

Pulzno varjenje konstrukcijskih jekel

Pulsed arc welding of structural steels

RAJKO KEJŽAR¹, UROŠ KEJŽAR²

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva cesta 6, 1000 Ljubljana, Slovenija;

E-mail: rajko.kejzar@fs.uni-lj.si

²ISKRA VARJENJE, Stegne 21c, 1000 Ljubljana, Slovenija;

E-mail: uros.kejzar@iskra-varjenje.si

Received: July 6, 2007

Accepted: July 10, 2007

Izveček: Konstrukcijska jekla lahko zelo ekonomično varimo z žicami VAC 60 v zaščiti plina CO₂. Varilni proces je zelo kaotične narave in ne zagotavlja lepega izgleda površine (brizganje) in visoke kakovosti vara. Že z zamenjavo zelo oksidativnega plina CO₂ z manj oksidativno plinsko mešanico Ar + 18 vol.% CO₂ dobimo lepši izgled površine in tudi višjo kakovost vara. Še boljše kakovost varov lahko dobimo s pulznim varjenjem konstrukcijskih jekel. Pri študiju in razvoju obstoječega varilnega procesa smo posebno pozornost usmerili na prehajanje materiala. To poteka pri pulznem varjenju z žico VAC 60 v zaščitni mešanici Ar + 18 vol.% CO₂ zelo mirno in enakomerno v zelo širokem območju varilnih parametrov. Zaradi nizke oksidativnosti plinske mešanice Ar + 18 vol.% CO₂ in zelo kratkega časa nastajanja kapljice pri pulznem varjenju prihaja do pomembnih kemičnih procesov v kapljici šele pri varjenju z višjo povprečno jakostjo varilnega toka (281A). Manj legirane navare s silicijem in manganom, ki so bolj kakovostni, dobimo zato le zaradi razredčenja navara, ki je posledica taljenja osnovnega materiala – uvarjanja. Na velikost uvara pa lahko pri pulznem varjenju zelo učinkovito vplivamo z izbiro oblike in energije pulza ter jakosti osnovnega toka.

Abstract: Structural steels can be welded very cost-effectively with VAC 60 wires in CO₂ shielding gas. Welding process is very chaotic and does not guarantee a nice appearance of the weld face and a high weld quality. With the replacement alone of a highly oxidizing gas, i.e. CO₂, with a less oxidizing gas mixture, i.e. Ar + 18 vol.% CO₂, a nicer appearance of the weld face and a higher weld quality may be obtained. Still higher quality of welds may be accomplished by employing pulsed arc welding of structural steels. In the study and development of the existing welding process special attention was paid to the metal transfer. In pulsed arc welding with VAC 60 wire in the protective gas mixture of Ar + 18 vol.% CO₂, the metal transfer is very smooth and uniform in a very wide range of welding parameters. Because of the low oxidizing capability of Ar + 18 vol.% CO₂ gas mixture and a very short time of droplet formation, however, in pulsed arc welding

major chemical processes in the droplet will occur only in welding with a higher average welding current (281A). Less alloyed surfacing welds with silicon and manganese will provide higher quality only due to the surfacing weld dilution resulting from the parent-metal fusion, i.e. penetration. In pulsed arc welding the degree of penetration may be efficiently affected by a pulse shape and energy and base current.

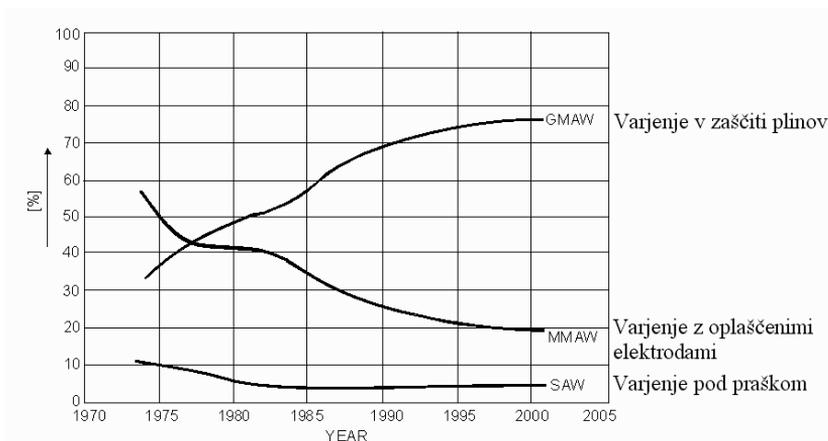
Ključne besede: MIG/MAG-varjenje, pulzno varjenje, žica VAC 60, konstrukcijsko jeklo H2, zaščitni plini: (CO₂, Ar + 18 vol.% CO₂), prehajanje materiala, odtaljevanje, uvarjanje, kvaliteta vara

Keywords: MIG/MAG welding, pulsed arc welding, VAC 60 wire, H2 structural steel, shielding gases: (CO₂, Ar + 18 vol.% CO₂), metal transfer, melting-off, penetration, weld quality.

UVOD

V praksi konstrukcijska jekla običajno varimo po MAG-postopku z masivnimi varilnimi žicami in v zaščiti CO₂. MAG – postopek varjenja je produktiven in ekonomičen ter zelo prilagodljiv. Ta postopek omogoča polavtomatsko varjenje tudi na terenu ter je zelo primeren za avtomatizacijo in robotizacijo varilnega procesa v industriji. Zaradi njegove

vsestranske industrijske uporabnosti se je delež varjenj različnih materialov v zaščiti plinov zelo povečal. V zadnjih dvajsetih letih se je predvsem zaradi zmanjšanja deleža ročno obločnega varjenja z oplaščenimi elektrodami delež tega načina varjenja v zaščiti plinov celo podvojil. Na sliki 1 je prikazana zastopanost najpomembnejših elektroobločnih postopkov varjenja^[1].



Slika 1. Zastopanost elektro-obločnih postopkov varjenja v zahodni Evropi^[1]
Figure 1. Shares of most important arc welding processes in Western Europe^[1]

Pospešeno povečevanje uporabe postopkov elektro obločnega varjenja v zaščiti plinov je sprožilo vrsto raziskav, ki so vplivale na hitrejši razvoj MIG/MAG postopka varjenja^[1-3].

Z uporabo najnovejših dosežkov moderne elektronike in računalništva se je znatno pospešil tudi razvoj varilnih naprav. Ker je varilni proces zelo kompleksen, je razvoj izvorov toka usmerjen v mikroračunalniško krmiljenje parametrov varjenja^[4-7].

Klasičen varilni proces pri varjenju konstrukcijskih jekel z varilno žico VAC 60 (oznaka po EN 440 je G3Si)^[8] pod oksidativnim zaščitnim plinom CO₂^[9-11] je zelo kaotične narave in ne zagotavlja visoke kakovosti vara^[12]. Tako poteka kratkostično varjenje tankih pločevin neenakomerno z vidika prehajanja materiala. Še bolj neenakomeren prehod materiala je zaslediti pri zelo produktivnem pršečem varjenju debelih pločevin. Pršeče prehajanje materiala temelji na eksplozijah odtaljenih kapljic, zaradi nastajanja ogljikovega monoksida (CO) v raztaljeni kovini varilne žice. Tako varjenje je zelo dinamično ter ga spremlja zelo pogosto tudi brizganje taline, kar pa daje slab

KRATKOSTIČNO IN PRŠEČE VARJENJE PO MAG-POSTOPKU

Pri varjenju konstrukcijskih jekel zelo pogosto kot dodajni material uporabljamo masivno žico VAC 60. Namenjena je

izgled vara in njegove okolice. Z zamenjavo zelo oksidativnega plina CO₂ z bolj inertno plinsko mešanico Ar + 18 vol.% CO₂ postane varjenje bolj mirno, ker zaradi zmanjšane oksidativnosti atmosfere obloka v kapljicah ne nastaja več ogljikov monoksid (CO). Proces poteka zelo enakomerno in brez brizganja in s prehajanjem materiala v finokapljičasti obliki^[13].

Še bolj enakomeren proces varjenja in bolj umirjene razmere med varjenjem, pa se doseže s pulznim prehajanjem materiala, ki zagotavlja znatno boljšo kakovost varov. Pulzno varjenje lahko dosežemo s tiristorskimi^[14], kot tudi tranzistorskimi izvori varilnega toka. Zadnji so izjemno primerni za mikroračunalniško krmiljenje varilnega procesa^[4-7,15].

Pulzno varjenje z digitalnimi izvori toka zagotavlja kakovosten nadzor nad procesom varjenja v zelo širokem območju varilnih parametrov. Zaradi izjemnih možnosti vplivanja na uvarjanje je ta način varjenja primeren tako za varjenje tankih kot tudi debelih pločevin in prav tako tudi za oplemenitenje konstrukcijskih jekel z navarjanjem^[16].

varjenju pod CO₂, zato je legirana z 0,9 % Si in 1,5 % Mn. Zaradi oksidativnosti zaščitnega plina CO₂ silicij in mangan med varjenjem delno odgorita^[11]. Odgorevanje je prikazano v tabeli 1.

Tabela 1. Odgor in prigor elementov ter nastajanje čistega vara (navara) in varilne žindre pri varjenju z žico VAC 60 v oksidativnem zaščitnem plinu CO₂. Osnova za izračun je 100 g masivne varilne žice.

Table 1. Burn-off and pick-up of elements and formation of the deposited metal and the welding slug in CO₂ welding with VAC 60 solid wire. The calculations are based on 100 g of the wire.

Dodajni material	Kovine					Oksidi			
	C	Si	Mn	Fe	Σ	SiO ₂	MnO	FeO	Σ
VAC 60 (g)	0,06	0,90	1,50	97,54	100	-	-	-	/
Odgor/Prigor (g)	+0,03	-0,33	-0,22	-0,16	-0,68	+0,71	+0,28	+0,21	+1,20
Čisti var/Žindra (g)	0,09	0,57	1,28	97,38	99,32	0,71	0,28	0,21	1,20
Sestava (%)	0,09	0,57	1,29	98,05		59,2	23,3	17,5	
Sestava navara (%) 45 % uvara	0,099	0,417	0,979						

Opomba: Navarjamo na konstrukcijsko jeklo H II (1.0452; 0,11 % C, 0,23 Si in 0,60 % Mn).

Zaradi oksidativnosti CO₂ pri visokih temperaturah varjenja, se vzpostavlja ravnotežje med oksidi v nastajajoči žindri in kovinami v varu:

$$\frac{(\% FeO)}{[\% Fe]} = 0,178$$

$$\frac{(\% MnO)}{[\% Mn]} = 18,1$$

$$\sqrt{\frac{(\% SiO_2)}{[\% Si]}} = 10,2$$

ki ustreza dezoksidaciji vara z okoli 0,1 mas.% O₂ [11].

Na kakovost varov varjenih po MAG-postopku v zaščitnem plinu CO₂ s kratkostičnim in pršičim prehajanjem materiala z varilno žico VAC 60, pomembno vpliva pogosto pojavljanje mikroporoznosti na mejah med posameznimi varki. Dosežena žilavost varov je

zato nekoliko slabša, vendar v večini primerov varjenja konstrukcijskih jekel še vedno zadovoljiva, saj dobimo kakovosten varjen spoj z žilavostjo okoli 100 J po metodi Charpy V notch pri 20 °C ter s sestavo in s trdotami okoli 140 HV 0,3. Nasprotno pa pri varjenju v plinski zaščitni mešanici sestavljeni iz Ar + 18 vol.% CO₂ dobimo nekoliko višje legirane in trše vare, če kot dodajni material uporabimo varilno žico VAC 60. Vzrok je manjše odgorevanje silicija in mangana iz varilne žice, kot v primeru varjenja pod zaščito CO₂. Zaradi drobno kapljicastega prehoda materiala in bolj enakomernega odtaljevanja so vari zelo čisti, skoraj brez nekovinskih vključkov in brez poroznosti. Ne glede na razmeroma veliko trdoto je žilavost varov varjenih v plinski mešanici Ar + 18 vol.% CO₂ presenetljivo dobra – celo boljša od varov varjenih v zaščiti plina CO₂. V tabeli 2 so podani rezultati kemične analize ter meritev trdot in žilavosti varov, ki smo jih varili po MAG-postopku z žico VAC 60 v zaščiti plina CO₂ in plinske mešanice Ar + 18 % CO₂.

Tabela 2. Kemične sestave, trdote in žilavosti varov, ki smo jih varili z varilno žico VAC 60, Φ 1,2 mm po MAG-postopku v zaščiti plina CO₂ in plinske mešanice Ar + 18 vol.% CO₂

Table 2. Chemical composition, hardness, and toughness values for MAG welds, welded in CO₂ and Ar + 18 vol.% CO₂ with VAC 60 welding wire, with diameter of 1.2 mm

Vzorec	Kemična sestava [%]			Trdote [HV 0,3]				Žilavost [J, Charpy Vnotch]		
	Št.	C	Si	Mn	Koren	Sredina	Teme	O.M.	+20°C	0°C
1	0,096	0,47	0,86	136	130	143	145	149	128	88
2	0,093	0,49	0,89	136	138	177	134	157	132	107
3	0,064	0,69	1,20	150	168	184	136	205	157	156

Legenda:

1. Kratkostično pod CO₂ (130A, 22V)
2. Pršeče pod CO₂ (210A, 24V)
3. Finokapljičasto v zaščiti mešanice plinov Ar + 18 vol.% CO₂ (220A, 24V)

Iz podatkov o kemični sestavi varov lahko ugotovimo, da je odgorevanje dezoksidantov (Si in Mn) pri varjenju pod zaščitnim plinom CO₂ tako na nataljeni žici, kot tudi na nastali kapljici zelo intenzivno. Znižanje vsebnosti silicija od 0,9 % v žici na 0,49 % v varu in mangana od 1,5 % v žici na 0,89 % v varu med varjenjem lahko pripišemo istočasno vplivu, ki ga ima na sestavo vara odgorevanje dezoksidantov in razredčenje čistega vara zaradi uvarjanja, ki je okoli 40 do 50 %-no, če varimo po MAG-postopku v zaščitnem plinu CO₂.

Pri varjenju pod zaščitnim plinom CO₂ se zaradi skoraj popolne disociacije CO₂ ($2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$) na temperaturi obloka, ki je pri MIG/MAG varjenju nad 5000 °C, zviša vsebnost ogljika v varih. Prigor ogljika v var je posledica reakcije $[\text{C}] + [\text{O}] \leftarrow \{\text{CO}\}$, ki zaradi visokega parcialnega tlaka ogljikovega monoksida v obloku pri varjenju v zaščiti CO₂ poteka v levo.

Pri varjenju z manj oksidativno plinsko mešanico Ar + 18 vol.% CO₂ pa je tako odgorevanje dezoksidantov (Si in Mn) kot tudi prigor ogljika v var neznaten. Kemična sestava vara je odvisna predvsem od razredčenja čistega vara zaradi uvarjanja v osnovno konstrukcijsko jeklo.

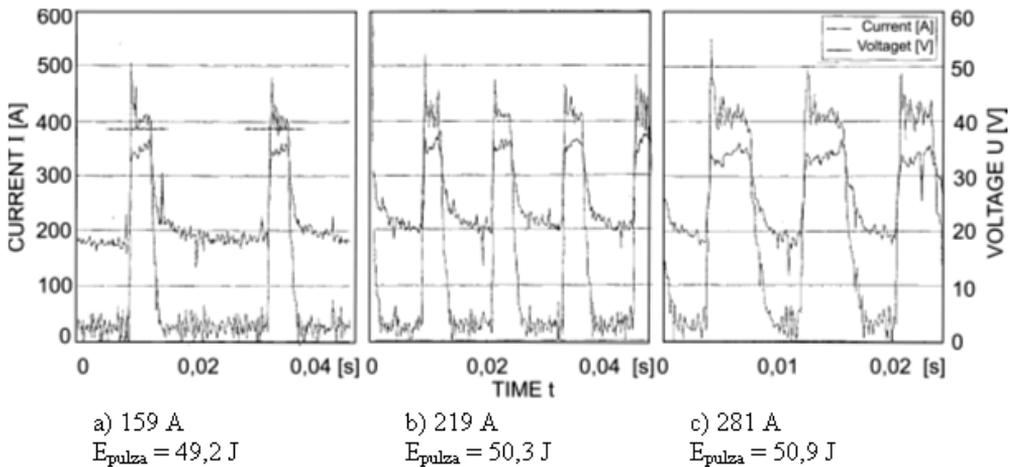
Velikost uvarjanja je pri varjenju v zaščiti plinske mešanice Ar + 18 vol.% CO₂ okoli 35 %-na, kar povzroči delno znižanje silicija od 0,9 % v žici na 0,69 % v varu in mangana od 1,5 % v žici na 1,20 % v varu, kar pa je bistveno manj kot pri varjenju v zaščiti plina CO₂. Zato imajo vari varjeni v zaščiti plinske mešanice Ar + 18 vol.% CO₂ kljub nižji vsebnosti ogljika (0,064 % C), še vedno nekoliko višjo trdoto. Boljša žilavost teh varov pa je posledica večje homogenosti in čistoče. Vari varjeni v zaščiti plinske mešanice Ar + 18 vol.% CO₂ so skoraj brez napak, to je brez mikroporoznosti in prav tako brez nekovinskih vključkov.

PULZNO VARJENJE PO MAG-POSTOPKU

Iz primerjave kakovosti varov, ki so bili varjeni po MAG-postopku v zelo oksidativnem zaščitnem plinu CO_2 , in varov, ki smo jih varili v manj oksidativni mešanici plinov Ar + 18 vol.% CO_2 smo ugotovili, da enakomerno odtaljevanje dodajnega materiala zelo ugodno vpliva tako na izgled vara, kot tudi na njegovo kakovost. Najlepše in najbolj kakovostne vare pa dobimo pri pulznem varjenju.

Pri pulznem varjenju z varilno napravo SYNERGIC 450 MIG PULSE pri jakostih varilnega toka nad 150 A v plinski zaščitni

mešanici Ar + 18 vol.% CO_2 poteka odtaljevanje dodajnega materiala v obliki drobnih kapljic. Pri izbrani nastavitvi varilnih parametrov, ko je povprečna in pulzna (maksimalna) jakost in napetost varilnega toka usklajena s hitrostjo varilne žice in frekvenco pulziranja, smo dosegli popolnoma enakomerno odtaljevanje kapljic. Potek pulziranja varilnega toka in napetosti je prikazan na sliki 2, v tabeli 3 pa so podani varilni parametri in meritve odtaljevanja kapljic za pulzno varjenje z žico VAC 60 premera ϕ 1,2 mm v zaščitni plinski mešanici Ar + 18 vol.% CO_2 .



Slika 2. Časovno spreminjanje toka in napetosti pri pulznem MAG-varjenju različnih povprečnih jakosti toka: a) 159 A, b) 219 A in c) 281 A

Figure 2. Time variation of welding current and voltage in pulsed MAG welding with different average currents: a) 159 A, b) 219 A in c) 281 A

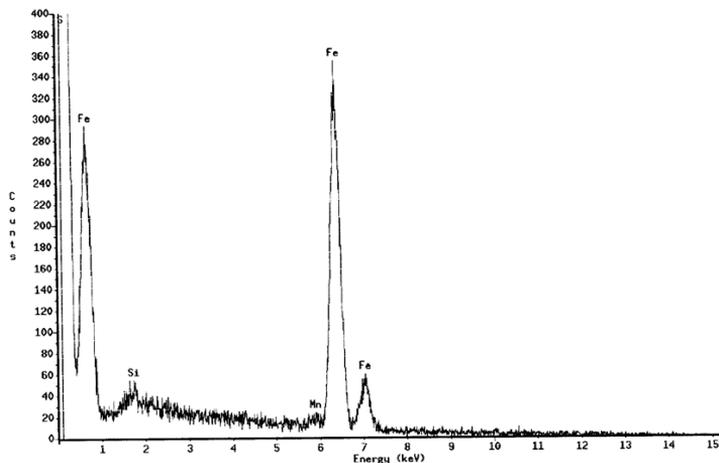
Tabela 3. Varilni parametri in podatki o odtaljevanju za pulzno MAG varjenje z žico VAC 60, premera ϕ 1,2 mm v zaščitni plinski mešanici Ar + 18 vol.% CO₂

Table 3. Welding parameters and information's of melting-off for pulsed MAG welding with 1.2 mm VAC 60 wire and using Ar + 18 vol.% CO₂ gas mixture

Vzorec	Jakost toka I (A)		Varilna napetost U (V)		Hitrost pomika varilne žice [m/min]	Frekvenca pulziranja Hz [s ⁻¹]	Odtaljevanje	
	Povprečna	Pulzna	Povprečna	Pulzna			Masa povprečne kapljice [g]	Izmerjena
Zap. št.	Povprečna	Pulzna	Povprečna	Pulzna			Izmerjena	Izračunana
1	159	385	16,3	33,6	3,0	42	0,0118	0,0106
2	219	386	21,4	34,3	5,0	80	0,0118	0,0092
3	281	392	24,9	32,7	6,7	130	0,0041	0,0075

Iz rezultatov študija odtaljevanja kapljic (prehajanje materiala) se lepo vidi, da se pri vsakem pulzu odtali samo ena kapljica. Le pri varjenju št. 3 (povprečna jakost toka je 281 A) prihaja do eksplozije kapljic (izmerjene kapljice so manjše od izračunanih).

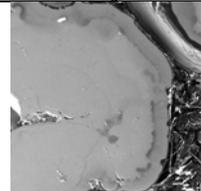
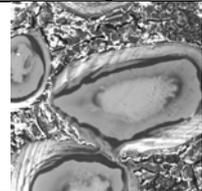
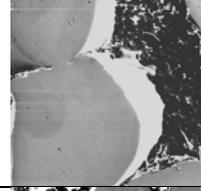
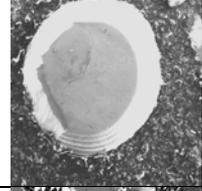
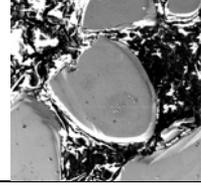
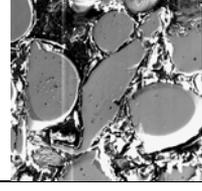
Intenzivnost in potek kemičnih procesov dezoksidacije vara med pulznim varjenjem smo ocenjevali na osnovi analize silicija in mangana v odtaljenih kapljicah. Na sliki 3 je prikazana izvedba meritev, v tabeli 4 pa rezultati določitev vsebnosti Si in Mn v kapljicah in izgled presekov kapljic.



Slika 3. Diagram določitve Si in Mn v kapljici po metodi EDS na elektronskem mikroskopu (št. 1; povprečna jakost toka 159A-manjša kapljica)

Figure 3. Diagram of determination of Si and Mn in droplet from method EDS on the electronic microscope (no. 1; average current 159 A – smaller droplet)

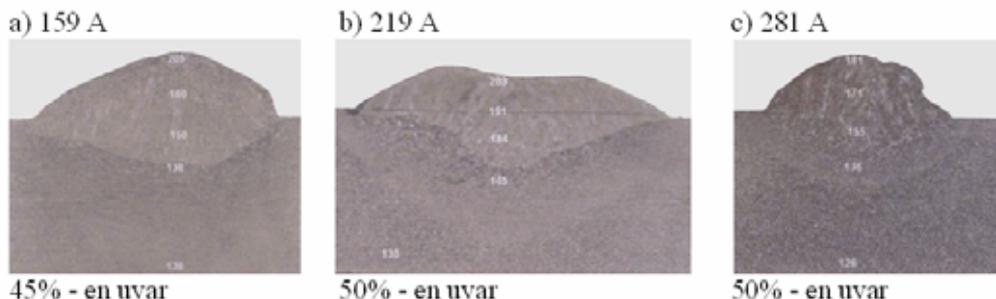
Tabela 4. Vsebnosti Si in Mn v kapljici in mikrostruktura na prerezu kapljic
Table 4. Contents of Si and Mn in the droplet and microstructure on cross section of droplet

Vzorec št. varjenja	Velikost kapljic	Kemična sestava kapljic		Mikrostruktura na prerezu kapljic (pov. 25x)	
		[mas.% Si]	[mas.% Mn]	večje	manjše
1 (159 A)	▪ večje	0,65 ± 0,33	2,05 ± 0,77		
	▪ manjše	0,96 ± 0,33	1,99 ± 0,81		
2 (219 A)	▪ večje	1,12 ± 0,24	1,65 ± 0,75		
	▪ manjše	0,88 ± 0,24	1,33 ± 0,44		
3 (281 A)	▪ večje	0,35 ± 0,21	0,43 ± 0,38		
	▪ manjše	0,82 ± 0,22	1,29 ± 0,40		

Iz kemične analize kapljic, ki je podana v tabeli 4, lahko zaključimo, da pri pulznem varjenju v zaščitni mešanici Ar + 18 % CO₂, ki je rahlo oksidativna, pri nizkih jakostih varilnega toka (pod 200 A) skoraj ni odgorevanja dezoksidantov, kot sta silicij in mangan. Intenzivnejše odgorevanje nastopi šele pri višjih jakostih varilnega toka (nad 250 A) in to le v večjih kapljicah.

Pri pulznem varjenju v rahlo oksidativni mešanici plinov Ar + 18 vol.% CO₂ je

odgorevanje dezoksidantov in legirnih elementov neznatno. Kemična sestava navara je zato odvisna le od razredčenja (razmešanja) čistega vara zaradi uvarjanja v osnovni material. Iz presekov navarov na sliki 4 vidimo, da je uvarjanje v vseh primerih navarjanja skoraj povsem enako. Trdote navarov in njihove kemične sestave se zato malo razlikujejo. Podatki o kemični sestavi navarov in njihovi trdoti so prikazani v tabeli 5.



Slika 4. Makrostruktura navarov pri pulznem MAG varjenju pri različnih povprečnih jakosti toka: a) 159 A, b) 219 A in c) 281 A

Figure 4. Macrostructure of surfacing welds in pulsed MAG welding with different average currents: a) 159 A, b) 219 A in c) 281 A

Tabela 5. Kemične sestave in trdote navarov po pulznem varjenju z žico VAC60 v zaščitni plinski mešanici Ar + 18 vol.% CO₂ na konstrukcijsko jeklo s parametri varjenja podanimi v tabeli 3

Table 5. Chemical composition and hardness of surfacing welds after pulsed MAG welding in an Ar + 18 vol.% CO₂ gas mixture with VAC 60 wire on structural steel employing the welding parameters given in Table 3

Vzorec	Povprečni tok	Kemična sestava navarov [%]			Trdota navarov [HV 0,3]		
		C	Si	Mn	Koren	Sredina	Teme
št.	I [A]						
1	159	0,073	0,51	0,91	138	160	206
2	219	0,084	0,52	0,93	145	181	203
3	281	0,094	0,44	0,78	136	171	181

Pulzno varjeni navari z žico VAC 60 v zaščitni plinski mešanici Ar + 18 vol.% CO₂ so visoko kakovostni in lepega videza. Tudi po detaljnem pregledu na preseku večvarkovnih navarov nismo zasledili mikroporoznosti in vključkov. Proces varjenja poteka zelo mirno in enakomerno, tako da se pri vsakem pulzu odtali le ena kapljica. Varjenje poteka brez brizganja, kar zagotavlja zelo lep izgled površine navara.

Zaradi znatno večjega uvarjanja v osnovno konstrukcijsko jeklo, so navari pri pulznem varjenju z varilno žico VAC 60 celo manj

legirani, kot pri finokapljicastem varjenju v zaščitni plinski mešanici Ar + 18 vol.% CO₂ (tabela 1). Legiranje navarov z ogljikom narašča z jakostjo varilnega toka. Parametri varjenja imajo močan vpliv na disociacijo CO₂ ter s tem tudi na parcialni tlak ogljikovega monoksida v obloku ($2 \text{ CO}_2 \rightarrow 2 \text{ CO} + \text{O}_2$) in oksidativnost atmosfere v okolici obloka. Zato pri nizkih jakostih varilnega toka (159 A) silicij in mangan skoraj ne odgorevata med varjenjem. Pri višji jakosti varilnega toka (281 A) pa povečana oksidativnost plinske atmosfere povzroči intenzivnejše odgo-

revanje dezoksidantov. Proces odgorevanja vpliva na znižanje vsebnosti Si in Mn v varu 3, kar je zelo lepo vidno v tabeli 3.

Pri danih pogojih pulznega varjenja z varilno žico VAC 60 v zaščitni plinski mešanici Ar + 18 vol.% CO₂ je bilo uvarjanje v osnovno konstrukcijsko jeklo okoli 50 %-no. Tako uvarjanje smo dosegli

SKLEPI

Z žico VAC 60 (0,06 % C; 0,9 % Si in 1,5 % Mn), ki jo proizvajajo ELEKTRODE Jesenice za varjenje po MAG postopku pod CO₂, dobimo zelo kakovostne vare z žilavostjo preko 150 J tudi v primeru, ko varimo v zaščitni plinski mešanici Ar + 18 vol. % CO₂. Varjenje poteka mirno, enakomerno in skoraj brez brizganja. Zaradi šibke oksidativnosti zaščitne plinske mešanice Ar + 18 vol.% CO₂ skoraj ni odgorevanja dezoksidantov med procesom taljenja dodatnega materiala pri varjenju. Razredčenje navara zagotavlja le intenzivnost taljenja osnove oziroma velikost stopnje uvarjanja, kar pa ne zadostuje, da ne bi bili navari višje legirani in trši. Dobre žilavosti so posledica visoke čistoče in kakovosti varov.

Še kakovostnejše vare in navare z dobrim videzom dobimo s pulznim varjenjem, v zaščitni plinski mešanici Ar + 18 vol. % CO₂. Ker vsak pulz odtali le eno kapljico, tudi brizganja ni, kar zagotavlja zelo lep izgled varov ali navarov. Zaradi zelo intenzivnega uvarjanja v osnovno konstrukcijsko jeklo so navari kljub varjenju z žico VAC 60 celo manj legirani, kot pri finokapljičastem varjenju v zaščiti Ar + 18 vol. % CO₂. Pri pulznem varjenju

pri varjenju z jakostjo osnovnega toka 30 A in energijo pulza, ki je bila pri vseh varjenjih okoli 50 J. S spreminjanjem jakosti osnovnega toka in energije pulza lahko vplivamo na uvarjanje, to je taljenje osnovnega materiala, kar je zelo pomembno pri varjanju, še pomembnejše pa je pri navarjenju legiranih nanosov na nelegirano konstrukcijsko jeklo^[16].

z nizkimi povprečnimi jakostmi varilnega toka skoraj ne pride do odgorevanja silicija in mangana med taljenjem dodatnega materiala. Na vsebnost silicija in mangana v navaru vpliva torej le stopnja uvarjanja, ki povzroči razredčenje čistega vara zaradi taljenja osnovnega konstrukcijskega jekla. Šele pri višjih povprečnih jakostih varilnega toka (281 A), nastane zaradi intenzivne disociacije CO₂ ($2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$) povečana oksidativnost obločne atmosfere, kar vpliva tudi na znatnejše odgorevanje dezoksidantov (Si in Mn). Ti navari zato vsebujejo najmanj silicija in mangana.

Stopnja disociacije CO₂ v obločni atmosferi ima pri pulznem varjenju v zaščitni plinski mešanici Ar + 18 vol. % CO₂ posebno pri višjih povprečnih jakostih varilnega toka (nad 250 A) pomemben vpliv na kemično sestavo navara. Vsebnost ogljika v navaru se zvišuje, če povečujemo povprečno jakost varilnega toka.

Pri pulznem varjenju v zaščitni plinski mešanici Ar + 18 vol. % CO₂ je kemična sestava varov in navarov, ki pomembno vpliva na njihovo kakovost, najbolj odvisna od stopnje uvarjanja v osnovno konstrukcijsko jeklo. Na velikost uvarjanja pa lahko uspešno vplivamo z izbiro oblike in energije pulza ter jakostjo osnovnega

toka. Velikost uvara je izredno pomembna za uspešno varjenje tankih pločevin, katerih brez nadzorovanega taljenja osnovnega materiala ne moremo pro-

duktivno variti, in pri navarjanju legiranih nanosov na nelegirano konstrukcijsko jeklo.

SUMMARY

Pulsed arc welding of structural steels

In practice structural steels are usually MAG welded using solid welding wires and CO₂ shielding gas. MAG welding is a productive, cost-effective and very adaptable welding process. It may be used as a semi-automatic process also on site. It is also very suitable for automation and robotization of the welding processes in industrial applications^[1-7]. Because of its versatile industrial applicability, the share of shielding gas arc welding applications for various materials has considerably increased. In the last 20 years its share has doubled mainly at the expense of the manual metal arc welding with covered electrodes. Figure 1 shows the shares of the most important arc welding processes^[1].

In welding of structural steels usually as filler material using solid wires VAC 60 (0.9 % Si and 1.5 % Mn)^[8]. Because welding with of the very oxidising shielding gas CO₂ are intense burn-off of silicon and manganese (Table 1).

A common welding process in welding of structural steels using VAC 60 wire (EN 440 - G3Si)^[8] and CO₂ oxidizing shielding gas^[9-11] is very chaotic and does not guarantee a high weld quality^[12]. Thus short-circuiting welding of thin sheets will be irregular in terms of metal transfer. A still more irregular metal transfer can be

found in high-productivity spray arc welding of thick sheets. Spray metal transfer consists in the explosions of the droplets melting off due to the formation of carbon monoxide (CO) in the molten pool of the melted wire.

The quality of the welds made with MAG welding in CO₂ with VAC 60 wire, and with short-circuiting and spray metal transfers, is essentially affected by the frequent occurrence of microporosity at bead boundaries. The weld toughness achieved is, therefore, somewhat lower, but still satisfactory in most cases of structural-steel welding. Thus a quality welded joint with a toughness of around 100 J according to a Charpy V-notch test at 20 °C and with a composition and hardness values of around 140 HV 0.3, which is very close to the quality of the parent metal, i.e. structural steel, is still satisfactory (Table 2).

With VAC 60 wire (0.06 % C; 0.9 % Si and 1.5 % Mn), product of Slovenian firm ELEKTRODE Jesenice, for CO₂ welding high-quality welds with toughness of over 150 J are obtained also in case welding is carried out in Ar + 18 vol. % CO₂ gas mixture. Welding is calm, uniform and almost without spatter. Because of a low oxidizing capability of Ar + 18 vol. % CO₂ gas mixture there is almost no burn-off of the deoxidizers during melting of the filler material. The surfacing-weld dilution can

be ensured only by intense melting of the parent metal, i.e., the degree of penetration respectively. This, however does not suffice to obtain higher-alloyed surfacing welds with higher hardness. Favourable toughness is a result of high purity and quality of surfacing welds (Table 2).

Surfacing welds of still higher quality and nice appearance can be obtained in pulsed arc welding in the gas mixture of Ar + 18 vol. % CO₂. There is no spatter because each pulse will melt only one droplet, which provides nice appearance of the surfacing welds or weld (Figure 2 and Table 3)^[13-15]. Due to intense penetration into the parent metal, i.e. structural steel, the surfacing welds are, in spite of welding with VAC 60 wire, even lower alloyed than in welding in fine-droplet welding in Ar + 18 vol. % CO₂. In pulsed welding with low average welding currents there is almost no burn-off of silicon and manganese during melting of the filler material (Figure 3 and Table 4). The contents of silicon and manganese in the surfacing welds are thus affected only by the degree of penetration, which produces the dilution of the all-weld metal due to melting of the parent metal (Figure 4 and Table 5). It is only at higher average welding currents (281 A) that, because of intense dissociation of CO₂ ($2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$), the oxidizing capability of the arc atmosphere will occur, which, in turn, will provide stronger burn-off of the deoxidizers Si and Mn. Consequently, these surfacing welds will contain the least

silicon and manganese (Figure 4 and Table 5)^[15, 16].

The degree of dissociation of CO₂ in the arc atmosphere in pulsed welding in Ar + 18 vol. % CO₂ gas mixture thus essentially affects the chemical composition of the surfacing weld. The carbon content in the surfacing weld will be increasing with the average welding current increasing as well (Figure 4 and Table 5).

In pulsed arc welding in Ar + 18 vol. % CO₂ gas mixture, the chemical composition of the welds and surfacing welds, which essentially affects their quality, is mostly dependent on the degree of penetration into the parent metal, i.e., structural steel. The degree of penetration can be affected efficiently by the pulse shape and energy and the base current. The degree of penetration is very important to accomplish efficient welding of thin sheets, which cannot be accomplished without controlled melting of the parent metal, and in surfacing of deposits on unalloyed structural steel.

All experimental pulsed welding and surfacing was carried out with a Synergic 450 MIG pulse welding device, product of ISKRA-Varjenje, which permits controlled energy input during welding and a choice of the base current and the pulse shape and energy. In setting of the degree of penetration, the pulse energy is more important than the base current.

VIRI

- [29] KÖVEŠ, A. (2003): Nadaljni razvoj varilnih postopkov in varilnikov s posebnim ozirom na povečanje produktivnosti varjenja. *Dan varilne tehnike: zbornik*. Maribor, pp. 66-69.
- [30] CHURCH, J.G., IMAIZUMI, H. (1990): Welding characteristics of a new welding Process, T.I.M.E. – Process. *IIW Doc. XII – 1199-90*.
- [31] BAUM, L., KNOCH, R. (1997): Höhere Wirtschaftlichkeit durch MAG-Hochleistungsschweiss-verfahren. *DVS-Berichte Band 183.*; pp. 50-55.
- [32] MITA, S., HARADA, S. (2004): Trends and Perspective of Welding Power Source in Japan. *IIW Doc. XII – 1824-04*.
- [33] UEYAMA, T., TONG, H., HARADA, S. (2000): Improve Sheet Metal Welding Quality & Productivity with AC Pulsed MIG Welding System. *IIW Doc. XII – 1629-00*.
- [34] SUZUKI, R., NAKANO, T. (2001): Development of MAG Welding Wires for Thin Steel Sheets in Automotive Industry. *IIW Doc. XII-1679-01*.
- [35] YAMAMOTO, H., TAKANO, Y., HIRAKAWA, M., TAKATANI, T., SENZAKI, M., IKEGAMI, Y. (2001): Development of a Double Wire MAG Welding System for Robots. *IIW Doc. XII-1682-01*.
- [36] Catalogue of filler materials produced by ELEKTRODE Jesenice d.o.o., Welding Consumables, (1999).
- [37] EN 439: *Dodajni materiali za varjenje – Zaščitni plini za obločno varjenje in rezanje* (EN 439: Welding consumables-shielding gases for arc welding and cutting), 1994.
- [38] SHACKLETON, D.N., SMITH, A.A. (1984): Standardisation of shielding gas mixtures for MIG/MAG welding, *IIW Doc. XII-832-84*.
- [39] KEJŽAR, R. (2001): Deoxidation of the weld in active gas welding. *IIW Doc. XII-1686-01*.
- [40] SUBAN, M. (2001): Kaotično obnašanje prehoda materiala pri MAG/MIG načinu varjenja (The chaotic behaviour of material transfer in MAG/MIG welding). *Varilna tehnika.*; Vol. 50 No. 1, pp. 16-20.
- [41] LANCASTER, J.F. (1986): *The physics of welding.*; IIW-Pergamon Press, Oxford.
- [42] LANGUS, D., KRALJ, V. (2005): Optimiranje varilnih parametrov pri impulznem varjenju MIG/MAG s sinusnimi, širinsko krmiljenimi impulzi toka. *Dan varilne tehnike: zbornik*. Novo mesto, pp. 127-136.
- [43] KEJŽAR, U., KLOBČAR, D., KEJŽAR, R. (2005): Prednosti pulznega varjenja konstrukcijskih jekel. *Dan varilne tehnike: zbornik*. Novo mesto, pp. 119-126.
- [44] KEJŽAR, R. (2003): Študij legiranja navara pri navarjanju obrabno obstojnih nanosov pod legiranimi varilnimi praški (Study of the alloying of a surfacing weld in the surfacing of wear-resistant deposits with alloyed welding fluxes). *Materiali in tehnologije.*; Vol. 37, No. 3-4, pp. 167-172.