

## » Zavarljivost niskolegiranih konstrukcijskih čelika visoke čvrstoće

**Andrej Skumavc**  
**Tomaž Vuherer**  
**Jan Foder**  
**Damjan Klobčar**

Zavarljivost je pojam, kojeg stručnjaci za zavarivanje primjenjuju za opis ponašanja određenog materijala tijekom zavarivanja i nakon njega. Na svojstva zavarenog spoja ne utječe samo čelik sa svojim kemijskim sastavom, već i postupak i uvjeti zavarivanja te oblik zavarenog spoja u određenoj zavarenoj konstrukciji te primijenjen dodatni materijal. U članku ćemo stoga pregledati svojstva zavarenih spojeva na čelicima S690QL1 i S1100QL. Oba čelika prema svojim svojstvima i namjeni spadaju u grupu tzv. niskolegiranih konstrukcijskih čelika visoke čvrstoće, koje krajnji korisnici u konstrukcije zavaruju u poboljšanom isporučenom stanju. Razlika između tih čelika je u tome, da za čelik S1100QL standard EN ISO 10025-6 za sada još nije dopunjen i posljedično nemamo propisane minimalna zahtijevana mehanička svojstva i ograničenja u kemijskom sastavu. U članku je za oba čelika okvirno prikazan tehnološki put izrade, a veći je naglasak dan na prikazivanju ključnih svojstava lučno zavarenih spojeva, koje smo utvrdili na temelju obavljenih ispitivanja MAG postupaka zavarivanja.

Niskolegirani konstrukcijski čelici visoke čvrstoće primjenjuju se za one konstrukcije, kod kojih se zahtijeva što veći omjer između nosivosti i vlastite mase [1]. Tipične konstrukcije od tih čelika su mobilna dizala i cestovna te željeznička teretna vozila. Glavna mehanička svojstva i kemijski sastav su definirani standardom EN ISO 10025-6: Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika - 6. dio: Tehnički uvjeti isporuke za plosnate proizvode od konstrukcijskih čelika s visokom granicom razvlačenja u poboljšanom stanju [2]. S povećanjem naprezanja tečenja čelika, preko snižavanja debljine stijenki, utječemo na niže troškove zavarivanja. Smanjuje se i potrošnja dodatnih materijala, a isto tako se skraćuje i vrijeme potrebno za zavarivanje.

Za postizanje visokih naprezanja tečenja, rastezne čvrstoće, kao i žilavosti pri niskim pogonskim temperaturama sve do -60 °C, ti su čelici izrađeni s posebnim kemijskim sastavom s dodacima mikrolegiranih elemenata, kao što su Nb, Ti, V i B. Titan se dodaje za zaštitu bora i stvaranje fino izlučenih TiN, koji dodatno pomažu finoiznatost čelika. Što je manja veličina kristalnih zrna, veće je naprezanje tečenja i žilavost čelika. Tu poveznicu poznamo kao Hall-Petch-ovu jednadžbu [3]. S povišenjem temperature, prije svega tijekom postupka lučnog zavarivanja, u ZUT (zona utjecaja topline) dolazi do rasta kristalnih zrna. Austenitna zrna rastu s kvadratnom ovisnošću o temperaturi. Posljedica toga je pad naprezanja tečenja, rastezne čvrstoće, istezanja, kontrakcije i žilavosti. Upravo zbog tih čimbenika zavarivanju tih čelika je potrebno posvetiti veću pozornost.

Osnovni legirni elementi tih čelika su Cr, Mn, Ni i Mo. S poveća-

njem sadržaja tih elemenata, krivulja u CCT dijagramu se pomiče u desno, prema duljem transformacijskom vremenu, što pomaže u većoj prokaljivosti čelika po debljini ploče. Homogena mikrostruktura po debljini ploče je osnovni uvjet za postizanje zahtijevanih mehaničkih svojstava. Isto tako je ključno, da je u čeliku prisutno što manje nemetalnih uključaka, koji negativno utječu prije svega na žilavost čelika. Upravo s tom namjerom tijekom procesa izrade čelika u čeličani moramo imati kontrolu nad sadržajem elemenata, kao što su P, S, N, O i H.

### Proizvodni proces čelika

Niskolegirani konstrukcijski čelici visoke čvrstoće (eng. HSLA čelici – high strength low alloy) su izrađeni uz sljedeći redoslijed tehnoloških koraka:

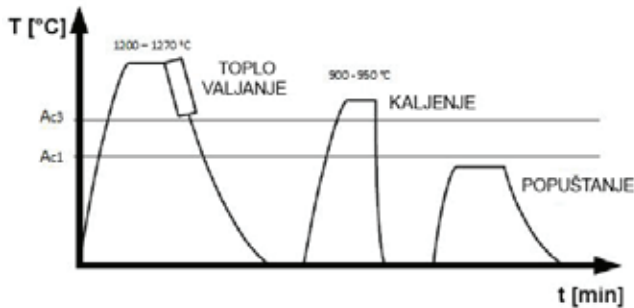
- ČELIČANA – pretaljanje čeličnog otpada, dezoksidacija i rafiniranje taljevine, legiranje taljevine u granice zahtijevane analizom, lijevanje čelika na uređaju s kružnim loncem nazvanim konti lijev.
- VRUČA VALJAONICA – valjanje slabova u ploče, ravnjanje pripremake.
- PRERADA DEBELOG LIMA – izvedba toplinske obrade (kaljenje i popuštanje), pjeskarenje i ravnjanje ploča, bočno obrezivanje i pakiranje.
- KONTROLA KVALITETE – izuzimanje uzoraka i izvedba nerazornih i razornih ispitivanja.

Ključni korak za postizanje odgovarajućih mehaničkih svojstava je provedba popuštanja. Nakon kaljenja čelik naime ima iznimno visoku čvrstoću pri relativnom malom istezanju i žilavosti. Za povišenje navedenih svojstava stoga provodimo popuštanje martenzi-



**Andrej Skumavc, Jan Foder** • SIJ Acroni d.o.o.  
**Tomaž Vuherer** • Fakulteta za strojništvo Maribor  
**Damjan Klobčar** • Fakulteta za strojništvo u Ljubljani

tne mikrostrukture. Čitav dijagram tijeka temperatura od valjanja, kaljenja do popuštanja je prikazan dijagramom na Slici 1.



» Slika 1: Tijek temperature tijekom valjanja, kaljenja i popuštanja [4]

## Eksperimentalni dio

### Podaci o čelicima

Pokus postupaka zavarivanja smo proveli na čeliku S690QL1 debljine 25 mm i S1100QL debljine 15 mm, koje s komercijalnim imenom SIMAX 700 i SIMAXX 1100 proizvodi SIJ Acroni Jesenice. Kemijski sastav čelika je prikazan Tablicom 1.

S690QL1 (W.Nr.: 1.8988)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	B
0,17	0,4	1,6	0,012	0,002	1,0	1,0	0,50	0,30	0,004
S1100QL (W.Nr.: 1.8942)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	B
0,21	0,50	1,60	0,012	0,002	1,20	1,20	0,60	0,30	0,005

» Tablica 1: Maksimalni sadržaj legirnih elemenata u čelicima S690QL1 i S1100QL [5]

Mehanička svojstva čelika S690QL1 su propisana standardom EN ISO 10025-6, a za čelik S1100QL su garantirane samo preko kataloga proizvođača čelika. Mehanička svojstva oba čelika, koja su bila primijenjena u pokusima postupaka zavarivanja, dana su u Tablici 2.

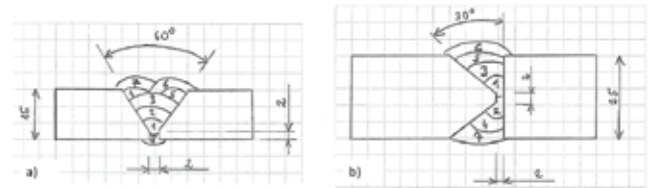
Čelik	Naprezanje tečenja $R_{p0,2}$ [MPa]	Rastezna čvrstoća $R_m$ [MPa]	Istezanje $A_5$ [%]	Žilavost KV2 po-prечно [J]
S690QL 1.8988 (svojstva propisana prema EN ISO 10025-6)	$\geq 690$	770 – 940	$\geq 14$	27 (pri $T = -60$ °C)
S1100QL 1.8942 (svojstva dobivena od strane proizvođača)	$\geq 1100$	$\geq 1150$	$\geq 10$	27 (pri $T = -40$ °C)

» Tablica 2: Mehanička svojstva čelika primijenjenih za ispitivanje postupaka zavarivanja

Obzirom na standard ISO/TR 15608 [6], oba čelika spadaju u grupu 3.2, koja propisuje finoizrnat čelik u poboljšanom (QT) stanju s naprežanjem tečenja  $R_{eh} > 690$  MPa. Na oba čelika je bio obavljen pokus postupka zavarivanja u skladu s EN ISO 15614 [7]. Za zavarivanje čelika S1100QL smo primijenili žicu proizvođača Böhler, oznaka X90-IG, a za čelik S690QL1 žicu proizvođača SIJ Elektrode Jesenice, oznaka MIG 75.

### Priprema zavarenih spojeva i redoslijed polaganja slojeva zavara

Priprema zavarenih spojeva je bila provedena na način, kako je prikazano na Slici 2. Zavareni spoj na čeliku S690QL1 je bio pripremljen u obliku slova K s ciljem točnog pozicioniranja zarez na uzorcima za ispitivanje žilavosti u ZUT zavarenog spoja.



» Slika 2: Priprema zavarenih spojeva i polaganje slojeva zavara a) S1100QL i b) S690QL1

Podaci o temperaturama predgrijavanja, temperatura između pojedinih slojeva zavara i unos energije, koji su bili primijenjeni za svaki od izrađenih zavarenih spojeva, prikazani su u Tablici 3 i Tablici 4.

Varek	Napon zavarivanja [V]	Struja zavarivanja [A]	Brzina zavarivanja [mm/s]	$T_p^{**}/T_i^{***}$ [°C]	Unos energije $Q^*$ [kJ/mm]
1	17,4	137	2,84	150	0,67
2	21,4	205	3,29	150	1,07
3	21,4	214	2,80	150	1,31
4	21,7	216	5,59	170	0,67
5	23,2	217	4,89	175	0,82
6	20,3	201	3,08	185	1,06
7	22,6	209	3,10	190	1,22
8	22,7	206	2,92	180	1,28

» Tablica 3: Parametri zavarivanja na spoju čelika S1100QL | \* uzet u obzir faktor  $k = 0,8$  / \*\* temperatura predgrijavanja / \*\*\* temperatura između slojeva zavara

Varek	Napon zavarivanja [V]	Struja zavarivanja [A]	Brzina zavarivanja [mm/s]	$T_p^{**}/T_i^{***}$ [°C]	Unos energije $Q^*$ [kJ/mm]
1	18,0	165	4,16	100	0,57
2	25,5	235	4,66	110	1,01
3	27,0	240	5,67	110	0,90
4	31,0	290	6,66	120	1,08
5	26,0	245	6,33	130	0,79
6	26,5	250	5,33	135	0,96
7	26,0	240	4,00	135	1,11

» Tablica 4: Parametri zavarivanja na spoju čelika S690QL1 | \* uzet u obzir faktor  $k = 0,8$  / \*\* temperatura predgrijavanja / \*\*\* temperatura između slojeva zavara

## Rezultati pokusa

### Rastezno ispitivanje

Poprečno rastezno ispitivanje zavarenog spoja bilo je provedeno u skladu sa standardom SIST EN ISO 4136 [8]. Na spoju od čelika S690QL1 naprežanje tečenja i rastezna čvrstoća spoja su viši od minimalno propisane granice za osnovni materijal. Lom ispitnog tijela je bio detektiran u području osnovnog materijala. A na zavarenom spoju od čelika S1100QL detektirana je prilično niža vrijednost naprežanja tečenja kao i rastezne čvrstoće, od minimalno zahtijevana za osnovni materijal. Govorimo o tzv. nejednakosti čvrstoće zavarenog spoja, što u engleskom jeziku nazivamo pojmom »undermatching«. Podaci o mehaničkim svojstvima oba zavarena spoja su prikazani u Tablici 5.

Zavareni spoj	Naprežanje tečenja $R_{p0,2}$ [MPa]	Rastezna čvrstoća $R_m$ [MPa]	Pozicija loma
S1100QL / X90-IG	959	1012	zavar
S690QL1 / MIG 75	707	789	osnovni materijal

» Tablica 5: Svojstva čvrstoće zavarnih spojeva

### Žilavost zavarenog spoja

Žilavost zavarenog spoja smo mjerili na uzorcima s pozicijom zarezu u zavaru (VWT) i zarezom u ZUT spoja u skladu sa standardom EN ISO 9016 [9]. Obje vrste čelika imaju na obje ispitivane lokacije žilavost višu, nego li je propisana za OM. Rezultati su prikazani u Tablici 6.

S1100QL / X90-IG			S690QL1 / MIG 75		
Pozicija zarezu	Vrijednost KV2 [J] T = -40 °C	Prosjeck [J]	Pozicija zarezu	Vrijednost KV2 [J] T = -60 °C	Prosjeck [J]
VWT 0/2	37	37	VWT 0/2	50	46
VWT 0/2	35		VWT 0/2	43	
VWT 0/2	40		VWT 0/2	46	
VHT 2/2	76	89	VHT 1/2	134	122
VHT 2/2	97		VHT 1/2	97	
VHT 2/2	94		VHT 1/2	t135	

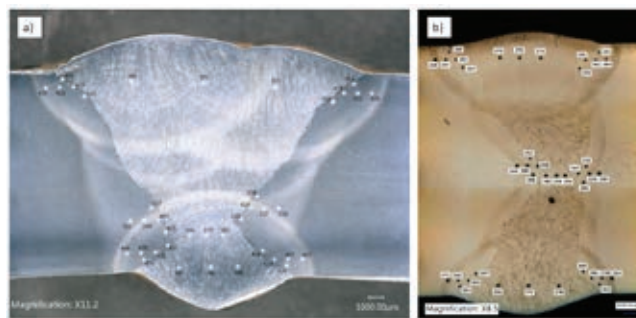
» Tablica 6: Žilavostne lastnosti zvarnih spojev.

### Tvrdoća

Mjerenja tvrdoće na zavarenim spojevima su bila provedena u skladu sa standardom EN ISO 9015 [10]. Za oba čelika je sa standardom EN ISO 15614-1 propisana najviša tvrdoća 450 HV10. Vrijednosti tik ispod granice standardna bile su izmjerene na spoju od čelika S1100QL, prije svega zbog relativno visoke vrijednosti ugljika i ekvivalenta ugljika CEV, koji iznosi 0,67. Na spoju od čelika S690QL1 vrijednosti su sigurno ispod granice 400 HV10. Rezultati mjerenja su prikazani na Slici 3 i Slici 4.

Na temelju dva obavljena pokusa postupaka zavarivanja, bilo je utvrđeno, da s povećanjem čvrstoće čelika dolazimo do problema izbora odgovarajućih dodatnih materijala, koji još osiguravaju spojeve s naprežanjem tečenja višim od naprežanja tečenja osnovnog materijala. Taj problem je prisutan kod zavarivanja čelika, koji imaju naprežanje tečenja više od 960 MPa. Povećanje ugljika i ekvivalenta ugljika CEV dovodi do porasta tvrdoće do 450 HV10 blizu linije spajanja zavarenoga spoja, što je bilo utvrđeno preko mjerenja tvrdoće na zavarenom spoju od čelika S1100QL. Bez obzira na vrstu primijenjenog čelika u zavarenom spoju (S690QL1 ili S1100QL), s odgovarajućom kontrolom parametara zavarivanja

možemo osigurati žilavost u zavaru i ZUT-u iznad minimalno zahtijevane vrijednosti 27 J.



» Slika 3: Rezultati mjerenja tvrdoće a) spoj na čeliku S1100QL i b) spoj na čeliku S690QL1

### Literatura

- [1] I. Samardžić, A. Čorić, M. Dunder, "Weldability investigation o fine-grained S1100QL steel", *Metabk*, 55, 3, 2016, pp. 453-456.
- [2] EN ISO 10025-6 (2019), Hot rolled products of structural steels – Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition.
- [3] N. J. Petch, "The influence of grain boundary carbide and grain size on the cleavage strength and impact transition temperature of steel", *Acta Metallurgica*, 34, 1986, pp. 1387-1393.
- [4] A. Smolej, Characterisation of gas metal arc welded butt joints of high-strength low-alloy S1100QL steel, Master thesis, University of Ljubljana – Faculty of Mechanical engineering, Slovenija, 2021.
- [5] SIJ Acroni d.o.o., Interni katalog kemičnih sestav, 2022.
- [6] ISO/TR 15608 (2013), Welding – Guidelines for metallic materials grouping system.
- [7] EN ISO 15614-1 (2004), Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys.
- [8] EN ISO 4136 (2011), Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test.
- [9] EN ISO 9016 (2012), Destructive tests on welds in metallic materials – Impact test – Test specimen location, notch orientation and examination.
- [10] EN ISO 9015-1 (2012), Destructive tests on welds in metallic materials – Hardness testing – Part 1: Hardness test on arc welded joints.

## » Headmade Materials se pridružuje udruženju ColdMetalFusion

Tvrtka Headmade Materials GmbH, Wuerzburg, Njemačka, je najavila pridruživanje udruženju ColdMetalFusion Alliance. ColdMetalFusion je savezništvo vodećih u industriji s iskustvima na području sinteriranja, aditivne proizvodnje i klasične industrijske proizvodnje. Članovi udruženja, svojim kupcima u metalskoj industriji, zajednički osiguravaju usluge, opremu, materijal, programsku opremu i znanje.

Tvrtka Headmade Materials je već predstavila materijale 316L i Ti6Al4V, a namjerava predstaviti i nehrđajući čelik 17/4PH i alatni čelik M2 za široku paletu aplikacija. S tim mogućnostima tvrtka vodi kupce od razvoja aplikacije i materijala po mjeri, sve do opsežne proizvodnje.

"Headmade Materials trenutačno razvija široku paletu ključnih materijala za dizajnere aplikacija. Zbog brzog razvoja u prethodnoj

godini, vrlo smo inspirirani s budućnošću, u kojoj namjeravamo našim kupcima osiguravati individualna rješenja," izjavio je Christian Staudigel, dopredsjednik uprave tvrtke Headmade Materials.

Christian Fischer, izvršni direktor tvrtke Headmade Materials, je dodao: "Zahvaljujući programu ColdMetalFusion smo razvili aplikacije, s pomoću kojih kupcima možemo pomoći promijeniti pravila igre na njihovom tržištu. Kako bi to omogućili širokom krugu, raduje nas, da ćemo zajedno s udruženjem oblikovati čvrste i pouzdane standarde."

Vizija udruženja ColdMetalFusion bila bi industrijalizacija aditivne proizvodnje sa zajedničkim standardima sinteriranja i AM. Članovi udruženja ColdMetalFusion dijele standarde, ali i zajedničku kulturu i način razmišljanja. Kao industrijalci s dugom poviješću, članovi imaju zahtjeve za robusnošću i neprekinutim djelovanjem tvornice 24 sata na dan, 7 dana u tjednu. Očekuje se, da će pridruživanje tvrtke Headmade Materials bitno utjecati na ubrzanje ostvarenja vizije ColdMetalFusion.

» [www.headmade-materials.de](http://www.headmade-materials.de)