

Ispitivanje uticaja termičke obrade na mehaničke osobine i strukturu zavarenog spoja martenzitno starenog čelika

Dr Zoran Odanović, dipl.inž.¹⁾
Dr Vencislav Grabulov, dipl.inž.¹⁾

Cilj istraživanja je bio definisanje tehnološkog postupka izrade tankozidnih komora raketnih motora od martenzitno starenih čelika (Fe-Ni-Co-Mo-Ti). Definisane su tehnologije zavarivanja TIG postupkom i termičke obrade zavarenih spojeva toplovaljanih traka debljine 2,8 mm. Ispitivanje najoptimalnije termičke obrade zavarenih spojeva je obuhvatalo kombinacije kaljenja i starenja pre i posle zavarivanja i ispitivanje njihovog uticaja na mehaničke osobine i strukturu čelika. Optimalne osobine i struktura zavarenog spoja su postignuti posle kaljenja i starenja zavarenog spoja, pri čemu je ostvarena čvrstoća koja predstavlja 80 % čvrstoće osnovnog materijala.

Ključne reči: Ispitivanje materijala, martenzitno starenje čelici, zavarivanje čelika, termička obrada, primena u raketnim motorima.

Uvod

MARTENZITNO starenje čelici predstavljaju grupu visokolegiranih čelika sistema Fe-Ni-Co-Mo-Ti, koje karakterišu visoke vrednosti zatezne čvrstoće i granice popuštanja sa relativno visokom žilavošću. Žilavost ovih čelika je izrazito viša od žilavosti konvencionalnih čelika, pri istim nivoima čvrstoće. Nasuprot konvencionalnim čelicima ultravisoke čvrstoće, martenzitno starenje čelici imaju veoma nizak sadržaj ugljenika i njihova čvrstoća je rezultat starenja - taloženja različitih intermetalnih jedinjenja u relativno mekanom martenzitu, koji nastaje transformacijom niskougljeničnog austenita sa 18% Ni pri hlađenju sa temperatura viših od A_{c3} do sobne temperature [1]. Martenzitno starenje čelici posle kaljenja ostaju meki i veoma pogodni za oblikovanje mehaničkom obradom i plastičnom deformacijom u hladnom stanju. Osim toga, brzina hlađenja u toku kaljenja nema uticaja na preobražaj austenita u martenzit, pa se pri bilo kojoj brzini hlađenja dobija struktura koja se naziva "meki" martenzit. Postupak ojačavanja plastične martenzitne matrice kod ovih čelika je povezan sa okupljanjem atoma legirajućih elemenata oko dislokacija, pojavom područja sa sredenom strukturom i izdvajanjem visokodisperznih metastabilnih intermetalnih faza koherentnih sa osnovom, što za posledicu ima značajan porast tvrdoće i čvrstoće čelika [2,3].

Termička obrada martenzitno starenih čelika je relativno jednostavna i predstavlja jednu od prednosti ovih čelika. Čelici ovog tipa se kale sa temperatura od 800–910°C na vazduhu ili u vodi, a stare na temperaturama od 450–510°C. Termička obrada ne zahteva posebne zaštitne atmosfere u pećima.

Zbog svojih odličnih mehaničkih osobina, dobrih tehnoloških karakteristika i jednostavne termičke obrade, odlične otpornosti ka naponskoj koroziji, niske osetljivosti na zarezanje, niskog koeficijenta termičkog širenja,

martenzitno starenje čelici su našli široku primenu u izradi visokopterećenih elemenata različitih konstrukcija. U mašinskoj industriji se koriste za izradu alata, zupčanika, delova transmisija, osovin, klizača, vodica, zatim za matrice za kovanje, izvlačenje i dr. Martenzitno starenje čelici se najčešće primenjuju u specifičnim vojnim područjima, kao što su: vazduhoplovstvo, raketna i kosmička tehnika, naoružanje i podmorničarstvo. Ovi čelici se koriste za izradu otkovaka avionskog stajnog trapa, komora raketnih motora, delova projektila, povratnih opruga topova, zatvarača, klinova donosača i cevi brzometnih oruđa i dr.

Martenzitno starenje čelici su mnogo skuplji od konvencionalnih čelika ako se posmatra cena izrade čelika. Međutim, za mnoge primene gotovi delovi izrađeni od ovih čelika su jeftiniji zbog značajno niže cene mašinske i termičke obrade, tako da često ekonomičnost, a ne samo odlične osobine, odlučuju o njihovoj primeni.

Jedna od glavnih prednosti martenzitno starenih čelika je njihova odlična zavarljivost. Nizak sadržaj ugljenika kod ovih čelika, pri hlađenju daje „meki“ martenzit koji omogućava dobru zavarljivost. Za zavarivanje ovih čelika se koriste sve klasične tehnologije zavarivanja. Tvrdo lemljenje se takođe može primeniti za njihovo spajanje. Najčešće se za elektrolučno zavarivanje koriste postupci zavarivanja u zaštitnoj atmosferi argona. U zavarenom spoju martenzitno starenih čelika, pri mikrostrukturnoj analizi, u zoni pod uticajem toplote (ZUT) razlikuju se tri oblasti: oblast grubog zrna uz liniju spoja, svetlo nagrižena oblast (ZUT I) i tamno nagrižena oblast (ZUT II). Svetlo nagrižena oblast nastaje kao rezultat zagrevanja čelika tokom zavarivanja do temperatura približno 600–750°C, dok je tamno nagrižena oblast rezultat zagrevanja na približno 600°C [3,7]. Posle jednostavnog starenja na ≈480°C, zavareni spoj martenzitno starenih čelika dostiže i

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

do 90 % čvrstoće osnovnog metala. Žilavost ZUT-a posle starenja obično postiže vrednost osnovnog metala, dok žilavost metala šava obično zavisi od primenjenog procesa zavarivanja. Najbolja žilavost se postiže zavarivanjem u argonu sa volframovom elektrodom -- TIG postupak, dok zavarivanje u atmosferi zaštitnog gasa sa potrošnom elektrodom - MIG/MAG postupak daje nešto nižu žilavost metala šava. Zavarivanje obloženom elektrodom, REL - postupak, daje najnižu žilavost spoja u poređenju sa prethodnim postupcima. Posebno nisku žilavost daju spojevi dobijeni zavarivanjem visokoenergetskim postupcima, kao što je zavarivanje pod prahom, gde dobijena niska žilavost poništava prednost velike brzine zavarivanja [3,4]. Hemijski sastav dodatnog materijala je sličan, ili isti, kao i osnovni materijal.

Glavni cilj istraživanja je dobijanje maksimalne čvrstoće spoja ispitivanjem optimalnih tehnoloških uslova izrade zavarenog spoja zida i danca komore raketnog motora i određivanjem optimalne termičke obrade pre i posle zavarivanja. Ispitivanja obuhvataju analizu uticaja termičke obrade na mehaničke osobine i strukturu zavarenog spoja. Ova istraživanja predstavljaju deo širih istraživanja, čiji je konačni cilj bio definisanje tehnološkog postupka izrade komore raketnog motora.

Ekperimentalni deo

Osnovne tehnološke faze izrade komore raketnog motora od martenzitno starenog čelika obuhvatale su: izradu čelika, toplo valjanje, rolovanje čelične trake, zavarivanje rolovanog priprema, zavarivanje danca i termički tretman zavarene celine.

Da bi se dobio visokokvalitetan proizvod, bilo je neophodno tokom svih tehnoloških faza vršiti međufazne kontrole, kao što su ultrazvučna i rendgenska ispitivanja, ispitivanja mehaničkih i strukturnih osobina osnovnog metala u obliku trake, kao i zavarenog spoja. Završna kontrola je obuhvatala ispitivanje suda pod dejstvom hidrostatičkog pritiska.

Materijal

Martenzitno starenj čelik korišćen u eksperimentima, je izraden postupkom topljenja u vakuum-indukcionoj peći i elektroretapanjem pod troskom u zaštitnoj atmosferi argona. Hemijski sastav ispitivanog čelika je prikazan u tabeli 1.

Ingoti dimenzija $\phi 160$ mm slobodno su kovani na presi

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivanog martenzitno starenog čelika u [mas.%]

Ni	Co	Mo	Ti	Al	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	N	Fe
18.2	9.8	5.2	1.0	0.2	0.01	0.02	0.05	0.003	0.017	0.12	0.05	0.0046	ost.

do šipki dimenzija kv. 70 mm, na temperaturi od 1150 do 900°C, sa ukupnim stepenom deformacije 75% i hlađenjem u ulju posle kovanja. Ove šipke su toplo valjane do traka debljine 2.85 mm na temperaturi od 1200 do 870°C, sa ukupnim stepenom prerade 96% i hlađenjem na vazduhu posle valjanja. Trake su termički obrađivane po sledećem režimu: kaljenje sa temperature 910°C/1 h u ulju, a zatim starenje na temperaturi 505°C/3h, sa hlađenjem na vazduhu. Ostvarena struktura se sastoji od masivnog martenzita.

Zavarivanje

Eksperimenti zavarivanja su vršeni na trakama dimenzija 2.85x85x95 mm. Za zavarivanje je primenjeno elektrolučno

zavarivanje u zaštitnom gasu argonu sa netopivom volframovom elektrodom (TIG) sa dodatnim materijalom. Zavarivanje je vršeno jednoprolazno u alatu, upravno na pravac valjanja ploča, sučeono sa 1 šavom bez zazora. Kao dodatni materijal je korišćena žica dimenzija kv. 1 mm istog sastava kao osnovni materijal. Primenjeni parametri zavarivanja su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2. Parametri zavarivanja primenjeni u eksperimentima

Oznaka uzorka	Napon U [V]	Struja I [A]	Vreme t [s]	Brzina v [mm/s]	Energija E [KJ/mm]
0	27-29	110	58	1.65	1.85
1	27-29	110	49	1.95	1.58
2	27-29	110	53	1.81	1.70
3	27-29	120	57	1.68	2.00
4	27-29	120	53	1.81	1.86
5	27-29	130	55	1.75	2.08
6	27-29	110	59	1.63	1.89
7	27-29	120	50	1.92	1.75
8	27-29	130	45	2.13	1.71

$$\text{Primedba: } E=U \cdot I/v$$

Trake, koje su zavarivane, pre i posle zavarivanja su termički tretirane na različite načine:

- K-S-Z - kaljenje, starenje i zavarivanje,
- K-S-Z-S - kaljenje, starenje, zavarivanje i ponovno starenje,
- K-S-Z-K-S - kaljenje, starenje, zavarivanje, kaljenje i starenje.

Parametri termičkih tretmana - kaljenja i starenja posle zavarivanja, identični su onim koji su primenjeni za termičku obradu traka osnovnog materijala. Po tri zavarene trake su termički obrađene istim tretmanom.

Ispitivanja

Ispitivanja zavarenih spojeva su obuhvatala: radiografsku kontrolu, određivanje mehaničkih osobina zatezanjem i savijanjem, ispitivanje tvrdoće i ispitivanje mikrostrukture.

Čvrstoća zavarenih spojeva zatezanjem je određivana na epruvetama sa paralelnim bokovima, a čvrstoća metala šava na epruvetama sa udubljenim bokovima. Ispitivanja su vršena na po tri epruvete. Ispitivanja savijanjem vršena su na epruvetama dužine 160 mm i širine 30 mm, a tvrdoće su ispitivane Vikers metodom HV30 sa međusobnim rastojanjem između otisaka od 1 mm. Sva ispitivanja su obavljena u skladu sa standardom JUS C.T3.051 [4].

Ispitivanja mikrostrukture su vršena na svetlosnom mikroskopu, uz prethodnu pripremu uzoraka klasičnim postupcima brušenja, poliranja i nagrizanja u Nitalu ili rastvoru FeCl_3 .

Rezultati ispitivanja

Mehaničke osobine

Rezultati ispitivanja zateznih osobina osnovnog materijala u kaljenom i kaljenom/starenom stanju su prikazani u tabeli 3. Rezultati ispitivanja zateznih osobina zavarenih spojeva, posle različitih termičkih tretmana su prikazani u tabeli 4.

Tabela 3. Rezultati ispitivanja zateznih osobina osnovnog materijala

Oznaka uzorka	Termička obrada	Zatezna čvrstoća, R_m [MPa]	Izduženje A_5 [%]	Kontrakcija Z [%]
OM1	K	1017	12	49.7
OM2	K-S	1931	6.1	10.8

Primedbe: OM- Osnovni materijal, K- Kaljenje sa 910°C/1h u ulju, S- Starenje na 505°C/3h hlađenje na vazduhu

Tabela 4. Rezultati ispitivanja zateznih osobina zavarenih spojeva

Oznaka uzorka	Termička obrada	Zatezna čvrstoća R_m [MPa]	Izduženje A_5 [%]	Zatezna čvrstoća met. šava, R_m^* [MPa]	Odnos R_{mZS}/R_{mOM} [%]
0,1,2	K-S-Z	895	4.3	980	46
3,4,5	K-S-Z-S	1442	6.6	1435	75
6,7,8	K-S-Z-K-S	1571	4.5	1427	81

Primedbe: R_{mZS} - Zatezna čvrstoća zavarenog spoja, R_{mOM} - Zatezna čvrstoća osnovnog metala posle starenja (OM2- tabela 3),*-Zatezna čvrstoća na epruveti sa udubljenim bokovima, K- Kaljenje sa 910°C/1h u ulju, S- Starenje na 505°C/3h hlađenje na vazduhu, Z- Zavarivanje

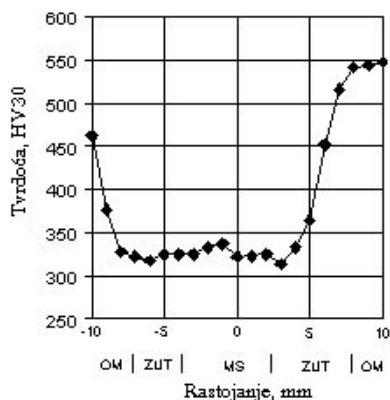
Pre izrade uzoraka za ispitivanje, svaka od zavarenih traka je radiografski ispitana i ni jedna od traka nije pokazala postojanje greške u zavarenom spoju.

Rezultati ispitivanja zavarenih spojeva savijanjem oko lica i korena šava su prikazani u tabeli 5.

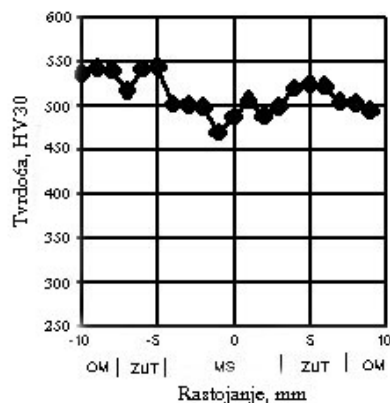
Tabela 5. Rezultati ispitivanja zavarenih spojeva savijanjem

Oznaka uzorka	Termička obrada	Ugao savijanja oko lica šava [°]	Ugao savijanja oko korena šava [°]
0,1,2	K-S-Z	103	137
3,4,5	K-S-Z-S	11	31
6,7,8	K-S-Z-K-S	9	22

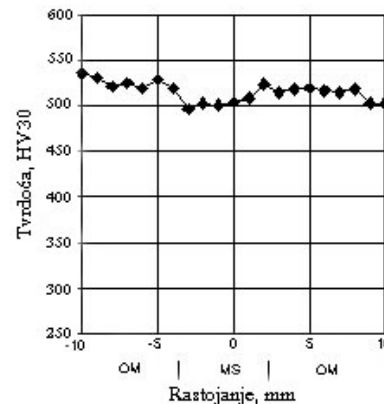
Rezultati ispitivanja tvrdoće HV30, dobijeni merenjem po sredini debljine ploče, prikazani su na slikama od 1 do 3 sa naznačenim oblastima osnovnog metala, metala šava i karakterističnim zonama ZUT-a.



Slika 1. Rezultati ispitivanja tvrdoće kroz zavareni spoj, termički tretman K-S-Z



Slika 2. Rezultati ispitivanja tvrdoće kroz zavareni spoj, termički tretman K-S-Z-S

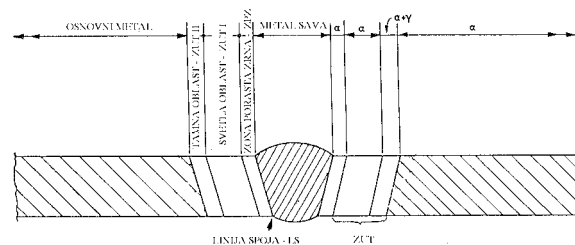


Slika 3. Rezultati ispitivanja tvrdoće kroz zavareni spoj, termički tretman K-S-Z-K-S

Na sl.1 je prikazana raspodela tvrdoće u zavarenom spoju, bez dodatnog starenja posle zavarivanja. Na sl.2 je prikazana tvrdoća zavarenog spoja podvrgnutog starenju posle zavarivanja. Tvrdoća zavarenog spoja, koji je prethodno kaljen, a posle zavarivanja kaljen i staren, je prikazana na sl.3.

Mikrostruktura

Šematski prikaz zavarenog spoja martenzito starenog čelika, sa karakterističnim zonama u ZUT-u, je prikazan na sl.4.



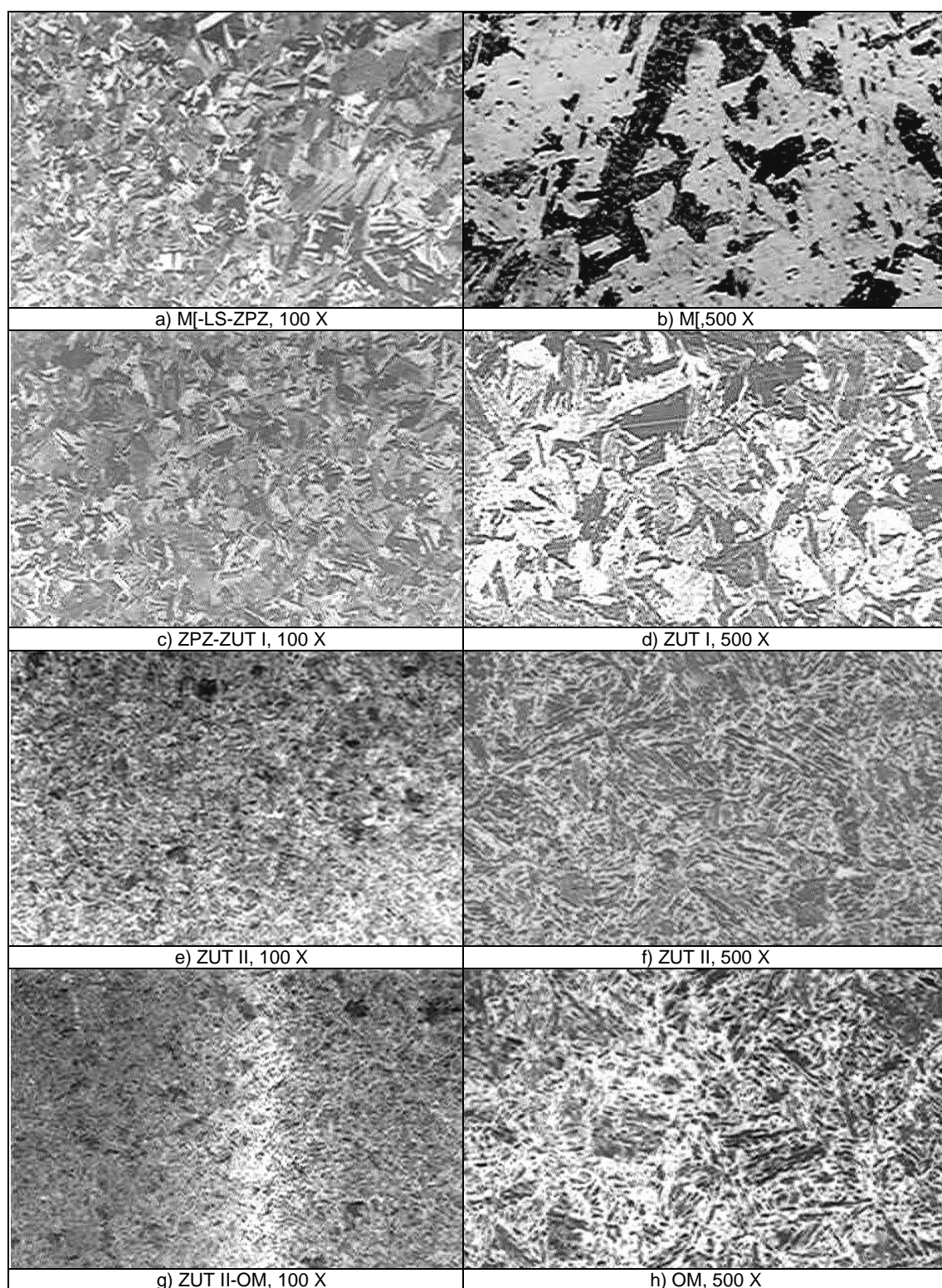
Slika 4. Šematski prikaz zona u zavarenom spoju martenzito starenih čelika [5]

U spoju se razlikuje metal šava i karakteristične zone u ZUT-u za martenzito starene čelike: zona okrupnjavanja zrna, svetlo nagrižena zona (ZUT I) i tamno nagrižena zona (ZUT II) [5]. Odgovarajuće mikrostrukture sa svetlosnog mikroskopa, pri uvećanju od 100 i 500 puta, za uzorak koji posle zavarivanja nije termički obrađivan (KSZ) prikazan je na sl.5.

Na sl.6 su prikazane mikrostrukture uzorka, sa karakterističnim zonama u ZUT-u, koji je posle zavarivanja staren na na 505°C (KSZS). Na sl.7 prikazane su mikrostrukture uzorka koji je posle zavarivanja kaljen i staren (KSZKS). Kod ovog uzorka se u strukturi ne razlikuju karakteristične zone u ZUT-u, već se uočava samo oblast metala šava i osnovni metal.

Diskusija dobijenih rezultata

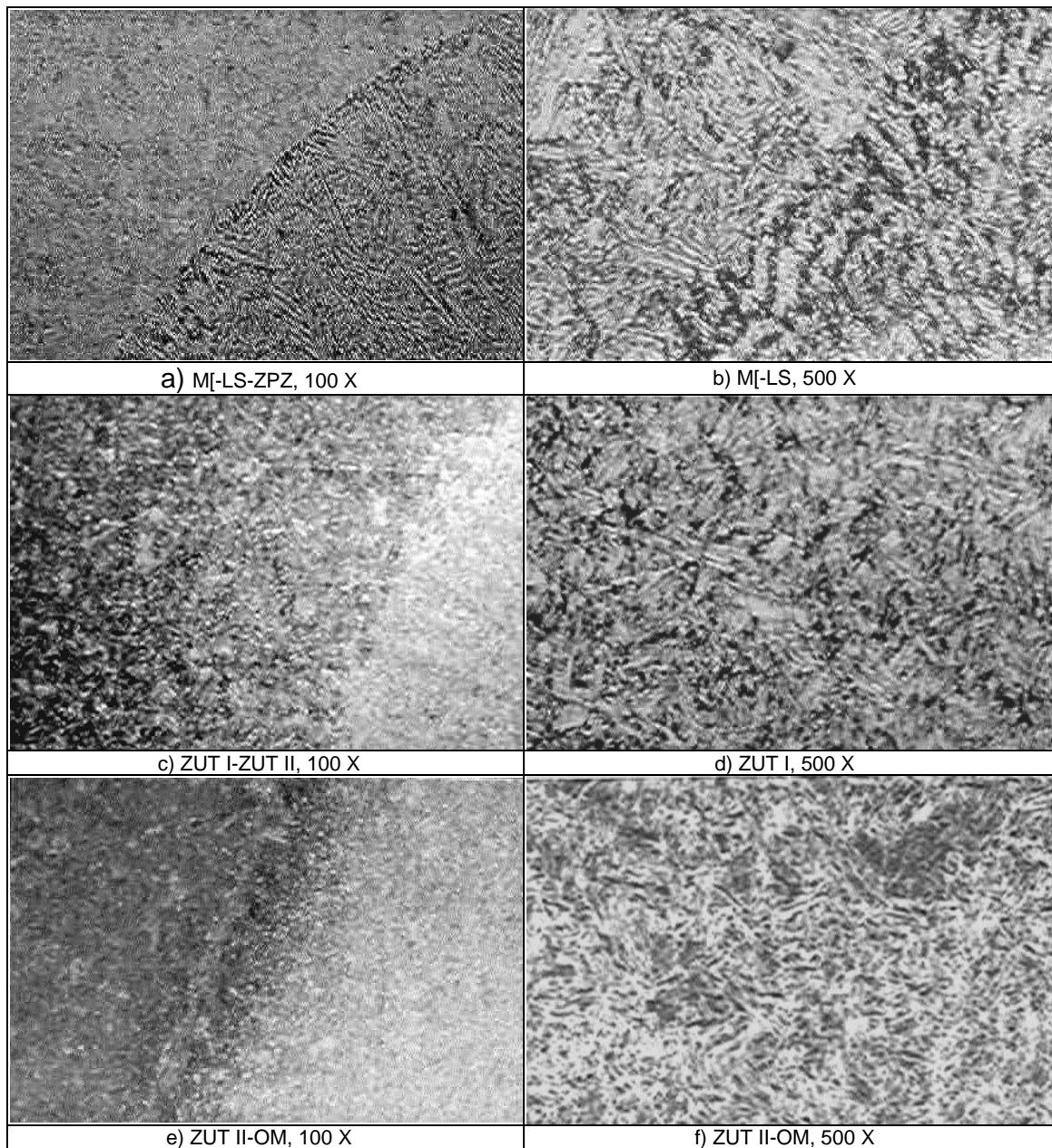
Dobijeni rezultati ispitivanja pokazuju da primenjeni postupak zavarivanja, elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi argona (TIG) sa dodatnim materijalom istog



Slika 5. Mikrostrukture zavarenog spoja bez termičke obrade posle zavarivanja (KSZ), MŠ - metal šava, LS - linija spoja, ZPZ - zona porasta zrna, ZUT I - svetla zona ZUT-a, ZUT II - tamna zona ZUT-a, OM - osnovni metal, nagrizanje u $FeCl_3$

hemijskog sastava kao osnovni materijal, sa energijom zavarivanja od 1.6 – 2.10 KJ/mm, daje kvalitetan zavareni spoj. Pri ispitivanju rendgenom nisu uočene greške.

Rezultati ispitivanja zateznih osobina osnovnog materijala i zavarenih spojeva nakon zavarivanja i nakon termičkih tretmana prikazani su u tabeli 3 i tabeli 4, respektivno.



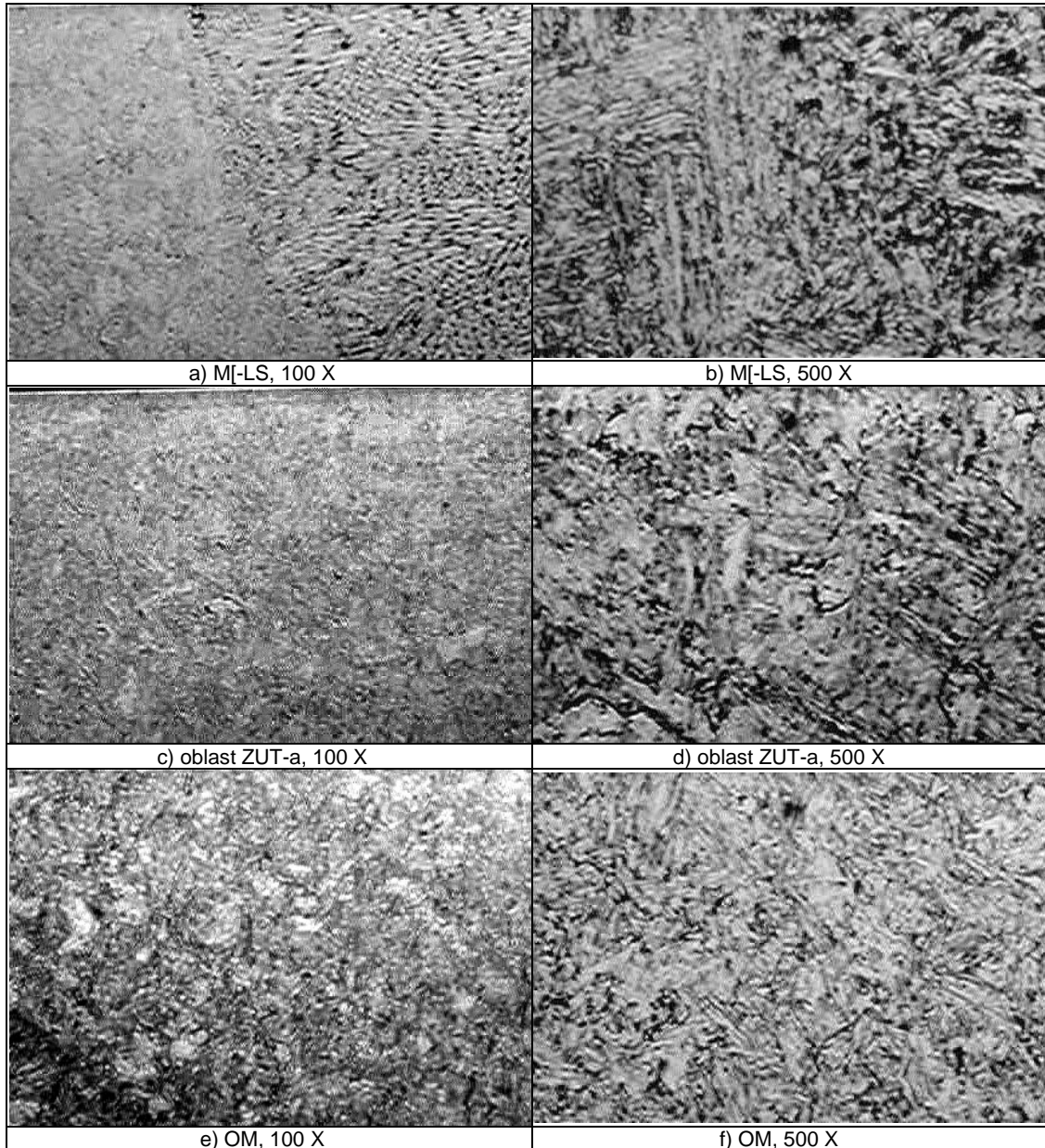
Slika 6. Mikrostrukture zavarenog spoja koji je staren posle zavarivanja (KSZS), MŠ - metal šava, LS - linija spoja, ZPZ - zona porasta zrna, ZUT I - svetla zona ZUT-a, ZUT II - tamna zona ZUT-a, OM - osnovni metal, nagrizanje u Nitalu

Uočava se da se najniže vrednosti zateznih karakteristika postižu kod zavarenog spoja koji nije termički obrađen. One su mnogo niže od vrednosti dobijenih za kaljen i staren osnovni materijal. Zatezna čvrstoća predstavlja 46 % čvrstoće osnovnog metala. Čvrstoća ovog spoja je niža od osnovnog materijala u kaljenom stanju. Raspodela tvrdoća, prikazana na sl.1, pokazuje da je tvrdoća najniža u metalu šava i neposredno uz liniju spoja, dok se njen porast uočava u oblasti ZUT-a uz osnovni metal. Poređenje ovih rezultata sa šemom prikazanom na sl.4 i mikrostrukturama na sl.5 pokazuje da je u metalu šava dobijen grubi masivni martenzit. To je niskouglnični meki martenzit koji ima niske vrednosti zateznih osobina i malu tvrdoću. Njegovo nastajanje je rezultat hlađenja austenita, koji ima površinski centriranu kubnu rešetku i koji prema ravnotežnom dijagramu stanja Fe-Ni egzistira iznad 750°C, i

transformiše se mehanizmom smicanja u martenzit sa prostorno centriranom kubnom rešetkom, nezavisno od brzine hlađenja [2]. Uz liniju spoja nastavlja se zona ukupnjavanja zrna, koju čini grubi, masivni martenzit, a zatim "svetla" oblast ZUT-a, tzv. ZUT I, koju čini potpuno transformisani austenit u martenzit, a što je prikazano na slikama 5 (c i d). Pretpostavlja se da je u ovoj zoni ostvareno hlađenje sa temperatura od solidus temperature do 750°C [6]. Pošto je u ovoj zoni ostvarena potpuna transformacija austenita u meki martenzit, tvrdoća je niska i u granicama od 310-340 HV. Uz osnovni metal nalazi se tamna oblast ZUT-a, tzv. ZUT II (sl.4), koji prema sl.5 (e i f), karakteriše mešavina martenzita i izvesne količine netransformisanog austenita, odnosno zaostalog austenita. Prema raspodeli tvrdoća u toj zoni, može se pretpostaviti da udeo zaostalog austenita opada od ZUT I ka osnovnom

metal, što navodi na pretpostavku da se temperature u toj oblasti kreću od 600 do 750°C [6]. Kao rezultat nastalih struktura uočava se porast tvrdoće od približno 350 HV do tvrdoće osnovnog metala ≈ 550 HV. Pojava da je čvrstoća zavarenog spoja niža i od čvrstoće osnovnog metala u

intermetalnih faza kao što su Ni_3Mo i Ni_xTi_y [2,6]. Ipak, relativno niža tvrdoća je rezultat nastale dendritne strukture sl.6 (a i b), koja i pored starenja ne može da postigne osobine osnovnog metala koji je plastično prerađen.



Slika 7. Mikrostrukture zavarenog spoja koji je kaljen i staren nakon zavarivanja (KSZKS), MŠ - metal šava, LS - linija spoja, ZPZ - zona porasta zrna, ZUT I - svetla zona ZUT-a, ZUT II - tamna zona ZUT-a, OM - osnovni metal, nagrizanje u Nitalu

kaljenom stanju, rezultat je okrupnjavanja zrna uz liniju spoja.

Starenjem zavarenog spoja na $\approx 500^\circ\text{C}$, dobijaju se više vrednosti zatezne čvrstoće u odnosu na spoj bez termičkog tretmana. Međutim, u poređenju sa osnovnim metalom koji je staren, dobijena zatezna čvrstoća predstavlja 75 % čvrstoće osnovnog metala. Osobine su, takođe, niže od osobina spoja koji je kaljen i staren. Raspodela tvrdoća (prikazana na sl.2) pokazuje povećanje i kreće se od 460 HV u oblasti metala šava do ≈ 500 HV u tamnoj oblasti ZUT-a (ZUT II). Povećanje tvrdoće u oblasti metala šava rezultat je ojačavanja starenjem, odnosno taloženja

Tvrdoća svetle zone ZUT-a je postigla visoke vrednosti kao rezultat starenja prisutnog martenzita. Nešto niža tvrdoća, u poređenju sa osnovnim metalom u tamnoj zoni ZUT-a (ZUT II), verovatno je rezultat prisustva zaostalog austenita, ali za potvrdu su neophodna detaljnija finostrukturna ispitivanja na elektronskom mikroskopu. Inače, u strukturi zavarenog spoja koji je staren posle zavarivanja, javljaju se sve karakteristične zone šematski prikazane na sl.4, a njihov izgled pri uvećanju od 100 i 500 puta prikazan je na sl.6 (a do f). Kod uzoraka koji su zavarivani, kaljeni i staren, tvrdoća je ravnomerno raspoređena i daje visoke vrednosti od 500 do 550 HV, kao

što je prikazano na sl.3. Zatezna čvrstoća kaljenog i starenog zavarenog spoja predstavlja 80% čvrstoće osnovnog materijala. Mikrostrukturna ispitivanja su pokazala da posle kaljenja i starenja zavarenog spoja nema karakterističnih oblasti u ZUT-u, već se pored martenzitne strukture, koja odgovara osnovnom metalu i koja se prostire celim ZUT-om, izdvaja samo dendritna struktura metala šava (sl.7). Ovakav izgled strukture je rezultat potpune transformacije austenita, odnosno zagrevanja na 910°C, a zatim kaljenja u ulju. Naime, austenit u celoj oblasti ZUT-a potpuno prelazi u martenzit, koji posle starenja postiže maksimalne osobine. Isti proces se odvija i u metalu šava. S obzirom da livena struktura u metalu šava ima niže mehaničke osobine nego plastično prerađeni osnovni metal, i čvrstoća zavarenog spoja je niža, bez obzira na potpunu transformaciju strukture u martenzit u ZUT-u.

Zaključak

Izvršena istraživanja su imala za cilj da ispitaju uticaj termičke obrade na strukturu, a time i na mehaničke osobine zavarenog spoja martenzitno starenog čelika za komore raketnih motora. Ispitivane su različite kombinacije kaljenja i starenja zavarenog spoja pre i posle zavarivanja. Vršeno je zavarivanje lima debljine 2.8 mm, jednoprolazno, TIG postupkom, sa dodatnim materijalom koji je identičan osnovnom.

Rezultati ispitivanja pokazuju da se najviše zatezne osobine zavarenog spoja postižu posle termičke obrade koja se sastoji od kaljenja sa 910°C/1h u ulju i starenja na 505°C u trajanju od 3 sata i hlađenja na vazduhu što u ZUT-u daje strukturu koju čini staren martenzit. Ostvarena zatezna čvrstoća od 1570 MPa predstavlja 80% čvrstoće osnovnog metala. Termička obrada, koja obuhvata samo starenje posle zavarivanja i koja se najčešće primenjuje kod martenzitno starenih čelika, dala je najnižu čvrstoću, odnosno ostvareno je 75% čvrstoće osnovnog metala.

Formirana struktura se ne sastoji samo od starenog martenzita, već u tamnoj zoni ZUT-a (ZUT II) ima prisutnog netransformisanog, zaostalog austenita. Čvrstoća zavarenog spoja, bez dodatne termičke obrade, daje najniže zatezne karakteristike, što je i za očekivanje, s obzirom da se struktura metala šava i dela ZUT-a (ZUT I) sastoji od "mekog" martenzita, koji u nestarenom stanju poseduje najniže osobine. Rezultati ispitivanja zatezne čvrstoće metala šava i ugla savijanja oko korena i lica šava, nešto su viši kod zavarenog spoja koji je samo staren posle zavarivanja. S obzirom na konkretne konstrukcijske zahteve za izradu komore raketnog motora, kao optimalna termička obrada izabrana je kombinacija kaljenja i starenja posle zavarivanja.

Literatura

- [1] HONEYCOMBE, R.W.K. *Steels-Microstructure and Properties*. Edward Arnold, (1981), London, p.165.
- [2] DECKER, R.F. *Source book on maraging steels*. AMS, (1979), Ohio, p.351.
- [3] ROHRBACH, K., SCHMIDT, M. *Metals Handbook*. 1997, vol.1, Metals Park Ohio, p.793.
- [4] ...Standard JUS C.T3.051, Jugoslovenski zavod za standardizaciju, Beograd, (1961).
- [5] NARAYANAN, P.R., SREEKUMAR, K. Metallographic investigations of the heat - affected zone II/parent metal interface cracking in 18 Ni maraging steel welded structures, *Journal of Materials Science*, 1990, vol.25, p.4587.
- [6] BLAUDEL, J.G., SMITH, H.R. Fracture toughness study of a grade 300 maraging steel weld joint. *Welding Journal, Research Supplement*, May 1974, p.211-217.
- [7] MITTAL, M.C., GHOSE, B.R. An analysis of fracture toughness in the HAZ of GTA welded maraging steel. *Welding Journal, Research Supplement*, November 1989, p.457-461.

Rad primljen: 17.12.1999.god.