

Kako povečati produktivnost pri obločnem varjenju?

How to Raise Productivity in Arc Welding?

Tušek J¹, Inštitut za varilstvo, Ljubljana

V članku je prikazanih in zelo splošno opisanih šest različnih možnosti povišanja produktivnosti pri obločnem varjenju s taljivo elektrodo. Opisan je proces varjenja z daljšim prostim koncem žice, proces varjenja z rotirajočim prehajanjem materiala in z daljšim oblokom, varjenje z več elektrodnimi glavami, varjenje z večžično elektrodo, varjenje z dodatnim kovinskim prahom in varjenje z dodatnim hlajenjem oplaščene elektrode pri ročnem varjenju. Pri vseh opisanih postopkih varjenja se na različne načine poveča talilni učinek oziroma količina pretaljenega dodatnega materiala v časovni enoti. V opisanih postopkih so zajeti praktično vsi znani postopki varjenja. Ti so: varjenje pod praškom, varjenje v zaščitnih plinih in ročno obločno varjenje z oplaščeno elektrodo. Z opisanimi metodami je možno produktivnost postopka povečati od 30% pa do desetkratnega povečanja osnovne vrednosti talilnega učinka.

Ključne besede: talilni učinek, produktivnost, prosti konec žice, povečana hitrost žice, večžična elektroda, več elektrod, kovinski prah, varjenje pod praškom, T.I.M.E. proces, RAPID-MELT proces, RAPID-ARC proces.

The article describes, in a very general manner, six different alternatives for rise in productivity in arc welding with consumable electrode, i.e. welding with longer wire extension, welding with rotating material transfer and longer arc, welding with several welding heads, welding with multiple-wire electrode, welding with metal powder addition, and manual metal-arc welding with additional cooling of the electrode covering. In all the welding processes described, melting rate, i.e. quantity of filler material molten in time unit, is increased. Practically all known welding processes, i.e. submerged arc welding, gas-shielded arc welding and manual metal-arc welding with covered electrode, are included in the description. By applying the processes described, process productivity can be raised by 30% or even up to ten-times the value of the original melting rate.

Key words: melting rate, productivity, wire extension, higher wire speed, multiple-wire electrode, several electrodes, metal powder, submerged arc welding, T.I.M.E. process, RAPID-MELT process, RAPID-ARC process.

1. Uvod

Z nastajanjem zasebnih podjetij in tržnega gospodarstva nasploh se vedno več vodij podjetij in celo menedžerji gospodarskih družb sprašujejo, kako povečati produktivnost varilcev pri obločnem varjenju. Učinkovitost varilcev se ob zahtevani kvaliteti meri izključno s količino pretaljenega dodatnega materiala na časovno enoto, kar imenujemo talilni učinek, ki se meri v kg/h.

Znano je, da pretali slovenski varilec povprečno od 1 do 2 kg dodatnega materiala, medtem ko so te vrednosti pri japonskih, ameriških in tudi zahodno-evropskih varilcih od 3 do 4-krat, po nekaterih podatkih pa celo do 6-krat večje.

Pri povečanem talilnem učinku pa ne gre samo za večjo količino pretaljenega dodatnega materiala,

ampak tudi za večjo količino energije, ki se vnese v zvar, kar lahko negativno vpliva na njegove mehanske lastnosti. Pri varjenju z visokoproduktivnimi postopki je potrebno biti previden in upoštevati sestavo in kemične lastnosti materiala.

V literaturi in tudi že v praksi so poznane številne metode, s katerimi je možno povečati produktivnost pri obločnem varjenju.

Posamezne poznane načine povišanja talilnega učinka je možno razvrstiti v štiri skupine: varjenje z večjo hitrostjo žice, varjenje z več žicami hkrati, varjenje z dodatnim kovinskim prahom in varjenje s hlajenjem oplaščene elektrode pri ročnem obločnem varjenju.

2. Varjenje s povečano hitrostjo žice

Klasične naprave za varjenje po MIG/MAG postopku omogočajo hitrosti žice do 20 m/min. Novejši postop-

¹ Doc. dr. Janez TUŠEK, dipl. inž.
Inštitut za varilstvo
Ljubljana, Ptujška 19

ki varjenja pa zahtevajo višjo hitrost žice, tudi do 50 m/min.

Pri varjenju z večjo hitrostjo žice moramo ustvariti takšne energijske razmere, da se žica raztali in skupaj z raztaljenim osnovnim materialom tvori ustrezno obliko vara.

V splošnem velja, da se za raztalitev dodatnega materiala uporabljata dve različni energiji. Prva je toplotna, ki se razvije v prostem koncu žice zaradi električne upornosti, druga pa obločna, ki se, če smo natančni, ravno tako razvije zaradi električne upornosti.

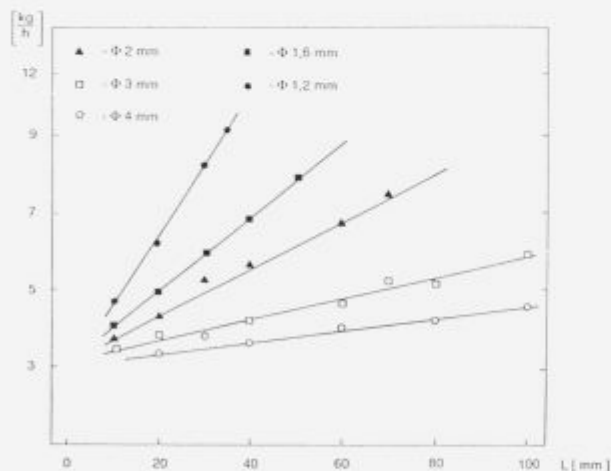
2.1 Vpliv dolžine prostega konca žice na povečano hitrosti žice

Pri prevajanju toka skozi prosti konec žice se del električne energije pretvori v toplotno, ki jo lahko popišemo z enačbo 1:

$$E_w = f I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S} dt \quad (1)$$

- I (A) – jakost toka
- f (Ω mm) – specifične upornosti
- l (mm) – dolžina prostega konca žice
- S (mm^2) – presek žice

Iz enačbe 1 vidimo, da je ustvarjena toplota v prostem koncu žice odvisna od jakosti varilnega toka, od premera žice in od dolžine njenega prostega konca. To pomeni, da lahko pri danih varilnih parametrih in žici talilni učinek povečamo z dolžino prostega konca žice. Iz enačbe in tudi iz praktičnih eksperimentov izhaja, da je odvisnost med dolžino prostega konca žice in talilnim učinkom linearna, kar je razvidno iz **slike 1**.



Slika 1: Vpliv prostega konca žice na talilni učinek pri nespremenjenih drugih parametrih: $I = 350$ A, $U = 28-31$ V, $v_w = 0,4$ m/min, plus pol na elektrodi

Figure 1: Influence of wire extension on melting rate, with other parameters remaining unchanged: $I = 350$ A, $U = 28-31$ V, $v_w = 0.4$ m/min, electrode positive

Nadalje lahko iz **slike 1** ugotovimo, da je s povečanjem prostega konca žice talilni učinek možno povečati do trikratne osnovne vrednosti. Čim

tanjša je žica, tem večja je gostota toka, večji je vpliv prostega konca žice na talilni učinek^{1,2,3}.

Nekateri proizvajalci dodatnih materialov za nekatere strženske žice, predvsem za navarjanje, priporočajo zelo dolge proste konce; tudi do 25-krat premer žice. To priporočilo izhaja iz treh razlogov. Prvi je, kot smo že omenili, večji talilni učinek. Drugi razlog je v dejstvu, da se v strženu strženske žice nahajajo težko taljivi karbidi in se na ta način močno pregrejejo ter nato v obloku lažje raztalijo. Tretji razlog pa izhaja iz energijskega zakona. Pri varjenju z daljšim prostim koncem žice se del energije porabi v žici in je zato moč obloka manjša, kar vpliva na zmanjšanje globine uvara, in to je tudi pri navarjanju zaželeno.

2.2 Vpliv dolžine obloka na povečano hitrost žice

V zadnjih petih letih se je v literaturi in delno tudi že v praksi pojavilo več različnih postopkov z dolgim oblokom, z visoko obločno napetostjo in z velikim talilnim učinkom. Čeprav so eksperimentalno dobljeni rezultati zelo ugodni, še vedno niso znane teoretične razlage za povišan talilni učinek. Nekateri raziskovalci trdijo, da celotna zakonitost temelji na uporabi večkomponentne plinske mešanice z visoko ionizacijsko napetostjo, kar močno poveča moč obloka. Helij ima skoraj še enkrat večjo ionizacijsko energijo kot argon in mnogo večjo, kot je disociacijska energija CO_2 . To razlago širijo predvsem zagovorniki uporabe T.I.M.E. procesa, pri katerem se uporablja štirikomponentna mešanica (65% Ar, 26,5% He, 8% CO_2 , 0,5% O_2) in kjer se doseže do 20 kg/h talilnega učinka z žico S 1,2 mm^{4,5,6,7}.

Druga razlaga za večji talilni učinek pri varjenju z daljšim oblokom temelji na specialnih procesih, ki se dogajajo v obloku. Pri varjenju z večjo gostoto toka v prostem koncu žice in z večjo razdaljo med kontaktno šobo in varjencem pride do močnega delovanja elektromagnetnih sil, ki poleg radialnega delovanja delujejo tudi aksialno in pod drugimi koti. Delovanje teh sil povzroči rotacijo prostega konca žice, materi-



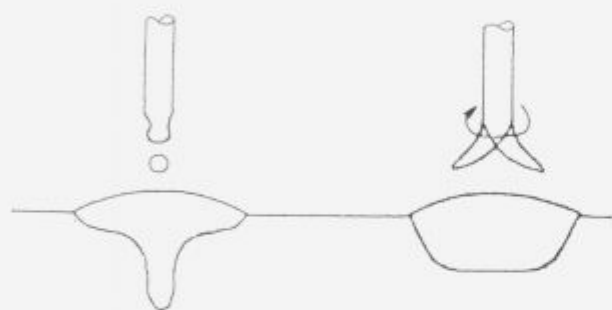
Slika 2: Shematski prikaz prehajanja materiala z vrtenjem in gibanje anodne pege po površini rotirajočega prostega konca žice

Figure 2: Schematic representation of rotating material transfer and anode spot movement along the surface of rotating wire extension

al prehaja iz žice skozi oblok z vrtenjem v tekočem curku, ki tvori široko obliko temena vara. Zaradi vrtenja prostega konca žice je gibanje anodne pege zelo intenzivno na širokem področju, ki dodatno povečuje taljenje dodatnega materiala (**slika 2**).

Anodna pega je zelo ozka površina na pozitivni strani obloka, na katero je oblok "vpet". Površino, iz katere izhajajo elektroni na negativni strani obloka, pa imenujemo katodna pega.

Švedska firma AGA je razvila dva varilna procesa po MAG postopku, ki jih je poimenovala RAPID-ARC in RAPID-MELT proces. Pri obeh postopkih uporablja le trikomponentno mešanico plinov in klasični izvor varilnega toka ter izboljšan sistem za pogon žic. Pri RAPID-MELT procesu se doseže višji talilni učinek, ki je od 10 do 20 kg/h z žico \varnothing 1,2 mm. Material lahko prehaja skozi oblok z vrtenjem ali s tečenjem, kar vpliva na obliko vara (shematski prikaz na **sliki 3**).



Slika 3: Vpliv načina prehajanja materiala na obliko vara

Figure 3: Influence of type of material transfer on weld shape

RAPID-ARC proces pa omogoča večje hitrosti varjenja. Ob zagotavljanju dobre kvalitete zvarnega spoja je možno variti s hitrostjo od 1 m/min do 2 m/min. Po razlagi inovatorjev procesa je možno doseči večje hitrosti z daljšim prostim koncem žice, s kratkim oblokom, s prehajanjem materiala s tečenjem in z uporabo zaščitne mešanice plinov, v kateri je nad 90% Ar. Kot praktični zgled lahko navedemo naslednje podatke: premer žice 1 mm, prosti konec žice 28 mm, hitrost žice 35 m/min, hitrost varjenja 1,2 m/min, jakost toka 520 A in obločna napetost 28 V; plin: 92% Ar, 8% CO₂, 0,03% NO. Pri navedenih varilnih parametrih se doseže 19 kg/h pretaljenega dodatnega materiala⁶.

3. Istočasno varjenje z več žicami

Pri varjenju je možno uporabiti več žic hkrati. V primeru, da se uporabi več varilnih glav z eno žico in da je vsaka žica napajana iz lastnega izvora toka ter ima svoj pogonski sistem in svojo regulacijo, govorimo o varjenju z več žicami. Če pa več žic potuje skozi eno kontaktno šobo in imajo vse žice isti pogonski sistem in isti izvor toka, govorimo o varjenju z večžično elektrodo.

3.1 Varjenje z več žicami

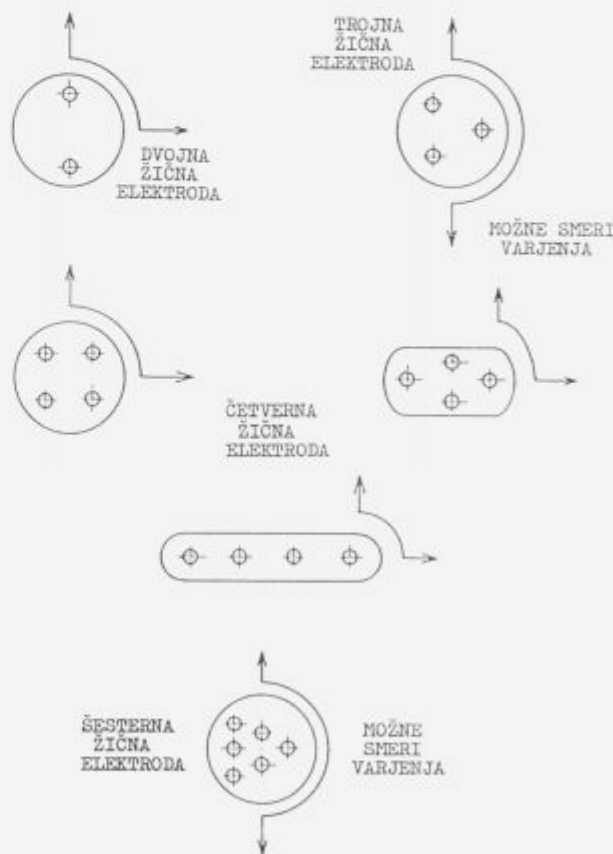
Varjenje z več elektrodnimi glavami se v največji meri uporablja za varjenje debelejših in daljših var-

jencev. V praksi se uporablja za varjenje cevi, za varjenje daljših nosilcev in v ladjedelnstvu. Uporabljajo se žice premera 4 ali 5 mm v kombinaciji treh, štirih, petih ali celo šestih elektrod. S celotnim sistemom je mogoče doseči hitrosti varjenja do 5 m/min in doseči talilni učinek do 100 kg/h^{9,10}.

Žice je možno postaviti tudi prečno na smer varjenja in jih uporabiti za navarjanje, toda to se v praksi zelo redko uporablja.

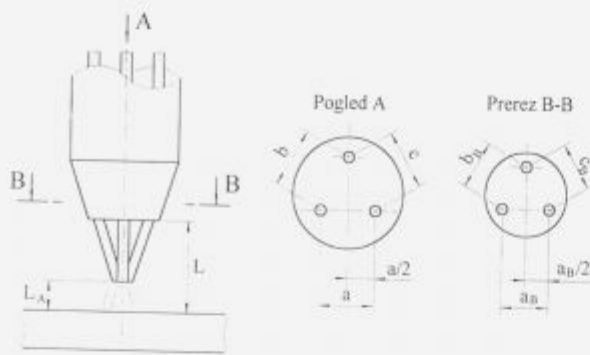
3.2 Varjenje z večžično elektrodo

Naprava za varjenje z večžično elektrodo se uporablja za manjše premere žic in za nižje jakosti varilnega toka, kot se uporablja naprava za varjenje z več elektrodami. Pri varjenju z večžično elektrodo se uporabljajo žice premera 1,2 mm, 1,6 mm, 2 mm in 3 mm. Lahko se uporabi dve, tri ali več žic v skupni kontaktni šobi. Žice so v kontaktni šobi lahko razporejene v liniji v smeri varjenja ali pravokotno ali pa pod določenim kotom na smer varjenja. Žice pa so lahko razporejene tudi drugače, nekaj primerov je prikazanih na **sliki 4**^{11,12,13}.



Slika 4: Možne razporeditve žic v skupni kontaktni šobi
Figure 4: Alternative arrangement of wires in a joint contact tube

Poleg vzporednega potovanja žic skozi skupno kontaktno šobo, pri poljubni razporeditvi, kot prikazuje **slika 4**, pa žice lahko potujejo skozi kontaktno šobo tudi pod določenim kotom, tako da se stikajo na vrhu obloka.



Slika 5: Kontaktna šoba za vodenje treh žic pod kotom v enoten oblok

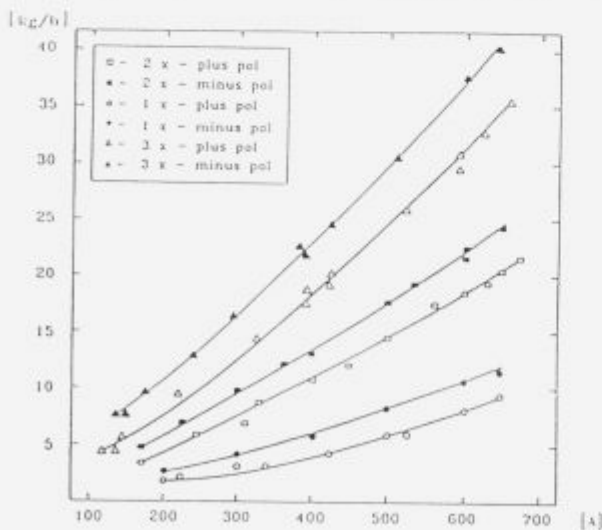
Figure 5: Contact tube for directing three wires, making an angle, into the arc

Na **sliki 5** je shematsko prikazana kontaktna šoba s tremi žicami.

Zgoraj opisani način vodenja žic v skupni stik na vrhu obloka ima nekaj prednosti in tudi nekaj slabosti v primerjavi z vzporednim vodenjem žic skozi kontaktno šobo na varilno mesto. Največja prednost je v enotnem obloku, ki zagotavlja varjenje brez brizganja in s tem omogoča varjenje v zaščitnih plinih¹⁴.

Pri varjenju z vzporednim vodenjem žic nastopajo med njimi in obloki močne elektromagnetne sile, ki vplivajo na prehajanje materiala in destabilizirajo proces varjenja. Zato je ta način predvsem primeren za varjenje pod praškom, kjer raztaljena žilindra oblikuje teme vara. Tudi produktivnost, izkoristek energije in možnosti vplivanja na obliko vara so ugodnejši pri varjenju z vzporednim vodenjem žic.

Za oba načina pa še posebno velja, da se talilni učinek poveča v primerjavi z varjenjem z eno žico za faktor, ki je večji od števila žic. V diagramu na **sliki 6**



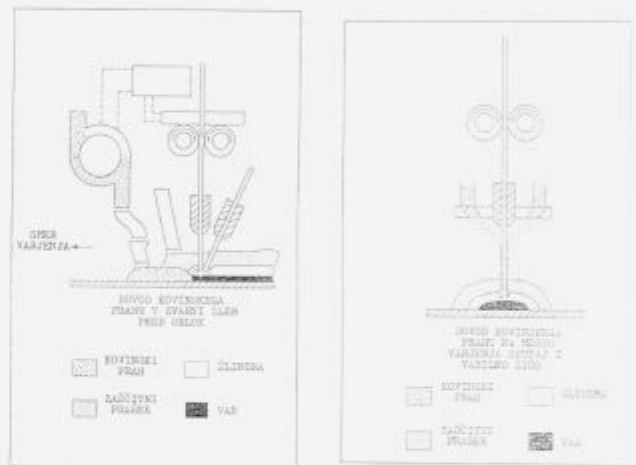
Slika 6: Vpliv števila žic in polaritete na količino pretaljenega dodatnega materiala v odvisnosti od jakosti varilnega toka na eno žico

Figure 6: Influence of the number of wires and polarity on the quantity of filler material molten as a function of welding current per wire

je to tudi lepo vidno. Razloge za povečan talilni učinek je potrebno iskati v fizikalno-metalurških in elektrodinamičnih zakonitostih, ki se dogajajo med obloki, žicami in med prostimi konci žic¹⁵.

4. Varjenje z dodatnim kovinskim praškom

Varjenje z dodatnim kovinskim praškom ali večjimi delci je poznano že več kot trideset let¹⁶. V tistem času so se kovinski delci v obliki nasekane žice ali prahu uporabljali kot dodaten dodatni material pri varjenju pod praškom z enojno žično elektrodo. Šele kasneje, ko je bil uporabljen zelo droben kovinski prah, so bile ugotovljene številne prednosti, ki jih ima varjenje pod praškom ali v zaščitnem plinu z dodatnim kovinskim praškom. Največji uspeh na tem področju je dosegla švedska firma Höganäs. Razvila je dva različna postopka varjenja pod praškom z dodatnim kovinskim praškom. Postopka sta shematsko prikazana na **sliki 7**.



Slika 7: Shematski prikaz dveh načinov varjenja pod praškom z dodatnim kovinskim praškom

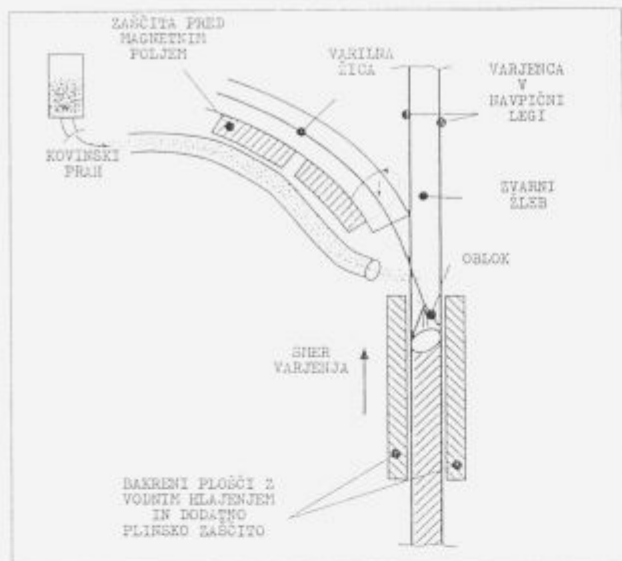
Figure 7: Schematic representation of submerged arc welding with metal powder addition

Najpomembnejšo vlogo pri uveljavitvi varjenja pod praškom z dodatnim kovinskim praškom je imela zrnatost kovinskega prahu. Zgoraj omenjeno švedsko podjetje je namreč izdelalo zelo droben prah, ki ga oblok s svojo mehansko silo odrine na stran, tako da se kovinski prah ne topi samo pod oblokom, ampak tudi ob straneh obloka. Z izrabo obločne energije ob straneh obloka se močno poveča energijski izkoristek obloka in zmanjša poraba zaščitnega praška. Prav tako pa se z uporabo kovinskega prahu poveča talilni učinek in izboljšajo se mehanske ter trdnostne lastnosti celotnega zvarnega spoja^{17,18}.

Varjenje v zaščitnem plinu z dodatnim kovinskim praškom se je v praksi manj uveljavilo in se v največji meri uporablja za navpično varjenje, kot je prikazano na **sliki 8**¹⁹.

5. Ročno obločno varjenje z dodatnim hlajenjem oplaščene elektrode

Naprava za varjenje z oplaščeno elektrodo z dodatnim hlajenjem je zelo preprosta in je bila razvita



Slika 8: Shematski prikaz varjenja v zaščitnem plinu z dodatnim kovinskim prahom

Figure 8: Schematic representation of gas-shielded arc welding with metal powder addition

pri podjetju NUTEK (National Board for Industrial and Technical Development) na Švedskem ter preizkušena na Institutu za varilstvo VUZ v Bratislavi na Slovaškem. Naprava je shematsko prikazana na **sliki 9**.

Z raziskavami je bilo ugotovljeno, da ima varjenje z omenjeno napravo številne prednosti pred klasično napravo z oplaščeno elektrodo. Pri varjenju s hlajeno elektrodo je možno povečati jakost toka do 33%, kar omogoča večjo produktivnost in doseganje večje globine uvara. Temperatura ostanka elektrode, ki je vpeta v držalo, je za dve tretjini nižja kot pri varjenju brez hlajenja. Mehanske lastnosti zvarov niso odvisne od tega ali je oplaščena elektroda med varjenjem hlajena ali ne. Med varjenjem in po njem pa je bilo zelo jasno ugotovljeno, da varjenje s hlajeno elektrodo povzroča mnogo manj dima in plinov, kot pri klasičnem varjenju brez hlajenja elektrode²⁰.



Slika 9: Shematski prikaz varilne naprave za ročno varjenje z oplaščeno elektrodo z dodatnim hlajenjem držala elektrode in oplaščene elektrode

Figure 9: Schematic representation of a welding unit for manual metal-arc welding with additional cooling of electrode holder and electrode covering

Ker se danes tudi v najbolj razvitih državah še vedno porabi okrog 40% vsega dodatnega materiala v obliki oplašenih elektrod, ima naprava prav gotovo lepe možnosti, da se uveljavi v praksi.

6. Sklepi

V članku je shematsko in pisno predstavljenih nekaj metod, s katerimi je možno povečati produktivnost pri ročnem, polavtomatskem in avtomatskem obločnem varjenju. V kratkem bi iz celotnega članka lahko navedli naslednje sklepe:

- Z daljšim prostim koncem žice je pri varjenju s tanjšimi žicami talilni učinek možno povečati tudi do trikrat.
- Pri varjenju s tanjšimi žicami v posebnih zaščitnih plinskih mešanica je možno doseči tudi do 20 kg/h talilnega učinka.
- Pri varjenju z več elektrodnimi glavami in z žicami z več elektrodami 5 mm pa je možno doseči tudi do 100 kg/h talilnega učinka.
- Z varjenjem z večžično elektrodo je z razporeditvijo žic v kontaktni šobi možno vplivati na obliko vara in na talilni učinek ter produktivnost.
- Žice lahko potujejo skozi skupno kontaktno šobo vzporedno ali pa pod določenim kotom, kar vpliva na proces varjenja in na obliko vara.
- Dodaten kovinski prah je možno uporabiti za povišanje produktivnosti pri varjenju pod praškom in pri varjenju v zaščiti plinske mešanice.
- Produktivnost ročnega obločnega varjenja je možno povečati do 33% z dodatnim hlajenjem oplaščene elektrode med njenim odtaljevanjem.

Literatura

- 1 I. L. Wilson, G. E. Claussen, C. E. Jackson: The Effect of I²R Heating on Electrode Melting Rate. *Welding Journal*, 35, 1956, 1, 1s-8s
- 2 U. Franz: Durch I²Rt - Erwärmung zu höherer Produktivität und Effektivität beim Füllschweißen. *Schweiss-technik Berlin*, 29, 1979, 7, 313-316
- 3 V. P. Demjancevič: O vibore veličini vileta elektrodnoj provoloki pri mehaniziravanoj svarke pod fljusom. *Svaročnoe proizvodstvo*, 46, 1975, 5, 28-29
- 4 J. G. Church, H. Imaizumi: Welding Characteristics of a New Welding Process, T.I.M.E. Process. *IIV/IIS, Doc. XII-1199-90*, Montreal, 1990
- 5 J. R. Mathews, J. F. Porter, J. Church, M. Macecek: An Evaluation of T.I.M.E. Welding of HY80 Plate. *Welding Journal*, 70, 1991, 2, 35-41
- 6 R. Lahnsteiner: The T.I.M.E. process - an inovative MAG welding process. *Welding Review International*, 1992, February, 17-20
- 7 E. Halm: The T.I.M.E. Welding Method Compared with GMAW. *IIV/IIS, Doc. XII-1248-91*, Haag, 1991
- 8 AGA-AB, S-181 81 Lidingö Švedska: RAPID-ARC, RAPID-MELT: High-productivity MIG/MAG Welding. *Posebna izdaja publikacije tovarne AGA - Švedska*
- 9 C. Düren, R. Felleisen, G. Hieber: Beitrag zur Technologie des Unterpulver-Vierdrahtschweißens. *DVS-Bericht*, Düsseldorf, 65, 1988, 8-14
- 10 M. Hanada in drugi: Development of High Speed Submerged Arc Welding in Spiral Pipe Mill. *Transactions ISIJ*, 26, 1986, 433-438

J. Tušek: Kako povečati produktivnost pri obločnem varjenju?

- ¹¹ J. Tušek, V. Kralj: Unterpulverschweissen mit zwei bzw. drei Drahtelektroden-Verfahrenscharakteristik und Leistungsbereiche. *Schweissen und Schneiden*, 44, 1992, 7, 380-384
- ¹² J. Tušek: Submerged Arc Welding with Double and Triple - Wire Electrode. *The International Journal of Joining of Materials*, 6, 1994, 3, 105-110
- ¹³ J. Tušek: Melting Characteristics of the wire by submerged arc welding with double and triple electrodes. *IIW/IIS, Doc. 212-772-90*. Montreal 1990
- ¹⁴ R. Knock, A. W. E. Nentwig: Schneller MAG-Schweissen mit mehreren Drahtelektroden. *DVS-Berichte*, Düsseldorf, 162, 1994, 77-81
- ¹⁵ J. Tušek: Raziskava procesov pri varjenju in navarjanju z dvojno in s trojno žično elektrodo pod praškom. *Doktorska disertacija, D/133*. Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana 1991
- ¹⁶ R. F. Arnoldy: Bulk Process. *Welding Journal*, 42, 1963, 11, 885-891
- ¹⁷ S. Sakaguchi, T. Yamaguchi, C. Shiga: One Pass Submerged Arc Welding with Flux Containing Iron Powder for Thick Steel Plates. *IIW/IIS, Doc. XII-1156-90*, Montreal, 1990
- ¹⁸ L. Wittung: Metal Powder Submerged Arc Welding. *IIW/IIS, Doc. XII-1058-88*, Dunaj, 1988
- ¹⁹ B. von Brömssen, A. Skirfors: Greatly increased welding speed with high-productivity welding methods. *Svetsen*, Special Issue, June 1995, 95-100
- ²⁰ G. Blomberg: Ustne komunikacije na letni skupščini v Stockholmu od 09.06. - 19.06.1995