

Matematično modeliranje talilnega učinka pri varjenju z dvojno žično elektrodo pod praškom

Mathematical Modelling of Melting Rate in Submerged Arc Welding with Twin-wire Electrode

Tušek J.¹, Inštitut za varilstvo, Ljubljana

V splošnem je poznanih več metod matematičnega modeliranja tehnoloških postopkov, kemičnih in fizikalnih ter drugih procesov. Pri obločnem varjenju s taljivo elektrodo sta se uveljavila predvsem dva principa matematičnega popisa napovedi in izračuna količine pretaljenega dodatnega materiala. Prva je statistična metoda, ki je široko uveljavljena in temelji na velikem številu poskusov in s tem na velikem številu podatkov. Druga metoda pa temelji na fizikalnih zakonitostih, na metalurških, fizikalnih in kemičnih lastnostih materialov, ki so uporabljeni pri varjenju. V pričujočem članku bosta pri izdelavi modela talilnega učinka uporabljeni obe metodi. Na osnovi fizikalnih zakonov je ugotovljen vpliv električnega toka, ki se prevaja skozi žico in oblok, na segrevanje prostega konca žice in na taljenje dodatnega materiala v samem obloku. Na osnovi poznavanja teh zakonitosti je bilo napravljenih veliko številu poskusov in dobljeni rezultati so bili statistično obdelani. V članku sta prikazana matematična modela za varjenje z dvojno žično elektrodo pod praškom s plus in z minus polom na elektrodi. Matematična modela sta bila tudi praktično preizkušena in ugotovljena je bila dobra soglasnost med teoretičnim izračunom in praktičnimi meritvami. Po podatkih iz svetovne (dostopne) literature sta to prva modela za izračun talilnega učinka pri varjenju z dvojno žično elektrodo.

Ključne besede: varjenje pod praškom, dvojna žična elektroda, talilni učinek, dodatni material, matematični model, prosti konec žice, jakost varilnega toka, polariteta

In general, several methods of mathematical modelling of technological, chemical, physical and other processes are known. In arc welding with consumable electrode, two principles of mathematical prediction and calculation of the quantity of filler molten material have asserted themselves. The first one is a statistical method, which has asserted itself widely and is based on a great number of experiments and, hence, a great number of data. The second method is based on physical principles, on metallurgical, physical, and chemical properties of materials used in welding. In the present article, both methods will be used to elaborate a model of melting rate. On the basis of physical laws, the influence of electric current conducted along the wire and the arc on wire extension heating and on filler molten material in the arc itself is established. On the basis of knowledge of these principles, a number of experiments has been performed and treated statistically. In the article, two mathematical models for submerged arc welding with twin-wire electrode with electrode negative and electrode positive respectively are presented. The mathematical models have also been tested in practice, and a good accordance between theoretical calculations and the practical measurements has been established. With reference to known world technical literature, these are probably the first models for calculation of melting rate in welding with twin-wire electrode.

Key words: submerged arc welding, twin-wire electrode, melting rate, filler material, mathematical model, wire extension, welding current intensity, polarity

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

1. Uvod

Raziskave varjenja pod praškom z večžično elektrodo potekajo na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani že vrsto let. O dobljenih rezultatih je bilo tudi že večkrat poročano na raznih posvetovanjih, v strokovni literaturi in pri Mednarodnem inštitutu za varjenje IIW/IIS^{1,2,3,4,5}. Na osnovi eksperimentalno dobljenih rezultatov je bilo opravljenih več teoretičnih izračunov, številni podatki so bili statistično obdelani in razvitih je bilo kar nekaj matematičnih modelov⁶.

V zadnjem desetletju se na področju varjenja v literaturi pojavljajo vedno novi matematični in računalniški modeli za napoved in za izračun različnih varilskih veličin. Čeprav so nekatere matematične enačbe za izračun talilnega učinka za eno žico, prenos toplote v varu, geometrije vara, ipd. poznane iz literature^{7,8,9,10} že več kot dve desetletji in nekatere dobro desetletje^{11,12}, se je izraz "model" pojavil šele v zadnjem desetletju^{13,14,15}.

Varjenje z enojno elektrodo v zaščitnih plinih s taljivo in z netaljivo elektrodo je dokaj dobro raziskano in matematično popisano^{16,17,18,19}. Mnogo manj pa ta trditev velja za varjenje pod praškom z enojno žično in tračno elektrodo. Za varjenje z dvojno elektrodo pa v dosegljivi literaturi nismo zasledili nikakršnega matematičnega modela za napoved in izračun talilnega učinka.

2. Pregled literature

Po podatkih iz literature je zelo veliko število raziskovalcev, ki so študirali talilni učinek pri varjenju s taljivo elektrodo in ki so želeli na tak ali drugačen način napisati enačbo ali model za napoved talilnega učinka. Poznana sta dva različna načina. Po prvem so raziskovalci napravili veliko število eksperimentov in dobljene vrednosti statistično obdelali¹⁴. Po drugem načinu pa matematični modeli temeljijo na fizikalnih zakonitostih, ki vladajo pri obločnem varjenju s taljivo elektrodo¹⁵.

Prvo obsežno raziskavo talilnega učinka pri varjenju z enojno elektrodo v različnih zaščitah je napravil Wilson⁹.

Robinson¹⁰ je eksperimentalno dobljene rezultate talilnega učinka prikazal v log-log diagramu v odvisnosti od jakosti toka in drugih parametrov. S pomočjo teh krivulj je zapisal matematične enačbe za izračun talilnega učinka za enosmerni tok, plus pol in za minus pol na elektrodi.

Matematične formule za napoved talilnega učinka, ki so prikazane v literaturi⁹, je obdelal Jackson in v članku napravil primerjavo z eksperimentalnimi rezultati.

Podobno pot je ubral Chandel¹³. V članku poroča o matematičnih modelih za napoved talilnega učinka pri varjenju pod praškom z enosmernim tokom s plus ter z minus polom na elektrodi in za varjenje z izmeničnim tokom. Matematični modeli temeljijo na statistični obdelavi praktično dobljenih rezultatov. Čeprav je v članku veliko število napačnih predpostavk in domnev, kar so opazili tudi drugi strokovnjaki s tega področja²⁰, so modeli dokaj natančna slika eksperimentalnih rezultatov in so v praksi

uporabljeni predvsem za dodatne materiale, kot jih je uporabil avtor.

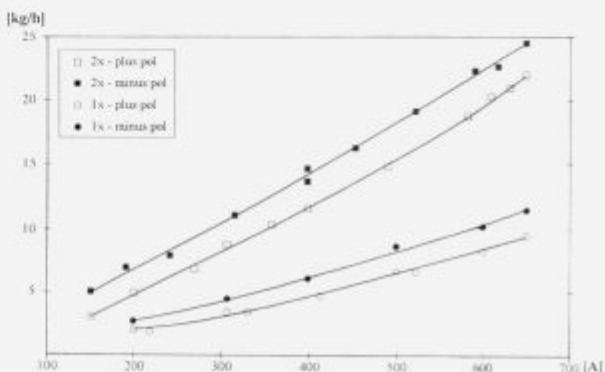
Nekoliko drugačen način popisa in napovedi talilnega učinka najdemo v referatu¹¹. Avtor prikaže matematični model za izračun talilne konstante za enosmerni tok, za obe polariteti, kar pa je seveda ne- navadno in vodi k nenatančnim rezultatom.

Zelo preprost matematični model za izračun talilnega učinka navajata avtorja v članku²¹. V enačbi je upoštevan le varilni tok in dolžina prostega konca žice, kar pomeni, da velja le za en sam premer žice.

Popolnoma drugačen način izdelave matematičnega modela oziroma enačbe za napoved talilnega učinka pri varjenju s taljivo elektrodo v zaščitnem plinu sta uporabila Halmoy¹⁹ in Waszink²². Izhajala sta iz fizikalnih zakonitosti ogrevanja prostega konca žice. S poznavanjem funkcijske odvisnosti specifične upornosti od temperature: $\rho = f(T)$, in odvisnosti vsebovane toplote od temperature: $H = f(T)$, za določen dodajni material sta prišla do preprostih enačb za napoved hitrosti odtaljevanja dodatnega materiala. Enačbe, ki sta jih izpeljala omenjena avtorja, so zelo splošne in je potrebno nekatere koeficiente v enačbi določiti za vsako vrsto dodatnega materiala in za vsak premer elektrode posebej.

3. Izdelava matematičnega modela za talilni učinek

S številnimi eksperimentalnimi poskusi smo raziskali vpliv varilnih parametrov na talilni učinek pri varjenju pod praškom z enojno in z dvojno žično elektrodo. Talilni učinek je v največji meri odvisen od jakosti varilnega toka, od polaritete, od premera elektrode in od dolžine prostega konca žice. Pri varjenju z večkratno elektrodo pa tudi od števila žic in razdalje med njimi. Drugi varilni parametri, kot so hitrost varjenja, obločna napetost, vrsta varilnega praška, vrsta vira varilnega toka, kemična sestava dodatnega materiala (to velja za malo legirana jekla) in drugi, vplivajo v zanemarljivo majhni meri. Večino teh parametrov smo raziskali, njihov vpliv poznamo in jih po naši oceni lahko zanemarimo.

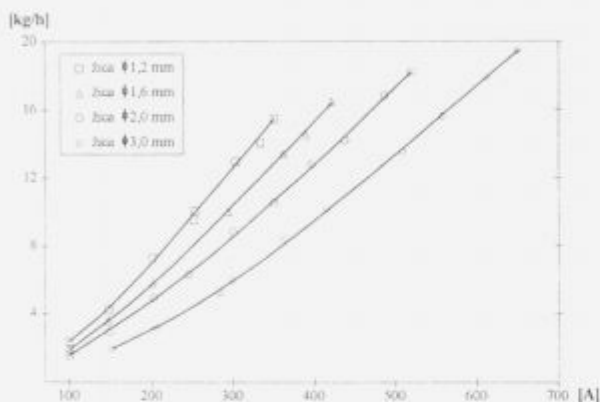


Slika 1: Talilni učinek v odvisnosti od jakosti varilnega toka na eno žico in polaritete za žico premera 3 mm; $L = 30$ mm, $b = 8$ mm, $U = 30$ V

Figure 1: Melting rate as a function of welding current intensity per wire and of polarity for a wire $\varnothing 3$ mm; $L = 30$ mm, $b = 8$ mm, $U = 30$ V

3.1 Vpliv jakosti varilnega toka na talilni učinek

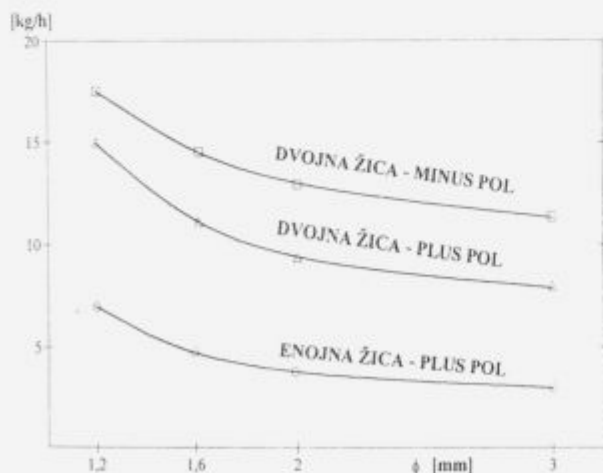
S praktičnimi poizkusi smo opravili raziskavo vpliva jakosti toka na talilni učinek. Dobljeni rezultati so prikazani na **sliki 1** in **sliki 2**. Vpliv jakosti varilnega toka na talilni učinek pri varjenju z enojno in dvojno žično elektrodo za obe polariteti, premera 3 mm, je prikazan na **sliki 1**. Varili pa smo tudi s premeri žic 1,2 mm, 1,6 mm ter 2,0 mm in so za dvojno elektrodo s plus polom na žici rezultati vpliva varilnega toka prikazani na **sliki 2** (L - dolžina prostega konca žice, b - razdalja med žicami).



Slika 2: Vpliv jakosti toka na talilni učinek pri varjenju pod praškom z dvojno elektrodo s premeri žic: 1,2; 1,6; 2,0 in 3,0 mm; L = 25 mm, b = 8 mm, U = 30 V, plus pol na elektrodi

Figure 2: Influence of current intensity on melting rate in submerged arc welding with twin electrode having wires with diameters of 1,2; 1,6; 2,0 and 3,0 mm; L = 25 mm, b = 8 mm, U = 30 V, electrode positive

Iz obeh diagramov (**slika 1 in 2**) lahko napravimo podobne sklepe. V vseh primerih se talilni učinek z večanjem jakosti varilnega toka povečuje eksponentialno.



Slika 3: Talilni učinek v odvisnosti od premera žice pri varjenju pod praškom z enojno in dvojno žično elektrodo. I = 350 A/žico, U = 30 V, L = 25 mm, b = 8 mm

Figure 3: Melting rate as a function of wire diameter in submerged arc welding with single-wire and twin-wire electrodes. I = 350 A, U = 30 V, L = 25 mm, b = 8 mm

3.2 Vpliv premera elektrode na talilni učinek

Raziskavo vpliva premera elektrode na talilni učinek nekateri avtorji zamenjujejo z raziskavo vpliva gostote jakosti varilnega toka. Za površno oceno je ta zamenjava možna, toda pri natančni analizi in še posebej pri varjenju pod praškom pa ni dopustna. Varilni tok teče skozi prosti konec žice pretežno po površini in pri varjenju pod praškom, kjer je žica med varjenjem potopljena v prašek, igra to pomembno vlogo.

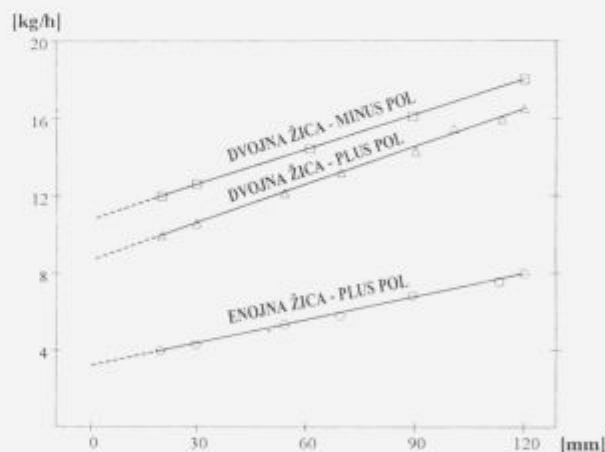
Eksperimentalni rezultati vpliva premera elektrode na talilni učinek so prikazani na **sliki 2** in **sliki 3**.

Že površna ocena funkcije vpliva premera elektrode na talilni učinek pokaže, da je ulomljena racionalna funkcija in da število žic in polariteta nimata pomembnejšega vpliva na obliko funkcijske odvisnosti. Talilni učinek je pri varjenju z dvojno elektrodo z žico $\varnothing$ 3 mm od 30 do 35% manjši kot z žico $\varnothing$ 1,2 mm v enakih razmerah na eno žico.

3.3 Vpliv dolžine prostega konca žice na talilni učinek

Dolžina prostega konca ima pri varjenju pod praškom zelo pomembno vlogo. S spreminjanjem prostega konca žice je možno vplivati na sam proces varjenja, na geometrijo vara in na talilni učinek.

S praktičnimi poizkusi smo ugotovili vpliv dolžine prostega konca žice na talilni učinek med varjenjem z žico premera 3 mm in z jakostjo toka 400 A na žico. Rezultati so prikazani na **sliki 4**.



Slika 4: Vpliv dolžine prostega konca žice na talilni učinek za žico $\varnothing$ 3 mm; I = 400 A/žico, U = 30 V, b = 9 mm

Figure 4: Influence of wire extension length on melting rate for wire $\varnothing$ 3 mm; I = 400 A/wire, U = 30 V, b = 9 mm

Iz prikazanih rezultatov (**slika 4**) je razvidno, da je povezava med dolžino prostega konca žice in talilnim učinkom pri varjenju z enojno in dvojno žično elektrodo linearna, kar je v soglasju s fizikalno zakonitostjo.

Težavo pri raziskavah vpliva prostega konca žice na talilni učinek je predstavljalo natančno merjenje dolžine prostega konca žice. Merjenje dolžine žice, po kateri se prevaja varilni tok, je zelo težka naloga že pri varjenju z odprtim oblokom, še mnogo težje pa je to izvedljivo pri varjenju pod praškom. Prva teža-

va je v tem, ker je del dolžine prostega konca žice zakrit s praškom, druga pa, ker se žica med varjenjem stalno odtaljuje v kapljicah in je lahko napaka pri natančni meritvi velika za velikost kapljice.

V literaturi najdemo različne, bolj ali manj natančne metode za ugotavljanje dolžine prostega konca žice. Tihodeev²³ je uporabil rentgensko kamero, s katero je lahko zelo natančno ugotovil dolžino žice in dolžino obloka pri varjenju pod praškom z enojno žično elektrodo.

Celotno meritev dolžine prostega konca žice je zelo poenostavil Chandel¹³. Kot dolžino prostega konca žice je pri matematičnem modelu za izračun talilnega učinka pri varjenju pod praškom vzel razdaljo med kontaktno šobo in varjencem.

Pri varjenju s taljivo elektrodo v zaščitnem plinu je avtor članka¹⁹ snemal proces varjenja in na filmski trak posnel dolžino prostega konca žice. Za realno vrednost je smatral razdaljo od kontaktne šobe do konice prostega konca žice, ki še ni bila raztaljena. To pomeni, če je bila v trenutku meritve na konici žice kapljica, se ta ni štela v celotno razdaljo.

Podobne postopke lahko najdemo tudi v referatih^{12,24}.

Ker se varilni tok iz kontaktne šobe v žico ne prevaja samo na koncu šobe, ampak po njenem večjem delu, je Waszink²² k normalni dolžini prostega konca žice pri varjenju z žico 1,2 mm v zaščitnem plinu dodal še 1,25 mm.

Pri naših raziskavah smo dolžino prostega konca žice merili na več načinov. Najnatančnejše je bilo merjenje z napravo, ki je shematsko prikazana in opisana v dokumentu IIW⁵ in v disertaciji⁶.

3.4 Izdelava matematičnega modela za talilni učinek na osnovi praktično dobljenih rezultatov

Na osnovi eksperimentalno dobljenih funkcijskih vplivov prej omenjenih parametrov smo želeli napraviti enoten model, ki bi zajel vse tri, za talilni učinek najvplivnejše parametre. Ker je matematično izredno težko popisati vpliv polaritete in do neke mere tudi vpliv števila žic, bodo prvi matematični modeli za izračun talilnega učinka izdelani ločeno za varjenje z enojno in dvojno elektrodo in za obe polariteti.

Za eksperimentalno delo je bil narejen plan praktičnih poskusov. Opravljenih je bilo izredno veliko število eksperimentov v širokem spektru varilnih parametrov, s ponovitvami pri tistih parametrih, ki so dali ugodne in praktično uporabne rezultate. V statistično obdelavo podatkov so bili vzeti tisti vzorci in rezultati, ki so vzdržali strogo oceno realnosti.

S fizikalnimi zakoni taljenja dodatnega materiala z oblokom in segrevanja prostega konca žice zaradi ohmskega ogrevanja smo izdelali splošen matematični model, kot ga popisuje enačba 1. Model je sestavljen iz dveh delov. Prvi popisuje prispevek obločne energije in drugi prispevek k talilnemu učinku zaradi jouskega ogrevanja v prostem koncu žice.

$$M = a_0 + a_1 \cdot I + a_2 \frac{I^2 \cdot L}{d^2} \quad (1)$$

kjer so a_0 , a_1 in a_2 konstante.

Parametri v enačbi 1 in v vseh naslednjih modelih bodo imeli naslednje enote: M (kg/h), I (A/žico), L (mm) in d (mm).

Pri izdelavi modelov je bila uporabljena večkratna regresijska analiza. Matematični modeli so bili izdelani z metodo najmanjše vsote kvadratov odklonov, ki omogoča nepristransko oceno. Modeli so sestavljeni iz ene odvisne in dveh neodvisnih spremenljivk. Pri tem je prva neodvisna spremenljivka I , drugega pa

$$\frac{I^2 \cdot L}{d^2}$$

Za izračun modelov po enačbi 1 smo uprabili računalniški program v jeziku pascal, ki je omogočal izračun za 100 različnih vrednosti za prvo in drugo neodvisno spremenljivko. Poleg izračunov koeficientov a_0 , a_1 in a_2 smo izračunali tudi koeficient določenosti oziroma koeficient večkratne regresije in standardno napako.

Pri praktičnem varjenju z dvojno žično elektrodo pod praškom je bilo izvedenih več kot 500 različnih varjenj. Uporabljene so bile žice premera 1,2, 1,6, 2,0 in 3,0 mm. Jakost varilnega toka na eno žico je bila pri žici 1,2 mm od 70 do 400 A, za žico 1,6 mm od 80 do 450 A, za žico premera 2,0 mm od 80 do 550 A in za žico premera 3,0 mm od 150 do 700 A.

Varili smo z običajnim prostim koncem žice, to je desetkratni premer žice, in s podaljšanim prostim koncem žice, ki je tudi do štridesetkrat večji od premera žice.

Razdaljo med žicami smo določili na podlagi predhodnih praktičnih poskusov, ker v literaturi nismo našli ustreznih podatkov.

Rezultati so pokazali, da medžično razdaljo lahko določimo z enačbo 2.

$$b = (1,2d + 4) \pm 1 \quad (2)$$

[d]mm - premer žice

Medžična razdalja je razdalja med osema oziroma med srednjicama obeh žic.

Z našimi raziskavami smo praktično ugotovili, da je minimalna razdalja med žicami 5 mm, ker dobimo pri manjših razdaljah zaradi močnih elektromagnetnih sil obrobne zajede in slabši videz temena zvara. Pri razdalji, večji od 10 mm, pa pri tanjših žicah toplotni vpliv med obloki in žicami močno pade, varilna kaverna spremeni obliko, za enotno kaverno je premajhna energija in pri nizkih jakostih tokov lahko dobimo dve ločeni varilni kaverni.

Na osnovi teh ugotovitev je nastala enačba 2, ki pa velja za varjenje, to je za žice v zaporedni postavitvi v smeri varjenja in za premere žic od 1,2 mm do 3 mm.

Po statistični obdelavi podatkov smo dobili matematični model, ki popisuje talilni učinek pri varjenju z dvojno elektrodo s plus polom na elektrodi, in je zapisan z enačbo 3.

$$M = 0,02393 \cdot I - 0,739 + 3,6093 \cdot 10^{-6} \frac{I^2 \cdot L}{d^2} \quad (3)$$

$r = 0,9805$, $S_e = 0,514$

Enačba 4 pa prikazuje matematični model za napoved talilnega učinka pri varjenju pod praškom z dvojno elektrodo z minus polom na elektrodi.

$$M = 0,03193 \cdot I - 0,876 + 30984 \cdot 10^{-6} \frac{I^2 \cdot L}{d^2} \quad (4)$$

$$r = 0,985, S_e = 0,605$$

Med modeli lahko naredimo primerjavo v odvisnosti od polaritete. Delež obločne energije za taljene dodatnega materiala je pri varjenju z dvojno elektrodo z minus polom na elektrodi večji kot pri varjenju s plus polom. Ker obločna energija raztali več dodatnega materiala pri varjenju z minus polom, je v tem primeru potrebna večja hitrost žice, kar vpliva na manjše ogrevanje prostega konca žice in s tem tudi na delež energije zaradi ohmske upornosti.

Nadalje lahko naredimo primerjavo iz literature⁶ z modeli za varjenje za izračun talilnega učinka pri varjenju z eno samo žico. Vpliv druge žice pri varjenju z dvojno elektrodo na talilni učinek je težje določiti. V obeh modelih za varjenje z dvojno elektrodo se sicer opazi povišanje vseh koeficientov v primerjavi z modelom z eno žico, toda velikost povišanja posameznih koeficientov je različna.

Koeficient a_1 v enačbi 1, ki predstavlja obločno energijo, se pri varjenju z dvojno žico poveča za več kot dvakrat. Iz tega lahko sklepamo, da je medsebojni vpliv oblokov precejšen in s tem povečan talilni učinek. Koeficient a_2 je pri varjenju z dvojno elektrodo večji, v primerjavi z enojno, za manj kot dvakrat.

To ugotovitev si lahko razlagamo z dejstvom, da pri varjenju z dvojno elektrodo obločna energija raztali več dodatnega materiala, preračunano na eno žico, v primerjavi z enojno elektrodo, kar zahteva pri enakih varilnih parametrih večjo hitrost žice pri varjenju z dvojno elektrodo in to vpliva na manjše ogrevanje prostega konca žice.

4. Primerjava teoretično in praktično dobljenih rezultatov

Po teoretični poti smo dobljene matematične modele že preizkusili s ponovnimi eksperimentalnimi poskusi. Ugotovljeni rezultati so prikazani na slikah 5 in 6.

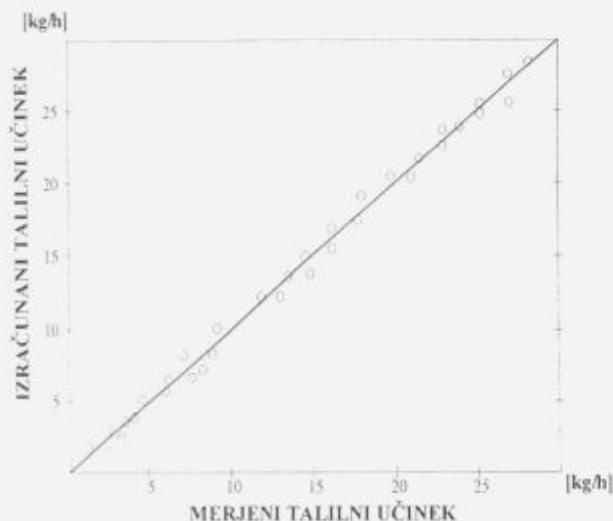
Primerjalni diagram na **sliki 5** prikazuje povezavo med izmerjeno vrednostjo talilnega učinka in izračunano vrednostjo po enačbah 3 in 4. Primerjava velja za varjenje z dvojno žično elektrodo z minus polom na elektrodi. Iz diagrama lahko ugotovimo, da je povezava med teoretičnimi in praktičnimi rezultati dobra, kar izhaja tudi iz vrednosti za koeficient večkratne regresije in vrednosti za standardne odklone (enačbi 3 in 4). Nadalje lahko iz **slike 5** ugotovimo še nekatere značilnosti. Izračunane vrednosti za talilni učinek so pri nizkih vrednostih talilnega učinka višje od izmerjenih, pri višjih vrednostih talilnega učinka pa je ravno obratno. Za vse primere pa lahko rečemo, da je povezava zelo dobra na celotnem področju.

Diagram na **sliki 6** prikazuje primerjavo med izračunano in izmerjeno vrednostjo talilnega učinka pri varjenju z dvojno žično elektrodo pod praškom s plus polom na elektrodi.

Iz diagrama je razvidno, da je podobnost zelo dobra. Pri nižjih vrednostih talilnega učinka je odstopanje največje, 18%, toda povprečno odstopanje je mnogo manjše, saj smo z enačbo pokazali, da je standardno odstopanje zelo majhno. Pri višjih vrednostih so odstopanja od pričakovane vrednosti nekoliko večja, kar smo ugotovili tudi iz vrednosti standardnega odklona.

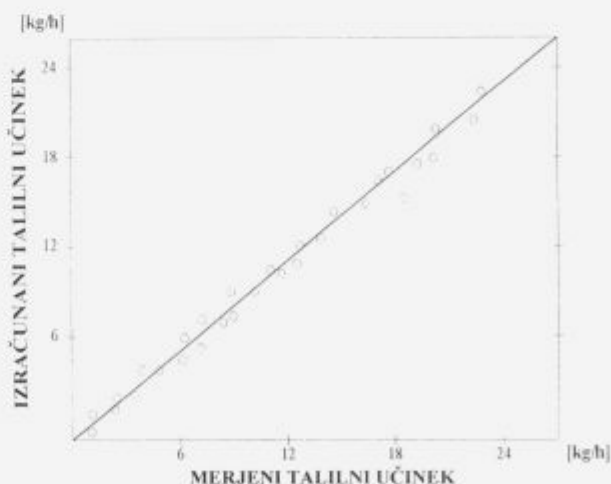
5. Sklepi

V članku so prikazani fizikalno in statistično dobljeni matematični modeli za izračun in napoved talilnega učinka pri varjenju z dvojno žično elektrodo



Slika 5: Odvisnost med izmerjeno in izračunano vrednostjo talilnega učinka pri varjenju z dvojno elektrodo pod praškom z minus polom na elektrodi

Figure 5: Relationship between measured and calculated melting rates in submerged arc welding with twin electrode; electrode negative



Slika 6: Povezava med izmerjeno in izračunano vrednostjo talilnega učinka pri varjenju z dvojno žično elektrodo pod praškom s plus polom na elektrodi

Figure 6: Relationship between measured and calculated melting rates in submerged arc welding with twin electrode; electrode positive

pod praškom. Ker se v praksi vedno več vari z dvojno žično elektrodo in ker do sedaj podobni modeli še niso obstajali, je njihova uporaba za praktično delo in za raziskovalno uporabo zagotovljena.

Na osnovi izvedenih poskusov veljavnosti razvitih matematičnih modelov lahko zapišemo, da so modeli dokaj natančna slika praktičnih rezultatov.

Literatura

- ¹ V. Kralj, J. Tušek: Some Findings and Characteristics about the Material in the Submerged Arc Welding with Parallel Wires, *IIW/IIS, Doc. 212-695-88*, Dunaj, 1988
- ² J. Tušek: Functions of Electrodes in the Formation of Weld in Triple-Electrode. Submerged Arc Welding. *IIW/IIS Doc. 212-696-88*, Dunaj, 1988
- ³ J. Tušek: Energy Distribution and Efficiency Grade in Submerged Arc Welding with Triple Electrode. *IIW/IIS, Doc. 212-726-89*, Helsinki 1989
- ⁴ J. Tušek: Melting Characteristics of the Wire by Submerged Arc Welding with Triple Electrode. *IIW/IIS, Doc. 212-772-90*, Montreal 1990
- ⁵ V. Kralj, J. Tušek: Material transfer with MIG parallel wires. *IIW/IIS, Doc. 221-771-90*, Montreal 1990
- ⁶ J. Tušek: Raziskava procesov pri varjenju in navarjanju z dvojno in s trojno elektrodo pod praškom. *Disertacija, D/133*, Fakulteta za strojništvo Ljubljana, Univerza Ljubljana, 1991
- ⁷ A. Lesnewich: Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding. Part I - Control of Electrode Melting Rate. *Welding Journal*, 37, 1958, 8, 343S-353S
- ⁸ C. E. Jackson: The Science of Arc Welding. Part II - Consumable - electrode Welding Arc. *Welding Journal*, 39, 1960, 5, 177S-190S
- ⁹ J. L. Wilson, G. E. Claussen, C. E. Jackson: The Effect of I_R Heating on Electrode Melting Rate. *Welding Journal*, 35, 1956, 1, 1S-8S
- ¹⁰ M. H. Robinson: Observations on Electrode Melting Rates During Submerged-Arc Welding. *Welding Journal*, 40, 1961, 11, 503S-515S
- ¹¹ V. P. Demjancevič: Rasčet koeficienta rasplavljenija elektrodnoj provoloki pri mehanizirovannoj svarke pod fljusom. *Avtomatičeskaja svarka*, 27, 1974, 8, 50-52
- ¹² J. C. Amson: An Estimate of the Voltage Fall Along the Electrode Stickout in the Consumable - electrode Arc System. *IIW/IIS, Doc. 212-202-70*
- ¹³ R. S. Chandel: Mathematical Modeling of Melting Rates for Submerged Arc Welding. *Welding Journal*, 66, 1987, 5, 135S-140S
- ¹⁴ G. A. Beltschuk: Anwendung statistischer Modelle bei der Untersuchung der Aufschmelzprozesse beim Lichtbogenschweißen. *Schweisstechnik - Berlin*, 27, 1977, 10, 452-454
- ¹⁵ R. A. Willgoss: Mathematical model predicts equilibrium. *Welding and Metal Fabrication*, 53, 1984, nov/dec, 340-351
- ¹⁶ International Institute of Welding: The Physics of Welding. Edited by J. F. Lancaster. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt, 1986
- ¹⁷ M. Schellhase: Der Schweißlichtbogen - ein technologisches Werkzeug, DVS, Düsseldorf, 1985
- ¹⁸ C. J. Allum: Metal transfer in arc welding as a varicose instability: 2. Development of model for arc welding. *J. Physics D.: Applied Physics*, 18, 1985, 1447-1468
- ¹⁹ E. Halmoj: Wire melting rate, droplet temperature and effective anode melting potential. *Proc. of Int. Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour*, TWI, London, 1979
- ²⁰ A. Lesnewich: Commentary: Mathematical Modeling of Melting Rates for Submerged Arc Welding. *Welding Journal*, 68, 1987, 12, 386S-388S
- ²¹ N. Stenbacka, K. A. Persson: Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, 68, 1989, 11, 41-47
- ²² J. H. Waszink, G. J. P. M. van den Heuvel: Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding. *Welding Journal*, 61, 1982, 8, 269S-282S
- ²³ G. M. Tihodeev: Električeskie karakteristiki svaročnoj dugi pod fljusom. *Izvestija Akademii Nauk SSSR - Otdelenie tehničeskikh nauk*, 7, 1955, 122-128
- ²⁴ P. Veleminot: Soudage MIG sous argon d'acier doux, étude thermique de la partie terminale, température de transfer. *Soudage et techniques connexes*, 21, 1967, 9/10, 367-379.