

OPTIMIZACIJA ELEKTROLUČNOG ZAVARIVANJA TOPLJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOM GASU PRI ZAVARIVANJU MPM SENDVIČ LIMOVA**OPTIMIZATION OF GAS METAL ARC WELDING DURING WELDING OF MPM SANDWICH SHEET METAL**Milko Madžar, Sebastian Baloš, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast - MAŠINSTVO**

Kratak sadržaj – *Pojavom sve strožijih zahteva za smanjenje buke i vibracija, pojavljuju se i novi materijali koji mogu da ispunite te zahteve. Jedan od tih materijala jesu metal – polimer – metal (MPM) sendvič paneli korišćeni kao antiakustična barijera, za kućišta industrijskih generatora i elektromotora. Zavarivanje ovih panela je zbog prisustva polimernog sloja problematično i može da rezultuje deformacijama, odnosno razdvajanjem čeličnih ploča. U ovom radu, prikazana je optimizacija tehnologije zavarivanja, sa ciljem da se na što ekonomičniji način, izvrši zavarivanje, uz što manje isparavanje polimernog međusloja.*

Ključne reči: *MPM lim, zavarivanje, MAG postupak.*

Abstract – *With increase of demands for lowering noise and vibration levels, there are many new materials developed that can satisfy these demands. One of these materials is metal – polimer – metal (MPM) sandwich panel used as anti-aqoustic element in industrial generators and electric motor housings. Problems related to welding refer to the polymer interlayer, that is, buckling and separating of steel plates. In this paper, welding technology optimization is shown, so that the joining process is as economical and with as low evaporation of polymer interlayer as possible.*

Keywords: *MPM plate, welding, MAG procedure.*

1. UVOD

Zavarivanje predstavlja proces u kome se dva materijala spajaju u neraskidivu vezu. Ovaj proces može se ostvariti sa dodatkom dodatnog materijala ili bez dodatnog materijala. Zavareni spoj mora ispuniti definisane tehnološke zahteve, mehaničke osobine, a u pojedinim slučajevima i da poseduje određene estetske zahteve [1].

MPM limovi se koriste kao kućišta velikih industrijskih elektromotora i električnih generatora, delova panela za vozila, za poklopce motora i kućišta menjača, itd. Njihova osnovna prednost u odnosu na jednoslojne čelične limove jeste sposobnost smanjenja buke i upijanja vibracija. Najčešći postupci zavarivanja MPM limova su MIG/MAG i elektrotoporni postupak [2].

NAPOMENA:

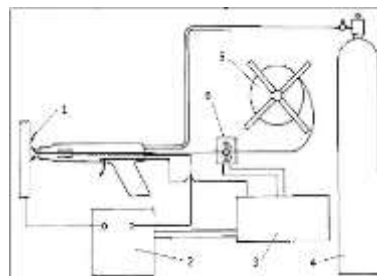
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio prof. dr Sebastian Baloš.

1.2 MIG/MAG postupak zavarivanja

Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom u zaštitnom gasu (slika 1) je proces spajanja osnovnog i dodatnog materijala topljenjem pri čemu se zagrevanje vrši električnim lukom, dodatni materijal je u koturu i može se primenjivati inertni ili aktivni zaštitni gas koji smanjuje potencijal jonizacije prostora između elektrode i štiti od prodora atmosferskih gasova.

Ako je zaštitni gas inertan (argon Ar, helijum He ili neka mešavina gasova koja se ponaša kao inertni gas) postupak se naziva MIG zavarivanje. Zaštitni gas može biti i aktivan (CO₂ ili mešavina gasova koja ima funkciju kao aktivan gas) tada se taj postupak naziva MAG zavarivanje [3].

U ovom radu, prikazana je optimizacija tehnologije zavarivanja postupkom MIG/MAG, sa ciljem da se na što brži i ekonomičniji način izvrši zavarivanje MPM limova, uz što manje isparavanje polimernog međusloja, čime se stvaraju preduslovi za smanjenje deformacija čeličnih limova.



Slika 1. *Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom u zaštitnom gasu: 1. Zaštitni gas; 2. Izvor struje; 3. Komandni ormar; 4. Boca sa zaštitnim gasom; 5. Kotur sa el. žicom; 6. Dovod žice [1].*

2. EKSPERIMENTALNI DEO**2.1. Zavarivanje MPM limova**

MPM limovi u ovom radu se sastoje iz dve čelične ploče debljine po 3 mm. Između njih se nalazi sloj vinil kopolimernog monomera, debljine 0,05 mm, koji povezuje dva čelična lima. Hemijski sastav limova je prikazan u tabeli 1, a mehaničke osobine u tabeli 2. U tabeli 1 dat je C ekvivalent (C_{EKV}) koji je dobijen na osnovu sledeće jednačine [4]:

$$C_{EKV} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad [\%] \quad (1)$$

Tabela 1. Hemijski sastav MPM limova [mas. %].

% C	% Si	% Mn	% S	% Cr	% P	% Al
0,03	0,011	0,185	0,009	0,049	0,011	0,039
% Cu	% Ni	% Fe	C _{EKV}			
0,019	0,025	ostatak	0,074			

Tabela 2. Mehaničke osobine MPM limova.

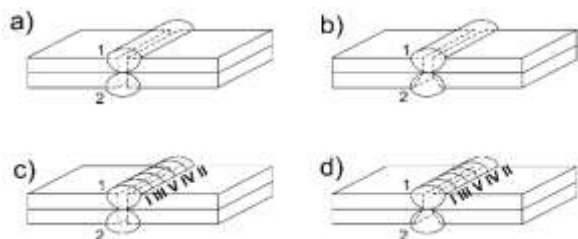
Granica tečenja Re [MPa]	Zatezna čvrstoća Rm [MPa]	Izduženje A [%]
176	281	40

U svrhu eksperimentalnog ispitivanja, MPM limovi su isečeni na sledeće dimenzije: 250 x 200 mm. Limovi su spojeni pomoću MAG postupka, po dužoj strani pravougaonika, koristeći uređaj EWM Vega 500, i Boehler EMK 6 punu elektrodnu žicu za zavarivanje sa hemijskim sastavom prikazanim u tabeli 3.

Tabela 3. Kataloški hemijski sastav elektrodne žice Boehler EMK 6

% C	% Si	% Mn
0,1	0,9	1,4

Primenjeni su različiti parametri zavarivanja, od kojih su najvažniji tipovi zavara prikazani na slici 2. Korišćene su četiri vrste sučeonih šavova: I šav sa 1 mm zazora, kombinacija I šava (gornja ploča) i V šava (donja ploča). Zavarivanje u jednom prolazu i zavarivanje u segmentima. Kod kombinacije I i V šava, prvi prolaz je izveden na gornjem delu šava čime se omogućava isparavanje polimera kroz donji deo šava.



Slika 2. Sučeoni zavari: a) I šav, zavarivanje u jednom prolazu sa obe strane; b) kombinacija I šava (gornja ploča) i V šava (donja ploča), zavarivanje sa obe strane; c) I šav, zavarivanje u segmentima sa obe strane; d) Kombinacija I i V šava, zavarivanje u segmentima sa obe strane.

Parametri procesa zavarivanja su prikazani u tabeli 4, dok je plan zavarivanja prikazan u tabeli 5. Korišćene su dve vrste zaštitnog gasa, CO₂ za prva četiri uzorka (1-4), i mešavina C18 (Ar + 18 % CO₂) za sledeća četiri uzorka (5 – 8).

Ispitivanje izrađenih epruveta na: zatezanje, savijanje i makro ispitivanja izvršena su na Fakultetu Tehničkih Nauka u Laboratoriji za ispitivanje materijala na Departmanu za proizvodno mašinstvo.

Ispitivanja zateznih karakteristika su urađena na proporcionalnim epruvetama širine 8 mm i paralelne dužine 70 mm na mehaničkoj kidalici VEB ZDM 5/91. Zatezanje je izvršeno na po tri epruvete od svakog uzorka.

Tabela 4. Parametri procesa zavarivanja

Vrsta zavarivanja	DC (+)
Struja zavarivanja	150 A
Brzina zavarivanja - I šav	42 cm/min
Brzina zavarivanja - V šav	14 cm/min
Nagib elektrode	60 o
Zaštitni gas	CO ₂ or C18 mix

Tabela 5. Plan zavarivanja.

Oznaka	zavarivanje kao na slici:	Brzina zavarivanja [cm/min]		Zaštitni gas
		Gornji prolaz	Donji Prolaz	
1	Slika 1a	42	42	CO ₂
2	Slika 1b		14	CO ₂
3	Slika 1c		42	CO ₂
4	Slika 1d		14	CO ₂
5	Slika 1a		42	C18
6	Slika 1b		14	C18
7	Slika 1c		42	C18
8	Slika 1d		14	C18

Za ispitivanje savijanjem korišćen je trn ϕ 24 mm, oslonci su bili na rastojanju od 36,5 mm, ispitivanje je vršeno do ugla savijanja od 180°. Ispitivane epruvete su širine 15 mm, a dužine 100 mm. Savijanje je izvršeno na po dve epruvete od svakog uzorka kako bi ispitali obe strane zavarenog spoja.

Makro i mikro struktura je ispitana nakon standardne metalografske pripreme koja se sastoji iz sečenja, brušenja na brusnim papirima različite granulacije (120, 220, 320, 500, 1000, 1500, 2000), poliranja dijamantskom suspenzijom (granulacije 6, 3, 1 μ m) i nagrizanja sa 3 % azotnom kiselinom (Nital).

Tvrdoća je ispitana metodom po Vickersu na uređaju VEB HPO-250, sa opterećenjem od 10 kg po odgovarajućoj šemi. Izvršena su po tri merenja tvrdoće u svakoj zoni (osnovni materijal (OM), zona uticaja toplote (ZUT) i metal šava (MŠ)).

Uticaj zavarivanja na polimerni međusloj je ispitivan nakon sečenja čeličnih limova po metalu šava i njihovog razdvajanja kako bi pristupili polimernom sloju.

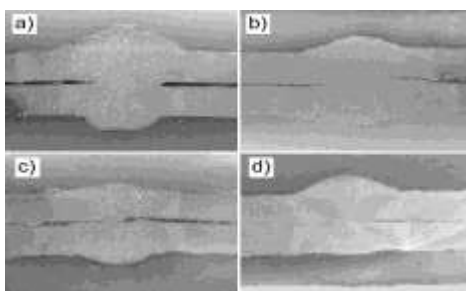
Merenja su izvršena od zavarene ivice lima do karakterističnih rastojanja. Ova karakteristična rastojanja odgovaraju istopljenom, oštećenom i međusobno povezanom poli-meru.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

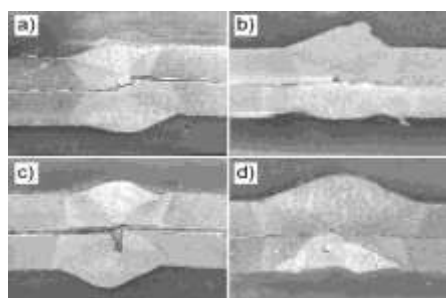
3.1 Makro ispitivanje

Makro slike spojeva su prikazane na slikama 3 i 4. U svim uzorcima osim u uzorcima 6, 7 i 8 (slika 3b, c, d) je postignuta puna penetracija.

Usled toga, u uzorcima koji su zavareni sa C18 zaštitnim gasom je postignuta manja, nepotpuna penetracija. Na slikama 3 i 4 se može videti tipičan šav sa zonom stubastih kristala. Takođe se može primetiti šira zona uticaja toplote.



Slika 3. Uzorci zavareni sa zaštitnim gasom CO₂: a) uzorak 1; b) uzorak 2; c) uzorak 3; d) uzorak 4.



Slika 4. Uzorci zavareni sa zaštitnim gasom C18: a) uzorak 5; b) uzorak 6; c) uzorak 7; d) uzorak 8.

3.2 Ispitivanje tvrdoće

Rezultati ispitivanja tvrdoće (HV10) su prikazani u tabeli 6. Tvrdoća osnovnog materijala je relativno ujednačena i odgovara zateznoj čvrstoći koja je prikazana u tabeli 2. Sve vrednosti za tvrdoću dobijene u ZUT-u imaju vrednost ispod 300HV, međutim, postoje značajne varijacije. Kod uzoraka sa V šavom, koji su zavareni zaštitnim gasom C18, u segmentima, je dobijena nešto veća tvrdoća u ZUT-u i MŠ-u, što je verovatno rezultat potpunog izlaganja isparenom ugljeniku iz polimernog međusloja.

Tabela 6. Rezultati tvrdoće HV10.

Uzorak, br. prolaza	Tvrdoća HV10															
	OM			ZUT			ŠAV			ZUT			OM			
1	1	109	117	109	114	118	115	169	155	152	121	121	113	107	115	115
	2	121	117	117	115	118	115	169	161	154	123	117	115	121	115	117
2	1	107	115	121	127	150	131	152	151	146	123	123	116	117	117	115
	2	109	107	119	118	120	127	169	178	153	112	114	121	109	115	115
3	1	121	109	109	147	129	126	189	191	187	129	127	121	117	117	121
	2	119	121	107	131	126	146	176	175	182	133	128	133	109	117	117
4	1	121	107	117	120	125	119	194	188	180	131	130	124	117	117	117
	2	115	119	121	117	120	120	157	155	160	132	121	131	119	115	119
5	1	121	121	109	131	131	140	206	206	201	126	127	126	117	115	115
	2	121	109	117	133	125	131	192	197	199	124	131	130	117	115	114
6	1	109	109	121	136	143	144	187	182	160	133	126	120	117	118	117
	2	121	115	119	125	118	114	177	170	180	152	142	143	115	121	117
7	1	117	107	109	144	146	169	206	206	185	136	128	128	121	106	115
	2	121	119	115	132	146	147	159	183	179	143	133	122	117	107	104
8	1	117	121	119	122	123	146	198	189	192	138	126	117	115	115	104
	2	109	115	117	122	122	125	224	227	240	129	123	133	117	115	115

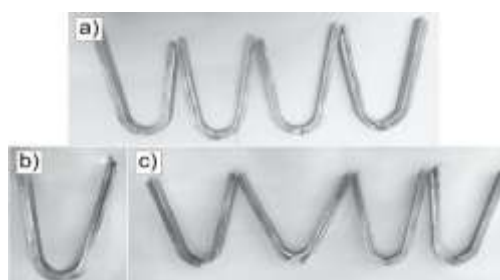
3.3 Ispitivanje zatezanjem i savijanjem

Rezultati ispitivanja savijanjem i zatezanjem dati su u tabeli 7. Pri ispitivanju zatezanjem kod uzoraka 1-4 i 7 do loma je došlo u OM-u. Kod uzoraka 5 i 6 do loma je došlo u OM-u i MŠ-u, a kod uzorka 8 je do loma došlo samo u MŠ-u.

Nakon savijanja uočene su prsline na uzorcima 5, 7 i 8, kod uzorka 8 pored prsline došlo je i do loma epruveta, dok kod ostalih uzoraka nisu uočene prsline, slika 5.

Tabela 7. Rezultati zatezanja i savijanja

Uz. br.	Ispitivanje zatezanja		Ispitivanje savijanja
	Zatezna čvrstoća [MPa]	Mesto loma	
1	287±6	OM, OM, OM	Nema prsline ili loma
2	292±3	OM, OM, OM	Nema prsline ili loma
3	292±3	OM, OM, OM	Nema prsline ili loma
4	294±6	OM, OM, OM	Nema prsline ili loma
5	235±35	OM, OM, MŠ	Četiri pukotine
6	243±55	OM, MŠ, OM	Nema prsline ili loma
7	268±11	OM, OM, OM	Jedna prsline
8	161±29	MŠ, MŠ, MŠ	Tri prsline, jedan lom



Slika 5. Ispitivanje savijanja sa prslinom i prelomom: a) uzorak 5; b) uzorak 7; c) uzorak 8

3.4 Ispitivanje mikrostrukture

Na slikama 6 i 7 je prikazana mikrostruktura uzoraka 1 i 8, usled njihove velike razlike u mehaničkim osobinama. Sve mikrostrukture su slične, osim u zoni ponovnog zagrevanja, koja nije prisutna kod uzorka 8.

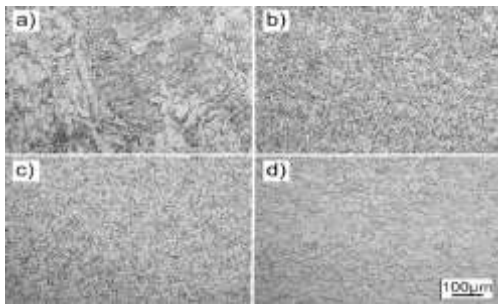
3.5 Ispitivanje debljine polimernog sloja nakon zavarivanja

Oblast isparavanja, topljenja i međusobnog povezivanja je prikazana na slici 8, dok su vrednosti izmerenih rastojanja date u tabeli 8.

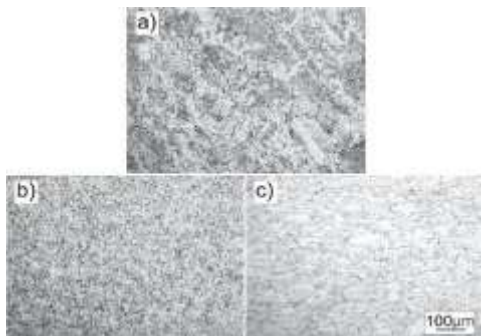
Rastojanja isparavanja, topljenja i među-sobnog povezivanja kod uzoraka 1-4 su veće u poređenju sa uzorcima 5-8, verovatno usled primene CO₂ kao zaštitnog gasa pri zavarivanju, nasuprot C18, koji ima manji sadržaj kiseonika.

Najveće oštećenje polimernog sloja je uočeno kod uzorka 2, najverovatnije zbog visokog unosa toplote, koja je uticala na dobijanje viših mehaničkih osobina.

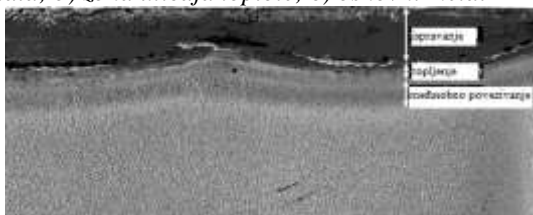
Primenom C18 kao zaštitnog gasa dobija se manje rastojanje isparavanja polimernog međusloja, ali se takođe dobijaju i lošije mehaničke osobine.



Slika 5. Mikrostruktura uzorka 1: a) zavar-zona stubastih kristala; b) zavar-zona ponovnog zagrevanja-; c) zona uticaja toplote; d) osnovni metal



Slika 6. Mikrostruktura uzorka 8: a) zavar-zona stubastih kristala; b) zona uticaja toplote; c) osnovni metal



Slika 8. Oblast isparavanja, topljenja i međusobnog povezivanja kod uzorka 4.

Tabela 8. Rastojanja isparavanja, topljenja i međusobnog povezivanja.

Uz.br	Rastojanje isparavanja (prosek) [mm]	Rastojanje topljenja (prosek) [mm]	Rastojanje međusobnog povezivanja (prosek) [mm]
1	6,5-13,2 (9,85)	2,2-5,3 (3,75)	5,7-7,3 (6,5)
2	7,5-15,1 (11,3)	3,8-5,3 (4,55)	7,7-9,6 (8,65)
3	7,1-12,2 (9,65)	2,8-4,7 (3,8)	3,6-6,8 (5,2)
4	5,3-11,8 (8,55)	3,1-3,5 (3,3)	5,0-8,8 (6,9)
5	4,6-8,0 (6,3)	1,6-3,0 (2,3)	3,6-4,8 (4,2)
6	3,6-10,3 (6,95)	4,4-6,2 (5,3)	4,6-4,7 (4,65)
7	8,0-8,2 (8,1)	2,2-2,3 (2,25)	4,4-5,5 (4,95)
8	4,0-5,0 (4,5)	1,8-3,2 (2,5)	1,5-1,7 (1,6)

Ako se uzme da su sa pogleda strukturnog integriteta mehaničke osobine najvažnije, uzorci 1-4 imaju prednost u odnosu na uzorke 5-8. Optimalni uzorak, osim kratkog rastojanja isparavanja polimernog međusloja treba da ima i najkraći utrošak vremena.

Iako je brzina zavarivanja koristan indikator, prekidanje šavova kod uzoraka 3 i 4 takođe zahteva dodatno vreme, naročito kod uspostavljanja luka i kod preklopa šavova. Kako su karakteristična rastojanja slična kod uzoraka 1 i 3, uzorak 1 se znatno brže zavaruje pošto se zavarivanje izvodi u jednom prolazu.

Usled toga, uzorak 1 se može smatrati kao optimalni uzorak od svih ispitanih uzoraka.

4. ZAKLJUČAK

U skladu sa rezultatima eksperimenta, mogu se izvući sledeći zaključci:

- Puna penetracija je postignuta u uzorcima 1-4, koji su zavareni sa CO₂ zaštitnim gasom.
- Najveća zatezna čvrstoća i zadovoljavajući rezultati savijanja su dobijeni kod uzoraka 1-4. Ovo je razumljivo usled pune penetracije dobijene na ovim uzorcima. Kod uzoraka koji su zavareni sa C18 zaštitnim gasom, dobijene su značajno lošije mehaničke osobine.
- Uzorci 5-8, iako su njihova rastojanja isparavanja manja u odnosu na uzorke 1-4, imaju niže mehaničke osobine.

Način izrade uzorka u jednom prolazu sa obe strane (uzorak 1) predstavlja izbor tehnologije zavarivanja, jer poseduje optimalnu kombinaciju mehaničkih osobina i tehnološke jednostavnosti u smislu brzine pripreme uzorka i brzine zavarivanja.

LITERATURA:

- [1] Palić Vlastimir: Zavarivanje 1, Fakultet Tehničkih Nauka Novi Sad, 1987.
- [2] http://antiphon.se/wp-content/uploads/antiphon_mpm_engelsk09_id340.pdf (23.06.2018)
- [3] Grupa autora, Zavod za zavarivanje, Postupci zavarivanja i oprema za zavarivanje, Beograd 2004.
- [4] Ivan Hrivnjak, Zavarljivost čelika, IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1982., 189.
- [5] <https://www.resale.de/ewm-wega-500-schweissger%C3%A4t/Nr-6073010> (23.06.2018)

Kratka biografija:



Milko Madžar rođen u Novom sadu 1991. god. Master rad na Fakultetu Tehničkih Nauka iz oblasti mašinstva – Optimizacija elektrolučnog zavarivanja topljivom elektrodom u zaštitnom gasu pri zavarivanju MPM sendvič limova.



Sebastian Baloš rođen je u Somboru 1974. god. Doktorirao je na Fakultetu Tehničkih Nauka 2010. godine iz oblasti Materijali i tehnologija spajanja. 2011. stekao zvanje docenta, a 2016. u vanrednog profesora.