

Srđan Bulatović<sup>1</sup>

# ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA NISKOLEGIRANOG ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE KLASSE 700 MPa

## INVESTIGATION OF WELDED JOINTS OF 700 MPa GRADE HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEEL

### Stručni rad / Professional paper

#### Rad primljen / Paper received:

Jun 2023.

#### Rad prihvaćen / Paper accepted:

Avgust 2023.

**Ključne reči:** niskolegirani čelici povišene čvrstoće, elektrolučno zavarivanje, mehaničke osobine

### Rezime

Zahtevi ekonomične potrošnje energije i sirovina upućuju proizvođače čelika na proizvodnju zavarljivih čelika povišene čvrstoće, a projektante i konstruktore na njihovu primenu u zavarenim konstrukcijama. Primena niskolegiranih čelika povišene čvrstoće (HSLA) u metalnim konstrukcijama je sve zastupljenija pre svega zbog njihovog svojstva oblikovanja gde zavarljivost ima poseban značaj. Stoga se vremenom razvio čitav niz postupaka ispitivanja kojima je cilj da se svojstva zavarenog spoja pomenutih materijala što bolje upoznaju i tako što racionalnije iskoriste. Analizirana svojstva kao što su ispitivanje zatezanjem, udarna žilavost i tvrdoća, daju širu sliku o samim zavarenim spojevima niskolegiranih čelika i njihovim osobinama i upoređuju se sa zahtevima međunarodnih standarda iz oblasti elektrolučnog zavarivanja.

### Adresa autora / Author's address:

Institut za ispitivanje materijala a.d. Bulevar vojvode Mišića 43,  
Beograd, Srbija

email: [srdjan.bulatovic@institutims.rs](mailto:srdjan.bulatovic@institutims.rs)

**Keywords:** high strength low alloy steel, arc welding, mechanical properties

### Abstract

The requirements of economical consumption of energy and raw materials direct steel producers to the production of weldable steels of high strength, and designers and constructors to their application in welded constructions. The use of high strength low alloy steel (HSLA) in metal constructions is increasingly prevalent, primarily due to their forming properties, where weldability is of particular importance. Therefore, over time, a whole series of test procedures has been developed, the aim of which is to better understand the properties of the welded joint of the mentioned materials and to use them more rationally. The analyzed properties, such as tensile testing, impact toughness and hardness, give a broader picture of the welded joints of high strength low alloy steel and their properties and compared with the requirements of international standards in the field of arc welding.



## 1. Uvod

### 1.1 Opšte činjenice o niskolegiranim čelicima povišene čvrstoće

Kako i svi materijali, tako i niskolegirani čelici povišene čvrstoće imaju svoju primenu u savremenim konstrukcijama, uz celokupno prisustvo svih prednosti i mana, pre svega zbog svoje specifičnosti u različitim uslovima opterećenja. Prednosti niskolegiranih čelika povišene čvrstoće u odnosu na ostale konstrukcijske čelike su:

- smanjena masa konstrukcije,
- povećana nosivost,
- povećan vek trajanja konstrukcije i
- manji troškovi izrade, odnosno ekonomičnija proizvodnja.

Pomenuti čelici svoju veliku primenu nalaze u brodogradnji, posudama pod pritiskom, transportnim sredstvima, nuklearnim postrojenjima i nosećim čeličnim konstrukcijama [1]. Zbog svoje cene i nivoa proizvodne tehnologije uz nizak sadržaj ugljenika (od 0.1 do 0.3 %), imaju i nizak sadržaj sumpora, fosfora i drugih primesa, a odlikuju se i povećanom čistoćom u odnosu na gasove i nemetalne uključke [2]. Važno je pomenuti da zbirni sadržaj svi legirajućih elemenata ne prelazi 5 %. Osnovni legirajući elementi koji se dodaju niskolegiranim čelicima povišene čvrstoće su: hrom, mangan, silicijum, nikl, molibden i vanadijum [3].

### 1.2. Zavarljivost HSLA čelika i udarna žilavost

Kada se govori o legiranju i termomehaničkoj obradi ovih čelika mora da se napomene da nisu svi niskolegirani čelici podjednako pogodni za zavarivanje. Što je čelik više legiran elementima koji obrazuju krte strukture pri zavarivanju (uključujući i ugljenik), to je lošija zavarljivost. Karakteristična je osobina obrazovanja zakaljive strukture u zoni uticaja toplote (ZUT), što povećava sklonost ka pojavi krtog loma [1, 3]. Zbog toga se izbor čelika, od kojih se očekuje izrada sigurnih konstrukcija, ne vrši samo na osnovu pokazatelja čvrstoće osnovnog metala (OM), već se uzimaju u obzir i druga mehaničko-tehnološka svojstva kako OM tako i celog zavarenog spoja.

Spajanje zavarivanjem je vrlo čest postupak oblikovanja metalnih materijala koji ima niz prednosti u odnosu na druge postupke spajanja metala ili izrade konstrukcija. Sve veća primena čelika povišene čvrstoće prilikom izrade savremenih konstrukcija iziskuje poseban osvrt na

ocenu pogodnosti tih materijala za zavarivanje odnosno za ocenu njihove zavarljivosti [3, 4]. Pojam zavarljivosti metala obuhvata sveukupnost karakteristika OM koje su određene njegovim odnosom prema promenama koje se odigravaju pri zavarivanju i sposobnosti da se uz izabrani tehnološki režim obezbedi sigurnost u eksploataciji zavarenog spoja [5]. Pored svojstava OM, zavarljivost je određena i elementima tehnološkog postupka zavarivanja (način zavarivanja, režim zavarivanja, sastav dodatnog materijala za zavarivanje, tip i karakter zaštite i dr.).

Jasno je da od vrste čelika i uslova eksploatacije zavarene konstrukcije zavisi i skup pokazatelja koji definišu zavarljivost. Što je veća čvrstoća čelika i što su složeniji uslovi eksploatacije, to je i veći broj pokazatelja zavarljivosti, pa se samim tim povećava i obim ispitivanja koja treba uraditi [1]. Obim ispitivanja, odnosno izbor metoda za ocenu zavarljivosti čelika zavisi od namene konstrukcije i svojstava osnovnog i dodatnog materijala za zavarivanje. Po pravilu, povećanje stepena legiranja i čvrstoće čelika doprinosi pogoršanju njegove zavarljivosti. Uvođenjem novih postupaka zavarivanja uz napredak u tehnologiji, mnogi materijali loše zavarljivosti su prevedeni u grupu zadovoljavajuće zavarljivosti, ali ostaje činjenica da ukoliko je materijal kvalitetniji, to je i broj podataka koji ocenjuju zavarljivost veći a njihove međusobne zavisnosti složenije. Sigurnost zavarenih spojeva u velikoj meri određuje eksploatacionu sigurnost i ekonomičnost konstrukcije.

Prisustvo grešaka u zavarenim spojevima, neispunjenje traženih svojstava, oblika i homogenosti šava, kao i svojstava i heterogenosti u ZUT, može poremetiti čvrstoću i druge eksploatacijske karakteristike konstrukcije. U uslovima izrade zavarene konstrukcije, greške nastaju dosta često. Broj grešaka je realni pokazatelj racionalnosti primenjenog tehnološkog procesa zavarivanja, pogodnosti i uslova korišćenja materijala koji se koristi u procesu zavarivanja, stručnosti kadra, postojanja neophodnih uslova koje zahteva radno mesto zavarivača kao i opšteg tehničkog nivoa proizvodnje [6]. Svako odstupanje od zahteva definisanih tehničkom dokumentacijom, koje može da se odnosi na bilo koju karakteristiku zavarenog spoja niskolegiranih čelika povišene čvrstoće se podrazumeva pod pojmom greške. Shodno tome, greška može biti unutrašnja (prslina, uključak) i spoljna (nehomogenost i geometrijsko odstupanje oblika i dimenzija). Greške se otkrivaju ispitivanjem bez razaranja, najčešće ultrazvukom,



radiografski, penetrantima i magnetnim fluksom. Takođe, greške u zavarenom spoju se dele na:

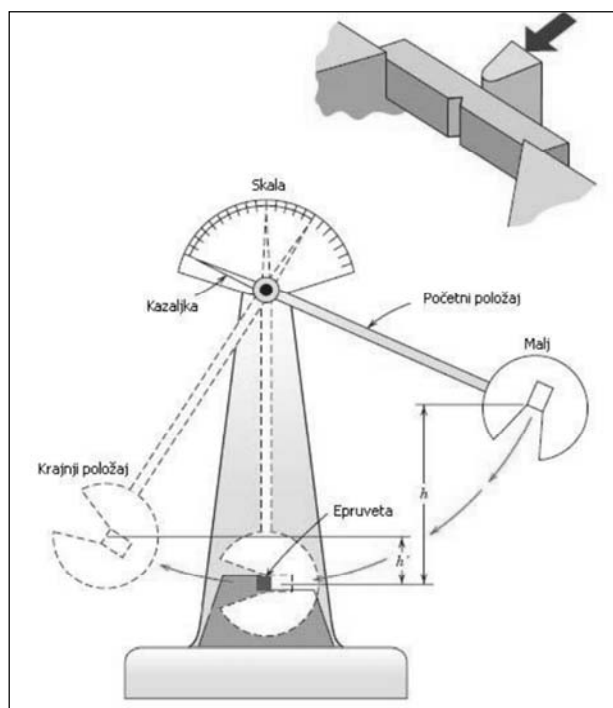
1) greške vezane za metalurške, termičke i hidrodinamičke pojave, koje prate proces rastapanja, formiranja i kristalizacije istopljenog metala i očvršćavanje zavarenog spoja. Među njima spadaju tople i hladne prsline u MŠ i ZUT, poroznost, troska, odstupanje od zahtevane čvrstoće i plastičnosti MŠ i zavarenog spoja, promene u mehaničim, fizičkim i hemijskim svojstvima ZUT.

2) greške formiranja šava (neprovari, zarez, nepotpuno stapanje, smanjenje dimenzija šava). Nastajanje grešaka je najčešće uslovljeno nepravilnim tehnološkim postupkom, narušavanjem režima rada, niskom stručnošću izvršilaca procesa zavarivanja, lošom pripremom, nepravilnim konstrukcijskim postavljanjem, sastavljanjem i pripajanjem, nepristupačnošću mesta zavarivanja kao i nepravilnim popunjavanjem žleba [1]. Najopasnije greške u zavarenim spojevima su prsline, koje nastaju kao posledica toplotnih i metalurških procesa. Već je pomenuto da se prsline u zavarenim spojevima čelika razvrstavaju na tople (nastaju tokom primarne kristalizacije šava ili pri hlađenju iznad polovine vrednosti temperature topljenja, međukristalnog su tipa), hladne (nastaju u MŠ ili ZUT, najčešće pri kraju hlađenja zavarenog

spoja, ispod 300 °C), laminarne (posledica su dejstva zateznih napona u pravcu debljine zavarenog spoja, nastalih pri termičkom ciklusu zavarivanja) kao i prsline od žarenja (koje nastaju usled ponovnog zagrevanja u ZUT ili MŠ tokom termičke obrade posle procesa zavarivanja legiranih čelika) [7, 8, 9].

Kada je u pitanju udarna žilavost zavarenih spojeva niskolegiranih čelika povišene čvrstoće ona se definiše kao energija koju je potrebno utrošiti da bi se izazvalo razaranje strukture materijala odnosno da bi se ostvario lom.

Ispitivanje udarnim dejstvom sile na epruvetama sa zarezom može da pruži objašnjenje o ponašanju materijala pri ometanom deformisanju odnosno pri prostornom naponskom stanju. Određivanje rada potrebnog za lom pod utvrđenim uslovima ispitivanja najčešće služi za tekuću kontrolu kvaliteta i homogenosti materijala. Ovim postupkom može se utvrditi sklonost ka krtom lomu, odnosno sklonost ka povećanju krtosti u toku eksploatacije [10]. Instrument pomoću kojeg se najmerodavnije vrše udarna ispitivanja je Šarpijevo klatno. Preciznije, klatno je u osnovi fizičko klatno gde se kinetička energija kretanja malja troši na razaranje (lom) epruvete fiksirane na osloncima. Šema klatna je prikazana na slici 1.



**Slika 1.** Instrumentirano Šarpijevo klatno

**Figure 1.** Charpy pendulum impact test

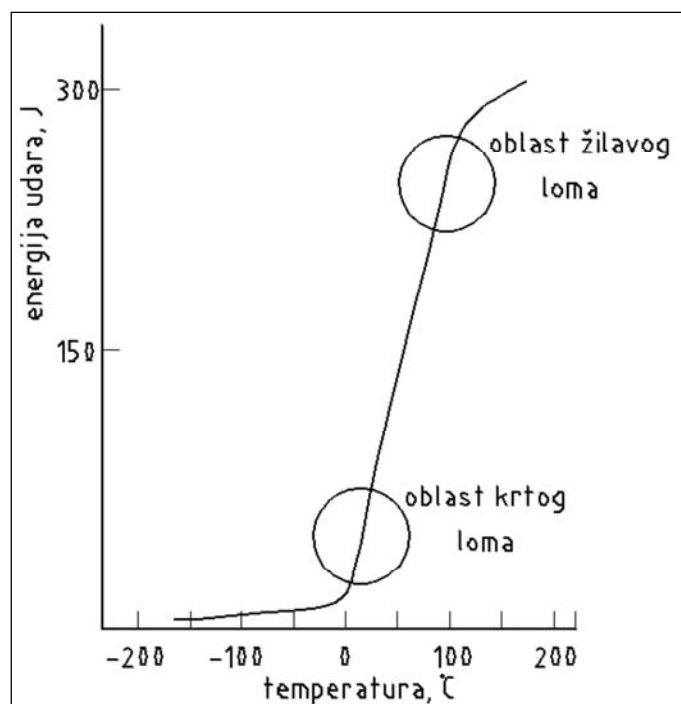


Pomoću instrumentiranja Šarpijevog klatna se veoma precizno rasčlanjuje ukupna energija za lom na udeo energije koji je vezan za otpornost materijala prema stvaranju prsline, i na deo koji se odnosi na širenje prsline. Ispitivanjem epruvete sa zarezom na instrumentiranom klatnu omogućeno je praćenje promene sile sa vremenom, odnosno dobijanje dijagrama sila-vreme. Iz dijagrama sila-vreme moguće je dobiti ukupnu energiju udara, potrebnu za lom uzorka, koja se kasnije rasčlanjuje na deo energije koji se troši za stvaranje prsline i na deo energije za njeno širenje [11].

Najadekvatniji postupak određivanja energije širenja prsline je preko "zamorne prsline", gde se na epruvetama sa "V" zarezom izaziva zamorna prsline, pa se takva epruveta lomi na Šarpijevom klatnu. Energija koja se pri tom utroši za lom je praktično energija širenja prsline. Ukoliko je

poznata vrednost ukupne energije udara ispitivanog materijala onda se može izračunati deo energije potrebne za stvaranje prsline.

Rezultati ispitivanja udarne žilavosti na različitim temperaturama pokazuju da temperatura bitno utiče na udarnu žilavost metala i legura. Na višim temperaturama utrošena energija udara na lom epruvete je velika (materijal pokazuje svojstva plastičnosti, uočava se jako izražena deformacija na mestu prekida epruvete, površina preloma pokazuje sitnozrnu-vlaknastu strukturu tzv. žilavi lom) dok na nižim temperaturama utrošena energija udara za prekid epruvete je mala (materijal je krto, ne uočavaju se znaci deformacije na mestu prekida, površina preloma je krupnozrnaste strukture tzv. krto lom). Na slici 2 je prikazana zavisnost udarne žilavosti od temperature uz prisustvo žilavog i krto loma.



**Slika 2.** Zavisnost udarne žilavosti od temperature

**Figure 2.** Dependence of impact toughness on temperature

## 2. Eksperimentalni deo

Eksperiment je baziran na ispitivanju realnog zavarenog spoja niskolegiranog čelika povišene čvrstoće pod nazivom Nionikral (NN-70) kao primeru heterogene structure. Sprovedena su udarna ispitivanja sva tri konstituenta radi provere žilavosti na različitim temperaturama eksploatacije.

Uz pomenuta ispitivanja izvršena su ispitivanja tvrdoće Vickersovom metodom i ispitivanja zatezanjem.

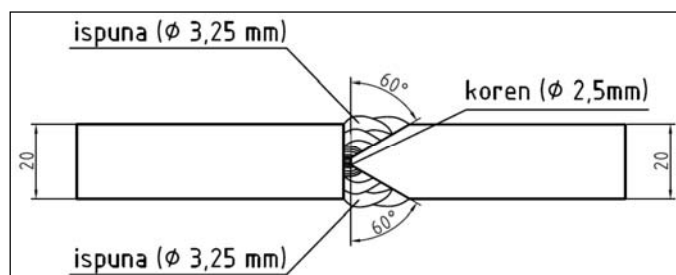
Hemijski sastav čelika Nionikral, koji se koristi za posude po pritiskom i brodske zavarene konstrukcije je dat u tabeli 1.

**Tabela 1. Hemijski sastav čelika NN-70 (u % mase)****Table 1. Chemical composition of NN-70 steel (in mass %)**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0.106	0.209	0.220	0.005	0.017	1.258	2.361	0.246
Al	Mo	Ti	As	V	Nb	Sn	Ca
0.007	0.305	0.002	0.017	0.052	0.007	0.014	0.0003
B	Pb	W	Sb	Ta	Co	N	Fe
0	0.0009	0.0109	0.007	0.0009	0.0189	0.0096	ostatak

Eksperimenti su vršeni na pločama debljina 20 mm, koje su zavarene ručno elektrolučnim postupkom iz kojih su kasnije napravljene epruvete

za pomenuta ispitivanja, preciznije u pitanju je šav koje je 'K' obliku, prema standardu SRPS EN ISO 9692-1:2012, što je prikazano na slici 3.

**Slika 3. Izgled "K" žleba****Figure 3. "K" groove**

Kako svojstva metala šava NN-70 mnogo zavise od odabira adekvatne elektrode, u ovom slučaju za popunu K žleba, tj. dodatnog materijala pri zavarivanju, ploče NN-70 su zavarene efektom overmečing uz korišćenje elektrode EVB 75 čiji

hemijski sastav je prikazan u tabeli 2., firme "Elektrode Jesenice" iz Slovenije. EVB 75 je legirana bazična elektroda za zavarivanje sitnozrnih čelika i čelika povišene čvrstoće.

**Tabela 2. Hemijski sastav elektrode EVB 75 (u % mase)****Table 2. Chemical composition of EVB 75 (in mass %) electrode**

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
0.06	0.45	1.5	0.45	2.2	0.45	ostatak

Prema podacima proizvođača, upotrebom ove elektrode dobijeni zavareni spojevi su otporni na pojavu prslina i imaju dobru žilavost do  $-60^{\circ}\text{C}$ . Zavareni spoj je izrađen elektrodom EVB 75 sa prečnicima od  $\varnothing 2.5$  mm i  $\varnothing 3.25$  mm. Elektroda prečnika  $\varnothing 2.5$  mm je iskorišćena za popunjavanje korena K žleba, zbog teže pristupačnosti prilikom zavarivanja, dok je elektroda prečnika  $\varnothing 3.25$  mm upotrebljena za ispunu K žleba. Temperatura predgrevanja je bila  $170^{\circ}\text{C}$ . Struja zavarivanja korena je iznosila 95 A, a kod ispune je iznosila u dijapazonu od 116 do 118 A. Zavaren je ceo prolaz po dužini, pet do sedam puta u zavisnosti od strane ploče. Podaci o naponu prilikom popunjavanja

korena nisu dobijeni zbog nekontinualnog zavarivanja i viška troske koja se pojavila u samom čošku K žleba. Napon kod zavarivanja korena je iznosio 19 V.

Nakon zavarivanja ploča izrđivani su standardni uzorci za sledća ispitivanja zavarenih spojeva i to:

- tvrdoća kroz zavareni spoj po Vickersu
- ispitivanje zatezanjem
- udarna ispitivanja instrumentiranom klatnu sa osciloskopom.

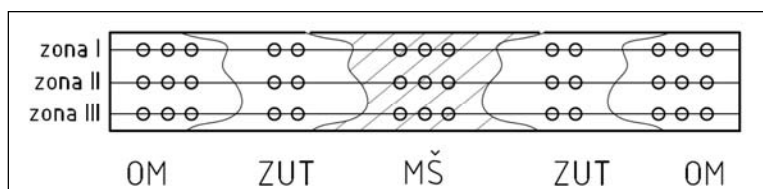


### 3. Rezultati i diskusija

#### 3.1. Merenje tvrdoće po Vickersu

Nakon zavarivanja, vršeno je merenje je tvrdoće, Vickersovom metodom HV10, sa statičkim dejstvom sile, prema standardu SRPS EN 1043-

1:2007. Tvrdoća je merena linijski u OM-ZUT-MŠ-ZUT-OM, na tri nivoa u poprečnom preseku sa dva do tri otiska u svakoj od zona spoja, kao što je prikazano na slici 4. Rezultati su prikazani u tabeli 3.



**Slika 4.** Prikaz merenja tvrdoće

**Figure 4.** Hardness measurement

**Tabela 3.** Rezultati merenja tvrdoće Vickerskovom metodom HV 10

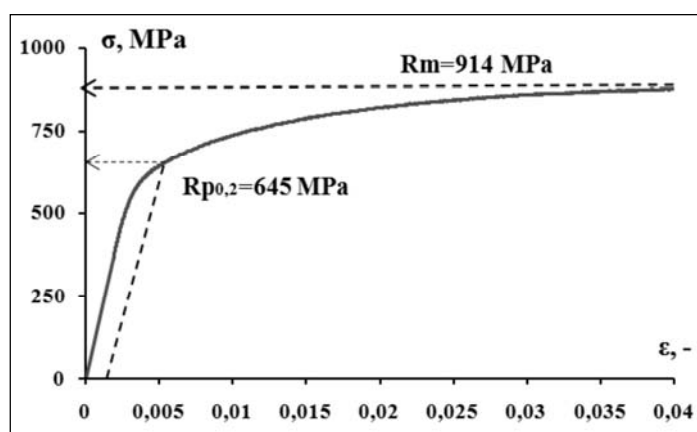
**Table 3.** Vickers hardness measurement method results HV 10

	OM			ZUT		MŠ			ZUT		OM		
	1	2	3	4	1	6	7	8	9	10	11	12	13
I	253	255	256	277	253	291	294	288	275	273	254	252	250
II	255	258	259	269	255	290	289	294	272	275	259	262	257
III	262	265	258	273	262	294	290	292	273	271	256	259	257

#### 3.2. Ispitivanje zatezanjem

Glatka epruveta je korišćena za određivanje zateznih svojstava zavarenog spoja NN-70 na sobnoj temperature, debljine 7 mm. Ispitivanje je urađeno na univerzalnoj elektromehaničkoj kidalici Schenck Trebel RM100, sa minimalnim opsegom od 0-20 kN i maksimalnim opsegom od 0-100 kN u kontroli izduženja. Brzina uvođenja opterećenja je bila 5 mm/min. Izduženje je registrovano ultrazvučnim ekstenzometrom, čija je tačnost

iznosila  $\pm 0,001$  mm. Sa dobijenog dijagrama, prikazanog na slici 5., očitane su vrednosti maksimalne sile, sile koja odgovara početku plastične deformacije, u cilju dobijanja čvrstoće popuštanja i zatezne čvrstoće kao i vrednost procentualnog izduženja epruvete. Ispitivanje zateznih svojstava je urađeno prema standardu SRPS EN ISO 6892-1:2012. Zatezna svojstva zavarenog spoja NN-70 su data u tabeli 4.



**Slika 5.** Ispitivanje zatezanjem zavarenog spoja NN-70

**Figure 5.** Diagram of tensile testing of NN-70 welded joint

**Tabela 4. Rezultati ispitivanja zatezanjem****Table 4. Results of tensile testing**

Granica popuštanja, $R_{p0.2}$ , (MPa)	645
Zatezna čvrstoća, $R_m$ , (MPa)	914
Izduženje, $A_5$ , (%)	22.4

### 3.3. Udarne ispitivanja

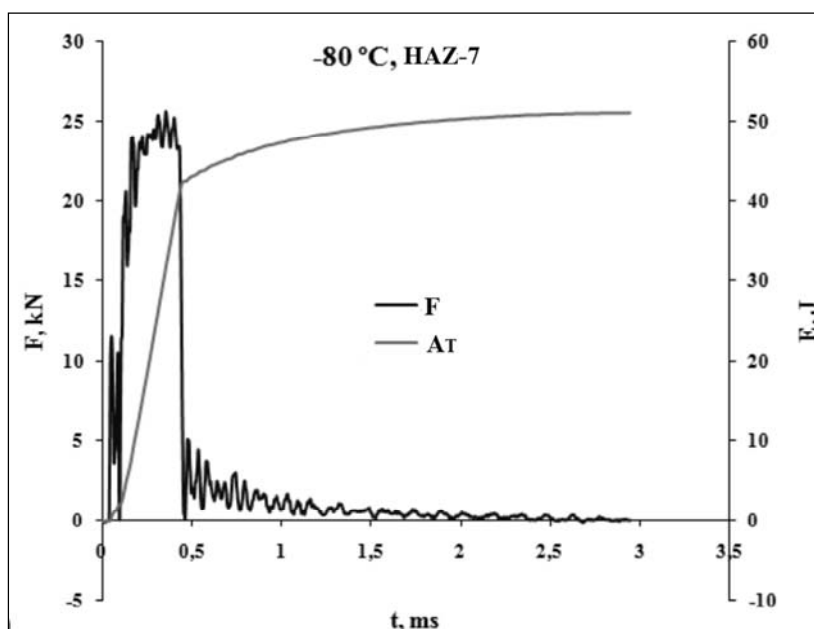
Udarne ispitivanja epruveta sa zarezom za OM, MŠ i ZUT na zavarenom spoju čelika NN-70, su rađena u cilju određivanja ukupne energije udara, njenih komponenti energije stvaranja i energije širenja prsline. Položaj V zareza, od 2 mm dubine, u odnosu na zavareni spoj je definisan standardom EN 875. Epruvete za ispitivanje udarne žilavosti su bile dimenzije 55x10x10 mm. U skladu sa standardom SRPS EN 10045-1 je urađeno ovo ispitivanje na instrumentiranom klatnu sa osciloskopom Schenck Trebel, energije 150-300 J. Osciloskopom je registrovan signal pri lomu epruvete udarom (period 5-12 ms) i posle je povezan na računar zbog obrade signala pri merenju.

Finalno su dobijeni dijagrami sa kojih su pročitani maksimalna sila, energija potrebna za stvaranje i širenje prsline kao i ukupna energija

udara. Preciznije, dobijena su dva tipa dijagrama, sila-vreme i energija-vreme koji su omogućili analizu rezultata ispitivanja, koja se sastojala od ocene uticaja temperature ispitivanja na ukupnu energiju udara, sa svojim komponentama energijom stvaranja i energijom širenja prsline. Udarne ispitivanja konstituenata zavarenog spoja (OM, MŠ i ZUT) čelika NN-70 su urađena na sledećim temperaturama:

- OM na temperaturama: 20 °C, -20 °C, -60 °C, -100 °C,
- MŠ na temperaturama: 20 °C, -40 °C, -80 °C i
- ZUT na temperaturama: 20 °C, -40 °C, -80 °C.

Epruvete na sniženim temperaturama su hladene tečnim azotom radi postizanja željenog temperaturnog stanja. Na slici 6. prikazan je jedan primer dobijenih rezultata dijagrama sila-vreme i energija-vreme za ZUT na -80 °C.

**Slika 6. Udarne ispitivanja zavarenog spoja NN-70 (ZUT na -80 °C)****Figure 6. Impact testing of NN-70 for HAZ at -80 °C**

U tabeli 5. su prikazani neki od rezultata udarnih ispitivanja za sve tri zone zavarenog spoja (OM, MŠ i ZUT) čelika NN-70. U tabeli su prikazani

rezultati ukupne energije udara, energije stvaranja prsline i energije širenja prsline na sobnoj i sniženim temperatureama.

**Tabela 5. Rezultati udarne žilavosti zavarenog spoja NN-70****Table 5. Results of impact toughness of NN-70 welded joints**

Broj epruvete	Temperatura ispitivanja °C	Ukupna energija udara, $A_T$ (J)	Energija stvaranja prsline $A_I$ (J)	Energija širenja prsline $A_P$ (J)
OM-1	20	97.08	39.17	57.90
OM-2	-20	96.89	41.59	55.30
OM-3	-60	60.78	41.44	19.34
OM-4	-100	52.91	46.21	6.7
MŠ-1	20	78.24	24.60	53.64
MŠ-2	-40	53.69	21.85	31.85
MŠ-3	-80	18.28	8.21	10.07
ZUT-1	20	104.88	26.80	78.09
ZUT-2	-40	98.59	32.58	66.01
ZUT-3	-80	51.34	27.99	23.35

#### 4. Zaključak

Iz prikazanih rezultata merenja tvrdoće zavarenog spoja NN-70 po Vickersu, metodom HV10, uočen je skok tvrdoće na liniji OM-ZUT-MŠ. Izmerena tvrdoća metala šava se kretala od 288 do 294 HV, dok kod zone uticaja toplote se kretala od 269 do 277 HV i kod osnovnog metala od 252 do 262 HV.

U slučaju ispitivanja zatezanjem dobijena je mala vrednost čvrstoće popuštanja od 645 MPa i vrednost zatezne čvrstoće od čak 914 MPa. Takođe, dobijena vrednost izduženja od 22.4 % govori o sklonosti materijala ka krtom lomu što nije u saglasnosti sa velikom razlikom između čvrstoće popuštanja i zatezne čvrstoće.

Poređenjem rezultata žilavosti – energije udara, odnosno poređenjem dijagrama sila-vreme i energija-vreme za sve tri zone zavarenog spoja NN-70 na različitim temperaturama proizilazi da su vrednosti ukupne energije udara kao i energije za širenje prsline najveće pri ispitivanjima na 20 °C, što znači da snižavanjem temperature opada i žilavost materijala. Takođe se vidi da mesto urezivanja V-2 zareza bitno utiče na heterogenost strukture samog zavarenog spoja, koju prate različita mehanička svojstva karakterističnih zona zavarenog spoja.

Generalno, izabrana tehnologija zavarivanja u smislu izbora elektrode EVB 75 i predgrevanje od 170 °C su značajno poboljšali žilavost materijala, prevashodno u ZUT kao kritičnoj zoni zavarenog spoja, što je automatski značilo i bolja udarna svojstva.

#### 4. Conclusion

From the presented results of measuring the hardness of the welded joint NN-70 according to Vickers, using the HV10 method, a jump in hardness was observed on the line BM-HAZ-WM. The measured hardness of the weld metal ranged from 288 to 294 HV, while for the heat affected zone it ranged from 269 to 277 HV and for the base metal from 252 to 262 HV.

In the case of tensile testing, a low yield strength value of 645 MPa and a tensile strength value of as much as 914 MPa were obtained. Also, the obtained elongation value of 22.4% indicates the tendency of the material towards brittle fracture, which is not in agreement with the large difference between yield strength and tensile strength.

From the above analysis of the impact tests, the conclusion clearly emerges that at 20 °C (BM, WM and HAZ) the results of total energy and propagation energy are the highest, which confirms the already well-known fact that toughness is lower at lower temperature. The location where the V-2 notch is formed, significantly affects the heterogeneity of the structure of the welded joint itself, which is followed by different mechanical properties of the characteristic zones of the welded joint.

In general, the selected welding technology in terms of EVB 75 electrode selection and preheating of 170 °C significantly improved the toughness of the material, primarily in the HAZ as the critical zone of the welded joint, which automatically meant better impact properties.



Primena niskolegiranih celika povišene čvrstoće uz zahteve ekonomične potrošnje energije i sirovina upućuju proizvođače čelika na proizvodnju zavarljivih čelika povišene čvrstoće, a projektante i konstruktore na njihovu primenu u zavarenim konstrukcijama.

### Zahvalnica

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ugovor br. 451-03-47/2023-01/200012).

### Literatura/Reference

[1] V. Grabulov (1986) Prilog definisanju uticaja hemijskog sastava i debljine lima na pojavu prskotina u zavarenim spojevima čelika Nionikral-70, magistarski rad, Tehnološko-Metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu.

[2] High-strength low-alloy steels.// Alloying: Understanding the basics / Ohio, (2001) USA: ASM International, Materials Park, 193-202.

[3] Yue By.X, Lippold J.C, Alexandrov B.T, Babu S.S.(2012) Continuous cooling transformation behavior in the CGHAZ of naval steels. Supplement to the Welding Journal; 88: 67-75.

[4] Lippold J.C, Yue By.X. (2013). Evaluation of heat-affected zone hydrogen-induced cracking in navy steels. Welding Journal, 92: 20-28.

[5] A. Radović (1966). Prilog metode za određivanje zavarljivosti niskolegiranih čelika visoke čvrstoće. Vojnotehnički institut, Beograd.

[6] S. Kastelec-Macura (2011). Istraživanje uticaja parametara zavarivanja na strukturu i karakteristike metala šava legure AlMg4.5Mn, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.

The application of high-strength low-alloy steels along with the requirements of economical consumption of energy and raw materials direct steel manufacturers to the production of high-strength weldable steels, and designers and constructors to their application in welded constructions

### Acknowledgement

This research is supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-47/2023-01/200012).

[7] A. Sedmak, V. Šijački-Teravčić, A. Milosavljević, V. Đorđević, M. Vukićević. (2000). Prsline u zavarenim spojevima.//Mašinski materijali-drugi deo/ Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Str. 31-37.

[8] M. Smiljanić (2006). Weldable fine grain structural steels-welding and weldability. ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 4; 155-164.

[9] A. Skumavc, A. Smolej, E. Bjelajac, T. Vuherer (2021) Properties and weldability of high-strength low-alloy s1100ql steel. ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 4; 168-175.

[10] Z. Burzić. (2005) Primena savremenih tehnologija u oblasti ispitivanja metala razaranjem. Metalurgija-Journal of Metallurgy; 11: 126-140.

[11] M. Dobrojević, A. Sedmak, E. Argob, O. Popović. (2003). The analysis of geometry and welded joint heterogeneity effect on Charpy specimen behaviour. Structural Integrity and Life; 3: 73-83.