Uticaj parametara termomehaničke obrade na mikrostrukturu i mehanička svojstva čelika S275JR

UROŠ S. STAMENKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Tehnički fakultet u Boru, Bor
ORCID: 0000-0002-7579-2159
IVANA I. MARKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Tehnički fakultet u Boru, Bor
ORCID: 0000-0003-4431-9921
DRAGAN M. MANASIJEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Tehnički fakultet u Boru, Bor
ORCID: 0000-0002-7828-8994
KRISTINA N. BOŽINOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Tehnički fakultet u Boru, Bor
ORCID: 0000-0002-9834-448X
MILAN M. NEDELJKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Tehnički fakultet u Boru, Bor
ORCID: 0000-0002-7927-1334

Originalni naučni rad
UDC: 669.14.018.298
DOI: 10.5937/tehnika2506607S

U ovom radu akcenat je stavljen na ispitivanje uticaja različitih parametara termomehaničke obrade na mehaničke osobine i mikrostrukturu čelika S275JR. Ovaj čelik se najčešće svrstava u grupu nelegiranih konstrukcionih čelika. Prema standardu EN 10025-2, on mora imati minimalnu udarnu žilavost po Šarpiju od 27 J na temperaturi od 20°C. U eksperimentalnom delu rada čelik je podvrgnut različitoj termomehaničkoj obradi, pri čemu je praćen uticaj parametara termomehaničke obrade na tvrdoću, udarnu žilavost i mikrostrukturu. Ispitivani režimi obuhvatali su normalizaciono žarenje, kaljenje, unošenje plastične deformacije od 8% nakon kaljenja putem hladnog valjanja, kao i otpuštanje na temperaturama od 100°C do 250°C u trajanju od 30 minuta. Glavni cilj bio je da se utvrdi da li, i pri kojim parametrima termomehaničke obrade, dolazi do pada žilavosti ispod dozvoljene vrednosti od 27 J. Rezultati su pokazali da je normalizacionim žarenjem uklonjena fabrička struktura, došlo je do usitnjavanja zrna, kao i do povećanja tvrdoće i žilavosti. Naknadno kaljenje izazvalo je značajan porast tvrdoće, pojavu martenzita u strukturi i izrazit pad žilavosti. Unošenje deformacije nakon kaljenja dovelo je do daljeg smanjenja žilavosti, uz blag porast tvrdoće, dok je otpuštanjem postignuto blago povećanje žilavosti, iznad minimalnih vrednosti propisanih standardom.

Ključne reči: *S275JR, termomehanička obrada, tvrdoća, žilavost, mikrostruktura*

1. UVOD

Konstrukcioni čelici našli su široku primenu u industriji zahvaljujući povoljnoj kombinaciji čvrstoće, plastičnosti i zavarljivosti [1]. Zbog ovih karakteristika, automobilska industrija ih često koristi u proizvodnji karoserijskih panela, delova šasije i drugih nosivih komponenti [2–4]. Ovi čelici se svrstavaju u ugljenično-manganske, a njihov hemijski sastav jasno je definisan standardom EN 10025-2 [5].

Struktura standardizovanih čelika može se menjati primenom različitih režima termičke ili termomehaničke obrade, čime se direktno utiče na njihove mehaničke i druge osobine. Čelik S275JR pripada grupi čelika sa niskim do srednjim sadržajem ugljenika (oko 0,2%C) i ima ograničene mogućnosti za termičku

Adresa autora: Uroš Stamenković, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Vojske Jugoslavije 12
e-mail: ustamenkovic@tfbor.bg.ac.rs
Rad primljen: 06.10.2025.
Rad prihvaćen: 16.10.2025.

obradu. Kaljenje se kod ove vrste čelika retko primenjuje, jer nastanak martenzita može dovesti do krtosti. Najčešće se ovaj čelik termički obrađuje zagrevanjem iznad eutektoidne temperature, a zatim kontrolisano hladi, čime se dobija uravnotežena mikro-struktura sastavljena od ferita, perlita i/ili bainita, što obezbeđuje povoljan odnos tvrdoće i žilavosti [6, 7].

Ovaj čelik, kao i njemu slični čelici (sa približno 0,2%C), i dalje su predmet brojnih istraživanja. Jedna grupa autora pratila je promene u mehaničkim osobinama, kao što su zamor, zatezna čvrstoća i žilavost, na različitim radnim temperaturama [1, 8]. A. Bulbul sa saradnicima ispitivao je uticaj deformacionog starenja na osobine čelika S275JR. Pokazano je da se kombinovanim postupkom deformacije i naknadnog starenja mogu postići više vrednosti zatezne čvrstoće i tvrdoće [9]. Uticaj različitih brzina hlađenja na mikrostrukturu, tvrdoću i pritisnu čvrstoću niskougljeničnih čelika istraživali su A. Isikgul i saradnici [10]. Njihovi rezultati pokazali su da povećanje brzine hlađenja dovodi do formiranja bejnita i martenzita, uz prisustvo ferita i perlita. Takve promene u mikrostrukturi rezultuju povećanjem tvrdoće i pritisne čvrstoće. Imajući u vidu da se radi o konstrukcionom čeliku, S. Parapurath i saradnici ispitivali su uticaj različitih režima termičke obrade na korozionu postojanost čelika S275JR, pored njegovih mehaničkih osobina [11].

Na osnovu pregledane literature definisani su ciljevi istraživanja ovog rada. Primarni cilj bio je ispitivanje uticaja različitih parametara termomehaničke obrade na mehaničke osobine i mikrostrukturu čelika S275JR. Poseban akcenat stavljen je na identifikaciju parametara koji su netipični za ovaj čelik, a to su kaljenje, unošenje deformacije nakon kaljenja i kratkotrajno niskotemperaturno otpuštanje. Imajući u vidu da standard EN 10025-2 propisuje da ovaj čelik na sobnoj temperaturi mora posedovati udarnu žilavost od najmanje 27 J, bilo je značajno ispitati da li kaljenjem i naknadnom deformacijom dolazi do smanjenja vrednosti ispod propisanih. Takođe, ukoliko se dobiju vrednosti niže od 27 J, ispitano je da li je naknadnim niskotemperaturnim otpuštanjem moguće povećati ih do ili iznad granice dozvoljene standardom.

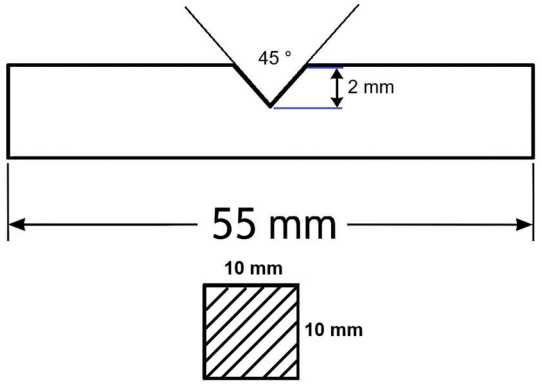
2. EKSPERIMENTALNI DEO

U okviru istraživanja korišćena je toplo valjana kvadratna šipka od S275JR čelika dimenzija 12×12×1000 mm. Hemijski sastav čelika S275JR, prema standardu EN 10025-2, prikazan je u tabeli 1. Uzorci u isporučenom stanju (AR) isečeni su i pripremljeni za ispitivanja tvrdoće, udarne žilavosti i analizu mikrostrukture. Radi uklanjanja fabričke strukture, svi uzorci su zagrevani na 900°C u trajanju od 60 minuta. Deo uzoraka hlađen je na mirnom vazduhu (normalizovani uzorci – N), dok je drugi deo zakaljen u hladnoj vodi (kaljeno stanje – Q). Nakon kaljenja, jedan deo uzoraka izdvojen je za analizu, dok je drugi podvrgnut hladnoj deformaciji od 8% na valjačkom stanu Joliot Paris (označeno kao Q+D). Tako deformisani uzorci podvrgnuti su ispitivanjima, a jedan deo njih naknadno je otpuštan 30 minuta na 100°C (QDT100), 150°C (QDT150), 200°C (QDT-200) i 250°C (QDT250). Termička obrada vršena je u elektrootpornoj peći Vims elektrik LPŽ-7,5 S.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika S275JR

Element	C	Mn	Cu	P	S	N
Sadržaj [mas.%]	≤ 0,21	≤ 1,5	≤ 0,55	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,012

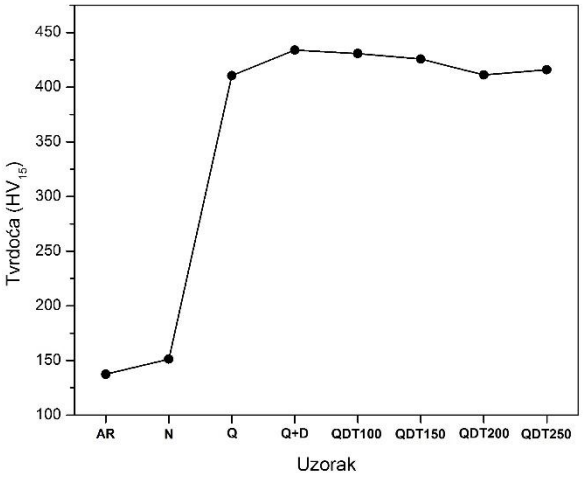
Merenje tvrdoće izvršeno je na tvrdomeru VEB Leipzig pri opterećenju od 15 kg i vremenu opterećenja od 15 s, u skladu sa ASTM E92-23 [12]. Ispitivanje udarne žilavosti sprovedeno je na Šarpijevom klatnu VEB Leipzig, prema standardu EN ISO 148-1:2016, na uzorcima dimenzija 10×10×55 mm sa V-zarezom dubine 2 mm. Masa čekića iznosila je 18,65 kg [13]. Izgled crteža prema kome je pripremljena epruveta prikazan je na slici 1. Za metalografsku analizu uzorci su brušeni postupno, serijom brusnih papira različite granulacije, a zatim polirani suspenzijom aluminijum-oksida sa česticama veličine 0,3 i 0,05 μm. Mikrostruktura je otkrivana nagrizanjem u rastvoru 2% Nital (2 ml HNO_3 i 98 ml C_2H_5OH) tokom 15 sekundi, nakon čega je posmatrana na optičkom mikroskopu Carl Zeiss Jena Epytip 2.



Slika 1 – Šematski prikaz uzorka sa V – zarezom

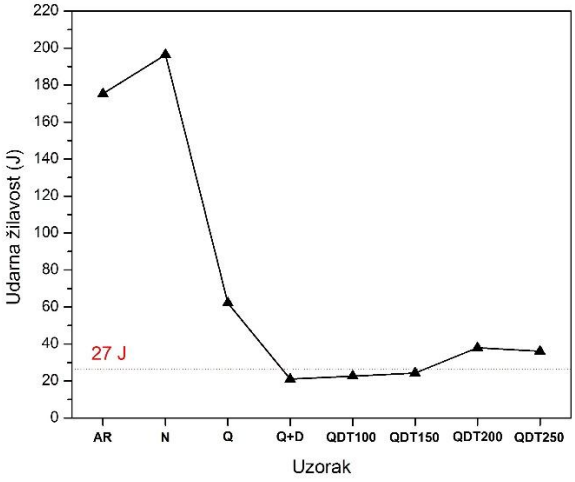
3. REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati merenja tvrdoće nakon svake faze termomehaničke obrade prikazani su na slici 2. Na osnovu dobijenih podataka može se uočiti da vrednosti tvrdoće rastu nakon normalizacije (uzorak N). Normalizaciono žarenje je dovelo do rafinacije strukture i smanjenje veličine zrna u odnosu na uzorak u isporučenom stanju (AR), što je uzrokovalo povećanje vrednosti tvrdoće [6, 14].



Slika 2 – Promena tvrdoće uzoraka čelika S275JR u zavisnosti od termomehaničke obrade

Kaljenje (uzorak Q) dovelo je do naglog porasta vrednosti tvrdoće usled formiranja martenzita u strukturi [10, 11, 14]. S. W. Thompson navodi da niskougljenični martenzit u strukturi obezbeđuje dobru kombinaciju čvrstoće i žilavosti [15]. Dodatni unos deformacije od 8% nakon kaljenja izazvao je dodatni porast tvrdoće (uzorak Q+D). Ovaj porast tvrdoće posledica je povećanja gustine dislokacija i dodatne rafinacije strukture usled hladnog valjanja. Tokom deformacije dolazi do klizanja duž ose deformacije, pri čemu se narušavaju inicijalne granice martenzitnih iglica. Na ovaj način postiže se viši stepen dezorijentacije u martenzitnoj strukturi, što dovodi do njene rafinacije [16-18]. Naknadnim otpuštanjem na temperaturama od 100°C do 250°C vrednosti tvrdoće postepeno su opadale sa porastom temperature, ali je taj pad iznosio svega oko 5% (uzorci QDT). Kratkotrajno otpuštanje dovelo je samo do delimičnog smanjenja gustine dislokacija i do neznatnog pada tvrdoće.

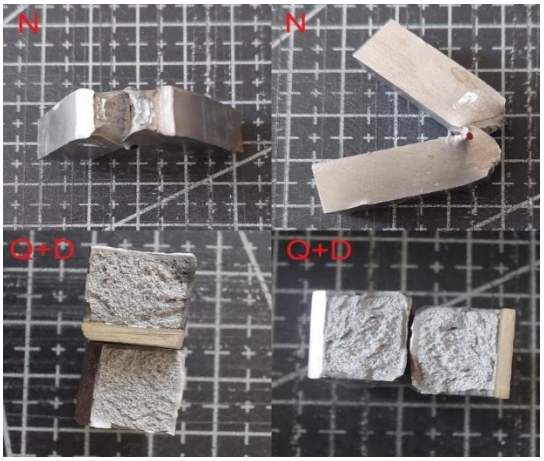


Slika 3 – Promena udarne žilavosti uzoraka čelika S275JR u zavisnosti od termomehaničke obrade

Na slici 3 prikazani su rezultati ispitivanja udarne žilavosti nakon svake faze termomehaničke obrade. Crvenom isprekidanom linijom u dijagramu označena je vrednost od 27 J, koja se smatra graničnom vrednošću za ispitivani čelik.

Najvišu vrednost udarne žilavosti pokazuje uzorak nakon normalizacionog žarenja, pri čemu je zabeležen porast u odnosu na uzorak u isporučenom stanju. Do povećanja žilavosti dolazi usled usitnjavanja i rafinacije mikrostrukture tokom žarenja i naknadnog sporog hlađenja. Slične rezultate za čelik S275JR dobili su i J. Brnić i saradnici [8]. Nakon kaljenja, vrednosti udarne žilavosti naglo opadaju zbog formiranja martenzitne strukture. Ipak, s obzirom na to da je reč o niskougljeničnom čeliku, formirani martenzit sadrži mali udeo ugljenika, zbog čega žilavost ostaje iznad graničnih vrednost. Niže vrednosti udarne žilavosti nakon kaljenja niskougljeničnih čelika zabeležili su i drugi autori [19]. Kako bi se simulirali još zahtevniji eksploatacioni uslovi, kaljeni uzorci su podvrgnuti dodatnoj deformaciji. Unošenjem deformacije došlo je do naglog porasta krtosti u ispitivanim uzorcima, pa je vrednost udarne žilavosti pala ispod granične vrednosti (uzorak Q+D). Istraživanja Lv i saradnika pokazala su da izrazit porast gustine dislokacija usled deformacije nakon kaljenja dovodi povećanja tvrdoće [16], ali u našem slučaju i do značajnog smanjenja žilavosti.

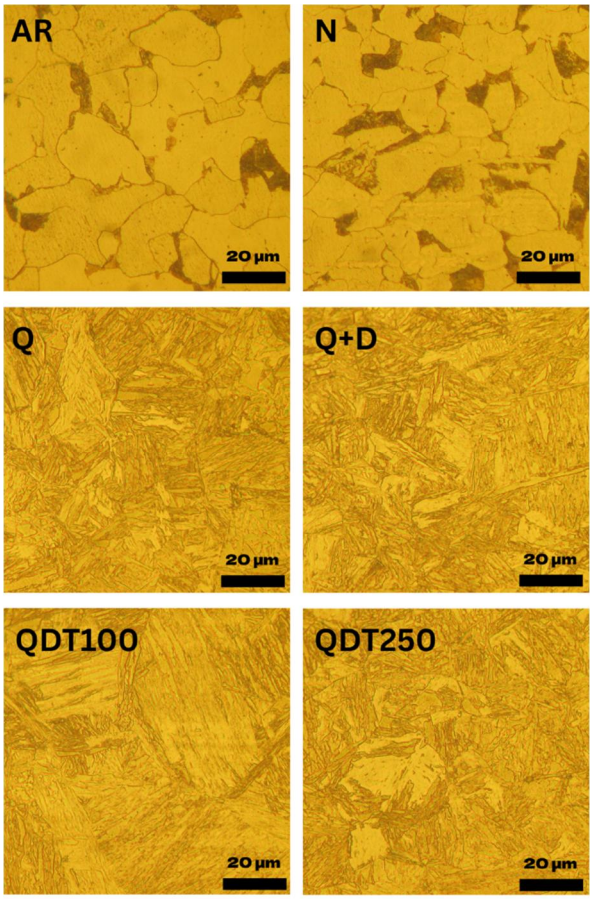
Naknadnim otpuštanjem kaljenih i deformisanih uzoraka nastojalo se povećati vrednosti udarne žilavosti iznad graničnih vrednosti. Sa slike 3 može se uočiti da su vrednosti udarne žilavosti premašile granicu od 27 J tek nakon otpuštanja na temperaturama od 200°C i 250°C. Značajniji porast žilavosti može se očekivati tek pri višim temperaturama i dužem vremenu otpuštanja, što su potvrdili Jo i saradnici [19]. U takvim uslovima dolazi do znatnog smanjenja gustine dislokacija i transformacije krte martenzitne strukture u žilaviju feritnu strukturu.



Slika 4 – Izgled preloma na epruvetama nakon sprovedenog ispitivanja udarne žilavosti

Na slici 4 mogu se videti fotografije preloma uzoraka nakon normalizacije (žilav prelom) i nakon kaljenja i deformacije (krti prelom).

Za detaljnu analizu promena u mikrostrukturi, uzorci podvrgnuti termomehaničkoj obradi ispitivani su optičkom mikroskopijom. Na slici 5 prikazane su mikrostrukture uzoraka nakon pojedinih faza termomehaničke obrade. Dobijeni rezultati mikrostrukturne analize potvrđuju prethodno uočene promene u mehaničkim svojstvima. Poređenjem mikrostruktura uzoraka u isporučenom stanju (AR) i nakon normalizacije (N) uočava se blago usitnjavanje zrna, što je posledica sprovedenog normalizacionog žarenja. Struktura normalizovanih uzoraka, usled sporog hlađenja, sastoji se od ferita i perlita. Slične mikrostrukture zabeležene su i u radovima drugih autora [6, 9, 11].



Slika 5 – Promena udarne žilavosti uzoraka čelika S275JR u zavisnosti od termomehaničke obrade

Kaljenjem (fotografije Q i Q+D) u strukturi je formirana martenzit [15], što je u skladu sa povećanim vrednostima tvrdoće, ali i znatno smanjenim vrednostima udarne žilavosti. Sličnu martenzitnu strukturu zabeležili su i Z. Lv i saradnici nakon kaljenja AISI 1010 čelika (0,12 %C) [16]. Nakon otpuštanja na temperaturi od 100°C tokom 30 minuta, mikrostruktura se praktično ne menja. Martenzit je i dalje dominantan u strukturi, uz blago povećanje veličine iglica. Otpuštanjem na 250°C, pri istom vremenskom intervalu, u strukturi se i dalje prepoznaje martenzit, ali se pojavljuju i pojedine feritne zone (krupna, svetla područja bez martenzitnih iglica kod uzorka QDT250). Može se zaključiti da je pojava ferita u ovom uzorku dovela do povećanja vrednosti udarne žilavosti iznad graničnih vrednosti (slika 3).

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih analiza uzoraka čelika S275JR, koji su bili podvrgnuti različitoj termomehaničkoj obradi, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Ispitivani konstrukcioni čelik S275JR, uprkos niskom sadržaju ugljenika, pokazuje izraženu osetljivost na promene mehaničkih i mikrostrukturnih osobina prilikom primene različitih parametara termomehaničke obrade. Primena ovakvih netipičnih režima termomehaničke obrade kod ove vrste čelika dala je vrlo interesantne i značajne rezultate.
- Normalizaciono žarenje dovelo je do blage rafinacije mikrostrukture i usitnjavanja zrna, što je rezultovalo povećanjem vrednosti tvrdoće i udarne žilavosti.
- Nakon kaljenja postignuta je dovoljna brzina hlađenja, čime je u mikrostrukturi formiran martenzit. Prisustvo martenzita dovelo je do povećanja tvrdoće za 172%, uz istovremeno smanjenje udarne žilavosti, ali ne ispod granične vrednosti od 27 J.
- Dodatno unošenje plastične deformacije od 8% putem hladnog valjanja uzrokovalo je porast gustine dislokacija i povećanje tvrdoće za približno 6%, dok je vrednost udarne žilavosti opala ispod propisane granične vrednosti.
- Otpuštanjem na temperaturama od 100°C i 150°C tokom 30 minuta, nakon kaljenja i unošenja deformacije, zabeležen je blag pad tvrdoće uz istovremeni blagi porast udarne žilavosti. Ipak, vrednosti udarne žilavosti nakon ove termomehaničke obrade i dalje su bile ispod propisane granične vrednosti od 27 J. U mikrostrukturi je martenzit i dalje prisutan, ali sa izraženije razvijenim i krupnijim iglicama.
- Otpuštanjem na višim temperaturama, 200°C i 250°C, u istom vremenskom intervalu, došlo je do dodatnog smanjenja tvrdoće, za približno 5–6%. Istovremeno, vrednosti udarne žilavosti porasle su na 36–38 J, čime su premašile graničnu vrednost. Porast žilavosti može se pripisati pojavi određene količine ferita u mikrostrukturi, usled delimične transformacije martenzita tokom procesa otpuštanja. Mikrostruktura ovih uzoraka pretežno se

sastoji od martenzita, uz lokalno prisutne feritne oblasti.

Sprovođenjem ovog istraživanja izvršena je detaljna karakterizacija uzoraka čelika S275JR u različitim stanjima, nakon primene različitih parametara termomehaničke obrade. Rezultati su pokazali da ovaj čelik, čak i pri najrigoroznijim uslovima termomehaničke obrade, zadržava vrednosti udarne žilavosti koje su tek neznatno ispod propisane granične vrednosti. Ipak, već primenom niskotemperaturnog i kratkotrajnog otpuštanja moguće je značajno smanjiti krtost materijala i postići vrednosti udarne žilavosti iznad graničnih.

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 451-03-137/2025-03/ 200131.

LITERATURA

[1] Torić N, Boko I, Divić V, Burgess IW. Behaviour of steel grade S275JR columns under the influence of high-temperature creep, *Metals*, Vol. 8, No. 11, article 874, 2018.

[2] Qiang X, Jiang X, Bijlaard FSK, Kolstein H. Mechanical properties and design recommendations of very high strength steel S960 in fire, *Engineering Structures*, Vol. 112, pp. 60–70, 2016.

[3] Sun B, Kwiatkowski da Silva A, Wu Y, Ma Y, Chen H, Scott C, Ponge D, Raabe D. Physical metallurgy of medium-Mn advanced high-strength steels, *International Materials Reviews*, Vol. 68, No. 7, pp. 786–824, 2023.

[4] CEN. Eurocode 3, Design of steel structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design, CEN, Brussels, 2005.

[5] Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels, Standard SRPS EN 10025-2:2020 [Internet, citirano 02.10.2025.]. Dostupno na: https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:57300

[6] Aktarer SM. The effect of air-cooling heat treatment on the microstructure and phase transformations of structural steels, *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, Vol. 14, No. 1, pp. 360–369, 2025.

[7] Chakraborty P, Neogy S, Sarkar NK, Donthula H, Ghosh SK, Nandi HK, Gopalakrishna B, Balasundar I, Tewari R. Formation of bainite in a low-carbon steel at slow cooling rate – experimental observations and thermodynamic validation, *Steel Research International*, Vol. 96, article number 2400593, 2025.

[8] Brnic J, Turkalj G, Niu J, Canadija M, Lanc D. Analysis of experimental data on the behavior of steel S275JR – Reliability of modern design, *Materials & Design*, Vol. 47, pp. 497–507, 2013.

[9] Bülbül A, Kaçar R. Factors affecting kinetics of strain aging in S275JRC steel, *Materials Research*, Vol. 20, No. 2, pp. 210–217, 2017.

[10] Işıkgül A, Ahlatci H, Esen İ, Türen Y, Yağız O. Investigation of Mechanical Properties of Accelerated Cooled and Self-Tempered H-Type Structural Sections, *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 68, No. 3, pp. 1191–1204, 2023.

[11] Parapurath S, Jacob L, Gunister E, Vahdati N. Effect of microstructure on electrochemical properties of the EN S275 mild steel under chlorine-rich and chlorine-free media at different pHs, *Metals*, Vol. 12, No. 8, article 1386, 2022.

[12] Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, Standard ASTM E92-23 [Internet, citirano 02.10.2025.]. Dostupno na: https://store.astm.org/e0092-23.html

[13] Metallic Materials - Charpy Pendulum Impact Test - Part 1: Test Method, Standard EN ISO 148-1:2016 [Internet, citirano 02.10.2025.]. Dostupno na: https://www.iso.org/standard/63802.html

[14] Hossain SS, Islam MM, Bhuyan MS. A case study of heat treatment on AISI 1020 steel, *Global Journal of Researches in Engineering: A Mechanical and Mechanics Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 35–39, 2014.

[15] Thompson SW. Interrelationships between yield strength, low-temperature impact toughness, and microstructure in low-carbon, copper-precipitation-strengthened, high-strength low-alloy plate steels, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 711, pp. 424–433, 2018.

[16] Lv Z, Qian L, Liu S, Zhan L, Qin S. Preparation and mechanical behavior of ultra-high strength low-carbon steel, *Materials*, Vol. 13, No. 2, article number 459, 2020.

[17] Huang X, Morito S, Hansen N, Maki T. Ultrafine structure and high strength in cold-rolled martensite, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 43, No. 10, pp. 3517–3531, 2012.

[18] Ueji R, Tsuji N, Minamino Y, Koizumi Y. Ultragrain refinement of plain low carbon steel by cold-rolling and annealing of martensite, *Acta Materialia*, Vol. 50, pp. 4177–4189, 2002.

[19] Jo H, Kang M, Park GW, Kim BJ, Choi CY, Park HS, Shin S, Lee W, Ahn YS, Jeon JB. Effects of cooling rate during quenching and tempering conditions on microstructures and mechanical properties of carbon steel flange, *Materials*, Vol. 13, No. 18, article number 4186, 2020.

SUMMARY

INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL TREATMENT PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF S275JR STEEL

In this study, the emphasis was placed on investigating the influence of various thermomechanical treatment parameters on the mechanical properties and microstructure of S275JR steel. This steel is commonly classified as a non-alloy structural steel. According to the EN 10025-2 standard, it must exhibit a minimum Charpy impact toughness of 27 J at 20 °C. In the experimental part of the study, the steel was subjected to different thermomechanical treatments, and the effects of these parameters on hardness, impact toughness, and microstructure were evaluated. The applied regimes included normalization, quenching, 8% plastic deformation after quenching by cold rolling, and tempering at temperatures ranging from 100 °C to 250 °C for 30 minutes. The primary goal was to determine whether, and under which thermomechanical conditions, the impact toughness decreases below the prescribed limit of 27 J. Normalization eliminated the as-received microstructure and resulted in grain refinement, leading to an increase in both hardness and toughness. Subsequent quenching caused a significant rise in hardness, the formation of martensite, and a pronounced drop in toughness. The introduction of deformation after quenching further reduced toughness, accompanied by a slight increase in hardness. Finally, tempering produced a modest improvement in toughness, raising it above the minimum values required by the standard.

Key Words: *S275JR structural steel, thermomechanical treatment, hardness, impact toughness, microstructure*