

ISPITIVANJA ZAVARENOG SPOJA ČELIKA ZA POBOLJŠAVANJE

EXAMINATIONS OF THE WELDED JOINT OF STEEL FOR QUENCHING AND TEMPERING

Ivan Opačak¹, Mario Brnjić¹, Ante Marušić¹, Nikolina Berić¹

¹ Sveučilište u Slavonskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg Ivane Brlić-Mažuranić 2, Slavonski Brod, Hrvatska

Ključne riječi: zavareni spoj, čelik C45E, struktura, tvrdoća

Key words: welded joint, steel C45E, structure, hardness

Sažetak: Zavarivanje je jedan od najvažnijih proizvodnih postupaka. Isto tako, kontrola zavarenih spojeva izrazito je važna s obzirom da su zavareni spojevi u širokoj uporabi. Upravo iz spomenutih razloga, važno je da zavar bude ispravan te da zadovoljava sve uvjete koji se očekuju u eksploataciji. U svrhu toga se provode razna ispitivanja s ciljem sprječavanja neželjenih oštećenja i pucanja zavara. U radu su provedena laboratorijska ispitivanja na odabranom uzorku zavarenog spoja (poluga kombajna), izrađenom od nelegiranog čelika za poboljšavanje C45E. Cilj ispitivanja bio je pružiti uvid u metalografska i mehanička svojstva, dobivena nakon provedenog postupka zavarivanja, a na osnovu kojih je provedena kontrola zavarenog spoja.

Abstract: Welding is one of the most important manufacturing processes. Similarly, weld inspection is extremely important as welds are widely used. For the very reasons mentioned above, it is important that the weld is correct and meets all the conditions expected in operation. To this end, various tests are performed to prevent unwanted damage and cracking of welds. Laboratory tests were performed on a selected sample of a weld (combine lever) made of steel for quenching and tempering C45E. The aim of the test was to get an insight into the metallographic and mechanical properties obtained after the welding process, based on which the control of the welded joint was performed.

1 UVOD

Tehnologija u današnje vrijeme ubrzano napreduje te konstantno dolazi do noviteta u raznim granama industrije. Naime, tehnologiju je potrebno redovito kontrolirati s ciljem izrade pouzdanih i kvalitetnih strojeva, proizvoda itd. Kvaliteta je karakteristika koja je povezana s prisutnošću grešaka tj. nedostataka koji su nastali ili tijekom proizvodnje, ili nakon izlaska stroja i proizvoda u uporabu. Opće je poznato da su greške svuda prisutne te ih je stoga potrebno smanjiti na minimum, odnosno, po mogućnosti otkloniti. Kako bi se greške smanjile, odnosno otklonile, potrebno je provoditi ispitivanja i kontrole u raznim segmentima proizvodnje. U ovom slučaju, ispitivanja zavarenih spojeva treba provoditi organizirano i dosljedno, na početku, tijekom te po završetku postupka zavarivanja [1].

Široko je područje primjene postupka zavarivanja, a jedan od primjera primjene je na poljoprivrednoj mehanizaciji npr. kombajnu. Tehnička ispravnost kombajna prije početka rada treba biti besprijekorna. Od cijelog spektra poljoprivredne mehanizacije, kombajn je najpodložniji na promjenljive uvjete rada, stoga bi bilo poželjno da se postupci poput strojne obrade, deformiranja, montaže, ali i zavarivanja provode na ispravan i adekvatan način. Kombajn se sastoji od niza dijelova koje je prije same ugradnje i montaže potrebno na ispravan i kvalitetan način zavariti adekvatnim postupcima. Neki od dijelova su bubanj i korpa vršalice, pužnica za transport zrna, sječkalica, razna sita i poluge, kod kojih je najzastupljeniji postupak zavarivanja. Ukoliko se zavarivanje na takvim dijelovima ne provodi ispravno i kvalitetno, za posljedicu može imati velike direktne i indirektne gubitke, a u nekim slučajevima može doći i do nepoželjne havarije. Stoga, kada se postupak zavarivanja i provede na ispravan i kvalitetan način, potrebno ga je redovito kontrolirati u određenom vremenskom razdoblju.

Cilj rada je da se pomoću laboratorijskih ispitivanja, kao što su kemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala, makro snimak uzorka, ispitivanje mikrostrukture te ispitivanje tvrdoće, na odabranom uzorku zavarenog spoja (poluga kombajna), izrađenom od nelegiranog čelika za poboljšavanje C45E pruži uvid u metalografska i mehanička svojstva, dobivena nakon provedenog postupka zavarivanja, odnosno da se pomoću spomenutih ispitivanja provede kontrola zavarenog spoja.

2 ČELIK C45E

Čelik C45E prema kemijskom sastavu pripada skupini nelegiranih čelika za poboljšavanje, koji se podvrgava postupku poboljšavanja - kaljenju i visoko-temperaturnom popuštanju u svrhu dobivanja visoke vrijednosti granice razvlačenja, vlačne čvrstoće, žilavosti i dinamičke izdržljivosti. Karakterizira ga homogena mikrostruktura (feritni čelik s lamelarnim perlitom) te vrlo niski udjel nemetalnih elemenata. Primjenjuje se najčešće do promjera 40 mm (zbog niske

prokaljivosti - omjer tvrdoće kaljenja i maksimalno moguće tvrdoće za dotični čelik), a za iznimno slabije opterećene dijelove do 100 mm.

Čelik C45E se naširoko koristi u mnogim industrijama koje zahtijevaju visoku vrijednost čvrstoće, tvrdoće i otpornosti na trošenje, pa tipični primjeri primjene uključuju osovine, vretena, klipnjače, matice, vijke, valjke, poluge itd. Sadržaj ugljika u čeliku C45E je relativno nizak, tako da je pogodan za zavarivanje, ali uz određena ograničenja te dodatne mjere opreza u pogledu zavarljivosti, odnosno potrebe za predgrijavanjem, najčešće na temperaturu $150 \div 250$ °C. Iako je čelik C45E toplinski obrađivani čelik, može očvrnuti u relativno maloj mjeri. Međutim, kaljenje rubova rezultira njihovom visokom vrijednosti tvrdoće. Također, kako bi se poboljšala obradivost, olovo je najbolji dodatak, pa se u pravilu dodaje čeliku C45E u količinama $0,15 \div 0,35$ % [2].

Deklarirana mehanička svojstva čelika C45E u normaliziranom i poboljšanom stanju prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Deklarirana mehanička svojstva čelika C45E [3]

Toplinska obradba	R_m / MPa	$R_{p0,2}$ / MPa	E / GPa	A / %	Z / %	KV / J	HV
Normalizirano	≈ 630	≈ 310	≈ 190	≈ 16	-	≈ 16	≈ 180
Poboljšano	≈ 700	≈ 440	≈ 190	≈ 17	≈ 45	≈ 29	≈ 290

Deklarirani kemijski sastav čelika C45E prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Deklarirani kemijski sastav čelika C45E [3]

Čelik C45E	Kemijski sastav / %							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
	0,42 - 0,50	max. 0,40	0,50 - 0,80	max. 0,030	max. 0,035	max. 0,40	max. 0,40	max. 0,10

Vrijednosti temperatura za pojedinu toplinsku obradbu čelika C45E prikazane su u tablici 3.

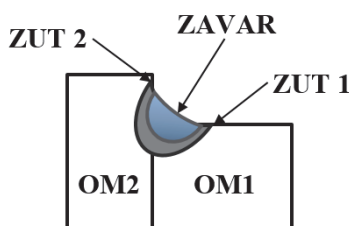
Tablica 3. Vrijednosti temperatura za pojedinu toplinsku obradbu čelika C45E [3]

Vrsta toplinske obradbe	Temperatura, °C
Kovanje, Toplo valjanje	850 - 1100
Normalizacija (na zraku)	840 - 880
Meko žarenje (u peći)	680 - 710
Kaljenje (voda ili ulje)	820 - 860
Popuštanje	550 - 660

3. EKSPERIMENTALNI DIO

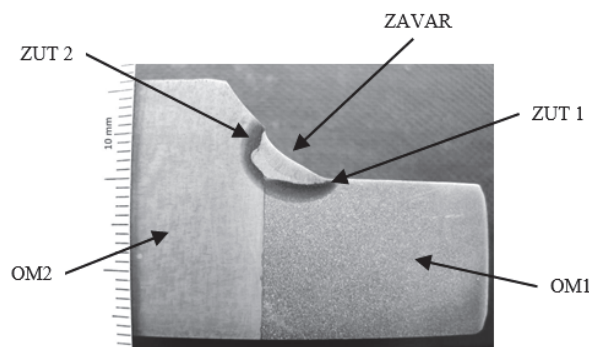
U eksperimentalnom dijelu rada na odabranom uzorku zavarenog spoja (poluga kombajna) provedena su sljedeća laboratorijska ispitivanja: ispitivanje kemijskog sastava osnovnog i dodatnog materijala, makro snimanje uzorka, ispitivanje mikrostrukture te ispitivanje tvrdoće.

Skica uzorka odabranog za ispitivanja prikazana je na slici 1.



Slika 1. Skica ispitnog uzorka

Makrosnimak uzorka odabranog za ispitivanja prikazan je na slici 2.



Slika 2. Makrosnimak ispitnog uzorka

3.1 Ispitivanje kemijskog sastava osnovnog i dodatnog materijala

Ispitivanje kemijskog sastava provedeno je na osnovnom materijalu 1 (OM1) čelika C45E, osnovnom materijalu 2 (OM2) čelika C45R te dodatnom materijalu elektrode ESAB \varnothing 1,2 mm OK AristoRod 12,63. Kemijskom analizom određen je sastav ispitnog uzorka, a koji treba biti u skladu sa tehničkom dokumentacijom. Za određivanje kemijskog sastava korištena je spektrometrijska metoda, a ispitivanja su izvršena uređajem „Belec Compact Port“.

Rezultati ispitivanja kemijskog sastava osnovnog materijala prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Ispitani kemijski sastav osnovnog materijala

Čelik C45E	Kemijski sastav / %							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
	0,44	0,32	0,71	0,022	0,030	0,36	0,33	0,08

Rezultati ispitivanja kemijskog sastava dodatnog materijala prikazani su u tablici 5.

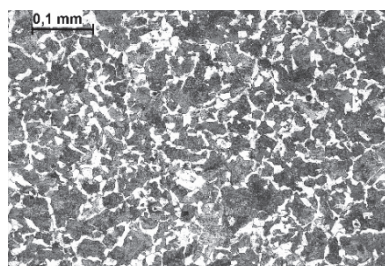
Tablica 5. Ispitani kemijski sastav dodatnog materijala

ESAB \varnothing 1,2 mm OK AristoRod 12,63	Kemijski sastav / %					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
	0,081	0,852	1,525	0,011	0,012	0,04

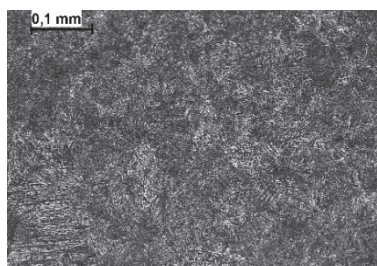
3.2 Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja izvršena su po poprečnom presjeku ispitnog uzorka. Zadatak metalografije je da pri određenom kemijskom sastavu iz ukupne makro i mikrostrukture, po mogućnosti unaprijed, odredi svojstva i ponašanje legure pod datim uvjetima opterećenja te da ukaže na najpovoljniju strukturu za određeni proces prerade ili područje primjene. Uvjet za metalografsko ispitivanje uzorka je izrada ravne i vrlo glatke površine. Snimanja mikrostrukture izvršena su svjetlosnim optičkim mikroskopom „Leica DM 2500M“.

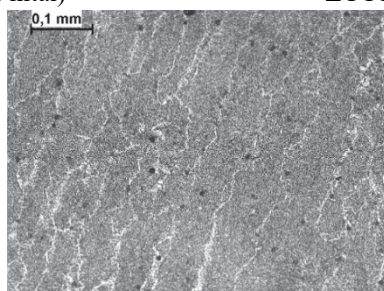
Mikrostrukture ispitnog uzorka prikazane su na slici 3.



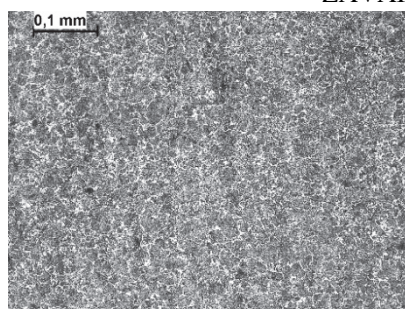
OM1 (3 % nital)



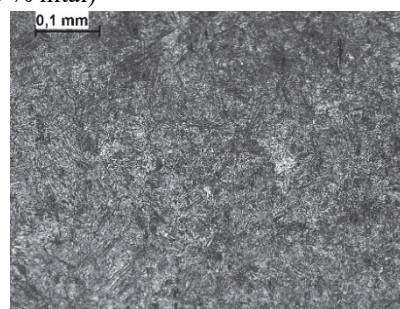
ZUT1 (3 % nital)



ZAVAR (3 % nital)



OM2 (3 % nital)



ZUT2 (3 % nital)

Slika 3. Mikrostrukture ispitnog uzorka

3.3 Ispitivanje tvrdoće

Kako bi slika mehaničkih svojstava bila potpuna, nakon metalografskih ispitivanja potrebno je izmjeriti vrijednosti tvrdoća na karakterističnim mjestima ispitnog uzorka. Tvrdoće su mjerene Vickers metodom HV10 pomoću uređaja “TH 720”.

Vrijednosti izmjerenih tvrdoća prikazane su u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati mjerenja tvrdoća ispitnog uzorka

Mjesto mjerenja	OM1		ZUT1		ZAVAR			ZUT2		OM2	
Vrijednosti tvrdoća	203	201	506	511	255	252	259	483	344	213	211

4 ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČAK

Analizom rezultata dobivenih ispitivanjem kemijskog sastava na osnovnom materijalu, utvrđeno je da se radi o čeliku C45E, prema EN 10277-5: 2008, tablica 4. Također, kemijska analiza sastava osnovnog i dodatnog materijala je pokazala da ispitani kemijski sastavi odgovaraju deklariranima. Struktura osnovnog materijala je uobičajena za čelik C45E u dostavnom stanju. Izmjerene vrijednosti tvrdoća se kreću ≈ 207 HV10, što odgovara feritno-perlitnoj strukturi u kojoj je sadržano nešto više perlita. Struktura zavara odgovara odabranom niskougljičnom dodatnom materijalu s povećanim udjelima Mn i Si. Uočava se prisustvo sitnih čestica nečistoća (najvjerojatnije oksida) koje su dispergirane, pa je za očekivati da ne utječu značajnije na mehanička svojstva. Zonu utjecaja topline, uslijed miješanja dodatnog s osnovnim materijalom, ali i uvjeta ohlađivanja, karakterizira struktura u kojoj je osim silicijem i manganom obogaćenog ferita, došlo do izlučivanja bainitno-troostitnih konstituenata. Rezultat toga očituje se u relativno visokim vrijednostima tvrdoće ZUT-a, pri čemu maksimalno izmjerene vrijednosti (≈ 511 HV10) ne prelaze internom normom dopuštenih 525 HV [4].

5 LITERATURA

- [1] Lagoda, T.; Glowacka, K.: *Fatigue life prediction of welded joints from nominal system to fracture mechanics*. International Journal of Fatigue. 137 (2020), pp. 1-9.
- [2] Kraišnik, M.; Vilotić, D.; Šiđanin, L.; Petrović, Ž.; Šljivić, M.; Stefanović, M.: *Morphology of steel C45E microstructure during upsetting*. Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications. Jahorina, 2014.
- [3] EN 10277-5-2008: *European Steel and Alloy Grades/Numbers - SteelNumber. Bright steel products. Technical delivery conditions. Steels for quenching and tempering*.
- [4] EN 10083-2-2006-10: *Steels for quenching and tempering - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy steels*.