Broj rada: 2.5
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.009

PROBLEMI ROBOTSKOG ZAVARIVANJA ČELIKA C35 BEZ PREDGRIJAVANJA

PROBLEMS OF ROBOTIC WELDING OF C35 STEEL WITHOUT PRE-HEATING

Amar Pohara[1]
doc. dr. Petar Tasić[2], ORCID broj: 0000-0002-3349-6116
prof. dr. Ismar Hajro[2], ORCID broj: 0000-0001-6148-895X

[1] Mercury Group, Ferde Hauptmana 40, Sarajevo, BiH
[2] Univerzitet u Sarajevu – Mašinski fakultet, Vilsonovo šetalište 9, Sarajevo, BiH

E-mail: tasic@mef.unsa.ba

Rezime: Automatizirana proizvodnja je postala neophodna za ispunjenje strogih zahtjeva većine proizvođača u automobilskoj industriji. Takva proizvodnja se oslanja na dva ključna parametra za efektivno planiranje i praćenje, a to su vrijeme ciklusa i ukupna efektivnost opreme. Sve smetnje i problemi koji se javljaju u procesu proizvodnje utiču na ova dva parametra, a njihovi uzroci mogu biti različiti. U ovom radu je izložena analiza koja uključuje samo neke u slučaju robotskog TIG zavarivanja komponenti od raznorodnih čelika. Naglasak je usmjeren na zavarljivost kritičnijeg osnovnog materijala, srednje-ugljičnog čelika C35, koji se obično prije zavarivanja predgrijava s ciljem sprječavanja nastanka toplih pukotina. S obzirom na specifičnost proizvodnog procesa obrađenog u ovom radu, ono se ne vrši, već se komadi zavaruju odmah poslije operacije popuštanja i čišćenja. U radu su analizirani uzroci zbog kojih nastaju tople pukotine na ovome proizvodu, te date smjernice kako bi se one mogle izbjeći.

Ključne reči: čelik C35, robotsko zavarivanje, tople pukotine, predgrijavanje

Abstract: Automated production has become a prerequisite for meeting the strict demands of most manufacturers in the automotive industry. Such production relies on two key parameters for effective planning and monitoring: cycle time and overall equipment effectiveness. Any issues or problems within the production process impact these parameters, while causes for them can be diverse. This paper presents analysis regarding some of them in case of robotic GMAW welding of components made of dissimilar steels. Emphasis is placed on the weldability of the more critical base material, C35 medium-carbon steel, for which preheating is commonly applied prior to welding in order to reduce the risk of hot cracking. However, due to specifics of the production process considered in this study, preheating is omitted. Instead, welding is performed immediately following tempering and cleaning operations. The paper analyses the reasons leading to hot crack formation in the investigated component and gives recommendations for their prevention.

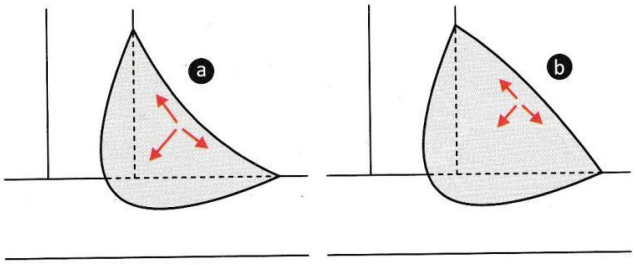
Key words: C35 steel, robotic welding, hot cracking, pre-heating

1. UVOD

Zavarljivost je složen pojam koji možemo definisati kao sposobnost materijala da primjenom adekvatne tehnologije zavarivanja ostvari kvalitetan zavareni spoj. Zavarljivost se postiže na osnovu razmatranja materijala (hemijski sastav, fizičke osobine, mikrostruktura), tehnologije zavarivanja (unos toplote i drugi parametri) i projektovanja zavarenog spoja (oblik, dimenzije, položaj dijela). [1] Opšte preporuke za zavarivanje konstrukcionih čelika, u šta spadaju i ova dva, su date u standardu EN 1011-2. Neki od problema koji se mogu javiti prilikom njihovog zavarivanja su pukotine, otvrdnjavanje, krti lom i starenje. Od navedenog, vjerovatno najopasniji tip problema je nastanak pukotina. Same pukotine predstavljaju razdvajanje materijala, odnosno prekid materijalnog kontinuiteta, i time predstavljaju mjesta inicijacije potencijalnog loma dijelova, posebno ako se radi o dinamičkim opterećenjima. [2,3] Postoji više vrsta pukotina, ali su za ovaj rad najinteresantnije (a sa aspekta proizvodnje najznačajnije) tople i hladne pukotine.

Tople pukotine su rijetko problem kod konstrukcionih čelika, i nastaju najčešće na temperaturama do $0{,}5\times T_t$ (temperatura topljenja). Dijele se u dvije grupe, kristalizacione i podsolidusne pukotine. Kristalizacione pukotine nastaju pri hlađenju, u temperaturnom intervalu između likvidus i solidus linije. Kod legura sa malim intervalom očvršćavanja nastaju podsolidusne pukotine. U praksi tople pukotine nisu posljedica samo metalurške prirode, već značajan uticaj imaju i naponi i temperaturni gradijent. Što je temperaturni interval kristalizacije veći, veća je i sklonost ka nastanku toplih pukotina. Temperaturni interval se povećava kako raste sadržaj ugljika i nečistoća (S i P). [2,4]

Geometrija šava također ima ulogu u nastajanju pukotina, što prikazuje slika 1. Kada se udubljeni (konkavni) jednoprolazni ugaoni šav hladi, na njegovoj vanjskoj površini se uslijed skupljanja javljaju zatezni naponi, a površina lica šava se povlači prema stranicama i korijenu, što izaziva zatezne napone. Kada je šav ispupčen (konveksan), površina lica šava se povlači prema korijenu, i time nastaju manji zatezni naponi prema stranicama. [5] Ovo znači da ispupčeni šavovi imaju manju tendenciju ka nastajanju pukotina.



Slika 1: Uticaj oblika šava na nastanak pukotina [5]

Ocjena sklonosti ka toplim pukotinama za ugljične čelike može se izvršiti na osnovu proračuna osjetljivosti na tople pukotine (HCS, eng. *Hot Cracking Sensitivity*), izraz (1).

$$\mathrm{HCS} = \frac{C \cdot \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V} \tag{1}$$

Općenito se smatra da su toplim pukotinama skloni čelici koji imaju jednu od sljedeće dvije kombinacije: (a) HCS > 2 i $R_m \geq 700$ MPa ili (b) HCS > 4 i $R_m < 700$ MPa. [5]

Da bi se smanjio rizik od nastanka toplih pukotina potrebno je birati dodatni materijal sa niskim sadržajem ugljika i nečistoća, te sa relativno visokim sadržajem Mn. Izbjegavanje njihovog nastanka, kako se vidi, nije posebno problematično. [5,6]

Hladne pukotine nastaju na temperaturama ispod 300 °C. Mogući preduslovi za nastanak hladnih pukotina su zakaljena mikrostruktura, zaostali naponi i zaostali vodik. Izbjegavanje hladnih pukotina je u suštini jednostavno, i najčešće se vrši predgrijavanjem. Postoji nekoliko načina da se izračuna potrebna temperatura predgrijavanja, a u ovom radu je iskorištena metoda iz Aneksa C.3 standarda EN 1011-2, izraz (2) [7].

$$T_P = 697 \cdot \mathrm{CET} + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot \mathrm{HD}^{0,35} + Q\left(53 \cdot \mathrm{CET} - 32\right) - 328 \tag{2}$$

Ovdje je T_P (°C) temperatura predgrijavanja, CET (bezdimenziono) ugljikov ekvivalent koji se računa prema izrazu C.2 Aneksa C.3 EN 1011-2 (izraz (3)), d (mm) debljina materijala, HD (ml/100 g) sadržaj zaostalog vodika i Q (kJ/mm) unos toplote (izraz (4)). [7]

$$\mathrm{CET} = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \tag{3}$$

$$Q = \frac{I \cdot U}{w} \cdot \eta \tag{4}$$

U izrazu (4) I (A) je jačina struje, U (V) napon električnog luka, w (cm/min) brzina zavarivanja i η (bezdimenziono) termički stepen iskorištenja postupka.

Od svega nabrojanog, vrijednosti CET su najznačajnije za procjenu zavarljivost. Čelici sa CET manjim od 0,22 se smatraju pogodnim za zavarivanje, a ukoliko su veće vrijednosti u pitanju, onda se zavarljivost poboljšava kontrolom unosa toplote ili predgrijavanjem. [1,8] Cilj je usporiti hlađenje i spriječiti nastanak neravnotežnih mikrostruktura, zaostalih napona i hladnih pukotina. Dodatno, njihov nastanak se može spriječiti sušenjem elektroda ukoliko je u pitanju REL postupak zavarivanja. Suštinski je, dakle, relativno lako izbjeći i njihov nastanak.

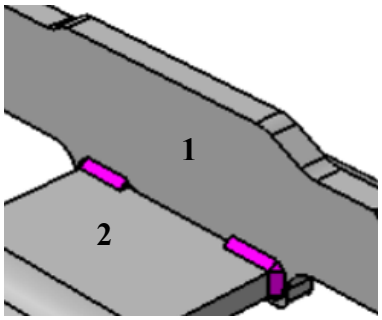
Problem je, međutim, u tome što predgrijavanje traži dodatno vrijeme i može dovesti do značajnog usložnjavanja proizvodnog procesa, kao i povećanja troškova proizvodnje. Kontrola unosa toplote može značiti promjene u tehnologiji (postupak, parametri), koji također uzrokuju povećanje troškova, ali i potencijalno povećanje vremena proizvodnje. Cilj je, dakle, izbjeći predgrijavanje, a zadržati tehnologiju i parametre koji daju najkraće moguće vrijeme zavarivanja uz ispunjavanje potrebne kvalitete. To je kompromis koji nije uvijek moguće jednostavno postići.

Tendencija većine proizvođača u automobilskoj industriji jeste da se za određenu konfiguraciju zavarenog spoja koriste jednom ustanovljeni i optimizirani parametri zavarivanja, a sve kako bi se osigurala ponovljivost procesa i rezultata. To je i razlog zašto se gotovo uvijek zahtjeva automatizirana i/ili robotizirana proizvodnja, posebno ako su u pitanju odgovorni dijelovi ili sklopovi. Na taj način je olakšano i planiranje proizvodnje, koje se bazira na dva ključna podatka, i to ciklično vrijeme (eng. *Cyclic time*) i ukupna efektivnost opreme (eng. *Overall Equipment Effectiveness*). Sve greške ili problemi koji se javljaju u proizvodnom procesu očituju se na ova dva parametra, a to uključuje i aspekte menadžmenta, ljudi, prethodnih operacija, mašina i materijala, a ne samo tehnologije.

2. EKSPERIMENT

Kako bi se ispitala zavarljivost pri spajanju raznorodnih čelika, izvršena je izrada serije zavarenih spojeva i njihova analiza sa aspekta pukotina, iz prostog razloga što one predstavljaju najveći problem u zavarenom proizvodu. Dodatno, biće analizirani i određeni aspekti izrade koji imaju uticaj na njihov nastanak.

Spojevi raznorodnih materijala, a posebno čelikâ, su česti u izradi dijelova i sklopova u savremenoj automobilskoj industriji, s obzirom na to da se teži optimiziranju masa i njihovog rasporeda, kao i iskorištenju najboljih osobina svakog od materijala. Primjer takvog dijela je dat na slici 2, gdje je vidljiv i položaj ugaonih spojeva između njih.



Slika 2: Šematski prikaz dijela izrađenog od dva različita čelika i zavarenog spoja

Komponenta 1 (slika 2) je izrađena od čelika C35 (grupa materijala 1.3 prema ISO 15608), dakle od čelika kod kojeg se obično vrši predgrijavanje sa ciljem sprječavanja nastanka toplih pukotina. U ovom slučaju se zbog ekonomskih razloga i skraćenja proizvodnog procesa ono ne vrši, već se komadi zavaruju odmah nakon operacija popuštanja i pranja. Komponenta 2 (slika 2) je izrađena od čelika S355MC (grupa materijala 2.2 prema ISO 15608). Oba čelika spadaju u grupu nelegiranih čelika, a debljina svake komponente je 8 mm. Garantovani hemijski sastav čelikâ komponenti 1 i 2 je dat u tabeli 1, a garantovane mehaničke osobine u tabeli 2, sve prema EN 683-7 i EN 10149-2, respektivno.

Tabela 1: Hemijski sastav čelikâ [9,10]

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Nb	Ti	Al	P	S
C35	0,39	<0,40	0,80	0,40	0,10	-	-	-	-	0,045	0,045
S355MC	<0,12	<0,50	<1,50	-	-	<0,20	<0,09	<0,15	>0,015	<0,025	-

Tabela 2: Mehaničke osobine čelikâ [9,10]

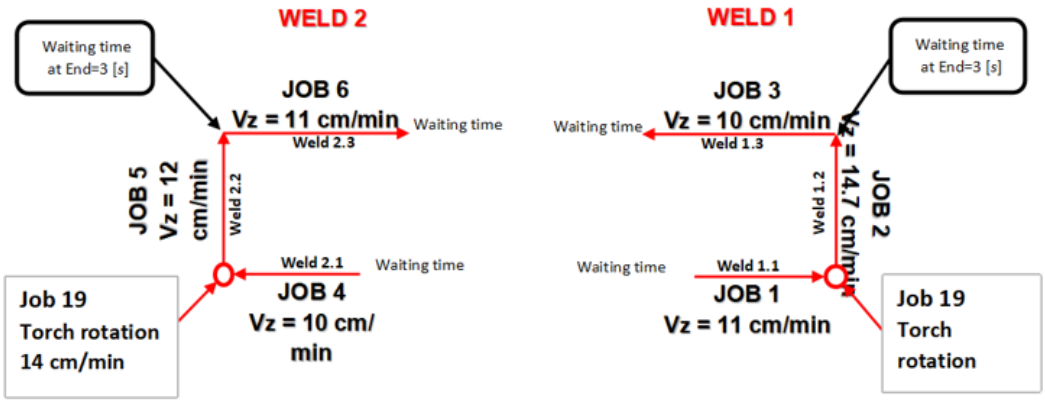
	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	KV (J) na -20 °C
C35	270	520	19	30
S355MC	355	550	22	40

Za spajanje dijelova je korišten TIG postupak, dok je za izvođenje samog procesa zavarivanja oformljena zavarivačka ćelija sa Fronius uređajem za zavarivanje i Fanuc industrijskim robotom. Time je postupak u potpunosti automatizovan i ostvarena je potpuna ponovljivost. Kao dodatni materijal iskorištena je žica oznake G 55 6 M21 Mn3Ni1Mo prema EN ISO 16834-A, kako ne bi bilo prekida u njenom dostavljanju na mjesto spajanja. Razlog za njen izbor je posjedovanje hemijskog sastava i mehaničkih osobina zavarenog spoja u skladu sa zahtijevanim. Korištena je volframska elektroda WLa20 (oznaka prema EN ISO 6848, plava, legirana sa La oksidima) prečnika 4 mm i dužine 175 mm, sa vrhom naoštrenim pod 45°. Ona je izabrana zbog lake uspostave i održavanja električnog luka, smanjene osjetljivosti na ponavljanje uspostave luka i izuzetno malog trošenja (odličan izbor za robotsko zavarivanje). Kao zaštitni gas je korišten čisti argon, komercijalne oznake Argon 4.8, odnosno I1 prema EN ISO 14175. Prilikom podešavanja visine električnog luka kao referenca je uzeta elektroda prečnika 2,4 mm, a način podešavanja je prikazan na slici 3.



Slika 3: Način podešavanja visine električnog luka pri robotskom zavarivanju

Eksplicitan zahtjev za izradu ovih ugaonih spojeva je bio i da budu urađeni u strogo definisanoj sekvenci (slika 4), svi kao ugaoni jednoprolazni, u horizontalnoj PB poziciji, i na svim šavovima lice mora biti udubljeno. Debljina svih zavarenih spojeva je $1{,}8^{+0{,}7}$ mm, i treba da ispunjavaju zahtjeve za C klasom kvaliteta prema ISO 5817.

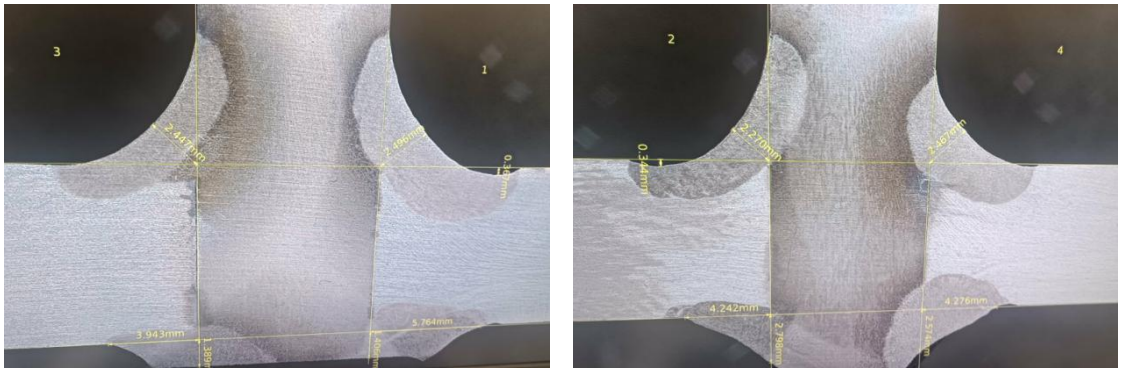


Slika 4: Prikaz redoslijeda zavarivanja

3. REZULTATI I DISKUSIJA

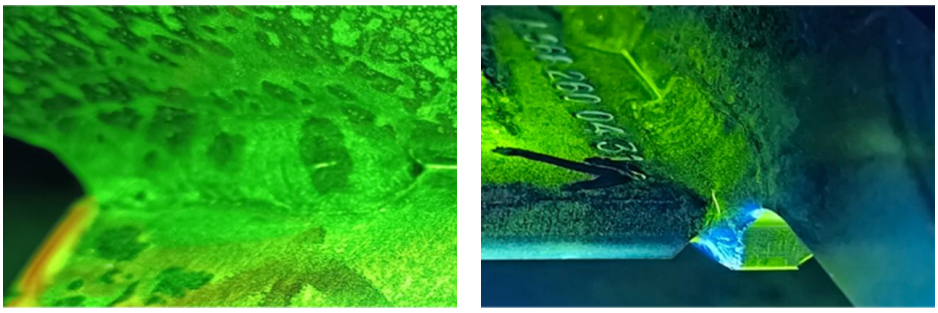
Kako je navedeno u poglavlju 1 (Uvod), pukotine predstavljaju vjerovatno najopasniji tip greške u zavarenim spojevima. Sa druge strane, i hladne i tople pukotine je relativno lako izbjeći promjenom projektnih i tehnoloških parametara. Međutim, poseban izazov je kada se vrši zavarivanje dva raznorodna čelika, što je objašnjeno u poglavlju 2 (Eksperiment). Tada je potrebno analizirati njihovu zavarljivost u odnosu na uobičajene kriterije, ali je i potvrditi izvođenjem probnih uzoraka.

Veliku ulogu u nastanku **toplih pukotina** ima oblik šava. Stvarni oblik (ostvareni profil) je dat na slici 2, i, kako se može vidjeti, ostvarene dimenzije i profil su u skladu sa zahtijevanim.



Slika 5: Stvarni oblik šava nakon zavarivanja

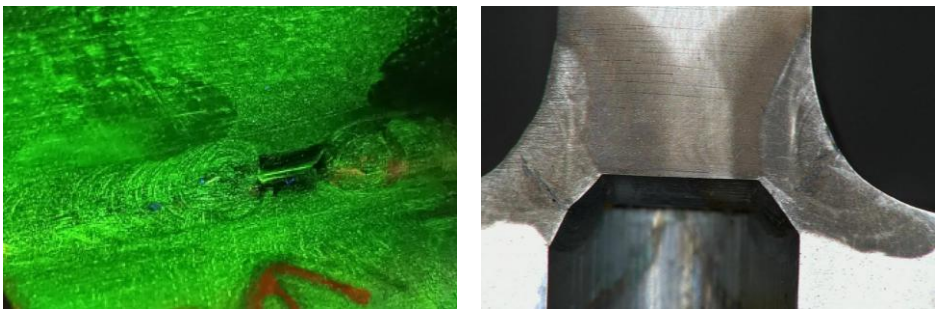
Važno je i prema izrazu (1) izračunati parametar HCS, koristeći pri tome hemijski sastav dat u tabeli 1. HCS iznosi 14,80 za čelik C35 i 1,65 za čelik S355MC, i ovo su vrijednosti bazirane na garantovanom hemijskom sastavu. One mogu blago varirati ovisno od šarže i stvarnog hemijskog sastava. Kada se uzme u obzir i vrijednost zatezne čvrstoće (tabela 2), može se zaključiti da je čelik C35 jeste sklon nastanku toplih pukotina, te je kao takav značajno lošije zavarljivosti od čelika S355MC. Uzevši u obzir nabrojano, pojava toplih pukotina nije neočekivana, i one su uočene na početku i kraju zavarenog spoja, kako je prikazano na slici 6.



Slika 6: Prikaz pukotina na početku i kraju zavara

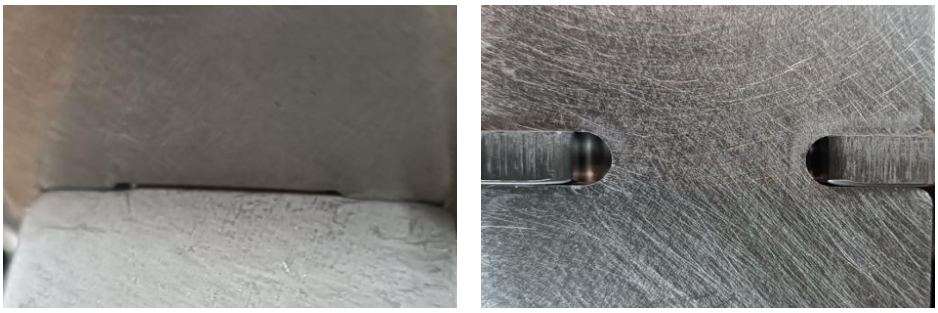
Ugljikov ekvivalent (CET) je ključan za procjenu mogućnosti nastanka **hladnih pukotina**, a može se izračunati prema izrazu (3), koristeći hemijski sastav dat u tabeli 1. CET iznosi 0,50 za čelik C35 i 0,27 za čelik S355MC, i ove vrijednosti mogu blago varirati zavisno od stvarnog hemijskog sastava. Najvažnije je da su obje vrijednosti veće od 0,22, što se smatra maksimalnom vrijednošću za koju čelik nije sklon nastanku hladnih pukotina. Prema tome, može se zaključiti da su oba čelika sklona njihovom nastanku, s tim da je skloniji C35. Kako je navedeno, njih je lako izbjeći predgrijavanjem, ali se ono u ovom slučaju ne vrši.

Analizom makro-presjeka zavarenih spojeva ustanovljeno je **još nekoliko** nesavršenosti i grešaka. Na kraju zavara je uočena pukotina, koja je bila vidljiva na površini, ali se protezala cijelim presjekom, kako je prikazano na slici 7.



Slika 7: Prikaz pukotina na početku i kraju zavara

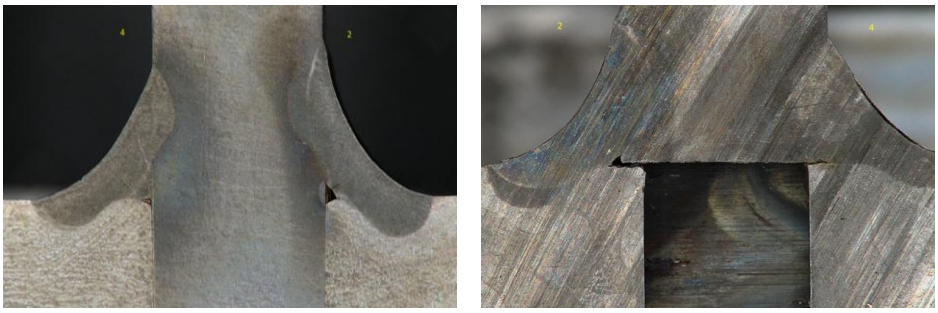
Analizom je utvrđeno da je razlog zazor između dijelova, koji je prikazan na slici 8.



Slika 8: Prikaz mjesta uklapanja pozicija sa gornje i donje strane i zazora između njih

Zazor je ostavljen iz konstruktivnih razloga, a potrebno ga je na siguran način i bez pukotina premostiti i popuniti dodatnim materijalom, što se postiže odgovarajućom tehnologijom, odnosno postupkom i parametrima.

Sličan problem je uočen i na drugom kraju zavarenog spoja, što prikazuje slika 9.



Slika 9: Prikaz pukotina na početku i kraju zavara

Kada se analiziraju slike 7 i 9, uočava se da sa donje strane zavarenog spoja postoji prostor koji je tokom zavarivanja ispunjen zrakom, dok zaštitna atmosfera argona postoji samo sa gornje strane spoja.

Ovo znači da je dizajn proizvoda nezahvalan za zavarivanje, ali dizajn nije nešto na šta se može uticati bez konsultacija sa konstruktorom. Postoji i mogućnost da se oko cijelog komada prilikom zavarivanja napravi zaštitna atmosfera argona, ali to, pored toga što je skupo, nije jednostavno izvesti i tražilo bi dodatno vrijeme. Samim time, opravdano je pretpostaviti da je neprihvatljivo za proizvodnju.

Dodatno je uočen i još jedan problem, a tiče se same izvedbe zavarivanja robotom. Kako je navedeno ranije, zahtjev je da se svi spojevi izvedu u PB poziciji, dok je preporučena pozicija za robotsko zavarivanje PA. Ta, naizgled sitna, promjena predstavlja veliki tehnički izazov za ova dva spoja, te se sve vrši u PB poziciji. To, međutim, nešto više savija vodilicu dodatnog materijala, što uzrokuje povećano trenje unutar nje, što opet znači i male oscilacije u brzini dostave dodatnog materijala, kao i relativno česte prekide jer senzori uređaja to detektuju kao problem.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je obrađena zavarljivost raznorodnih niskolegiranih čelika C35 i S355MC, i to sa aspekta toplih i hladnih pukotina kao najvećih problema, te sa aspekta proizvodnog procesa i dizajna proizvoda. U pitanju su komadi debljine 8 mm spojeni u jednom prolazu robotskim TIG zavarivanjem, uz obavezu da se ispoštuju specifičnosti koje je pred tehnologiju i tehnologa postavio konstruktor.

Sa aspekta toplih pukotina, pokazalo se da je glavni izazov tražena geometrija spoja, odnosno to da on bude udubljen, što pogoduje njihovom nastanku, pri čemu je čelik C35 sam po sebi sklon toplim pukotinama. Sa aspekta hladnih pukotina, oba čelika su im sklona, s tim da čelik C35 ima veću vrijednost CET, što upućuje da im je on i skloniji. Pri ovome se dijelovi ne predgrijavanju, što predstavlja dodatnu poteškoću njihovom izbjegavanju. Ipak, prilikom ispitivanja zavarljivosti komponenti, uočene su samo tople, ali ne i hladne pukotine. Razlog ovome treba tražiti u izboru procesa zavarivanja i dodatnog materijala.

Nastanku toplih pukotina pogoduje i zazor između dijelova koji postoji kada se dijelovi dovedu u položaj za zavarivanje. Dodatnim materijalom ga je potrebno premostiti i/ili popuniti, i to u dovoljnoj mjeri da ne dođe do pojave pukotina, vodeći računa o čvrstoći, brzini hlađenja i termičkom skupljanju. Ustanovljeno je i nepostojanje zaštitne atmosfere (ili bar njeno značajno ograničenje) sa donje strane dijelova prilikom zavarivanja.

Ovo govori o tome da je robotsko zavarivanje puno izazova, i da rješava samo dio problema vezanih za tehnologiju, dok otvara mnoge druge. Ono osigurava ponovljivost i preciznost, ali nema fleksibilnost koju bi imao zavarivač. Ovo posebno dolazi do izražaja kada se postave ograničenja od strane konstruktora (zazor i dimenzije) ili menadžmenta (troškovi i vrijeme). U slučaju koji obrađuje ovaj rad se na kraju došlo do optimalnog seta parametara, koji jeste uspješno riješio sve probleme koji su analizirani, ali je za to trebao relativno visok broj probnih uzoraka i značajna materijalna sredstva.

ZAHVALA

Autori rada se zahvaljuju Ministarstvu za nauku, visoko obrazovanje i mlade Kantona Sarajevo, koje je u okviru projekta „Istraživanje savremenih modifikacija elektrolučnih postupaka zavarivanja“ (broj 27-02-35-33087-30/24) omogućilo nabavku opreme koja je korištena prilikom istraživanja u okviru ovog rada.

LITERATURA

[1] Hajro, I., Zavarivanje željeznih legura, Mašinski fakultet, Sarajevo, 2019.
[2] Dilthey U., Welding Technology 2, Welding and Joining Institute, RWTH Aachen University, 2000.
[3] The Welding Engineer’s Current Knowledge, GSI-SLV, DVS Media, 2015.
[4] ASM Handbook Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering, ASM International, 2004.
[5] Bhadeshia H.K.D.H., Honeycombe R.W.K., Steels: Microstructure and Properties, Butterworth-Heinemann, 2006.
[6] Cvetković, R. P., Popović, O. D., Metalurgija zavarivanja, Mašinski fakultet, Beograd, 2019
[7] EN 1011-2: Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - Dio 2: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika
[8] Hajro I., Hodžić, D., Termička obrada, Mašinski fakultet, Sarajevo, 2015.
[9] EN 683-7: Termički obradivi čelici, legirani čelici i čelici za automate – Dio 7: Svijetli proizvodi od nelegiranih i legiranih čelika
[10] EN 10149-2: Vruće valjani plosnati proizvodi od čelika za hladno oblikovanje sa visokim naponom tečenja - Dio 2: Tehnički uvjeti isporuke za termomehanički valjane čelike