

KARAKTERISTIKE PONAŠANJA NAJNOVIJE GENERACIJE HROM MOLIBDEN ČELIKA GRUPE SA 387 Gr. 91 PRI OBLIKOVANJU PROIZVODA POSTUPCIMA ZAVARIVANJA I ODRŽIVI RAZVOJ / CHARACTERISTICS OF THE BEHAVIOR OF THE LATEST GENERATION CHROMIUM MOLYBDENUM STEEL GROUP SA 387 Gr. 91 IN PRODUCT SHAPING BY WELDING PROCESSES AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Prof. dr. Milivoje Jovanović¹, Prof. dr. Muhamed Sarvan², Anja Jovanović³, Prof. dr. Ivica
Čamagić³, Dr.sc. Zijah Burzić, naučni savetnik⁴

¹Akademija kosovsko metohijska, Leposavić, Republika Srbija

²Internacionalni Univerzitet Travnik, Aleja Konzula-Meljanac bb, 72270 Travnik, BiH

³Fakultet tehničkih nauka Kragujevac, Republika Srbija

⁴Vojnotehnički institut Beograd, Republika Srbija

e-mail: milivoje.s.jovanovic@gmail.com, muksar@hotmail.com, anjajovanovic290@gmail.com,
ivica.camagic@pr.ac.rs, zijah.burzic@vti.rs

Izvorni naučni rad

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251401431>

UDK / UDC 669.1:621.791:620.9:502.131.3

Sažetak

Hrom molibden čelik grupe SA 387 Gr. 91 je najnoviji iz generacije čelika za rad u uslovima povišene temperature, povišenog pritiska i korozione sredine. Najvažnije osobine ovog čelika u odnosu na do tada korišćene čelike za rad na povišenim temperaturama su visoka vrednost napona tečenja, dobra koroziona postojanost, značajna otpornost na oksidaciju i dobra otpornost na puzanje. Zadržano je navedeno, omogućava inženjerima projektovanje komponenata opreme značajno tanjih zidova u poređenju sa drugim vrstama čelika (ušteda materijala). Pored dobrih mehaničkih karakteristika na povišenim temperaturama, za ovaj čelik, a generalno i za celu grupu ovih čelika, važna je i zavarljivost. Veoma je bitno da zavarivanje ne utiče na njihovu otpornost na koroziju, puzanje kao i generalno na mehaničke osobine čime se produžava preostali vek konstrukcije što se, uz uštedu materijala, uklapa u koncept održivog razvoja. U radu će biti dat prikaz karakteristika ponašanja Cr-Mo čelika pri zavarivanju, na osnovu eksperimentalno izvršenih ispitivanja (makro i mikrostrukturno ispitivanje zavarenog spoja, tehnološka ispitivanja-ispitivanje savijanjem, ispitivanje tvrdoće).

Ključne reči: Cr-Mo čelici, zavarivanje, prslina, mikro i makro struktura, tvrdoća, održivi razvoj
JEL klasifikacija: Q55, Q56, L61

Abstract

Chromium-molybdenum steel group SA 387 Gr. 91 is the latest from the generation of steels designed to operate under high temperature, elevated pressure, and corrosive environments. The most important characteristics of this steel, compared to previously used steels for high-temperature applications, are its high yield strength, good corrosion resistance, significant oxidation resistance, and excellent creep resistance. The latter property enables engineers to design components with significantly thinner walls compared to other types of steels (material savings). In addition to its good mechanical properties at elevated temperatures, weldability is also important for this steel and, in general, for the entire group of such steels. It is crucial that welding does not affect their resistance to corrosion, creep, or their overall mechanical properties, thus extending the remaining lifespan of the structure, which, together with material savings, fits into the concept of sustainable development. This paper will present the characteristics of the behavior of Cr-Mo steels during welding, based on experimental testing (macro and microstructural examination of the welded joint, technological tests – bend testing, hardness testing).

Keywords: Cr-Mo steels, welding, cracks, micro and macrostructure, hardness, sustainable development
JEL klasifikacija: Q55, Q56, L61

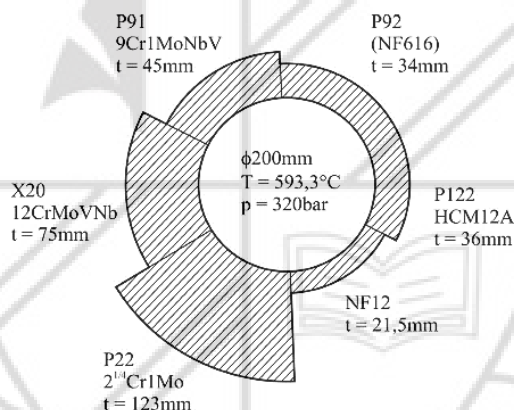
UVOD

Hrom molibden čelik grupe SA 387 Gr. 91 pripada najnovijoj generaciji hrom molibden čelika predviđenih za rad pri povišenim i visokim temperaturama i od kojih se zahtevaju posebna svojstva poput visoke vrednosti napona tečenja, dobre korozijske postojanosti, značajne otpornosti na oksidaciju i dobre otpornosti na puzanje

Prema temperaturnom području primene, čelici za rad na povišenim temperaturama se dele u četiri grupe: ugljenični (nelegirani), niskolegirani (u koju spada i Cr-Mo SA 387 Gr. 91 čelik), visokolegirani martenzitni i visokolegirani austenitni čelici.

Legirani hrom molibden čelik (Cr-Mo) SA 387 Gr.91 (P91) je namenjen za izradu posuda pod pritiskom, parovoda i gasnih instalacija u hemijskoj i petrohemijskoj industriji, kao i termoenergetskim postrojenjima, koje rade u uslovima povišene temperature (od 0,45 do 0,55 temperature topljenja), povišenog pritiska (radni napon $R \ll R_{p0.2}$) i korozijske sredine

Dobra otpornost na puzanje čelika P91 omogućava ostvarivanje komponenti postrojenja (parovoda i sabirnih cevi) znatno tanjih zidova u odnosu na druge vrste čelika, slika 1, čime se smanjuje toplotni gradijent u zidu cevi tokom starta i prekida rada i sprečava nastanak zamornih prslina kao velikog problema kod debelozidnih komponentenata. Takođe, smanjenje debljine zidova dovodi do uštede u materijalu, što se poklapa sa principima održivog razvoja.



Slika 1. Poređenje debljine zida cevi različitih čelika pri istim konstruktivnim uslovima

(Izvor: DIN 17175, "Seamless Tubes of Heat-resistant Steels", DIN Handbook 403 (English edition), Iron and steel, Quality standards 3, Pressure vessels and pipelines, 1993.)

Pored dobrih mehaničkih karakteristika na povišenim temperaturama, za ovaj čelik, a generalno i za celu grupu ovih čelika, važna je i zavarljivost. Treba napomenuti da se više od polovine ukupno proizvedenog čelika u svetu ugrađuje u zavarene konstrukcije. [1]

Pri projektovanju konstrukcija kao što su posude pod pritiskom, mostovi, brodovi, vazduhoplovi i vozila jedan od osnovnih ciljeva je da se njihove zahtevane performanse optimizuju sa stanovišta sveobuhvatne cene materijala, konstruisanja, izrade, eksploatacije i održavanja.

1. LEGIRANI ČELICI KLASA P/T91

Nove vrste materijala, poboljšanih karakteristika, među kojima su i Cr-Mo čelici, nastali su kao odgovor na sve intenzivniji razvoj industrije.

Upotreba čelika prvenstveno proizilazi iz njegovih upotrebnih svojstava odnosno mogućnosti postizanja dobre kombinacije visoke vrednosti napona tečenja, dobre korozijske postojanosti, značajne otpornosti na oksidaciju i dobre otpornosti na puzanje itd. Spomenuta svojstva zavise od hemijskog sastava, mikrostrukture, stanja, oblika i dimenzija gotovog proizvoda.

Postizanje dobrih svojstava omogućeno je legiranjem, hromom, molibdenom, vanadijumom, neobijumom i volframom. Navedeni legirajući elementi su skloni obrazovanju karbida i imaju ograničenu rastvorljivost u feritu

Veoma bitno je u kojoj meri se dodaju legirajući elementi. Iz tabele 1 u kojoj je prikazan hemijski sastav čelika SA 387 Gr.91 (P 91) prema ASTM/ASME standardima, se vidi da je sadržaj svakog od prisutnih elemenata, sa izuzetkom hroma ispod 1% i pripada grupi niskolegiranih čelika. Za postizanje dobre zavarljivosti, sadržaj ugljenika (C) je od 0,08 do 0,12% što je manje od 0,25%.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika SA 387 Gr. 91 [2 - 4]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Nb	Cu	N
0,08	0,30	0,20	max	max	8,0	max	0,85	0,18	max	0,06	max	0,03
0,12	0,60	0,50	0,015	0,01	9,5	0,40	1,05	0,25	0,04	0,10	0,1	0,07

U tabeli 2, date su deklarirane mehaničke osobine čelika P 91 na sobnoj temperaturi.

Tabela 2. Mehaničke osobine čelika SA 387 Gr. 91 [2 - 4]

Debljina, t, mm	Napon tečenja, R _{p0,2} MPa	Zatezna čvrstoća R _m , MPa	Izduženje, A, %,min	Energija udara, KV, J, min		
				-20°C	0°C	20°C
< 60	445	585 - 760	18	27	34	40
60 < t < 90	435	550 - 730	18	27	34	40

Tabela 3. daje uporedni pregled načina označavanja legiranog čelika klase 91 prema pojedinim standardima.

Tabela 3. Uporedne oznake i primenjeni standardi za čelik P91 [2 - 4]

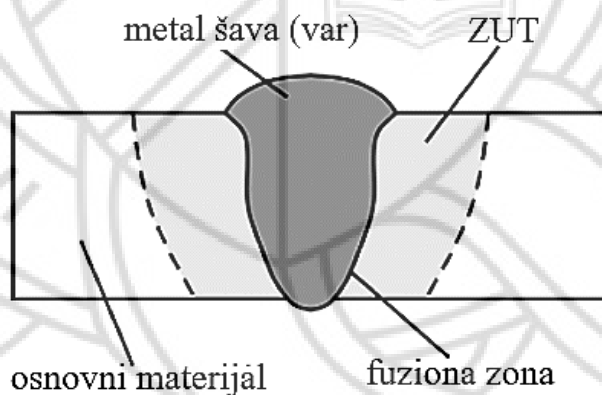
Država	Oznaka	Standard
Srbija	P91	SRPS EN 10216-2:2020
SAD	T91	ASTM A213/A1016
SAD	P91	ASTM A335/A999
SAD	SA387 Gr.91	ASME A213
SAD	SA387 Gr.91	ASME A335
Evropski standard	X10CrMoVNb9-1	EN 10216-2:2020 + A1:2019
Nemačka	X10CrMoVNb9-1	DIN EN 10216-2:2020 + A2:2007
Velika Britanija	Class 91	BS3059/3604
Francuska	TU Z 10CDVNb 09-01	NF A 49-213

2. ZAVARLJIVOST LEGIRANIH ČELIKA KLASA P/T91

Kvalitet zavarenih spojeva u velikoj meri određuje eksploatacijsku sigurnost i ekonomičnost konstrukcije.

Osnovni kriterijum zavarljivosti je odsustvo prslina i delova materijala zavarenog spoja povećane sklonosti prema krtom lomu. Prsline nastaju u različitim etapama izrade zavarenih konstrukcija i jedan su od osnovnih uzroka sniženja eksploatacione sigurnosti proizvoda.

Kod zavarenih spojeva, koji se obrazuju zavarivanjem topljenjem, mogu se uočiti sledeće zone, slika 2, [5]:



Slika 2. Zone zavarenog spoja [5]

- zona metal-šava (var) - zona formirana očvršćavanjem rastopljenog metala,
- zona stapanja (fuzionna zona) - nalazi se neposredno na granici zone topljenja,
- zona uticaja toplote (ZUT) – zona u kojoj se pri zagrevanju i hlađenju tokom zavarivanja odvijaju fazni i strukturni preobražaji, i
- zona osnovnog materijala -

Navedene zone se razlikuju po hemijskom sastavu, mikro i makro strukturi i drugim osobenostima.

3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Osnovni uslov koji mora zadovoljiti svaka zavarena konstrukcija je sigurnost i pouzdanost u uslovima eksploatacije. Da bi taj uslov bio zadovoljen, presudne su osobine zavarenog spoja nastale kao rezultat odvijanja fizičko-hemijskih transformacija tokom zavarivanja. Za detaljno poznavanje osobina zavarenih spojeva neophodna su eksperimentalna ispitivanja i studiozna analiza rezultata ispitivanja.

Kao polazni podatak o kvalitetu i primenljivosti zavarenog spoja služe karakteristike koje se dobijaju pri delovanju statičkog opterećenja (mehaničko-tehnološka ispitivanja) kojima se opisuju mehaničko ponašanje zavarenog spoja.

4.1. OSNOVNI MATERIJAL

Kao osnovni materijal za ispitivanje ponašanja zavarenog spoja, uzet je legirani čelik SA 387 Gr.91, proizveden u “Železarni ACRONI”, Jesenice, sledećeg hemijskog sastava, tabela 4., [6]:

Tabela 4. Hemijski sastav ispitivane šarže čelika SA 387 Gr.91, [6]

Element	%	Element	%	Element	%
C	0,129	Ni	0,01	Al	0,007
Si	0,277	Cu	0,068	Sn	0,005
Mn	0,443	Mo	0,874	W	0,016
P	<0,001	V	0,198	Co	0,009
S	<0,001	Ti	0,001	B	0,0005
Cr	8,25	Nb	0,056	N	0,031

4.2. DODATNI MATERIJAL

Iskustvo je pokazalo da je najbolje koristiti dodatni materijal sličnog hemijskog sastava kao i osnovni materijal.

U tabeli 5. date su karakteristike hemijskog sastava, a u tabeli 6. mehaničke osobine dodatnog materijala. [7,8]

Tabela 5. Hemijski sastav dodatnog materijala [7,8]

Dodatni materijal	Postupak zavarivanja	Hemijski sastav, %											
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Nb	N
C9 MV-1G	TIG	0,11	0,23	0,5	0,006	0,003	9,0	0,93	0,5	0,19	0,03	0,07	0,04
FOX C9 MV	REL 2,5 mm	0,09	0,19	0,55	0,01	0,006	8,5	1,00	0,5	0,19	0,1	0,04	0,05
FOX C9 MV	REL 3,2 mm	0,11	0,26	0,66	0,008	0,005	8,5	0,94	0,5	0,20	0,1	0,06	0,04

Tabela 6. Mehaničke osobine dodatnog materijala [7,8]

Dodatni materijal	Postupak zavarivanja	Napon tečenja, Rel/Rp _{0,2} , MPa	Zatezna čvrstoća, Rm, MPa	Izduženje A, %	Energija udara, KV, J
C9 MV-1G	TIG	≥ 530	≥ 620	≥ 17	≥ 50
FOX C9 MV	REL, 2,5mm	≥ 550	≥ 680	≥ 17	≥ 47
FOX C9 MV	REL, 3,2mm	≥ 550	≥ 680	≥ 17	≥ 47

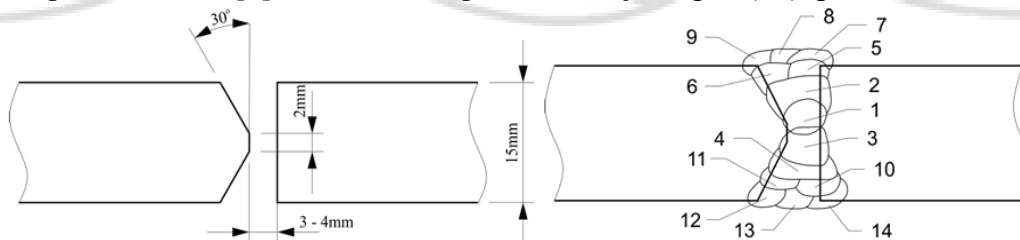
4.3. IZBOR IZVEDBE POSTUPKA ZAVARIVANJA

Zavarivanje ispitnih uzoraka je urađeno sa dva postupka i dodatna materijala:

2. **Korenski zavar** - TIG zavarivanje (dodatni materijal je žica oznake BOEHLER C9 MV-1G prečnika 2,4 mm),
3. **Ispuna** – REL zavarivanje (dodatni materijal su elektrode oznake FOX C9 MV prečnika 2,5 i 3,2 mm).

Hemijski sastav i mehaničke osobine dodatnog materijala date su u tabelama 5. i 6.

Kako postoje razne vrste zavarenih spojeva, za naša ispitivanja izabran je sučeoni zavareni spoj sa pravilnim simetričnim K-žlebom, slika 3, [9], dok su redosled i broj prolaza definisani u odnosu na debljinu ploča, slika 4, [9]. Kao zaštitni gas korišćen je Argon (Ar), protoka 12 lit/min.



Slika 3. Oblik šava za materijal SA 387 Gr. 91 [9]

Slika 4. Prolazi zavarivanja SA 387 Gr. 91: 1 – 4-TIG, žica prečnika 2,4 mm; 5 – 9-REL, elektroda prečnika 2,5 mm; 10 – 14-REL, elektroda prečnika 3,2 mm [9]

Pre zavarivanja vršeno je predgrevanje na 250°C. Tokom zavarivanja temperatura je održavana u intervalu 200°C÷300°C.

U cilju homogenizacije zavarenog spoja i preraspodele zaostalih napona, ploče su bile izložene termičkoj obradi.

Izgled sučeono zavarenih limova dimenzija 500 x 150 x 16 mm sa zavarenim spojem u sredini nakon termičke obrade dat je na slici 5.



Slika 5. Sučeono zavareni limovi legiranog čelika SA 387 Gr.91 (Izvor: autori)

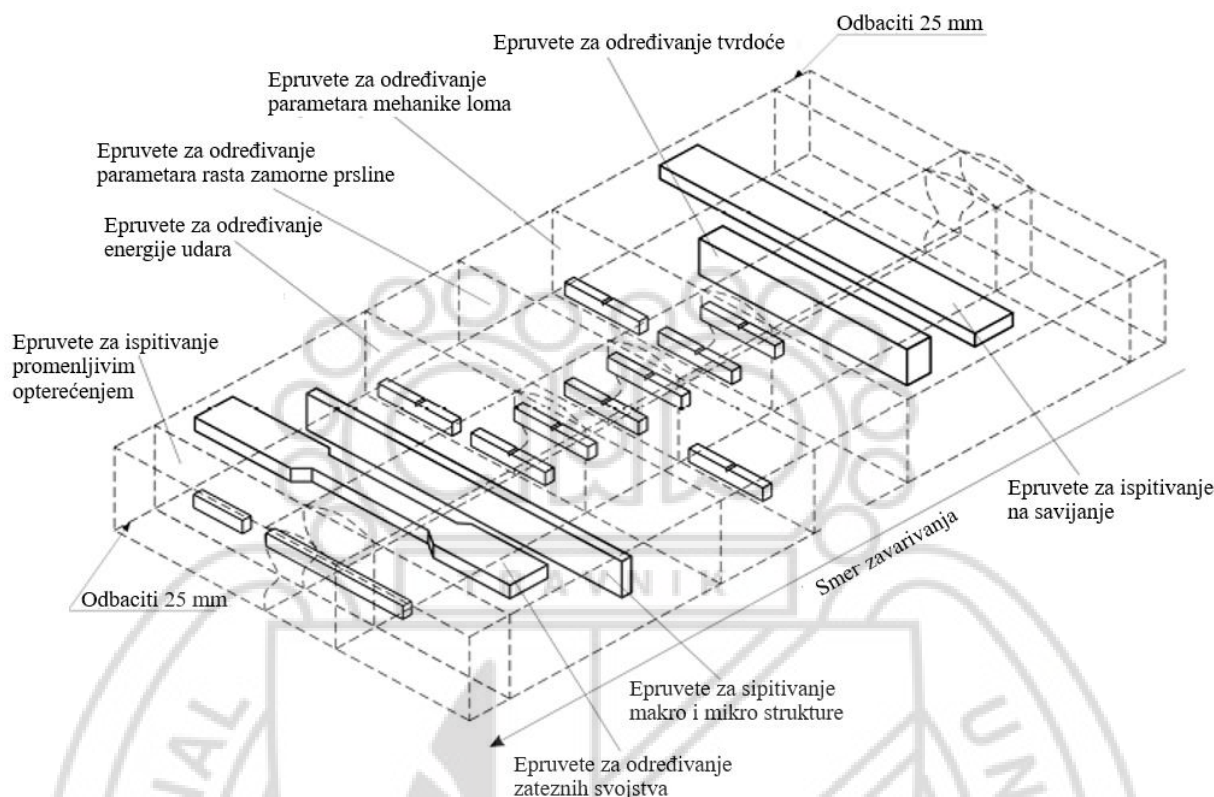
4.4. ISPITIVANJE ZAVARENOG SPOJA LEGIRANOG ČELIKA SA 387 Gr. 91

Pre uzorkovanja epruveta za ispitivanje, izvršena je kontrola zavarenog spoja metodama bez razaranja (NDT-Non Destructive Test): vizuelnim pregledom pomoću lupe uvećanja 10x, korišćenjem penetranta i radiografskom metodom, sve prema standardu SRPS EN ISO 15614-1:2017 [10]. Pri tome, nisu detektovane bilo kakve greške u zavarenom spoju.

4.5. PLAN UZORKOVANJA EPRUVETA ZA ISPITIVANJE

Nakon što je detektovano odsustvo grešaka u zavarenom spoju, prišlo se ispitivanju tehnoloških i mehaničkih ispitivanja metodama razaranja - destruktivnim metodama (DT – Destructive Test), da bi se odredile osobine otpornosti i deformacije osnovnog materijala i zavarenog spoja: čvrstoće, tvrdoće, elastičnosti, plastičnosti i energije udara.

Epruvete su vađene iz zavarenih ploča (slika 5), prema šemi datoj na slici 6.



Slika 6. Plan vađenja epruveta (Izvor: autori)

4.6. MAKRO I MIKROSTRUKTURNO ISPITIVANJE ZAVARENOG SPOJA

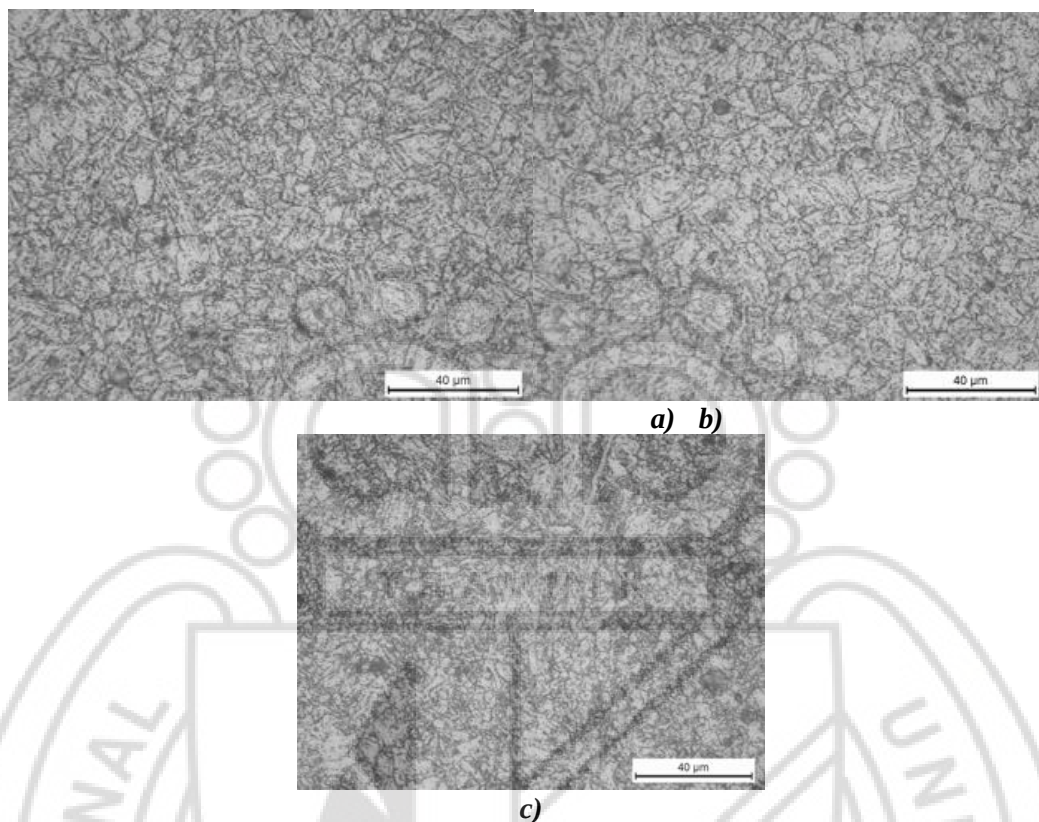
Ova ispitivanja se izvode da bi se utvrdila struktura ispitivanog materijala, odnosno, procenio kvalitet izvedenog spoja i primenjene tehnologije zavarivanja, prema standardu SRPS EN ISO 17639:2014 [11].

Na slici 7 dat je makroskopski snimak sučeono zavarenog spoja, sa kojeg je uočljivo da je zavarivanje urađeno iz više prolaza, polaganjem zavara u jednom sloju.



Slika 7. Makrostruktura zavarenog spoja čelika SA 387 Gr. 91 (Izvor: autori)

Na slici 8 (a,b,c) prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala (OM) i komponenti zavarenog spoja (zone uticaja temperature – ZUT i materijala šava - MŠ) legiranog čelika SA 387 Gr. 91.



Slika 8. a)-mikrostruktura OM čelika SA 387 Gr. 91; b)-mikrostruktura ZUT zavarenog spoja čeličnih limova SA 387 Gr. 91; c)-mikrostruktura MŠ zavarenog spoja čeličnih limova SA 387 Gr. 91 (Izvor: autori)

4.7. ISPITIVANJE TVRDOĆE

Vršeno je prema standardu SRPS EN ISO 9015:2013 [12], metodom Vikersa HV10, optrećenjem od 100N i uvećanjem 100x za merenje otiska.

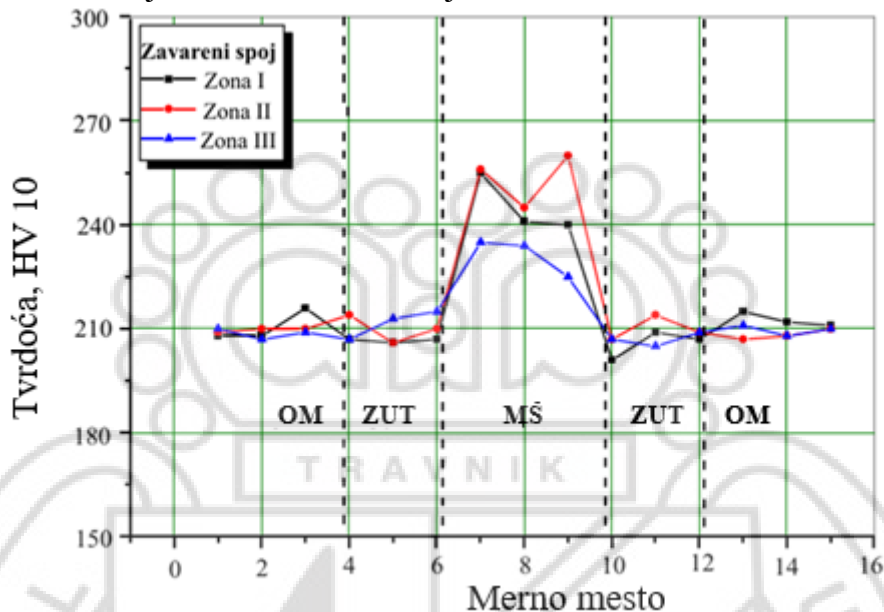
Tvrdoća je merena linijski OM – ZUT – MŠ – ZUT – OM.

Rezultati merenja predstavljeni su u tabeli 7, dok je dijagramski prikaz dat na slici 9.

Tabela 7. Rezultati merenja tvrdoće na zavarenom spoju čelika SA 387 Gr.91 (Izvor: autori)

Mesto merenja	Tvrdoća HV10														
	OM			ZUT			MŠ			ZUT			OM		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Zona I	208	208	216	207	206	207	255	241	240	201	209	207	215	212	211
Zona II	209	210	210	214	206	210	256	245	260	207	214	209	207	208	210
Zona III	210	207	209	207	213	214	235	234	225	207	205	209	211	208	210

Na osnovu tabele i dijagrama, uočava se da je najveća tvrdoća, tvrdoća materijala šava (225-260 HV10). U zoni uticaja temperature, tvrdoća se kretala od 201-210 HV10, a u osnovnom materijalu 207-215 HV10 što ukazuje na trend uravnoteženja vrednosti tvrdoće.

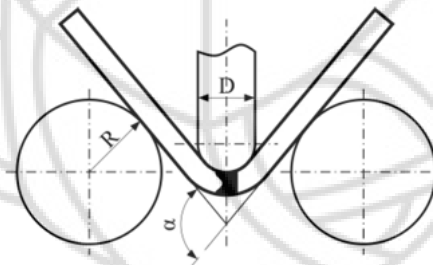


Slika 9. Promena vrednosti tvrdoće u zavisnosti od mesta ispitivanja (Izvor: autori)

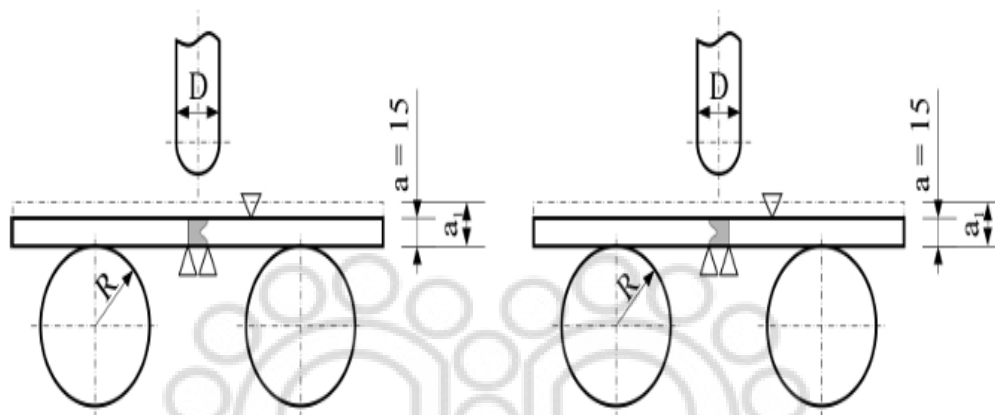
4.8. TEHNOLOŠKA ISPITIVANJA – ISPITIVANJE SAVIJANJEM

Svrha ovog ispitivanja je utvrđivanje sposobnosti materijala da se deformiše pod određenim uglom i sprovodi se prema standardu SRPS EN ISO 5173:2013 [13], čime se dobija potpunija slika o ponašanju zavarenog spoja, koji predstavlja heterogenu strukturu.

Dimenzije epruveta su 300 x 300 x 15 mm. Epruvete se savijaju trnom ili valjkom sa uglom savijanja od 180° na mehaničkoj kidalici. Na slici 10, data je shema postupka merenja ugla savijanja, a na slici 11 shema postupka savijanja zavarenog spoja oko korena i oko lica.



Slika 10. Merenje ugla pri savijanju (α) [13]



Slika 11. Savijanje epruvete zavarenog spoja [13]

U toku ispitivanja na epruvetama se ni u jednom pravcu ne smeju javiti greške sa dužinom većom od 3 mm. Rezultati ispitivanja na savijanje dati su u tabeli 8, odakle se može konstatovati de je zavarivanje izvedeno kvalitetno, jer pri dostizanju ugla od 180° nije došlo do pojave prslina te se rezultati ispitivanja smatraju zadovoljavajućim.

Tabela 8. Rezultati ispitivanja savijanjem (Izvor: autori)

Oznaka uzorka	Ugao savijanja oko lica zavara, °	Oznaka uzorka	Ugao savijanja oko korena zavara, °	Ocena radiograma
ZS _L - 1	180 (nema prslina)	ZS _K - 1	180 (nema prslina)	2
ZS _L - 2	180 (nema prslina)	ZS _K - 2	180 (nema prslina)	2

ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata ispitivanja koja su izvršena i prikazana u ovom radu, a odnose se na statička ispitivanja, može se zaključiti da niskolegirani CR-Mo čelici grupe SA 387 Gr.91 dobro podnose rad na povišenim temperaturama (do 600°C), povišenim pritiscima i korozionim sredinama. Takođe, imaju visoku otpornost na puzanje (tema je nekog drugog rada!), što uz pravilno odabranu tehnologiju zavarivanja, sprečava pojavu prslina i time povećava vek trajanja komponenti procesne opreme i, uz ranije spomenutu uštedu materijala, uklapa se u koncept održivog razvoja.

LITERATURA

- [1] Burzić, Z., "Savremene metode provere mehaničko-tehnoloških osobina zavarenih spojeva–Deo 2", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol. 47, No. 3, str. 151-158, 2002.
- [2] ASTM A335/A335M-19a, "Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy Steel Pipe for High-Temperature Service", ASTM International, West Conshohocken, PA, Book of Standards Volume 01.01, 2019, www.astm.org.
- [3] ASTM A387/A387M-17a "Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, Chromium-Molybdenum", ASTM International, West Conshohocken, PA, Book of Standards Volume 01.04, 2017, www.astm.org.
- [4] EN 10216-2:2013, "Seamless steel tubes for pressure purposes-Technical delivery conditions-Part 2: Non-alloy and alloy steel tubes, with specified elevated temperature properties", CEN-CENELEC Management Centre, Brussels, 2013.
- [5] V.N. Volčenko, V.M. Iampoljski, V.A. Vinokurov, V.V. Frolov, "Teoria svaročniih procesov", Višaia škola, Moskva, 1988.
- [6] Milivoje Jovanović: *Istraživanje uticaja promenljivog opterećenja i greške tipa prsline na procenu integriteta zavarenih komponenta procesne opreme za povišene radne temperature*, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, 2022
- [7] https://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/01112015000000B_Boehler%20FOX%20C%209%20MV_ce.pdf
- [8] https://www.capilla-gmbh.com/wp-content/uploads/Katalog_03_en.pdf
- [9] Burzić, M: EUREKA Project E!9983 2016-2018: "Optimal welding parameters of SA 387 Gr.91 thick steel plates in corrosive environment", IC Mechanical Faculty Belgrade, 2018.
- [10] SRPS EN ISO 15614-1:2017: "Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala-Klasifikacija tehnologije zavarivanja-Deo 1:Elektrolučno i gasno zavarivanje čelika"
- [11] SRPS EN ISO 17639:2014 "Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva"
- [12] SRPS EN ISO 9015:2013 "Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje tvrdoće – Deo 1: Ispitivanje tvrdoće elektrolučno zavarenih spojeva"
- [13] SRPS EN ISO 5173:2013 "Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje savijanjem"