

Ispitivanje uticaja temperature austenitizacije na mehaničke, toplotne i strukturne osobine 51CrV4 čelika

UROŠ S. STAMENKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Tehnički fakultet u Boru, Bor
IVANA I. MARKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Tehnički fakultet u Boru, Bor
SRBA A. MLADENOVIC, Univerzitet u Beogradu,
Tehnički fakultet u Boru, Bor
MILENA S. STAJIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Tehnički fakultet u Boru, Bor

Originalni naučni rad
UDC: 669.18.058
669.18.018.298
DOI: 10.5937/tehnika2401055S

U ovom radu akcenat je stavljen na ispitivanje uticaja temperature kaljenja (austenitizacije) na mehaničke, toplotne i strukturne osobine 51CrV4 hrom-vanadijumskog čelika. Čelik 51CrV4 se u većini slučajeva kategoriše kao opružni čelik, međutim, poslednjih godina sve veću namenu nalazi u proizvodnji sitnijih i krupnijih alata pa se može kategorisati i kao alatni čelik. Radi dobijanja kvalitetnijih alata, ovaj čelik se podvrgava raznim vidovima termičke obrade, koji obično uključuju: normalizaciono žarenje, kaljenje i nakon toga srednje otpuštanje. U ovom radu uzorci su austenitizirani na različitim temperaturama (780-920 °C) nakon čega su kaljeni u ulju i nakon kaljenja grupa uzoraka je otpuššana na temperaturi od 350 °C u trajanju od 2 sata. Cilj je bio pratiti kakav uticaj temperatura kaljenja (progrevanja, austenitizacije) ima na tvrdoću, toplotnu provodnost i mikrostrukturu podvrgavanjem uzoraka karakterizaciji nakon sprovedenih režima termičke obrade. Rezultati su pokazali da sa porastom temperature austenitizacije vrednosti tvrdoće postepeno rastu dostižu maksimum, a nakon toga opadaju bez obzira da li se radi o kaljenju ili otpuštanju. Sa druge strane, vrednosti toplotne provodnosti pokazuju obrnuti trend. Nakon karakterizacije izveden je zaključak da izborom niske temperature austenitizacije (770 °C) može doći do hlađenja iz dvofaznog područja ($\alpha+\gamma$) koje prouzrokuje pad mehaničkih osobina, dok izbor visoke temperature (920 °C) dovodi do ukрупnjavanja austenitnog zrna i razugljeničenja površine opet snižavajući vrednosti tvrdoće.

Ključne reči: 51CrV4, austenitizacija, tvrdoća, toplotna provodnost, mikrostruktura

1. UVOD

Čelik 51CrV4 se kategoriše kao niskolegirani opružni čelik zbog svoje namene, ali pored toga sve veću primenu ima i pri izradi sitnijih i krupnijih alata i kao takav najčešće se upotrebljava u kaljenom ili otpuštenom stanju jer tada pokazuje veoma dobru čvrstoću, žilavost i otpornost na razvijanje zamornih pukotina [1, 2]. Kada je u pitanju termička obrada čelika ili drugih materijala, primarni postupak obično uključuje zagrevanje. Bez obzira da li je cilj uklanjanje naprezanja,

normalizacija, kaljenje ili rekristalizacija, svaki vid termičke obrade zahteva neki vid zagrevanja. Kada je u pitanju čelik 51CrV4 najkorišćeniji postupci termičke obrade su: normalizacija, kaljenje i otpuštanje. Kao jedan od glavnih parametara kaljenja je temperatura kaljenja ili u literaturi poznatija kao temperatura austenitizacije [3]. Kako bi se postigao potpuni prelazak u austenit i obezbedio homogeni sastav u austenitnom zrnju, neophodno je zagrejati čelik i progrevati ga za određeno vreme u određenom temperaturnom opsegu koji pogoduje austenitizaciji. Generalno govoreći, što je viša temperatura austenitizacije veća je šansa da dođe do potpune transformacije strukture u austenitnu [4]. Potpuna transformacija strukture tokom zagrevanja u austenitnu je od izuzetne važnosti za naknadno dobijanje martenzita nakon brzog hlađenja tj. kaljenja. Međutim, prekomerna temperatura austenitizacije i predugo zadržavanje mogu dovesti do rasta

Adresa autora: Uroš Stamenković, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Vojske Jugoslavije 12

e-mail: ustamenkovic@tfbor.bg.ac.rs

Rad primljen: 17.01.2024.

Rad prihvaćen: 26.01.2024.

zrna i razugljeničenja [5]. Shodno tome, izbor temperature austenitizacije značajno utiče i na veličinu zrna austenita i na ujednačenu distribuciju legirajućih elemenata. Ovo može kasnije uticati na martenzitnu transformaciju, i na kraju uticati na svojstva čelika, te je ispitivanje uticaja temperature austenitizacije zainteresovalo mnoge naučnike [6, 7]. Autori su u svojim istraživanjima pokazali da su temperatura i vreme austenitizacije itekako korisni za ispitivanje, jer utiču na gotovo sve osobine čelika. Literaturni podaci pokazuju da temperatura austenitizacije utiče na rast austenitnog zrna, raspored legirajućih elemenata, homogenizaciju strukture, promenu mehaničkih osobina u pogledu: promene tvrdoće, zatezne čvrstoće, žilavosti, kao i uticaj na formiranje i širenje zamornih pukotina. Sa druge strane, veoma mali broj podataka postoji o uticaju temperature austenitizacije na toplotne osobine čelika 51CrV4, a kod alatnih čelika veoma je važno poznavanje promene toplotnih osobina nakon sprovedenih režima termičke obrade. Zhang i saradnici istraživali su uticaj temperature austenitizacije i naknadnog kaljenja na mikrostrukturu i osobine čelika 51CrV4. Autori su došli do zaključka da temperatura austenitizacije kod čelika 51CrV4 ima veliki uticaj na veličinu zrna i da se sa povećanjem temperature povećava veličina zrna, što dovodi do opadanja vrednosti mehaničkih osobina [4]. Međutim, povećanje austenitnog zrna usled austenitizacije na povišenim temperaturama može imati pozitivan efekat, jer se sa povećanjem zrna postiže bolja prokaljivost čelika, što su Lee i saradnici pokazali u svom radu na NiCr niskolegiranoj čeliku [8].

Lambers sa saradnicima je dokazao da je prokaljivost bolja kod čelika 51CrV4 sa porastom temperature austenitizacije i porastom austenitnog zrna merivši početak temperature martenzitne transformacije (M_s) [9]. Pored temperature austenitizacije bitno je i vreme austenitizacije, tj. vreme držanja komada na zadatoj temperaturi. Bajželj i Burja su odvojeno u dva rada akcenat stavili na uticaj temperature i vremena austenitizacije na veličinu zrna, početak martenzitne transformacije kao i kasniju beinitnu transformaciju prilikom otpuštanja. Autori su pokazali da sa porastom temperature i vremena austenitizacije dolazi do porasta austenitnog zrna. Na nižim temperaturama austenitizacije potrebno je duže vreme držanja kako bi se transformacija austenita potpuno završila. Prilikom kratkog držanja (5 min), tvrdoća postepeno raste sa porastom temperature austenitizacije, dostiže maksimum i na najvišim temperaturama opada [1, 10]. Lai i dr. su ispitivali kako temperatura austenitizacije i naknadno otpuštanje utiču na razvijanje zamorne pukotine kod čelika 51CrV4. Oni su došli do saznanja da temperatura austenitizacije pre kaljenja nema velikog uticaja na porast zamornih pukotina, međutim,

sa porastom temperature austenitizacije, kako autori navode, dolazi do porasta austenitnog zrna što dovodi do smanjenja ukupne dužine granice, tako da će se zamorna pukotina teže pojaviti na granicama zrna, te se začetak pukotine javlja u samim zrnima [11].

Na osnovu svega iznetog definisan je cilj ovog rada, a to je ispitivanje temperature austenitizacije na osobine čelika 51CrV4 nakon sprovedene termičke obrade koja je uključivala zagrevanje uzoraka na različitim temperaturama austenitizacije (770 °C, 800 °C, 830 °C, 860 °C, 890 °C i 920 °C) u trajanju od 45 minuta, a nakon progrevanja, uzorci čelika 51CrV4 kaljeni su u ulju. Jedna grupa uzoraka je nakon kaljenja u ulju podvrgnuta otpuštanju na temperaturi od 350 °C u trajanju od 2 sata, kako bi se pratio uticaj temperature austenitizacije na naknadno otpuštanje. Nakon sprovedene termičke obrade, uzorci su podvrgnuti karakterizaciji, koja je uključivala: merenje tvrdoće, određivanje toplotne provodnosti i praćenje promena u strukturi uz pomoć SEM mikroskopije.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Kao materijal u ovom radu korišćena je šipka čelika 51CrV4 okruglog profila koja je nabavljena od firme „BG Steel“ iz Beograda. Ovaj čelik spada u standardizovane hrom-vanadijumske legirane čelike pa stoga ima jasno definisan hemijski sastav koji je dat u tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika 51CrV4

Element	C	Si	Mn	Cr	V	Fe
Sadržaj [mas.%]	0,51	Max. 0,4	0,9	1,05	0,18	Ostatak

Nakon dobijanja šipke, pristupilo se dimenzionisanju iste, kako bi se dobili adekvatni uzorci za termičku obradu i naknadno ispitivanje. Ispitivanje toplotnih osobina iziskuje specijalnu i tačnu pripremu uzoraka na dimenzije koje je proizvođač uređaja definisao, a to su: prečnik uzorka $\varnothing 12,7 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ i visina uzorka za gvožđa i čelike 2 mm sa tolerancijom $\pm 0,2 \text{ mm}$. Radi ispitivanja uticaja austenitizacije na osobine 51CrV4 čelika vršeno je najpre zagrevanje uzoraka na šest različitih temperatura. Zagrevanje uzoraka je vršeno tako što je najpre elektrootporna peć „Vims elektrik LPŽ-7,5 S“ zagrevana na različitim temperaturama: 770 °C, 800 °C, 830 °C, 860 °C, 890 °C, 920 °C, nakon čega su komadi postavljeni u zagrejanu peć na zadatim temperaturama i uzorci su austenitizovani u trajanju od 45 minuta. Nakon progrevanja, uzorci su kaljeni u ulju dok je druga grupa uzoraka nakon kaljenja u ulju podvrgnuta otpuštanju na temperaturi od 350 °C u trajanju od 2 sata, kako bi se pratio uticaj temperature austenitizacije na naknadno otpuštanje. Termička obrada uzoraka može videti na slici 1.

Nakon sprovedene termičke obrade, uzorci su podvrgavani različitim vidovima karakterizacije. Uticaj na mehaničke osobine čelika ispitivan je merenjem vrednosti tvrdoće.

Tvrdoća uzoraka merena je uz poštovanje standarda ASTM E384 [12], Vickersovom metodom utiskivanjem dijamantskog utiskivača oblika piramide pri opterećenju od 30 kP (294,2 N) u trajanju od 15 sekundi na uređaju „VEB Leipzig“. Određivanje toplotne difuzivnosti, toplotne provodnosti i specifične toplote je izvršeno na uređaju za merenje toplotne difuzivnosti „TA Instruments DXF – 500“. Toplotne osobine uzoraka ispitivane su uz pomoć „Flash“ metode.



Slika 1 – Termička obrada čelika 51CrV4

Ovaj uređaj direktno meri toplotnu difuzivnost (α), dok se vrednosti specifične toplote (c_p) i gustine (ρ) dobijaju iz formirane baze podataka za grupu uzoraka koja se ispituje.

Merenje difuzivnosti se vrši radijacijom uzorka uz pomoć ksenonske lampe sa donje strane uzorka i merenjem vremena zagrevanja uzorka uz pomoć detektora sa gornje strane uzorka. Toplotna provodnost (κ) izračunava se po obrascu:

$$\kappa = \alpha \cdot \rho \cdot c_p \quad (1)$$

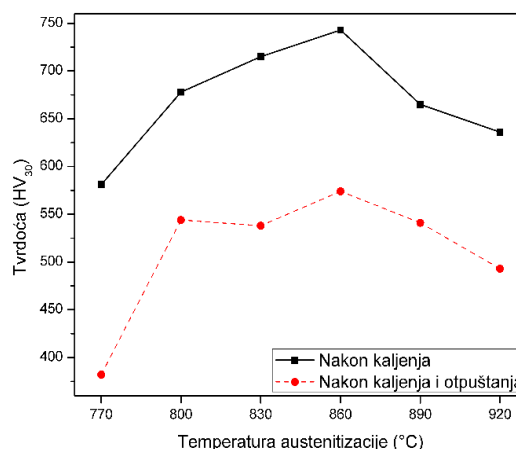
Toplotne osobine čelika 51CrV4 su ispitivane na sobnoj temperaturi nakon svakog pojedinačnog postupka termičke obrade.

Priprema uzoraka za metalografsku analizu uključivala je moko brušenje na silicijum - karbid papirima različitih finoća (P120, P220, P400, P800, P1000, P1200 i P2000), poliranje na tkanini sa dodatkom suspenzije aluminijum (III) oksida sa veličinom čestice od 0,3 μm i naknadno nagrizanje 2% rastvorom Nitala (2% HNO_3 u etanolu), kako bi došlo do razvijanja mikrostrukture. Analiza mikrostrukture vršena je na skenirajućem elektronskom mikroskopu „Tescan Vega 3 LMU“.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 2 prikazani su rezultati ispitivanja tvrdoće nakon austenitizacije na različitim temperaturama i naknadnog kaljenja sa i bez otpuštanja.

Što se tiče uticaja temperature austenitizacije na mehaničke osobine uzoraka nakon kaljenja, može se videti da vrednosti tvrdoće postepeno rastu sa porastom temperature austenitizacije, dostižu maksimum (860 °C) i onda opadaju. Minimalne vrednosti tvrdoće dobijene su nakon austenitizacije na temperaturi od 770 °C, dok su maksimalne vrednosti dobijene nakon austenitizacije na temperaturi od 860 °C. Daljim porastom temperature austenitizacije vrednosti mehaničkih osobina su postepeno opadale. Dobijanje ovakvih vrednosti mehaničkih osobina objašnjavaju se time da niske temperature austenitizacije (770 °C) nisu bile dovoljne za potpunu austenitizaciju, već je u strukturi zadržana i određena količina ferita zajedno sa nerastvorenim karbidima na bazi hroma i vanadijuma. Sa druge strane, kaljenjem takvog uzorka nemoguće je dobiti potpunu martenzitnu strukturu već je u strukturi prisutan i ferit koji snižava vrednosti tvrdoće. Pri srednjoj temperaturi austenitizacije (860 °C) stvorili su se gotovo idealni uslovi za kaljenje. Došlo je do potpune austenitizacije, nema ferita, austenitna zrna su fina i uniformna, gotovo svi karbidi su rastvoreni u austenitu pa se javlja i određen stepen ojačavanja usled prezasićenja austenita, jer će sada slobodni ugljenik preći u martenzit pri kaljenju. Kaljenjem ovakvog uzorka dobija se veoma fini, homogeni i gusti paketasti martenzit sa kojim dolaze i izuzetno visoke vrednosti tvrdoće. Ako se temperatura austenitizacije poveća iznad ove vrednosti (920 °C) dolazi do ogrubljenja i ukupnjavanja austenitnog zrna, razugljeničenja površine komada, pa se kaljenjem ovakvog uzorka dobija grublji i krupniji martenzit koji ima niže vrednosti tvrdoće [1, 4, 10, 11, 13-15].



Slika 2 – Promena tvrdoće uzoraka čelika 51CrV4 u zavisnosti od temperature austenitizacije nakon kaljenja i otpuštanja

Takođe, sa prezentovanih dijagrama može se zaključiti da su vrednosti tvrdoće nakon otpuštanja opale u odnosu na vrednosti koje su dobijene za uzorke nakon kaljenja sa različitih temperatura austenitizacije. Pad mehaničkih osobina se objašnjava otpuštanjem martenzitne strukture koja je bila prisutna u kaljenim uzorcima. Trend koji je bio prisutan kod kaljenih uzoraka zapaža se i kod ove grupe uzoraka. Vrednosti tvrdoće postepeno rastu sa porastom temperature austenitizacije, dostižu maksimum na temperaturi od 860 °C i nakon toga opadaju.

Kada se govori o uticaju temperature austenitizacije na toplotnu provodnost kaljenih i otpuštenih uzoraka (slika 3) minimalne vrednosti toplotne provodnosti su dobijene kod uzoraka koji su pokazivali visoke vrednosti tvrdoće. Kod kaljenih uzoraka minimum je dobijen kod uzoraka koji je austenitiziran na temperaturi od 890 °C, dok je kod otpuštenih uzoraka minimalnu vrednost toplotne provodnosti imao uzorak koji austenitiziran na temperaturi od 860 °C.

Maksimalne vrednosti toplotne provodnosti dobijene su kod uzorka koji je austenitiziran na najnižoj temperaturi bez obzira na tip termičke obrade. Promena vrednosti toplotne provodnosti objašnjava se na sličan način kao i kod promene vrednosti tvrdoće. Upravo ono što je dovelo do porasta vrednosti tvrdoće kod kaljenih uzoraka ujedno je dovelo i do pada toplotne provodnosti.

Maksimalne vrednosti su dobijene kod uzoraka koji nisu bili potpuno austenitizirani i nisu imali rastvorene karbide u austenitu, pa je kretanje elektrona kao nosioca toplotne energije bilo nešto lakše u matrici nego kod ostalih uzoraka.

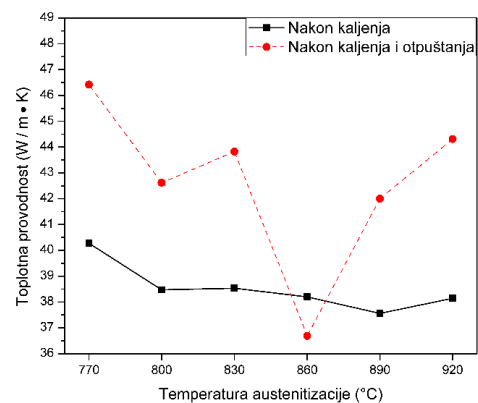
Daljim povećavanjem temperature austenitizacije dolazi do postepenog rastvaranja karbida, raste prezasićenje austenita, pa je kretanje elektrona kroz rešetku martenzita nakon kaljenja sve teže i teže, stoga vrednosti toplotne provodnosti opadaju.

Ako je temperatura austenitizacije previsoka (920°C) ogrubljanje austenita, povećanje veličine zrna kao i kasnije ogrubljanje martenzita naknadnim kaljenjem olakšaće kretanje elektrona bez obzira na rastvorene karbide u čvrstom rastvoru, pa toplotna provodnost postepeno raste.

Daljim posmatranjem dobijenih rezultata na slici 3, može se zaključiti da su vrednosti toplotne provodnosti otpuštenih uzoraka više od vrednosti uzoraka koji su samo kaljeni. Kod otpuštenih uzoraka došlo je do modifikacije morfologije martenzita (otpuštanje martenzita), gubljenja njegove tetragonalnosti, kao i rasterećenja prezasićenog čvrstog rastvora austenita formiranjem prelaznih i stabilnih karbida na bazi hroma, vanadijuma i pre svega železa. Sve navedeno dovodi do rasterećenja matrice i pomaže kretanje

elektrona kroz kristalnu rešetku pa sa time i toplotna provodnost raste. Takođe, vrednosti toplotne provodnosti variraju sa promenom temperature austenitizacije. Ovo variranje vrednosti ne može se pripisati uticaju temperature austenitizacije jer nije bilo prisutno kod uzoraka koji su samo kaljeni bez otpuštanja.

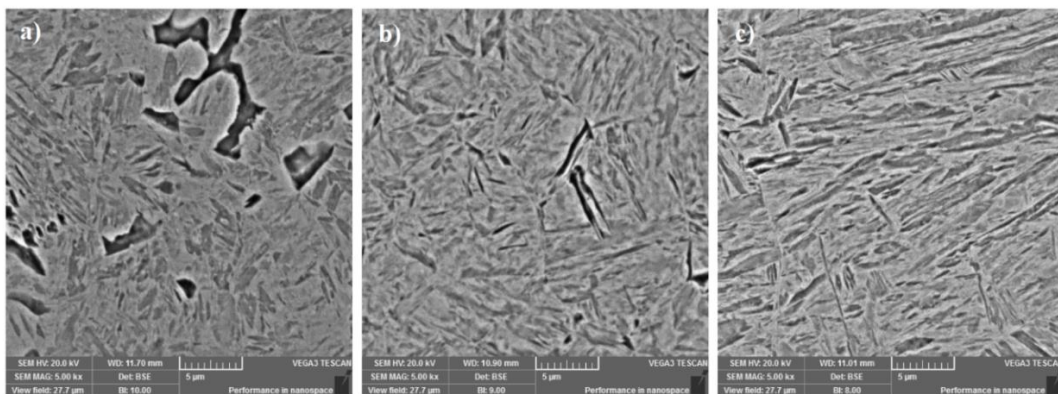
Variranje vrednosti toplotnih osobina nije strano, jer rasipanje elektrona dosta zavisi od rasporeda ojačavajućih čestica u matrici čvrstog rastvora. S obzirom na to, da položaj tih čestica nije moguće tačno odrediti, nemoguće je znati da li će one u datom momentu u položaju koje su zauzele pospešiti kretanje elektrona ili iste rasipati. Variranje vrednosti toplotne provodnosti nije jako izraženo, jer ova veličina zavisi od nekoliko činioca, što se može videti iz obrasca br.1.



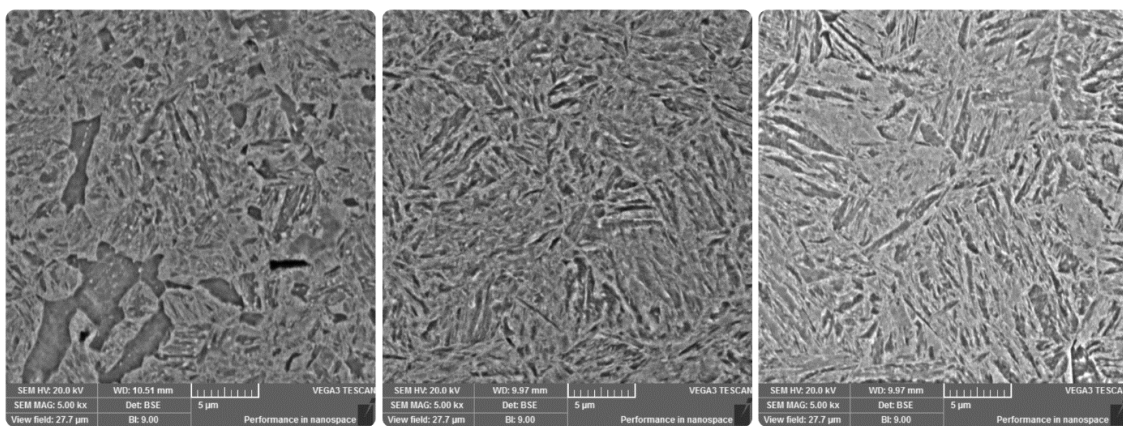
Slika 3 – Promena toplotne provodnosti uzoraka čelika 51CrV4 u zavisnosti od temperature austenitizacije nakon kaljenja i otpuštanja

Sva objašnjenja koja su data za uticaj temperature austenitizacije na tvrdoću i toplotnu provodnost potvrđena su analizom na skenirajućem elektronskom mikroskopu. Na slikama 4a-c date su mikrofotografije uzoraka nakon austenitizacije na različitim temperaturama (770 °C, 860 °C, 920 °C) i kaljenja u ulju, dok su na slikama 5a-c date mikrofotografije uzoraka nakon austenitizacije na različitim temperaturama (770 °C, 860 °C, 920 °C) i otpuštanja nakon kaljenja, respektivno.

Sa prikazanih mikrofotografija na slikama 4a-c može se videti da se struktura kod uzorka austenitiziranog na temperaturi od 770 °C sastoji od zaostalog ferita (crna područja na SEM mikrofotografijama, slika 4a) i martenzita koji se nalazi između feritnih područja. Mikrofotografija uzorka austenitiziranog na temperaturi od 860 °C (slika 4b) potvrđuje pojavu sitnozrnog, paketastog i gustog martenzita. Dok se na slici 4c, takođe uočava paketasti martenzit, ali su iglice nešto krupnije i grublje u odnosu na one dobijene nakon austenitizacije na temperaturi od 860 °C i kaljenja. Veoma slične mikrostrukture dobili su i drugi istraživači [1, 4, 11].



Slika 4 - Mikrostrukture uzoraka nakon austenitizacije na temperaturi od: a) 770 °C; b) 860 °C; c) 920 °C i hlađenja (kaljenja) u ulju; uvećanje x5000



Slika 5 - Mikrostrukture uzoraka nakon austenitizacije na temperaturi od: a) 770 °C; b) 860 °C; c) 920 °C, hlađenja (kaljenja) u ulju i otpuštanja; uvećanje x5000

Posmatranjem mikrofotografija na slikama 5a-c zaključuje se da većih promena u odnosu na mikrostrukture uzoraka nakon kaljenja nema. Kod uzorka koji je austenitiziran na temperaturi od 770 °C zapaža se zaostali ferit u kome se uočavaju sitni sferični karbidi (bele čestice u feritu), a između ferita nalazi se otpušteni martenzit.

Kod uzorka koji je austenitiziran na temperaturi od 860 °C u strukturi se zapaža otpušteni martenzit zajedno sa sitnim sferičnim karbidima i karbidima nepravilnog oblika istaloženih po granicama i u samim iglicama otpuštenog martenzita.

Na slici 5c prikazana je mikrostruktura uzorka austenitiziranom na najvišoj temperaturi. Struktura se sastoji od grubog i krupnijeg otpuštenog martenzita. U samim krupnijim iglama otpuštenog martenzita mogu se uočiti veoma fini, sferični karbidi. Drugi istraživači su pokazali veoma slične mikrostrukture [1, 11].

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu izvršenih analiza na uzorcima čelika 51CrV4 nakon sprovedenih režima termičke obrade mogu se izvući sledeći zaključci:

- Temperatura austenitizacije pokazuje veliki uticaj na tvrdoću, toplotnu provodnost i mikrostrukturu čelika 51CrV4 nakon kaljenja, kao i nakon otpuštanja.
- Nakon kaljenja, vrednost tvrdoće postepeno raste sa porastom temperature austenitizacije, dostiže svoj maksimum na temperaturi od 860 °C, a potom opada. Minimalna vrednost dobijena je na najnižoj temperaturi austenitizacije od 770 °C. Apsolutna razlika u vrednosti tvrdoće od minimalno dobijene vrednosti do maksimalno dobijene vrednosti je čak 162 HV₃₀ pri temperaturnoj razlici od svega 90 °C pri austenitizaciji.
- Takođe nakon kaljenja, minimalne vrednosti toplotne provodnosti zabeležene su kod uzorka sa visokim vrednostima tvrdoće, što ukazuje na obrnutu proporcionalnost između ispitivanih osobina. Najniža vrednost toplotne provodnosti uočena je kod uzorka austenitiziranog na 890 °C, dok su maksimalne vrednosti zabeležene kod uzorka austenitiziranog na najnižoj temperaturi.
- Nakon kaljenja i otpuštanja, vrednosti tvrdoće su niže od onih dobijenih za kaljeno stanje ali zadržavaju sličan trend. Maksimum je zabeležen

takođe na temperaturi austenitizacije od 860 °C, a minimum pri progrevanju na temperaturi od 770°C. Vrednosti toplotne provodnosti blago variraju sa promenom temperature austenitizacije, minimalne vrednosti su dobijene kod uzorka koji je imao maksimalnu vrednost tvrdoće.

- Mikrostrukturalna analiza uzoraka dodatno potvrđuje izneto u vezi sa uticajem temperature austenitizacije na tvrdoću i toplotnu provodnost čelika 51CrV4.

Rezultati dobijeni istraživanjem čelika 51CrV4, potvrđuju teorijsku osnovu i upotpunjuju istu. Ovim radom izvršena je karakterizacija uzoraka u različitim stanjima nakon termičke obrade. Takođe, određena je optimalna temperatura austenitizacije od 860 °C, koja obezbeđuje zadovoljavajuću tvrdoću i toplotnu provodnost, kao i odgovarajuću strukturu.

5. ZAHVALNICA

Istraživanja u ovom radu realizovana su uz finansijsku podršku Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, u okviru finansiranja naučno istraživačkog rada na Univerzitetu u Beogradu, Tehničkom fakultetu u Boru pod brojem ugovora 451-03-47/2023-01/200131.

LITERATURA

- [1] Bajželj A, Burja J. Influence of austenitisation time and temperature on grain size and martensite start of 51CrV4 spring steel, *Crystals*, Vol. 12 No. 5, article number 1449, 2022.
- [2] Zhang L, Gong D, Li Y, Wang X, Ren X, Wang E. Effect of Quenching Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties of 51CrV4 Spring Steel, *Metals*, Vol. 8, No. 12, article number 1056, 2018.
- [3] Xie N, Chen SP, He Z. Effect of Austenitizing Temperature on Martensite's Structure and Morphology of steel, *Journal of Shaanxi Institute of Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 10-14, 1996.
- [4] Zhang X, Xia D, Wang S. Effect of austenitizing temperature on the quenching microstructure and properties of 51CrV4, *Materials Science Forum*, Vol. 944, pp. 357-363, 2019.
- [5] Hwang B, Suh DW, Kim SJ. Austenitizing temperature and hardenability of low-carbon boron steels, *Scripta Materialia*, Vol. 64, No. 12, pp. 1118-1120, 2011.
- [6] Zhang ZB, Liu QY, Zhang XB. Effect of heating temperature on prior austenite size and solution of Nb in pipeline steel, *Journal of Iron and Steel Research*, Vol. 20, No.10, pp. 36-39, 2008.
- [7] Zhang SS, Li MQ, Liu YG, Luo J, Liu TQ. The growth behavior of austenite grain in the heating process of 300M steel, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 528, No. 15, pp. 4967-4972, 2011.
- [8] Lee SJ, Lee YK. Prediction of austenite grain growth during austenitization of low alloy steels, *Materials and Design*, Vol. 29, No. 9, pp. 1840-1844, 2008.
- [9] Lambers HG, Tschumak S, Maier HJ, Canadinc D. On the bainitic and martensitic phase transformation behavior and the mechanical properties of low alloy 51CrV4 steel, *International Journal of Structural Changes in Solids – Mechanics and Applications*, Vol. 3, No. 1, pp. 15-27, 2011.
- [10] Bajželj A, Burja J. Influence of austenitisation temperature and time on martensitic and isothermal bainite phase transformation of spring steel, *Metals*, Vol. 12, No. 8, article number 1373, 2022.
- [11] Lai C, Huang W, Li S, Liu T, Lv R, Tang X, Yu J. Effects of quenching and tempering heat treatment on microstructure, mechanical properties, and fatigue crack growth behavior of 51CrV4 spring steel, *Materials Research Express*, Vol. 8, No. 9, article number 096514, 2021.
- [12] Standardne metode testiranja tvrdoće materijala, Standard ASTM E384-22 [Internet, citirano 17.01.2024.]. Dostupno na: <https://www.astm.org/Standards/E384.htm>
- [13] Babu NK, Suresh MR, Sinha PP, Sarma DS. Effect of austenitizing temperature and cooling rate on the structure and properties of a ultrahigh strength low alloy steel, *Journal of Materials Science*, Vol. 41, pp. 2971-2980, 2006.
- [14] Cai H, Liu GQ, Wang S, Peng W. Effect of quenching temperature on microstructure and properties of 60Si2CrVAT spring steel, *Heat Treatment of Metals*, Vol. 42, No. 2, pp. 185-189, 2017.
- [15] Xu DX, Yin Z. Effect of heat treatment process on structure and properties of spring steel, *Special Steel*, Vol. 24, No. 6, pp. 1-4, 2003.

SUMMARY

A STUDY ON THE INFLUENCE OF AUSTENITIZATION TEMPERATURE ON THE MECHANICAL, THERMAL, AND STRUCTURAL PROPERTIES OF 51CrV4 STEEL

In this paper, emphasis is placed on studying the influence of quenching temperature (austenitization) on the mechanical, thermal, and structural properties of 51CrV4 chrome-vanadium steel. Generally, 51CrV4 steel is often categorized as spring steel; however, in recent years, it has been increasingly used in the production of different types of tools, so it can also be categorized as tool steel. To obtain better-quality tools, this steel is subjected to various types of heat treatment, which usually include normalizing, quenching, and medium-temperature tempering. In this investigation, the samples were austenitized at different temperatures, ranging from 780 °C to 920 °C, and subsequently quenched in oil. After quenching, the samples were tempered at a temperature of 350 °C for 2 hours. The goal was to monitor the influence of austenitizing temperature on hardness, thermal conductivity, and microstructure by subjecting the samples to characterization after the applied heat treatment. The results showed that with an increase in the austenitization temperature, the hardness values gradually increase, reach a maximum, and then decrease, regardless of the type of heat treatment. On the other hand, thermal conductivity values show the opposite trend. After the characterization, it was concluded that by choosing a low austenitization temperature (770 °C), samples would be cooled from the two-phase region ($\alpha+\gamma$), which produces lower hardness values. However, choosing a high austenitization temperature (920 °C) would lead to austenite grain growth and surface decarburization, again lowering hardness values.

Key Words: 51CrV4, austenitization, hardness, thermal conductivity, microstructure