

POJAVI PRI VARJENJU Z VEČŽIČNO ELEKTRODO ZA POVEČANJE TALILNEGA UČINKA

PHENOMENA IN ARC WELDING WITH A MULTIPLE-WIRE ELECTRODE INCREASING ENERGY EFFICIENCY

Janez Tušek

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija
janez.tusek@guest.arnes.si

Prejem rokopisa - received: 2001-06-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-11-29

Varjenje z večžično elektrodo se je v praksi uveljavilo predvsem kot varjenje z dvožično elektrodo. Danes poznamo varjenje z dvožično elektrodo pod praškom ali v zaščitnem plinu in varjenje z večžično elektrodo pod praškom (trižična, štirižična elektroda itd.). Naprava za varjenje z večžično elektrodo omogoča navarjanje in zvarjanje. Pri varjenju z večžično elektrodo uporabljamo samo en vir varilnega toka, vse žice potujejo skozi skupno kontaktno šobo, imajo enako hitrost in enoten pogonski sistem.

Z razporeditvijo žic v skupni kontaktni šobi lahko vplivamo na obliko vara in termični varilni cikel. Najpomembnejša prednost varjenja z večžično elektrodo je visok izkoristek električne energije, ki jo uporabimo za varjenje. Pri tem se odvijata dva fizikalna pojava, ki ta izkoristek povečata. Prvi temelji na izrabi dovedene električne energije, ki se prevaja skozi proste konce žic, drugi pa na višjem izkoristku obločne toplotne energije oziroma na ustrežnejši obliki površine vnosa energije v varjenec.

V članku sta oba pojava slikovno predstavljena, teoretično izračunana in z eksperimentalnimi rezultati dokazana. Pri varjenju z večžično elektrodo je količina učinkovite toplote, ki se razvije zaradi prevajanja električnega toka v eni sami žici, v prostem koncu žice mnogo višja od tiste, ki se razvije v prostem koncu žice pri varjenju s samo eno žico pri enaki porabi električne energije na eno žico.

Pri varjenju z večžično elektrodo, ko žice potujejo ena za drugo v smeri varjenja, se "oblika" vnosa energije v varjenec bistveno razlikuje od načina vnosa energije pri varjenju s samo eno žico. V takem primeru vnos energije v varjenec ni v obliki krožne površine kot pri varjenju z eno žico, ampak v obliki eliptične površine. Prav to pa poveča izkoristek dovedene energije in zmanjša toplotne izgube v okolico vara.

Ključne besede: obločno varjenje, večžična elektroda, talilni učinek, obločni izkoristek

Arc welding with a multiple-wire electrode, particularly with a twin-wire electrode, has lately found increasing application in practice. We know submerged-arc and gas-shielded arc welding processes with a twin-wire electrode and submerged arc welding with a multiple-wire (triple wire, quadruple wire) electrode. A unit for multiple-wire welding allows welding and surfacing. A principle of multiple-wire welding is that a single welding current source, a joint wire feed mechanism, and common regulation are used while all the wires travel through the same contact tube.

Weld shape can be affected by the arrangement of the wires in the contact tube with regard to the welding direction. The most important advantage of multiple-wire welding, however, is the efficiency of the electrical energy supplied. In this case, and advantage is taken of two physical phenomena, which are related but based on different principles. The first one is based on efficient utilisation of electric current when it is conducted through the wire extension, while the second one is based on a more efficient utilisation of heat energy of the arcs, i.e. more optimized energy input into a welded joint.

The paper gives a description of the two physical principles accompanied by figures, theoretical calculations, and experimental results. In multiple-wire welding, welding current intensity in the wire extension varies and is practically never the same in all wires. The average value of the welding current intensity, however, is the same in each wire for the whole duration of welding. But the effective value is, due to variation of current intensity, higher than the average one, which produces a higher efficiency of the welding current.

In multiple-wire welding, when the wires are arranged one after another, heat input into the workpiece has not a circular shape but an elliptical one. This increases energy efficiency and reduces heat influence on weld vicinity.

Key words: arc welding, multiple-wire electrode, melting rate, arc efficiency

1 UVOD

O varjenju z večžično (enožično, dvožično, trižično) elektrodo govorimo, če vse žice med varjenjem potujejo skozi skupno kontaktno šobo, imajo samo en vir varilnega toka in skupno regulacijo. O varjenju z več elektrodami pa govorimo, če ima vsaka žica svoj vir toka, svojo regulacijo, svoj pogonski sistem in svojo kontaktno šobo.

Varjenje z večžično elektrodo se je v praksi najprej uveljavilo kot varjenje z dvožično elektrodo in se kot tako še danes največ uporablja za varjenje v zaščiti

različnih medijev (plin, prašek). Medtem ko dvožično elektrodo uporabljamo pri varjenju pod praškom in varjenju v zaščitnem plinu ter plinskih mešanicah, pa več kot dve žici v skupni kontaktni šobi uporabljamo le pri varjenju pod praškom. V tem članku bomo prikazali praktično pridobljene rezultate talilnega učinka pri varjenju z dvožično in trižično elektrodo ter jih primerjali z enojno in opisali dva fizikalna pojava, ki sta pri varjenju prisotna in sta razlog za boljšo izrabo pri proces dovedene električne energije pri obločnem večžičnem varjenju v primerjavi z varjenjem z eno samo žico.

Prvi fizikalni pojav zadeva prevajanja toka skozi proste konce žic. Količina učinkovite električne energije, ki se porabi za ogrevanje samo enega prostega konca žice do določene temperature, je namreč pri varjenju z večžično elektrodo mnogo nižja od energije, ki jo porabimo za ogrevanje prostega konca žice za dosego enake temperature pri varjenju z eno samo žico. Ta fizikalni pojav, ki je sicer poznan, bo matematično opisan in dokazan ter potrjen s praktičnimi rezultati.

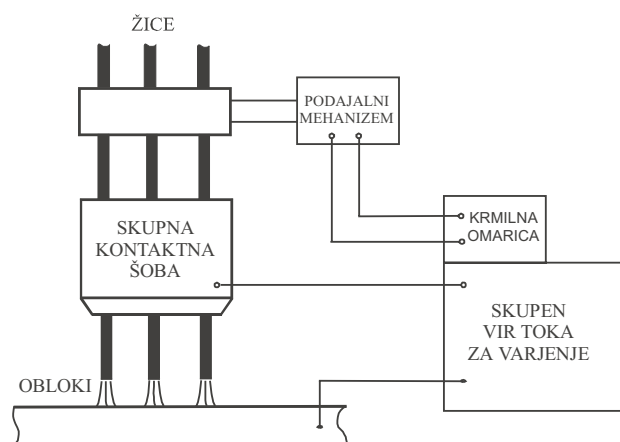
Drugi fizikalni pojav obravnava izrabo toplotne energije oblokov. Pri varjenju z enožično elektrodo je vnos energije v var v obliki skoraj pravilnega kroga. Takšen način vnosa energije v linijski var pa z energetskega vidika ni najprimernejši. Pri vnosu energije v var v površino krožne oblike pri varjenju z enožično elektrodo so izgube v okolici v obsegu celotnega kroga. Če uporabimo tri žice, ki potujejo ena za drugo v smeri varjenja ob enakem vnosu energije kot pri varjenju z eno samo žico, so toplotne izgube v okolico sicer v obsegu popačene elipse, toda kljub temu so te izgube v širšo okolico varja manjše kot pri varjenju z eno žico.

2 PREDSTAVITEV VARJENJA Z VEČŽIČNO ELEKTRODO IN PREGLED DOSEDANJEGA DELA

2.1 Kratek pregled literature

Varjenje z dvožično elektrodo je poznano že skoraj pol stoletja¹⁻⁴. Praktične raziskave in dobljeni rezultati so že takrat pokazali, da je možno z dvožično elektrodo dosegati visok talilni učinek in vplivati na obliko vara. Večina avtorjev iz tistega časa je varila z dvožično elektrodo pod praškom. Iz literature so poznane zelo različne izvedbe postavitve žic in napajanja z električnim tokom⁵⁻¹².

O varjenju s trižično elektrodo pod praškom sta največ člankov objavila avtor tega prispevka in njegov mentor pri izdelavi magistrske in doktorske naloge prof.



Slika 1: Shematski prikaz naprave za varjenje pod praškom s trižično elektrodo

Figure 1: Schematic representation of the unit for submerged arc welding with a triple-wire electrode

Kralj¹³⁻²², drugih prispevkov pa v dostopni literaturi nismo našli.

V zadnjih petnajstih letih pa je največji razvoj doživel varjenje z dvožično elektrodo v zaščitnem plinu²³⁻²⁶. Večina naprav za ta način varjenja temelji na dveh sinergijskih izviri toka, ki sta sinhrono povezana tako, da v obeh žicah teče impulzni tok izmenično. V času impulznega toka se od ene žice odtrga kapljica, v drugi žici pa teče le osnovni tok, ki vzdržuje gorenje obloka. V naslednjem trenutku pa impulzni tok teče v drugi žici in v prvi le osnovni. Kapljice torej skozi obloka potujejo periodično in izmenično: enkrat z ene žice in nato z druge. Toda takšno napravo in tehnologijo imenujemo varjenje z dvema žicama oz. elektrodama in ne varjenje z dvožično elektrodo, kot je obravnavano v tem članku.

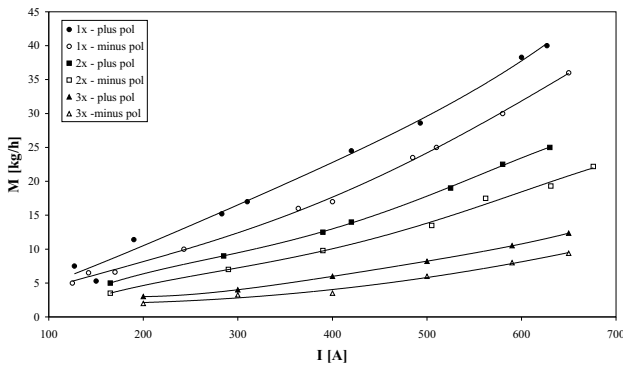
2.2 Opis naprave za varjenje z večžično elektrodo

Naprava za varjenje z večžično elektrodo se bistveno ne razlikuje od klasične naprave za varjenje z eno samo žico. Na **sliki 1** je shematsko prikazana naprava za varjenje s trižično elektrodo. Sestavljena je iz pogonskega in ravnalnega mehanizma, kontaktne šobe za vse tri žice, regulacijskega sistema in vira varilnega toka. Vse žice imajo enako hitrost, potujejo skozi eno samo kontaktno šobo, imajo le en vir varilnega toka in se oddaljujejo v skupni talini vara v zaščitni plina ali praška. Žice so v kontaktni šobi lahko poljubno razporejene (v liniji ena za drugo v smeri varjenja, v liniji ena poleg druge v smeri varjenja ali pa tudi drugače). Žice so lahko enakih ali različnih premerov, enake ali različne sestave in enakih ali različnih tipov (strženske ali masivne).

Naprava in tehnologija varjenja z večžično elektrodo (**slika 1**) pa se bistveno razlikujeta od naprave in tehnologije varjenja z več elektrodami. Pri napravi za varjenje z več elektrodami ima vsaka žica svoj vir varilnega toka, svoj pogonski sistem in svojo regulacijo. To pomeni, da v žicah lahko tečeta različni vrsti tokov (enosmerni ali izmenični) in tokovi različnih jakosti. V praksi poznamo varjenje z dvema, s tremi, štirimi in celo petimi žicami oz. elektrodami.

3 TALILNI UČINEK PRI VARJENJU Z VEČŽIČNO ELEKTRODO

Talilni učinek je definiran s količino dodatnega materiala, pretaljenega v časovni enoti. V največji meri je odvisen od jakosti varilnega toka, polaritete in dolžine prostega konca žice. Pri varjenju z večžično elektrodo pa nanj vplivajo tudi število žic v kontaktni šobi in razdalje med njimi. Drugi varilni parametri, kot so oblačna napetost, hitrost varjenja in drugi, pa praktično na talilni učinek ne vplivajo. Pri varjenju z večžično elektrodo med obloki in žicami ter v talini vara potekajo številni kemično-metalurški in fizikalno-toplotni procesi, ki izboljšajo izrabo energije in povečajo talilni učinek.



Slika 2: Vpliv jakosti toka, števila žic in polaritete na talilni učinek pri varjenju s trižično elektrodo pod praškom; premer žice $d = 3,0$ mm, oblačna napetost $U = 29-31$ V, dolžina prostega konca žice $L = 30$ mm, razdalja med žicami $b = 8$ mm

Figure 2: Influence of the number of wires, welding current intensity and polarity on the deposition rate in submerged arc welding; diameter of wires: $d = 3.0$ mm, arc voltage $U = 29-31$ V, wire extension length $L = 30$ mm, distance between wires $b = 9$ mm

Na **sliki 2** je prikazan talilni učinek pri varjenju s trižično elektrodo pod praškom. Iz diagrama je razvidno, da se talilni učinek z večanjem števila žic povečuje eksponentno in ne linearno, kot bi morda pričakovali.

Pri varjenju s trižično elektrodo z žico premera 3,0 mm, jakostjo toka 700 A na žico in minus polom na žici pretalimo v eni uri približno 35 kg dodatnega materiala, kar je za 30 % več, kot če varimo z eno žico z enako jakostjo toka na žico ter pod enakimi drugimi pogoji in če dobljeno vrednost za talilni učinek pri varjenju z eno žico pomnožimo s tri.

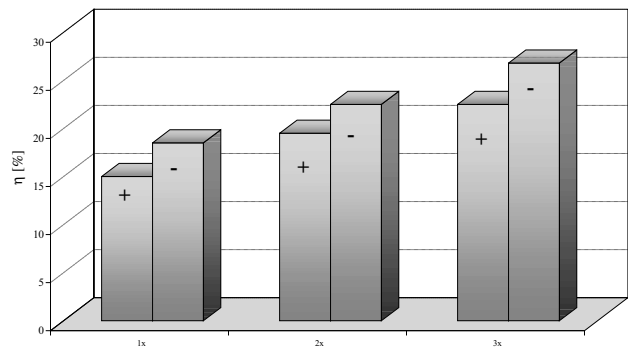
4 IZKORISTEK V OBLOK DOVEDENE ELEKTRIČNE ENERGIJE PRI VARJENJU Z VEČŽIČNO ELEKTRODO

Obločni izkoristek je odvisen od vrste varilnega procesa, zaščitnega medija in varilnih parametrov. Čeprav v literaturi ni mogoče najti enotne definicije za obločni izkoristek, lahko zapišemo, da je koristna izraba v oblok dovedene energije izredno nizka. Pri obločnem varjenju nastanejo namreč številne toplotne izgube, in sicer zaradi sevanja, konvekcije, prevajanja toplote po varjencu in prestopa toplote iz varjenca v okolico. Poznano je, da dosežemo najvišji izkoristek pri varjenju pod praškom in da ga je mogoče še povečati z uporabo dodatne vroče ali hladne žice, kovinskega prahu ali pa z večžično elektrodo.

Pri naših raziskavah smo izkoristek obločne energije η , ki ga lahko imenujemo tudi talilni ali relativni izkoristek, izračunali po enačbi 1:

$$\eta = \frac{1340 \cdot M}{I \cdot U} \cdot 100 (\%) \quad (1)$$

V enačbi 1 izraz 1340 [J/g] pomeni količino energije, ki je potrebna, da raztalimo 1 g jekla brez izgub, M [g/s] je talilni učinek, I [A] je jakost toka in U [V] oblačna napetost.



Slika 3: Izkoristek energije, dovedene v oblok, v odvisnosti od jakosti toka, števila žic in polaritete pri varjenju pod praškom: $I = 500$ A/žico, $U = 30$ V, dolžina prostega konca žice $L = 30$ mm, razdalja med žicami $b = 8$ mm, premer žic $d = 3,0$ mm

Figure 3: Efficiency as a function of the number of wires and polarity in submerged arc welding current intensity $I = 500$ A/wire, arc voltage $U = 30$ V, wire extension length $L = 30$ mm, distance between wires $b = 9$ mm, wire diameter $d = 3$ mm

Na **sliki 3** je prikazan vpliv jakosti varilnega toka, polaritete in števila žic na izkoristek energije, dovedene v oblok. Lahko zatrdimo, da je z enačbo 1 možno narediti zelo dobro primerjavo glede na izrabo energije, dovedene med različnimi postopki obločnega varjenja.

5 EFEKTIVNA VREDNOST TOPLOTE, USTVARJENE V PROSTEM KONCU ŽIC, PRI VARJENJU Z VEČŽIČNO ELEKTRODO

V točki 2 smo opisali in na **sliki 1** shematsko prikazali napravo za varjenje z večžično elektrodo. S slike je torej razvidno, da se vse žice napajajo samo iz enega tokovnega vira. Električni tok teče iz svojega vira do kontakte šobe in nato v eno, dve ali vse tri žice (**slika 4**) in nazaj (sklenjen krog).

Pri prevajanju toka skozi žico se zaradi električne upornosti v njej ustvari toplota Q , ki jo lahko izrazimo z enačbo 2:

$$Q = I \cdot U \cdot t \quad [J] \quad (2)$$

I [A] - jakost toka

U [V] - padec napetosti v prostem koncu žice

t [s] - čas

Če padec napetosti izrazimo z jakostjo toka in upornostjo, dobimo po Ohmovem zakonu:

$$Q = I^2 \cdot U \cdot t \quad [J] \quad (3)$$

R [Ω] - električna upornost

I, t - (glej enačbo 2)

Padec napetosti v prostem koncu žice pa lahko izrazimo tudi z enačbo 4:

$$U = \frac{I}{S} \int_0^L \rho(L) dL \quad [V] \quad (4)$$

S [mm²] - presek žice

L [mm] - dolžina prostega konca žice

- specifična električna upornost

Z upoštevanjem enačb 3 in 4 dobimo enačbo 5, ki opisuje količino energije, vnesene v prosti konec žice:

$$Q = I^2 \cdot \rho \cdot t \cdot \frac{L}{S} \quad [J] \quad (5)$$

I, t - (glej enačbo 2)

L, S, ρ - (glej enačbo 4)

Iz enačbe 5 lahko sklepamo, da se z večanjem jakosti toka vnos energije povečuje s kvadratno funkcijo, z večanjem specifične upornosti, časa, dolžine prostega konca žice se vnos energije povečuje linearno, z večanjem preseka žice pa se linearno zmanjšuje.

Za lažje razumevanje procesov, ki se dogajajo v prostem koncu žice zaradi prevajanja električne energije, bomo le-te predstavili na primeru.

Na **sliki 4** sta prikazani dve kontaktni šobi, prva za varjenje z enojno in druga za varjenje z trižično elektrodo.

Za računski primer bomo uporabili nekaj izmišljenih, a realnih podatkov za varilne parametre in jih najprej zapisali v **tabelo 1**.

Tabela 1: Pričakovane maksimalne, minimalne in srednje vrednosti jakosti tokov pri varjenju pod praškom z eno in trižično elektrodo.

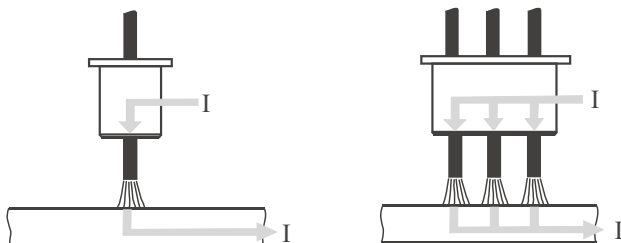
Table 1: Expected maximum, minimum and mean values of the currents carried by the wires in single-wire and triple-wire welding processes.

$I_{1xsr}, I_{1xmax}, I_{1xmin}$ - srednja, maksimalna oz. minimalna vrednost jakosti toka pri varjenju z eno žico

$I_{3xsr}, I_{3xmax}, I_{3xmin}$ - srednja, maksimalna oz. minimalna vrednost jakosti toka na eno žico pri varjenju s trižično elektrodo

tri žice - tri elektrode	tri žice - trižična elektroda
jakost toka [A]	jakost toka [A]
$I_{1xsr} = 500$	$I_{31sr} = I_{32sr} = I_{33sr} = 500$
$I_{1xmax} = 800$	$I_{31max} = I_{32max} = I_{33max} = 2400$
$I_{1xmin} = 300$	$I_{31min} = I_{32min} = I_{33min} = 0$

Jakost toka, ki se prevaja skozi žice in obloke, se med varjenjem spreminja od neke minimalne pa do maksimalne vrednosti in je odvisna od dolžine obloka in od načina prehoda kapljic skozi oblok, to je od skupne električne upornosti v žici in obloku. To pomeni, da se prevaja tok z neko maksimalno, minimalno in srednjo



Slika 4: Shematski prikaz kontaktne šobe za varjenje z eno in s trižično elektrodo ter potek varilnega toka skozi kontaktno šobo v žico oz. žice

Figure 4: Schematic representation of current variations through the contact tube and the wire extension in single-wire and multiple-wire welding processes

vrednostjo. Pri varjenju z eno samo žico je razmerje med maksimalno zgornjo in minimalno spodnjo vrednostjo jakosti varilnega toka dvakratnik do trikratnik minimalne spodnje vrednosti. Pri varjenju z večžično elektrodo pa je to razmerje odvisno od števila žic in je prav gotovo mnogo večje kot pri varjenju z eno samo žico. Ker je pri varjenju z večžično elektrodo možno, da v posameznih žicah določen trenutek tok sploh ne teče, pomeni, da teče v drugih toliko večji. Električni tok teče po tisti žici, ki ima manjšo električno upornost. Iz tega sklepamo, da je lahko maksimalna zgornja vrednost jakosti toka v eni žici pri varjenju z večžično elektrodo celo vrednost zmnožka števila žic in maksimalne zgornje vrednosti za jakost toka v eni žici pri varjenju z eno žico. To velja, če varimo s konstantno srednjo vrednostjo jakosti toka na žico (ne glede na število žic v skupni kontaktni šobi).

Frekvenca nihanja med minimalno spodnjo in maksimalno zgornjo vrednostjo jakosti toka je pri varjenju z eno žico od 20 - 40 Hz in pri varjenju s trižično elektrodo od 30 - 60 Hz.

Če nekoliko poenostavimo in predpostavimo, da so vse vrednosti iz enačbe 5, razen jakosti toka na eno žico, konstantne, 0 ter izberemo konkreten, nekoliko ekstremen, a realen primer, potem količino vnesene energije v prosti konce žice lahko izračunamo.

V prvem primeru predpostavimo, da 1/3 časa v vsaki žici (pri varjenju z eno in tudi pri varjenju s trojno žico) teče maksimalna jakost toka, 1/3 časa tok srednje vrednosti in 1/3 časa je minimalna jakost toka. Varimo z žico premera 3,0 mm z dolžino prostega konca 30 mm, s pozitivnim polom na elektrodi, s specifično upornostjo pri povišani temperaturi $0,2 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Za navedeno jakost toka mora biti hitrost žice 2,5 m/min, kar pomeni, da potuje žica od kontaktne šobe do obloka (30 mm) 0,72 s.

Izračunane vrednosti za vnos energije v prosti konec žice so podane v **tabeli 2**.

Tabela 2: Izračunana količina vnosa energije v prosti konec žice pri različnih jakostih varilnega toka pri varjenju pod praškom z eno žico in pri varjenju s trižično elektrodo

Table 2: The calculated quantities of heat input into the wire extension in single-wire and triple-wire welding processes assuming that each wire carries maximum, minimum, and mean currents one third of the time

ena žica - ena elektroda		tri žice - trižična elektroda	
jakost toka [A]	vnos toplote [J]	jakost toka [A]	vnos toplote [J]
$I_{sr} = 500$	$Q = 155$	$I_{sr} = 500$	$Q = 155$
$I_{min} = 300$	$Q = 55,8$	$I_{min} = 0$	$Q = 0$
$I_{max} = 800$	$Q = 396,8$	$I_{max} = 2400$	$Q = 3726$
	$\Sigma Q = 607,6$		$\Sigma Q = 3871$

Z izračuni smo ugotovili, da je vnos energije v prosti konec žice pri varjenju s trižično elektrodo približno šestkrat višji kot pa pri varjenju z eno samo žico pri enaki srednji vrednosti jakosti toka in pri enakih drugih razmerah.

V drugem primeru bomo vzeli nekoliko drugačen zgled, ki pa je ravno tako realen, in bomo predpostavili, da pri varjenju s trižično elektrodo v eni žici teče tok maksimalne jakosti le 1/9 časa in minimalne tudi 1/9, 7/9 časa pa teče tok srednje jakosti. Dejstvo je, da se prosti konec žice zelo hitro ogreje, kar v njem poveča električno upornost in zato tok teče po drugi ali tretji žici ali pa po obeh. Takšno menjavanje prevajanja toka v prostih koncih žic pa se med varjenjem dogaja stalno s frekvenco, kot smo jo navedli zgoraj.

Izračunani rezultati so prikazani v **tabeli 3**.

Tabela 3: Izračunane količine energije, vnesene v prosti konec žice pri varjenju pod praškom z enožično in trižično elektrodo s predpostavko, da skozi vsako žico teče 7/9 časa tok srednje jakosti, 1/9 časa maksimalna jakost toka in 1/9 časa minimalna jakost varilnega tok

Table 3: Calculated heat input into the wire extension in single-wire and triple-wire welding processes assuming that each wire carries the mean current 7/9, the maximum current 1/9, and the minimum current 1/9 of the time

ena žica - ena elektroda		tri žice - trižična elektroda	
jakost toka [A]	vnos toplote [J]	tok [A]	vnos toplote [J]
$I_{sr} = 500$	$Q = 361,7$	$I_{sr} = 500$	$Q = 361,7$
$I_{min} = 300$	$Q = 18,5$	$I_{min} = 0$	$Q = 0$
$I_{max} = 800$	$Q = 132,2$	$I_{max} = 2400$	$Q = 1253$
	$\Sigma Q = 512,4$		$\Sigma Q = 1614,7$

Tudi v tem primeru vidimo (**tabela 3**), da se pri varjenju s trižično elektrodo v prosti konec ene same žice vnese trikrat več toplote kot pri varjenju z eno samo žico.

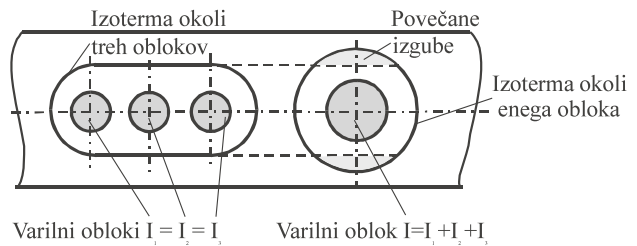
Prav tako lahko napravimo primerjavo med **tabela 2 in 3**. Vnos energije v prosti konec žice se s krajšanjem časa prevajanja maksimalne jakosti toka bolj zmanjša pri varjenju s trižično elektrodo kot pri varjenju z eno samo žico, kar izhaja iz fizikalne zakonitosti učinkovite vrednosti varilnega toka.

6 PRIMERJAVA TOPLOTNIH POLJ PRI VARJENJU Z VEČŽIČNO ELEKTRODO Z VARJENJEM Z ENO SAMO ŽICO

Toplotno polje na varjencu okoli obloka oziroma mesta varjenja in v varjencu bomo prikazali za vzdolžni var. To pomeni, da so pogoji za odvod toplote v okolico za oba načina varjenja enaki. Obravnavali bomo primer, ko je pri obeh načinih varjenja vnos energije v varjenec enak. Pri varjenju z eno žico se ves tok prevaja po eni žici, s tem pa ima vnos energije v varjenec obliko centričnega kroga.

Pri varjenju z večžično elektrodo pa je vnos celotne energije v varjenec v obliki popačene elipse z daljšo osjo v smeri varjenja (**slika 5**). To pomeni, da prva žica in oblok segrevata hladen varjenec, medtem ko drugi dve potujeta že po talini vara.

V splošnem je vnos energije v varjenec definiran z enačbo 6 in je odvisen od moči obloka, njegovega



Slika 5: Oblike in porazdelitev izoterm po varjencu pri varjenju z enožično in trižično elektrodo pri konstantni količini vnesene energije
Figure 5: Shape and distribution of isotherms across the workpiece in single-wire welding and triple-wire welding.

izkoristka in hitrosti varjenja. Pri varjenju z večžično elektrodo je torej vnos energije E v varjenec bolj "naraven" oz. prilagojen obliki zvarnega stika, s tem pa so izgube v širšo okolico varjencev manjše, kar je razvidno s **slike 5**.

$$E = \frac{I \cdot U_v}{v} \cdot \eta \quad (6)$$

I [A] - jakost varilnega toka

U_v [V] - varilna napetost

v [m/min] - hitrost varjenja

η [%] - izkoristek obloka

Prav tako je s **slike 5** razvidno, da so pri enakem vnosu toplote (ena žica ali tri žice) vse vrste toplotnih izgub (sevanje, konvekcija, prevod, prestop) pri varjenju z eno samo žico višje kot pa pri varjenju s tremi žicami. Z razdaljo med žicami je pri varjenju z večžično elektrodo možno še dodatno vplivati na termični varilni cikel med varjenjem in s tem na hitrost ohlajanja toplotno vplivane cone in samega vara po varjenju.

7 SKLEPI

V članku sta opisana, slikovno predstavljena in matematično dokazana dva fizikalna pojava, ki potekata pri varjenju z večžično elektrodo. V prvem delu članka so prikazani praktično dobljeni rezultati talilnega učinka in izkoristka energije, ki dokazujejo da je varjenje z večžično elektrodo produktivnejše kot varjenje z eno samo žico.

Ugotovljeno je, da se pri varjenju z večžično elektrodo talilni učinek poveča predvsem zaradi večjega učinkovitega vnosa toplote v proste konce žic kot pri varjenju z eno samo žico.

Prav tako pa je ugotovljeno, da so izgube toplote v okolico in v varjenec manjše pri varjenju z večžično elektrodo v primerjavi z varjenjem z eno samo žico.

Vse to pa pomeni, da je koristno v praksi, če je to le mogoče, uporabiti varjenje z dvožično ali trižično elektrodo, kar pa je odvisno od konkretnega praktičnega primera.

8 LITERATURA

- ¹ Ashton, T.: Twinarc Submerged Arc Welding. *Weld. J.*, 33(1954)4, 350-355
- ² Knight, D. E.: Multiple Electrode Welding by "Unionmelt" Process. *Weld. J.*, 33(1954)4, 303-312
- ³ Heinke, H., Schlerfer, H., Franz, U., Wendler, H. D.: Einseitiges UP-Paralleldrahtschweißen. *Schweißtechnik*, 17(1967)9, 386-392
- ⁴ Uttrachi, G. D., Messina, J. E.: Three-Wire Submerged-Arc Welding of Line Pipe. *Weld. J.*, 47(1968)7, 475-481
- ⁵ Mandelberg, S. L., Lopata, V. E.: Karakter processa dvuhelektrodnoj trefaznoj svarki pod fljusom s povišennoj skorostju. *Avtomatičeskaja svarka*, 19(1966)2, 25-28
- ⁶ Uttrachi, G. D.: Multiple Electrode Systems for Submerged-Arc Welding. *Weld. J.*, 57(1978)5, 15-21
- ⁷ Ratzsch, H.: Beidseitige UP-Tandemschweißung. *ZIS-Mitteilungen*, 15 (1973)5, 591-599
- ⁸ Wittke, K., Franz, U., Koczelov, K., Synnatschke, A., Hanke, H.: Beitrag zur Kristallisationsrissicherheit beim UP-Paralleldrahtschweißen. *Schweißtechnik*, Berlin, 18(1968)11, 487-491
- ⁹ Ratzsch, H.: Einseitige UP-Paralleldrahtschweißung von Stumpfstoßen. *ZIS-Mitteilungen*, 14(1971)8, 1105-1115
- ¹⁰ Šostak, I. A.: Ustrojstvo dlja odnovenmennoj podači dvuh elektrodov pri mehanizirovannoj svarke. *Avtorski svidetel*, No. 381489 - "Bjulleten izobret", (1973)22
- ¹¹ Šostak, I. A.: Sposob svarki rasšepnim lentočnim elektrodom. *Avtorski svidetel*, No. 397288 "Bjulleten izobret", (1973)37
- ¹² Hinkel, J. E., Forsthoefel, F. W.: High Current Density Submerged Arc Welding with Twin Electrodes. *Weld. J.*, 55(1976)3, 175-180
- ¹³ Tušek, J.: Functions of Electrodes in the Formation of Weld in Triple-Electrode Submerged Arc Welding. Doc. 212-696-88. International Institute of Welding, Vienna, 1988
- ¹⁴ Tušek, J.: Research process of the submerged arc welding and building up with double and triple electrode. Doctor thesis (in Slovene), D/133, University in Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, 1991
- ¹⁵ Tušek, J. Melting Characteristics of the Wire by Submerged Arc Welding with Double and Triple Electrodes. Doc. 212-772-90. International Institute of Welding, Montreal, 1990
- ¹⁶ Tušek, J., Kralj, V.: Mathematical Modelling of the Melting Rate in Triple Electrode Submerged Arc Welding. Doc. 212-811-92. International Institute of Welding, Madrid, 1992
- ¹⁷ Tušek, J., Kralj, V.: Submerged Arc Welding with Multiple-Wire Electrode. Proceedings of the Int. Conf. on "Joining of Materials" JOM-6. The European Institute for Joining of Materials, Helsinki, 1993, 438-454
- ¹⁸ Tušek, J.: Submerged Arc Welding with Double and Triple-Wire Electrode. *International Journal for the Joining of Materials*, 6(1994)3, 105-110
- ¹⁹ Tušek, J.: "Equipment for Multiple-Wire Welding". Proceedings of the Int. Conf. on "Equipment for Welding and Allied Processes and its Application". Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Pula, 1995, 35-46
- ²⁰ Tušek, J.: SAW with Multiple Electrodes Achieves High Production Rates. *Welding Journal*, 75(1996)8, 41-11
- ²¹ Tušek, J. UP-Mehrdraht-Verbindungs- und-Auftragschweißen. *Schweiß- und Prüftechnik*, 53(1999)4, 55-58
- ²² Tušek, J.: A Mathematical Model for the Melting Rate in Welding with a Multiple-Wire Electrode. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32(1999)14, 1739-1744
- ²³ Knoch, R., Nentweg, W. E.: "Schneller MAG-Schweißen mit mehreren Drahtelektroden". Proceedings of the Int. Conf. on "Welding and Cutting". Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1994, 77-82
- ²⁴ Lahnsteiner, R.: "T.I.M.E.-TWIN-Verfahren - das Hochleistungs-MAG-Schweißen mit zwei Drahtelektroden". Proceedings of the Int. Conf. on "Welding and Cutting". Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1994, 82-84
- ²⁵ Böhme, D., Nentweg, A. W. E.: "Leistungssteigerung beim MIG/MAG-Schweißen durch 2-Drahttechnik. Proceedings of the Int. Conf. on "Equipment for Welding and Allied Processes and its Application". Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Pula, 1995, 1-3
- ²⁶ Shinoda, T., Nakata, J., Miyauchi, H.: "Development of High Deposition Rate Double Wire MIG Welding Process for Aluminium Alloys. Proceedings of the Int. Conf. on "Joining of Materials" JOM-8. European Institute for the Joining of Materials, Helsinki, 1997, 78-85