

PROCENA MEHANIČKIH OSOBINA SUČEONO ZAVARENIH SPOJEVA OD KONSTRUKCIONOG ČELIKA IZVEDENIH NA ROBOTU MAG POSTUPKOM

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF BUTT- WELDED JOINTS OF STRUCTURAL STEEL PERFORMED BY A ROBOT USING THE MAG PROCESS

Aleksandra Mitić¹, M. Sc. Mech. Eng. 0009-0008-6443-0014

Djordje Ivković¹ M. Sc. Mech. Eng., 0000-0002-5747-7876

Dr Dušan Arsić¹, doc., 0000-0003-0326-0898

Dr Srbislav Aleksandrović¹, full professor, 0000-0001-5068-5560

Dr Vukić Lazić¹ retired full professor¹, 0000-0001-9362-7184

Dr Vladimir Milovanović¹ associate professor, 0000-0003-3071-4728

Andjela Mitrović M. Sc. Mech Eng., 0009-0008-5300-5653

¹ Faculty of engineering, Sestre Janjić 6, 34000, Kragujevac

E-mail: djordje.ivkovic@fink.rs

Rezime: Cilj ovog rada je da se prikažu rezultati mehaničkih ispitivanja ugljeničnog konstrukcionog čelika S235JR i njegovih sučeonu zavarenih spojeva koji su izvedeni na robotu (MAG postupkom). Za zavarivanje pripremljen je jedan par ploča dimenzija 200x500 mm, debljine 12 mm. Priprema ploča sastojala se iz laserskog sečenja i pripreme žleba za zavarivanje. Za zavarivanje, shodno debljini osnovnog materijala pripremljen je V žleb mašinskom obradom na CNC glodalici. Za zavarivanje je takođe pripremljena i posebna bakarna podloška (potkorena letva) s ciljem da se poveća kvalitet izvedenog korenog zavara, bez dopunskih aktivnosti i naknadnih prolaza. Kao dodatni materijal odabrana je elektroдна žica prečnika 1.2 mm, standardne oznake G42 4 C/M 3Si1 prema EN ISO 14341-A. Za usvojeni dodatni materijal odabrani su parametri zavarivanja korenog zavara i ostalih zavara popune. Po završetku zavarivanja sprovedena su ispitivanja bez razaranja (IBR) i to vizuelno ispitivanje, ispitivanje penetrantima i ispitivanje ultrazvukom. Ispitivanja su pokazala da je zavarivanje uspešno izvedeno. Po završetku zavarivanja iz pomenutog osnovnog materijala i njegovih zavarenih spojeva, pripremljeni su odgovarajući uzorci i izvršena su ispitivanja zatezanjem i ispitivanja udarne žilavosti. Dobijeni rezultati su analizirani a u radu je takođe data i ocena pogodnosti primene robotskog zavarivanja za ovaj tip osnovnog materijala i pripremljenu geometriju spoja (iz aspekta mehaničkih osobina i kvaliteta zavarenog spoja). Osim eksperimentalnih rezultata u radu su prikazani detaljno opisani postupci pripreme delova za zavarivanje, uzoraka za ispitivanje kao i samih ispitivanja sa i bez razaranja.

Ključne reči: S235JR, robotsko zavarivanje, ispitivanje zatezanjem, udarna žilavost

Abstract: The aim of this paper is to present the results of mechanical testing of the carbon structural steel S235JR and its butt-welded joints, which were performed using a robot (MAG process). One pair of plates with dimensions 200x500 mm and a thickness of 12 mm was prepared for welding. The preparation involved laser cutting and groove preparation for welding. A V-groove was machined on a CNC milling machine, in accordance with the thickness of the base material. Additionally, a special copper backing strip was prepared for welding to improve the quality of the root weld, without supplementary activities or additional passes. The filler material selected was electrode wire with a diameter of 1.2 mm, designated G42 4 C/M 3Si1 according to EN ISO 14341-A. Welding parameters were selected for both the root weld and the filler welds based on the chosen filler material. After welding, non-destructive testing (NDT) was conducted, including visual inspection, penetrant testing, and ultrasonic testing. The tests confirmed that the welding was successfully performed. Upon completion of welding, samples were prepared from the base material and its welded joints, and tensile and impact toughness tests were conducted. The obtained results were analyzed, and the paper also provides an assessment of the suitability of robotic welding for this type of base material and the prepared joint geometry (in terms of mechanical properties and weld quality). In addition to the experimental results, the paper presents detailed descriptions of the procedures for preparing parts for welding, testing samples, as well as the testing itself, both destructive and non-destructive.

Key words: S235JR, robot welding, tensile testing, impact toughness

1. UVOD

Zavarivanje čelika, legure gvožđa i ugljenika, predstavlja složeni fizičko-metalurški proces u kojem dolazi do spajanja dva ili više predmeta. Kako bi se dobio kvalitetan zavareni spoj, potrebno je uložiti veliki napor i izvršiti temeljne pripreme, kako u pogledu izbora i pripreme šava, izbora dodatnog materijala i parametara zavarivanja, tako i izbora adekvatne tehnike zavarivanja prema tipu spoja i njeno pravilno izvođenje. Takođe, ovde treba naglastiti da dobri zavarivači u najvećem broju slučajeva nemaju problema sa pravilnim izborom tehnike i njenim izvođenjem. U savremenim industrijskim postrojenjima, zbog razvoja računara i elektrotehnike, sve češće se ljudski rad zamenjuje radom robota. Uzroci ove pojave su brojni, od kojih se ističu veća produktivnost robota kao i mogućnost robota da rade u otežanim uslovima, koji ne odgovaraju ljudima (visoke i niske temperature, toksične sredine i sl.). Zavarivanje u ovom slučaju ne predstavlja izuzetak, a u poslednjih par godina postoje veliki naponi da se rad ljudi potisne radom robota. Potrebno je naglasiti da primena robotskog zavarivanja ima brojne prednosti (pravolinijsko vođenje, konstantna brzina zavarivanja, velika produktivnosti itd.), ali i nedostatke. Kao glavni nedostatak može se navesti to da robot za razliku od zavarivača, nema sopstveni vid te mu izostaje sposobnost vizuelnog praćenja procesa zavarivanja, donošenje zaključka o topljenju i mešanju materijala kao i korekcije putanje usled neadekvatno pripremljenog žleba. Ideja autora ovog rada je da proveriti mehaničke osobine sučeono zavarenih spojeva dobijenih MAG zavarivanjem ploča od konstrukcionog čelika, pri čemu je zavarivanje izvedeno na robotu. [1, 2]

2. EKSPERIMENT

2.1 PLAN EKSPERIMENTA

U okviru eksperimentalnih ispitivanja koja se sprovode radi ocene mehaničkih osobina zavarenih spojeva čelika S235JR izvedena su ispitivanja na zatezanje osnovnog materijala i zavarenih spojeva,

kao i ispitivanje udarne žilavosti osnovnog materijala na sobnim i sniženim temperaturama kao i nekih karakterističnih zona samog zavarenog spoja takođe na sobnim i sniženim temperaturama.

2.2 PRIPREMA

Za potrebe sprovođenje eksperimentalnih ispitivanja neophodno je izvršiti temeljne pripreme. U pripremnom procesu spremljen je jedan par ploča dimenzija 200x500 mm, debljine 12 mm, od čelika S235JR. Hemijski sastav i mehaničke osobine čelika prikazane u tablicama 1 i 2. Na osnovu sadržaja ugljenika kod ovog čelika može se zaključiti da pripada grupi zavarljivih čelika tj. može se uspešno zavariti bez prethodnog predgrevanja i naknadne termičke obrade. Priprema ploča podrazumevala je seču ploča na laseru i njihovu mašinsku obradu kako bi se dobio žleb odgovarajuće geometrije. U ovom slučaju pripremljen je tzv V-žleb, s obzirom na debljinu ploča koje treba zavariti. Budući da je pripremljene ploče trebalo sučeono zavariti, pripremljena je i tzv. podložna ploča od bakra. Njena uloga je da omogući dobijanje korena odgovarajućih karakteristika. Njene dimenzije su 60x10 mm dužine 520 mm. Na slici 1 prikazan je process pripreme ploča i podložne ploče.

Tablica 1. Hemijski sastav čelika S235JR prema EN10025-2 [3]

Hemijski element	C	Mn	P	S	N	Cu
Hemijski sastav, %	max 0.2	max 1.4	max 0.04	max 0.04	max 0.012	max 0.55

Tablica 2. Mehaničke osobine čelika S235JR prema EN10025-2 [3]

Mehaničke karakteristike	ReH, MPa	Rm, MPa	A, %	KV, J (+20°C)
	min 235	360-510	17	min 27



a)



b)

Slika 1 Mašinska obrada ploča za zavarivanje (a) podložne bakarne ploče (b)

2.3 IZBOR DODATNOG MATERIJALA I PARAMETARA ZAVARIVANJA

Po završetku mašinske obrade, usledio je odabir odgovarajućeg dodatnog materijala. Budući da je reč o MAG zavarivanju, dodatni materijal je elektrodna žica. U ovom slučaju odabrana je elektrodna žica proizvođača Elektroda Zagreb d. d. komercijalne oznake SG-2 tj. standardne oznake prema EN ISO 14341-A: G 42 4 C/M 3Si1. prečnika $d = 1.2 \text{ mm}$. Hemijski sastav elektrodne žice, kao i njene mehaničke osobine prikazane su u tablicama 3 i 4.

Tablica 3 Hemijski sastav elektrodne žice SG-2 [4]

Hemijski sastav, %	C	Mn	Si	Cu
Oznaka žice prema EN ISO 14341-A	0.06-0.13	1.4-1.6	0.7-1.0	≤0.3

Tablica 4 Mehaničke karakteristike elektrodne žice SG-2 [4]

Mehaničke karakteristike	R_{eH} , MPa	R_m , MPa	A, %	KV (-20°C), J
Oznaka žice prema EN ISO 14341-A	min 430	500-640	min 22	min 47

Za odabrani dodatni materijal, njegov prečnik i tip spoja definisani su parametri zavarivanja koji su prikazani u tablici 5. Potrebno je naglasiti da su definisani posebni parametri za prvi/koreni prolaz i za ostale prolaze popune.

Tablica 5 Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja	I, A	U, V	v_z , cm/s	Q_{gas} , l/min	Zaštitni gas	q_l , J/cm
Prvi prolaz	170	23	0.4	14	M21	7820
Ostali prolazi	310	27	0.7	14	M21	9565

2.4 OPREMA ZA ZAVARIVANJE

Kada su definisani parametri zavarivanja pristupilo se postavljanju čeličnih ploča i bakarne podloške na radni sto robota. Kompletно radno mesto prikazano je na slici 2.

**Slika 2** Prikaz radnog mesta za robotsko zavarivanje

Radno mesto se sastoji iz tri celine:

1. Robotske ruke sa zavarivačkim pištoljem,
2. Jedinice za zavarivanje i
3. Radnog stola.

Robotska ruka nosi oznaku OTC FD-V8L japanskog proizvođača OTV čije su tehničke karakteristike prikazane u tablici 6. Jedinica za zavarivanje je proizvođača DAIHEN VARSTROJ oznake WB-P500L, čije su tehničke karakteristike prikazane na slici 3.

Tablica 6 Opšte karakteristike robota za zavarivanje [5]

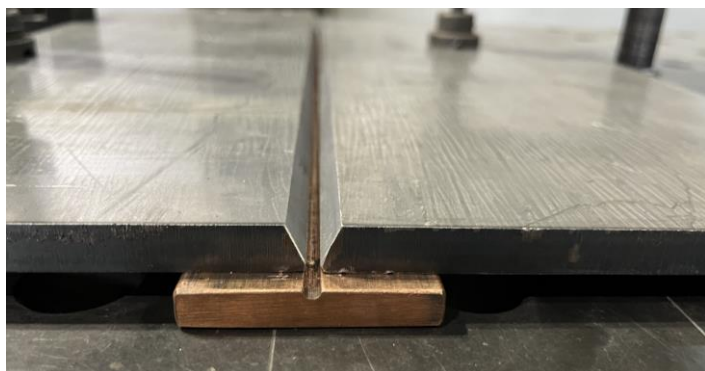
Karakteristike robota OTC FD-V8	
Broj stepeni slobode	6
Težina	8 kg
Ponovljivost	$\pm 0.08 \text{ mm}$
Snaga	5000 W



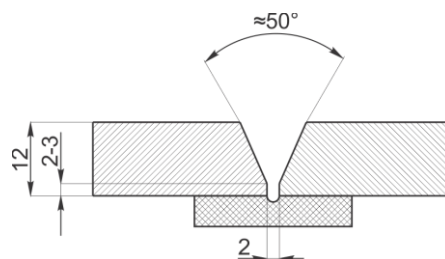
Slika 3 Tehničke karakteristike uređaja za zavarivanje

2.5 ZAVARIVANJE I ISPITIVANJE METODAMA BEZ RAZARANJA

Na prikazani radni sto izvršeno je postavljanje ploča za zavarivanje kao I postavljanje bakarne podložne ploče. Kada je izvršeno postavljanje i odgovarajuće centriranje elemenata spoja, celokupni sistem je stegnut odgovarajućim pritezačima kako bi se onemogućilo pomeranje u toku zavarivanja. Pritezanjem svih elemenata dobijen je šav prikazan na slici 4 pod a), a njegove geometrijske karakteristike prikazane su na slici 4 pod b).



a)



b)

Slika 4 Prikaz dobijenog žleba posle učvršćivanja elemenata (a) geometrijske karakteristike žleba (b)

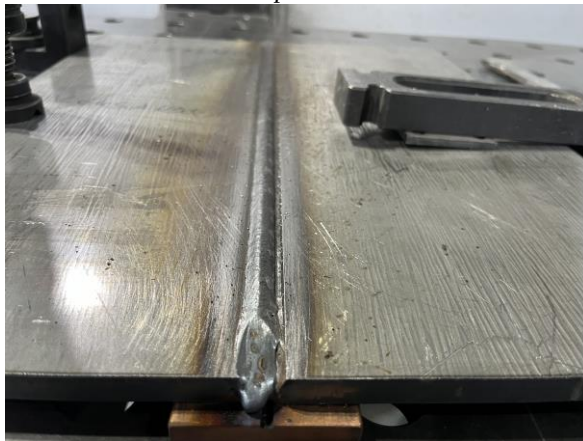
Posle stezanja elemenata, izvršeno je postavljanje početnog položaja zavarivačkog pištolja i programiranje putanje kretanja. Kada je putanja isprobana, zadata je realna brzina kretanja i izvršena je proba kretanja robota. Budući da se na testu nije bilo većih problema, započeto je višeprolazno zavarivanje. Zavarivanje je izvršeno a na slici 5 prikazana je progresivna popuna V-žleba. Prva dva prolaza izvedena su tako da se zavarivački pištolj kretao po osi žleba a naneti su direktno jedan iznad drugog. Treći prolaz je blago izmešten u levu stranu a potom je četvrti prolaz nanet pored njega.



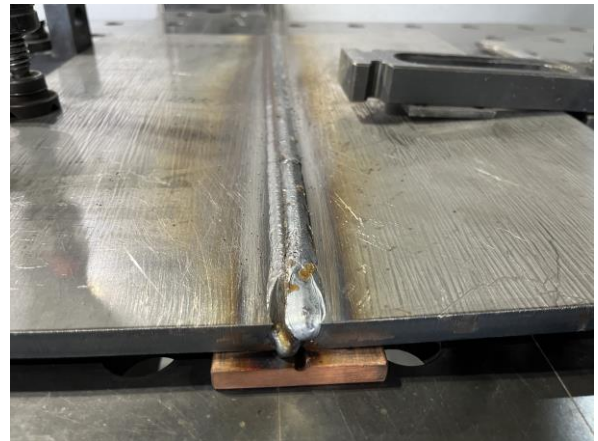
Prvi prolaz



Drugi prolaz



Treći prolaz



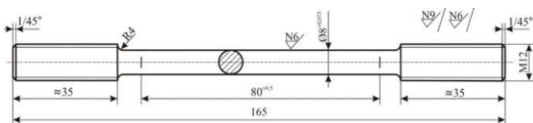
Četvrti prolaz

Slika 5 Prikaz postupka popune šava višeprolaznim zavarivanjem

Zbog unete toplote tokom zavarivanja zavarena ploča se deformisala i izgubila je ravnost, te se odmah posle zavarivanja, dok se ploče još uvek nisu ohladile ispravile na presi kako bi bile što ravnije. Posle ispravljanja usledilo je hlađenje i kontrola metodama ispitivanja bez razaranja. U konkretnom slučaju sprovedena su ispitivanja penetrantnim tečnostima i ultrazvukom. Obe metode nisu pokazale prisustvo nedozvoljenih grešaka te se pristupilo daljoj pripremi uzoraka za ispitivanje.

2.6 ISPITIVANJE METODAMA SA RAZARANJEM

Za ispitivanje zatezanjem iz zavarenih ploča pripremljeni su cilindrični uzorci prečnika $d=8\text{ mm}$, merne dužine $L_0=80\text{ mm}$ (Slika 6). Ispitivanje na zatezanje izvršeno je na univerzalnoj mašini za ispitivanje proizvođača ZWICK ROELL Z/100 (slika 7), brzina kretanja čeljusti pri ispitivanju je bila 10 mm/min . Ispitivanje udarne žilavosti izvršeno je metodom po Šarpiju I pripremljeni su standardni uzorci deimenzija $10\times 10\text{ mm}$, sa za U- zarezom dubine 2 mm (Slika 8).



a)

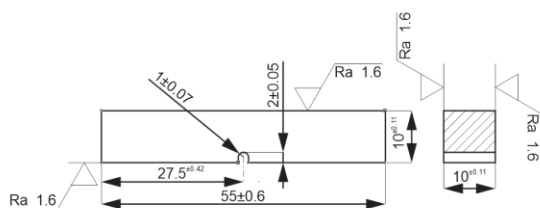


b)

Slika 6 Prikaz uzoraka za zatezanje, shematski (a), realno pripremljeni (b) [6, 7]



Slika 7 Prikaz univerzalne mašine za ispitivanje ZWICK ROELL Z/100



a)



b)

Slika 8 Prikaz uzoraka za ispitivanje po Šarpiju, shematski (a), realno pripremljeni (b)

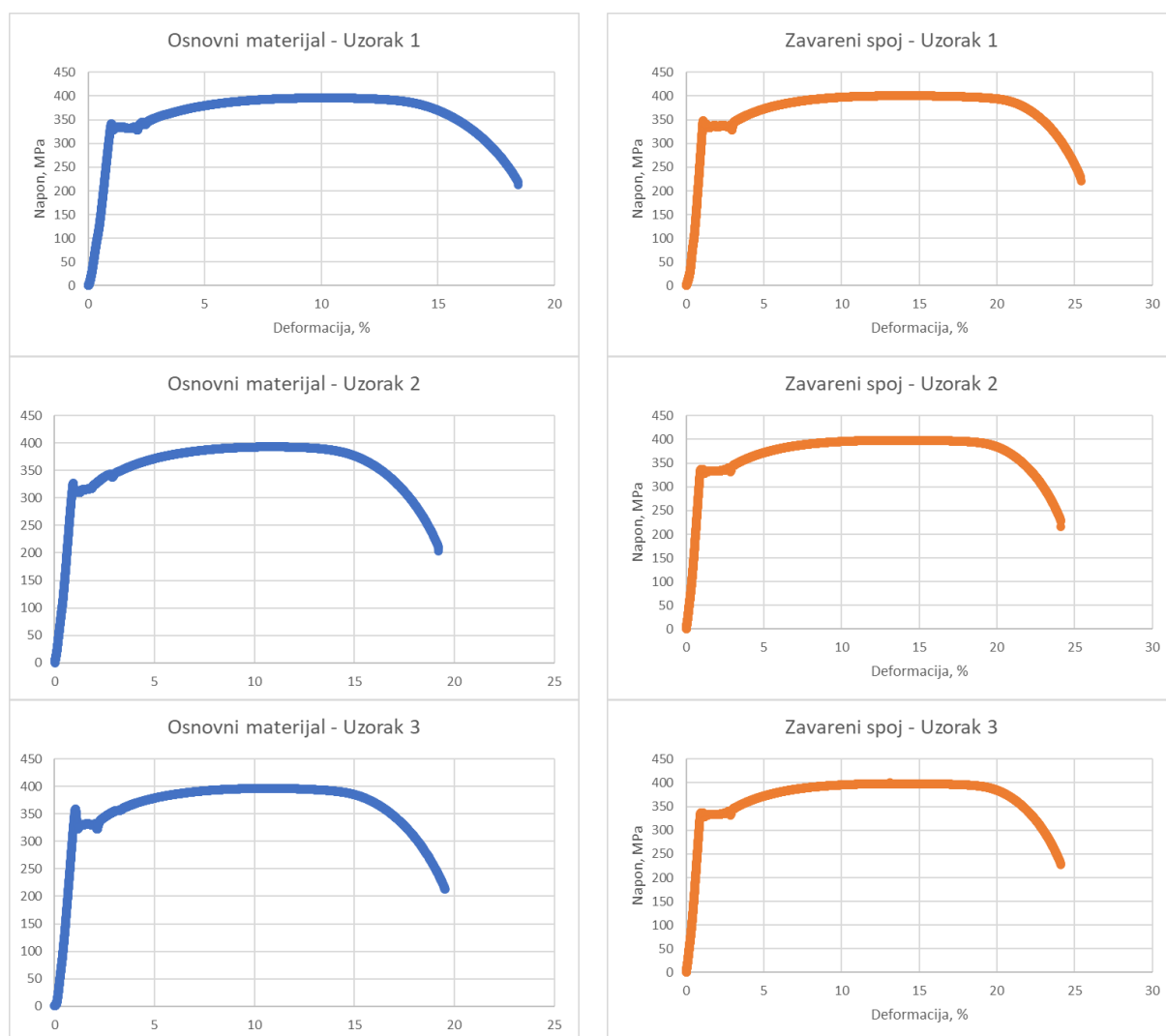
3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 ISPITIVANJE ZATEZANJEM

Rezultati ispitivanja zatezanjem uzoraka iz osnovnog materijala i zavarenih spojeva prikazani su u tablici 7. Dijagrami zatezanja prikazani su na slici 9

Tablica 7 Rezultati ispitivanja zatezanjem

Uzorci		R_{eH} , MPa	R_m , MPa	A, %	Z, %
Osnovni materijal	1	334	396	17.68	78.03
	2	311	393	18.54	75.62
	3	327	396	18.81	78.61
Zavareni spoj	1	335	400	24.52	75-62
	2	330	398	23.44	74.37
	3	333	400	24.01	74.37



Slika 9 Prikaz dijagrama zatezanja dobijenih ispitivanjem zatezanjem

Rezultati ispitivanja ukazuju na to da je napon tečenja osnovnog materijala približno jednak naponu tečenja uzoraka iradenih iz zavarene ploče. Osim što uzorci iz zavarenih spojeva imaju veći napon tečenja, takođe imaju u veću vrednost zatezne jačine kao i veće izduženje i kontrakciju. Dobijeni rezultati su očekivani s obzirom na to kakve su vrednosti predložene u tablici 4, gde se jasno vidi da dodatni materijal ima veće vrednosti izduženja i kontrakcije. Pad jačine zavarenog spoja u odnosu na dodatni materijal predstavlja posledicu mešanja dodatnog materijala sa slabijom osnovnim materijalom.

3.2 ISPITIVANJE UDARNE ŽILAVOSTI

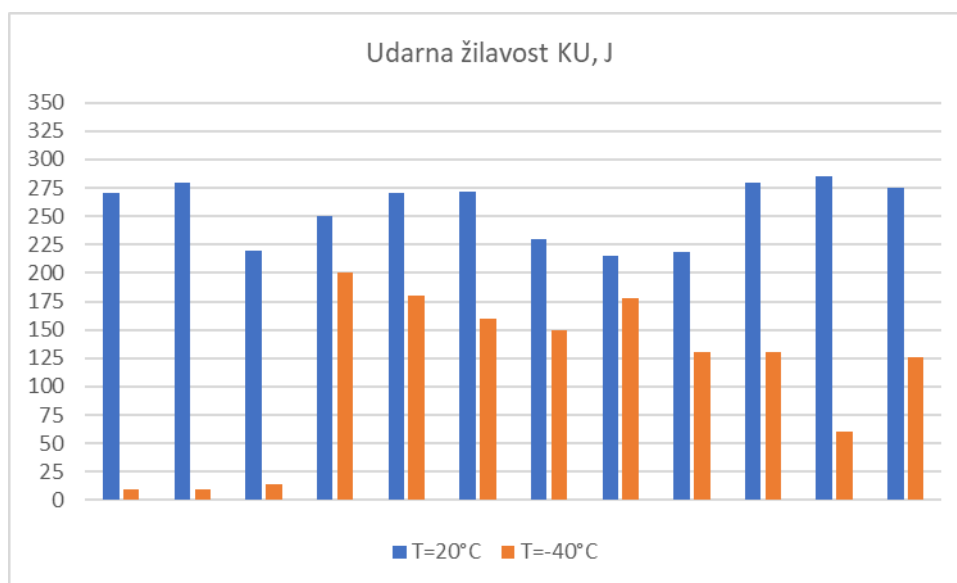
Dobijeni rezultati ispitivanja udarne žilavosti osnovnog materijala i zavarenog spoja na sobnim i sniženim temperaturama, metodom po Šarpiju prikazani su u tablici 8. Osnovni materijal pokazuje veliku žilavost na sobnim temperaturama, dok se na sniženim temperaturama uočava izuzetan pad udarne žilavosti. Ova pojava je očekivana s obzirom na samu kristalnu rešetku ovog čelika (A2) koju karakteriše izraženi pad žilavosti sa sniženjem temperature.

Kod zavarenih spojeva može se uočiti uobičajeni trend da sa sniženjem temperature u svim zonama zavarenog spoja dolazi do pada udarne žilavosti kao i do prelaska iz žilavog u krti lom. Poređenjem udarne žilavosti osnovnog materijala sa žilavošću različitih zona u zavrenom spoju zaključuje se da su vrednosti bliske iako. Na ispitanim uzorcima sa

snižanjem temperature uočava se pad udarne žilavosti 20%-50% (Slika 10), ali je u svim slučajevima u zavarenom spoju ispoštovan kriterijum da je udarna žilavosti veća od 27 J.

Tablica 8 Rezultati ispitivanja udarne žilavosti osnovnog materijala i zavarenog spoja

Lokacija zareza		Osnovni materijal		Metal šava		Koren		ZUT	
Temperatura ispitivanja		T=20°C	T=-40°C	T=20°C	T=-40°C	T=20°C	T=-40°C	T=20°C	T=-40°C
Uzorak 1	KU, J	270	10	250	200	230	150	280	130
Uzorak 2		280	9	270	180	215	178	285	60
Uzorak 3		220	14	272	160	219	130	275	126



Slika 10 Histogramski prikaz rezultata udarne žilavosti

4. ZAKLJUČAK

U savremenoj industriji primena robota u svim industrijskim granama je sve veća. Zavarivanje kao jedan poseban segment u industriji takođe beleži porast upotrebe robota. Razlozi ovome su brojni, počev od veće produktivnosti, konstantnih parametara i sl. Uprkos brojnim prednostima upotreba robota ima i svoje nedostatke. Cilj ovog rada je bio da se provere mehaničke osobine zavara dobijenog robotskim zavarivanjem. U tu svrhu pripremljene su dve ploče dimenzija 200x500 mm debljine 12 mm od čelika S235JR. Kada je završena priprema pristupilo se višeprolaznom zavarivanju a potom i kontroli zavarenih ploča. Iz zavarenih ploča pripremljeni su uzorci za zatezanje i udarnu žilavost. Sprovedena ispitivanja i dobijeni rezultati pokazuju da pravilnim odabirom dodatnog materijala i parametara zavarivanja, mehaničke karakteristike zavarenog spoja mogu biti približno jednaka i slična svojstvima osnovnog materijala.

LITERATURA

- [1] M. Jovanović, V. Lazić, D. Arsić, *Nauka o materijalima 1*, Univezitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitetski udžbenik, Kragujevac, 2017.
- [2] M. Jovanović, V. Lazić, *Tehnologija livenja i zavarivanja*, Univezitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitetski udžbenik, Kragujevac, 2015.
- [3] https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=4, pristupljeno 26.08.2024. u 18:45.
- [4] <https://ezg.hr/en/products/wires/ez-sg-2/>, pristupljeno 26.08.2024. u 19:15.
- [5] <https://en.oj-otc.com/aspcms/product/E-FDV8L.html>, pristupljeno 05.09.2024. u 11:13.
- [6] M. Jovanović, V. Lazić, D. Arsić, M. Tonic, *Nauka o materijalima 2-Ispitivanje materijala*, osnovni univerzitetski udžbenik, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, ISBN 978-86-6335-110-3, 2024.
- [7] M. Jovanović, V. Lazić, D. Arsić, M. Tonic, *Nauka o materijalima 3-Ispitivanje zavarenih spojeva i odlivaka*, osnovni univerzitetski udžbenik, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, ISBN 978-86-6335-111-0, 2024.

ZAHVALNICA

Ovim putem, autori ovog rada izražavaju veliku zahvalnost preduzeću PROMEK D.O.O iz Velike Plane, koja je najvećim delom omogućila sprovođenje ovog eksperimenta. Preduzeće je autorima rada stavilo na raspolaganje celokupan kadar, resurse i raspoložive osnovne i dodatne materijale za zavarivanje kao i kompletan stručni kadar.