



Dragan Mitić¹, Dragan Milčić², Miodrag Milčić², Nenad Radović^{3,a}

ANALIZA MAG POSTUPKA ZAVARIVANJA TRANSFORMATORSKOG LIMA I KONSTRUKCIONOG ČELIKA

MAG WELDING OF ELECTRICAL STEEL AND STRUCTURAL STEEL

Stručni rad / Professional paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa 31. Savetovanja sa međunarodnim učešćem "Zavarivanje 2020" održanog u Kladovu, Srbija od 13. do 16. Oktobra 2021.

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2021.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Mart 2022.

Ključne reči: Transformatorski lim, S355, MAG postupak, električne osobine

Rezime

Transformatorski lim je primer čelika specifične namene kod koga je glavni kriterijum za izbor zasnovan na fizičkim osobinama, a ne na mehaničkim osobinama. Ispitani su raznorodni zavareni spojevi S355/trafo lim (dva kvaliteta, sa 1,78 i 2,94%Si), koji su zavareni MAG postupkom sa dva seta parametara zavarivanja. Najbolji rezultat je dobijen za probu broj 4, položaj PF. Da bi se smanjila razlika tvrdoće metala šava i osnovnih metala, predložena je promena dodatnog materijala. Takođe je predloženo smanjenje prečnika žice, kako bi se smanjilo nadvišenje. Ovako dobijeni zavareni spoj tek treba ispitati sa aspekta otpora na vrtložne struje u jezgru koje smanjuju koeficijent korisnog dejstva.

1. Uvod

Transformatorski lim je primer čelika specifične namene kod koga je glavni kriterijum za izbor zasnovan na fizičkim osobinama, a ne na mehaničkim osobinama. Ovi čelici su razvijeni da bi se koristili za jezgra transformatora ili dinamo mašina, a sa ciljem da im povećaju koeficijent korisnog dejstva. Povoljnom strukturom se obezbeđuje usmerenost zrna i domena tako da se obezbeđuje minimalna električna otpornost na indukovane vrtložne struje u transformatoru [1, 2]. Nastalo zagrevanje je gubitak korisnog dejstva. Sa aspekta hemijskog sastava, glavnu ulogu ima legiranje silicijumom, uz veoma preciznu termomehantičku preradu. Osnovni zahtev je da se nakon nekoliko režima hladnog valjanja i rekristalizacionog žarenja obezbedi intenzivni rast zrna specifične orijentacije (paralelne pravcu

Adresa autora / Author's address:

¹ NIVAR, Čarnojevića 11/1, Niš, Srbija

² Mašinski fakultet, A. Medvedeva 14, Niš, Srbija

³ Tehnološko metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd, Srbija

^a E mail: nenrad@tmf.bg.ac.rs

Keywords: Electrical steel, S355, MAG welding, electrical properties

Abstract

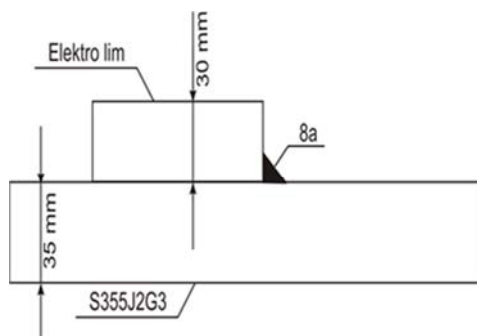
Electrical (high silicon) steels are specifically developed steels for which the principle selection principle was based on physical properties, rather than mechanical properties. Four different MAG welded joints (S355/electrical steel with 1.78 and 2.94%Si) were tested. Best result was obtained for joint 4. Furthermore, in order to decrease difference in hardness between weld metal and base metals, a change of filler material is suggested. Also, in order to reduce overlap, a smaller diameter of wire is recommended. Finally, these joints are yet to be tested on eddy current and magnetic permeability, because they affect efficiency.

valjanja), čime se smanjuje broj granica zrna koje povećavaju električnu otpornost. Ovako dobijena izotropnost je još poznata i kao Goss tekstura [1, 2]. Ovako dobijeni lim (debljine ispod 0,75mm) se naknadno iseca, kroji i slaže u jezgro transformatora.

Sa druge strane, konstruktori često predviđaju da se jezgro spoji zavarivanjem za nosač koji je klasični konstrukcioni čelik [3]. Zavarivanje ovih raznorodnih čelika je izazov jer je u pitanju čelik sa povišenim sadržajem silicijuma i zavarivanje velikog broja složenih limova za ram.

2. Eksperiment

Izvedeno je zavarivanje ugaonih spojeva trafo limova (dva različita sastava) za noseći ram koji je izradjen od čelika klase S355J2G3, prema Slici 1.



Slika 1. Skica ugaonog spoja

Figure 1. Schematic presentation of the fillet weld

Zavarene su 4 probe ugaonih spojeva mešavine gasova, parametri zavarivanja dati u konstrukcionog čelika S355+N debljine 30mm i Tabeli 1. trafolimova 227x0.6mm, MAG postupkom u zaštiti

Tabela 1. Parametri zavarivanja

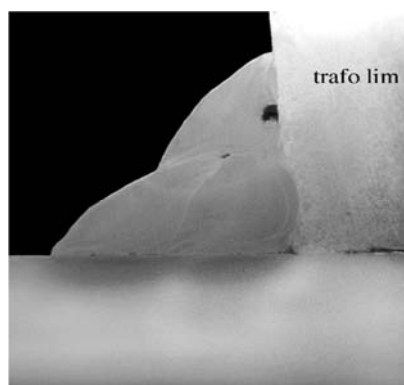
Table 1. Welding parameters

Proba	Ram	Trafo lim	prolaz	I, A	U, V	Brzina dodavanja m/min	Položaj zavarivanja
1	S355J2G3	1,77%Si	1	160	17,5	3,8	PG
			2	155	17,5	3,8	
			3	160	17,5	3,8	
2	S355J2G3	2,95%Si	1	160	17,5	3,8	PG
			2	155	17,5	3,8	
			3	160	17,5	3,8	
3	S355J2G3	1,77%Si	1	125	17,5	3,2	PF
			2	130	17,8	3,2	
4	S355J2G3	2,95%Si	1	125	17,5	3,2	PF
			2	130	17,8	3,2	

Korišćen je dodatni materijal EN ISO14341-A G 46 4 M21 4Si1 OKAristoRod 12.63, prečnika 1.2mm.

3. Rezultati i diskusija

Proba 1. Na Slici 2 je prikazan zavareni spoj probe 1.



Slika 2. Makro presek zavarenog spoja - proba 1

Figure 2. Macro cross section of welded joint - test 1



Vizuelnim pregledom zavarenog spoja, nisu uočene nedozvoljene greške prema standardu SRPS EN ISO 5817 za nivo kvaliteta "B".

Ispitivanjem penetrantskom tečnošću ugaonog zavarenog spoja SPQR1 utvrđeno je da ima

linearnih indikacija na prelazu metala šava i osnovnog materijala rama S355+N i da ne zadovoljava nivo kvaliteta prema standardu SRPS EN ISO 5817 "B"[4]. Rezultati merenja tvrdoće su dati u tabeli 2.

Tabela 2. Prosečne vrednosti tvrdoće u karakterističnim zonama zavarenog spoja - proba 1

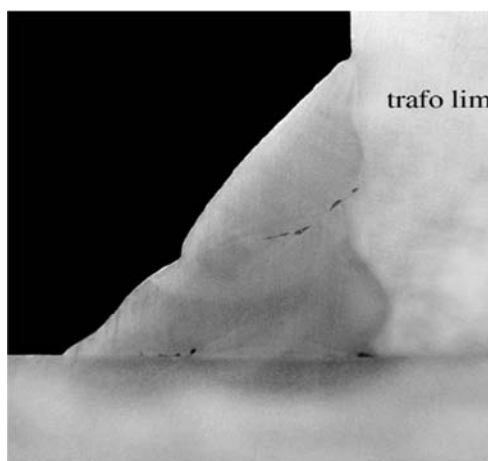
Table 2. Average values of hardness in the characteristic zones of the welded joint - test 1

	S355 OM	ZUT/S355	MŠ	ZUT/Trafo	TrafoOM
Tvrdoća, HV	144	184	249	168	132

Makroskopskim ispitivanjem ugaonog zavarenog spoja SPQR1, konstatovano je da je debljina zavarenog spoja 8mm i da postoje nepravilnosti - nedostatak uvarivanja 402, gasna šupljini 2011 i nedostatak stapanja između slojeva 4012.

Klasifikacija geometrijskih nepravilnosti rađena je prema standardu SRPS EN ISO 6520-1 2008[5].

Proba 2. Na Slici 3 je prikazan zavareni spoj probe 2.



Slika 3. Makro preseki zavarenog spoja – proba 2

Figure 3. Macro cross section of welded joint - test 2

Vizuelnim pregledom zavarenog spoja, nisu uočene nedozvoljene greške prema standardu SRPS EN ISO 5817 za nivo kvaliteta "B" - izmereno nadvišenje ugaonog zavarenog spoja je 5.7mm. Takođe, veoma malo je uvarivanje na strani rama segmenta, što znači da je samim tim nosivost zavarenog spoja nepouzdana.

Ispitivanjem penetrantskom tečnošću probe 2, utvrđeno je da ima linearnih indikacija na prelazu metala šava i osnovnog materijala rama segmenta S355+N i da ne zadovoljava nivo kvaliteta prema standardu SRPS EN ISO 5817 "B"[4].

Rezultati merenja tvrdoće su prikazani u tabeli 3.

Tabela 3. Prosečne vrednosti tvrdoće u karakterističnim zonama zavarenog spoja – proba 2

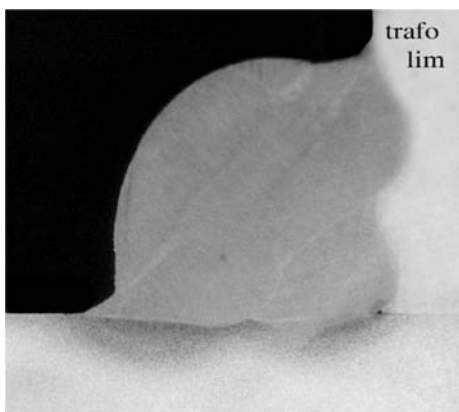
Table 3. Average values of hardness in the characteristic zones of the welded joint - test 2

	S355 OM	ZUT/S355	MŠ	ZUT/Trafo	TrafoOM
Tvrdoća, HV	131	199	239	185	142

Makroskopskim ispitivanjem ugaonog zavarenog spoja probe 2, konstatovano je da je debljina zavarenog spoja 7.4mm i da postoje nepravilnosti - nedostatak uvarivanja 402, nedovoljno provarivanje korena 4021 i nedostatak stapanja između slojeva

4012. Klasifikacija geometrijskih nepravilnosti rađena je prema standardu SRPS EN ISO 6520-1 2008[5].

Proba 3. Na slici 4. je prikazan zavareni spoj probe 3.



Slika 4. Makro presek zavarenog spoja – proba 3

Figure 4. Macro cross section of welded joint - test 3

Vizuelnim pregledom zavarenog spoja probe 3, uočena je prevelika ispupčenost zavarenog spoja. Izmereno nadvišenje ugaonog zavarenog spoja je 7 mm.

Ispitivanjem penetrantskom tečnošću ugaonog zavarenog spoja probe 3 utvrđeno je, da zadovoljava nivo kvaliteta prema standardu SRPS EN ISO 5817 "B"[4].

Rezultati merenja tvrdoće su dati u tabeli 4.

Tabela 4. Prosečne vrednosti tvrdoće u karakterističnim zonama zavarenog spoja proba 3

Table 4. Average values of hardness in the characteristic zones of the welded joint – test 3

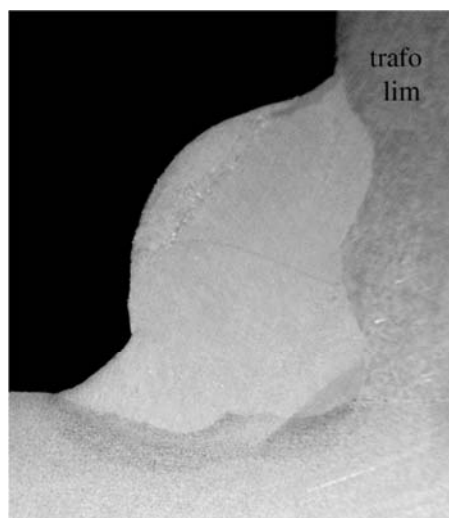
	S355 OM	ZUT/S355	MŠ	ZUT/Trafo	TrafoOM
Tvrdoća, HV	125	168	241	182	134

Makroskopskim ispitivanjem ugaonog zavarenog spoja probe 3, konstatovano je da postoje nepravilnosti - nedostatak uvarivanja - neravnomerno 402, nedovoljno provarivanje korena 4021 i prevelika ispupčenost šava 503. Klasifikacija geometrijskih nepravilnosti rađena je prema standardu SRPS EN ISO 6520-1 2008 [5].

Proba 4. Na slici 5 je prikazan zavareni spoj probe 4

Vizuelnim pregledom zavarenog spoja probe 4, uočena je prevelika ispupčenost zavarenog spoja. Izmereno nadvišenje ugaonog zavarenog spoja je 7mm.

Ispitivanjem penetrantskom tečnošću ugaonog zavarenog spoja probe 4 utvrđeno je, da zadovoljava nivo kvaliteta prema standardu SRPS EN ISO 5817 "B" [4].



Slika 5. Makro presek zavarenog spoja – proba 4

Figure 5. Macro cross section of welded joint - test 4



Tabela 5. Prosečne vrednosti tvrdoće u karakterističnim zonama zavarenog spoja proba 4

Table 5. Average values of hardness in the characteristic zones of the welded joint – test 4

	S355 OM	ZUT/S355	MŠ	ZUT/Trafo	TrafoOM
Tvrdoća, HV	122	187	256	140	119

Makroskopskim ispitivanjem ugaonog zavarenog spoja proba 4, konstatovana je prekomerna asimetričnost ugaonog spoja. Debljina zavarenog ugaonog spoja je 6mm. Klasifikacija geometrijskih nepravilnosti rađena je prema SRPS EN ISO 6520-1 2008 [5].

Probe 3 i 4 pokazuju značajno bolje uvarivanje kako čelika S355, tako i u trafo lim. Pretpostavljeno je da je to posledica promene zavarivanja “na gore” umesto “na dole”. Sa druge strane, tvrdoća metala šava je u svim slučajevima znatno iznad vrednosti osnovnih metala, tako da može da se preporuči promena dodatnog materijala, čime bi se ova

4. Zaključak

Ispitani su raznorodni zavareni spojevi čelika S355/trafo lim (dva kvaliteta), zavareni MAG postupkom sa dva seta parametara zavarivanja. Najbolji rezultat je dobijen za probu broj 4.

Da bi se smanjila razlika tvrdoće metala šava i osnovnih metala, predložena je promena dodatnog materijala. Takođe je predloženo smanjenje prečnika žice, kako bi se smanjilo nadvišenje. Ovako dobijeni zavareni spoj tek treba ispitati sa aspekta otpora na vrtložne struje u jezgrukoje smanjuju koeficijent korisnog dejstva.

Literatura / References

- [1] Drobnjak, DJ., (2015), Fizička Metalurgija: Fizika čvrstoće i plastičnosti, TMF, Beograd
- [2] Radović, N., (2020), Čelici – struktura i svojstva, interne skripte TMF, Beograd
- [3] Prokić-Cvetković, R., Popović, O., (2020), Metalurgija zavarivanja, MF, Beograd
- [4] SRPS EN ISO 5817:(2015): Zavarivanje — Spojevi zavareni topljenjem na čeliku, niklu, titanu i njihovim legurama (isključujući zavarivanje snopom) — Nivoi kvaliteta nepravilnost, ISS, Beograd
- [5] SRPS EN ISO 6520-1 (2008): Zavarivanje i srodni postupci - Klasifikacija geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima - Deo 1: Zavarivanje topljenjem, ISS, Beograd
- [6] Cunjuan Xia, Hongze Wang, Yi Wu and Haowei Wang, (2020): “Joining of the Laminated Electrical Steels in Motor Manufacturing: A Review”, Materials 13, 4583-4604

razlika smanjila (npr. G 42 2M G2Si). Da bi se još bolje kontrolisala veličina tečnog kupatila i nadvišenje spoja, može se razmotriti i smanjenje debljine dodatne žice, sa 1,2 na 1,0mm

Na ovaj način će se obezbediti minimalni zahtevi sa aspekta integriteta zavarenog spoja. Sa druge strane, u narednim koracima treba uraditi ispitivanje električnih osobina i magnetne permabilnosti, jer je ZUT sa strane trafo lima nepovratno promenio strukturu. Prema tome, zahtevi sa aspekta mehaničkih osobina su tek potreban uslov za uspešan zavareni spoj [6].

4. Conclusion

Welded joints of different steels S355 and transformer sheet steel (two grades), welded by MAG method with two sets of welding parameters, and were tested. The best result was obtained for the test number 4.

In order to reduce the difference between the hardness of the weld metal and the base metal, a change in the filler metal has been proposed. It is also proposed to reduce the diameter of the wire, in order to reduce the overlap. The weld obtained in this way has yet to be tested from the aspect of eddy current resistance in the core, which reduces the efficiency.