                         |
| 3.           | 2,5                      | 80/ DC+             | -----                       | 140                         |
| 4.           | 3,2                      | 105/DC+             | -----                       | 132                         |

### 5. 2. 3. Zavarivanje 3 uzorka

Zavarivanje trećeg uzorka provedeno je uz predgrijavanje od 200 °C, te bez naknadne toplinske obrade, uz propisanu tehnologiju zavarivanja.

Priprema uzorka i redoslijed nanošenja pojedinih prolaza pri zavarivanju su identični kao za slučaj 1 i 2 uzorka.

Nakon zavarivanja provedeno je hlađenje na zraku. Vrijednosti međutemperatura za pojedini prolaz prikazane su u Tablici 11.

Originalni dokument sa svim parametrima zavarivanja za ovaj uzorak nalazi se u poglavlju Prilozi.

Tablica 11. *Prikaz međuslojnih temperatura s obzirom na pojedini prolaz pri zavarivanju 3 uzorka*

| Broj prolaza | Promjer elektrode $\phi$ | Jakost struje I [A] | Temp. predgrija. $T_p$ [°C] | Međuslojna temp. $T_m$ [°C] |
|--------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1.           | 2,5                      | 80/DC+              | 205                         | -----                       |
| 2.           | 3,2                      | 104/DC+             | -----                       | 232                         |
| 3.           | 2,5                      | 80/DC+              | -----                       | 212                         |
| 4.           | 3,2                      | 104/DC+             | -----                       | 216                         |

#### 5. 2. 4. Zavarivanje 4 uzorka

Zavarivanje četvrtog uzorka izvedeno je uz predgrijavanje na 200 °C, te uz naknadnu toplinsku obradu žarenje na temperaturi 800 - 850 °C.

Priprema uzorka i redoslijed nanošenja pojedinih prolaza pri zavarivanju su identični kao za slučaj 1, 2 i 3 uzorka.

Vrijednosti međutemperatura za pojedini prolaz prikazane su u Tablici 12.

Tablica 12. *Prikaz međuslojnih temperatura s obzirom na pojedini prolaz pri zavarivanju 4 uzorka*

| Broj prolaza | Promjer elektrode $\phi$ | Jakost struje I [A] | Temp. predgrija. $T_p$ [°C] | Međuslojna temp. $T_m$ [°C] |
|--------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1.           | 2,5                      | 83.3/DC+            | 208                         | -----                       |
| 2.           | 3,2                      | 104/DC+             | -----                       | 215                         |
| 3.           | 2,5                      | 80/DC+              | -----                       | 217                         |
| 4.           | 3,2                      | 104/DC+             | -----                       | 220                         |

Žarenje kao toplinska obrada provedeno je sa ciljem postizanja strukture koja po granici zrna nema izlučene precipitate. Postupak toplinske obrade proveden je na slijedeći način.

Žarenje se izvodilo zagrijavanjem uzorka zavarivanja na temperaturu od oko 850 °C u peći, zadržavanja na toj temperaturi nekih 35 min, te hlađenja u peći do sobne temperature.

#### 5. 2. 5. Zavarivanje 5 uzorka

Kod zavarivanja petog uzorka provedeno je predgrijavanje na 200 °C, te na kraju zavarivanja žarenje na temperaturi 800 - 850 °C.

Priprema uzorka i redoslijed nanošenja pojedinih prolaza pri zavarivanju su identični kao za slučaj 1, 2, 3 i 4 uzorka.

Vrijednosti međutemperatura za pojedini prolaz prikazane su u Tablici 13.

Žarenje se izvodilo zagrijavanjem uzorka zavarivanja na temperaturu od oko 850 u peći, zadržavanja na toj temperaturi nekih 35 min, te hlađenja u peći do 300 °C, a kada

postigne tu temperaturu hladi se na zraku. Brzina hlađenja određena je tehnologijom zavarivanja i iznosi nekih 100 °C / h.

Tablica 13. *Prikaz međuslojnih temperatura s obzirom na pojedini prolaz pri zavarivanju 5 uzorka*

| Broj prolaza | Promjer elektrode $\phi$ | Jakost struje I [A] | Temp. predgrija. $T_p$ [°C] | Međuslojna temp. $T_m$ [°C] |
|--------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1.           | 2,5                      | 80/DC+              | 215                         | -----                       |
| 2.           | 3,2                      | 104/DC+             | -----                       | 208                         |
| 3.           | 2,5                      | 80/DC+              | -----                       | 210                         |
| 4.           | 3,2                      | 104/DC+             | -----                       | 207                         |

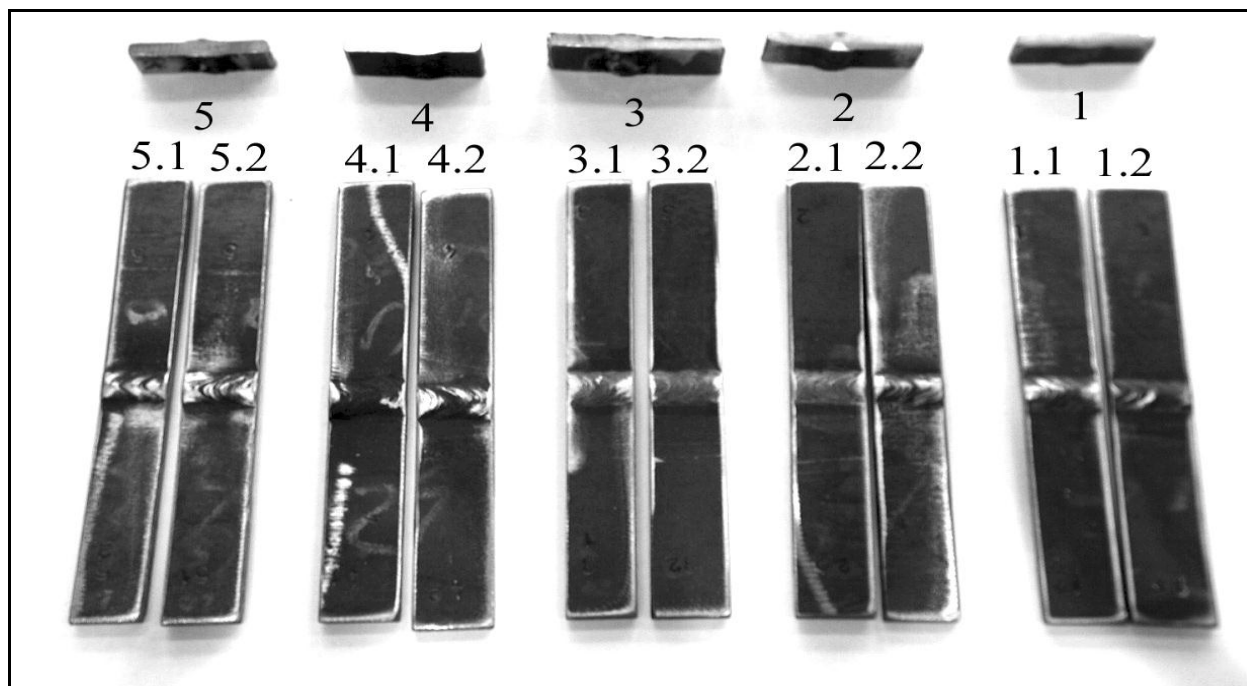
Žarenje se izvodilo zagrijavanjem uzorka zavarivanja na temperaturu od oko 850 u peći, zadržavanja na toj temperaturi nekih 35 min, te hlađenja u peći do 300 °C, a kada postigne tu temperaturu hladi se na zraku. Brzina hlađenja određena je tehnologijom zavarivanja i iznosi nekih 100 °C / h.

Nakon provedene tehnologije zavarivanja i toplinske obrade na svim uzorcima izvršeno je odstranjivanje pričvrtnih pločica, te izrada epruveta za provedbu mjerenja mehaničkih svojstava svakog pojedinog uzorka.

Uz mehanička ispitivanja provodi se i metalografska analiza.

Da bi se to prikazalo na potpuniji način te po propisima cjelokupni plan tehnologije zavarivanja predložen je na originalnom dokumentu prikazanom u prilogu 1 i 2.

Oblik izrađenih epruveta iz svakog uzorka prikazan je na Sl. V.1.



Na Sl. V. 1. prikazane su epruvete za ispitivanje na savijanje i to po dvije epruvete za svaki uzorak.

Dimenzije epruveta za savijanje predviđene standardom 3A iznose  $150 \times 25 \times 5$  mm, dok za mikro i makro iznose  $25 \times 30 \times 5$  mm.

Za ispitivanje predviđeno je 5 uzoraka. U gornjem djelu slike prikazani su uzorci za ispitivanje mikro i makro strukture.