

Vpliv dezoksidantov na vsebnost kisika v čistem varu in izkoristek Cr iz plašča pri elektroobločnem varjenju

Rajko Kejžar

Zakovitosti poteka reakcij med varjenjem z visokolegiranimi oplasčenimi elektrodami (Pr 18/8) so ugotovljene na osnovi matematične obdelave rezultatov raziskav.

Pri visoko legiranih elektrodah (legiranje vara s kromom iz plašča) pride do omejitev uporabnosti teh elektrod zaradi visokih minimalnih izkoristkov varjenja.

Prenos kisika iz plinske faze v talino žlindre in vara je pri elektrodah, ki so oblikovane na nelegirano žico »EO«, nekoliko višji kot pri elektrodah, ki so oblikovane na legirani žici »EPP Cr 6 in PR 18/8« (razlike v oddaljevanju). Razlike v porazdelitvi kroma med žlindro in varom pa so kljub razlikam v načinu legiranja vara s kromom neznatne.

Vsebnosti kisika v čistih varih, ki so zavarjeni z visoko legiranimi elektrodami, so nad 500 ppm.

UVOD

Pri varjenju z oplasčenimi elektrodami je sestava elektrodne obloge, od katere je odvisna ionizacija obločne atmosfere (stabilnost varjenja^(8, 9, 10)) in sestava varilne žlindre osnovnega pomena za varilno tehnične lastnosti elektrode. Fizikalne lastnosti (predvsem temperatura taljenja in viskoznost) varilne žlindre namreč odločilno vplivajo na možnost varjenja v raznih prisilnih položajih⁽²⁶⁾, velik vpliv pa imajo tudi na videz in kvaliteto vara. Odločilen vpliv na sestavo vara in v veliki meri tudi na kvaliteto vara pa imajo fizikalno kemični procesi, ki se odvijajo med varjenjem. To so reakcije prenosa kisika iz plinske faze v talino žlindre in vara⁽⁶⁾ ter reakcije vzpostavljanja navideznega ravnotežja med raztaljeno žlindro in kovinsko talino vara^(1, 6, 13). Zelo kratek čas, ki je na razpolago za potek reakcij med varjenjem — čas od raztalitve do zamrznjenja vara je le 3—8 sekund⁽³⁾ — onemogoča vzpostavitev ravnotežja.

Članek je izveček iz raziskovalne naloge, ki je bila financirana iz sredstev za raziskave in razvoj Železarne Jesenice ter Sklada Borisa Kidriča.

Avtor je doktor metalurških znanosti in raziskovalni svetnik na Zavodu za varjenje SRS v Ljubljani.

Naloga je bila izdelana, ko je bil avtor še v Železarni Jesenice.

I. FIZIKALNE LASTNOSTI VARILNE ŽLINDRE IN SESTAVA ELEKTRODNE ŽICE — OSNOVI PRI IZBIRI POIZKUSNIH ELEKTROD

1. Žlindre, ki nastajajo pri varjenju visokolegiranih prokron jekel

Pri varjenju z elektrodami za varjenje visokolegiranih prokron jekel nastajajo odvisno do sestave elektrodne obloge rutilne in bazične žlindre, ki vsebujejo poleg CaF_2 , CaO , TiO_2 , SiO_2 in Cr_2O_3 še manjše količine alkalijskih oksidov, MgO , Al_2O_3 , FeO , MnO in Nb_2O_5 . Povprečna sestava te vrste varilne žlindre z območjem glede vsebnosti komponent CaF_2 , CaO in TiO_2 , ki so močno odvisne od sestave oplasčenja, je podana v tabeli 1.

Od sestave varilne žlindre, to je njenih fizikalnih lastnosti (predvsem temperature taljenja in viskoznosti); je odvisna primernost elektrod za varjenje v različnih legah, v veliki meri pa sta od fizikalnih lastnosti varilne žlindre odvisna tudi videz in kvaliteta vara^(6, 26).

Za določanje viskoznosti raztaljenih žlinder obstoji več metod⁽²³⁾. Stanje varilnih žlinder smo ugotavljali z določanjem temperature zmeščiča s pomočjo segerjevih stožcev ter z določanjem temperature taljenja in temperature lahko tekočega stanja žlindre po metodi izlivanja žlindre, ki smo jo razvili tako, da čim bolj ustreza dejanskemu stanju varilnih žlinder — kratkotrajno (ca. 5 minut) taljenje pod redukcijskimi pogoji (zaradi dezoksidantov v elektrodi so tudi varilne žlindre delno reducirane, običajno celo bolj kot po 5 minutnem taljenju v grafitnem lončku blizu temperature taljenja^(6, 24)).

Varilne žlindre podobno kot stekla nimajo izrazitega tališča, temveč bolj ali manj široko območje taljenja — omehčanja. Pri razvoju elektrod nas zanimata predvsem temperatura, pri kateri prične žlindra teči (temperatura taljenja — interpolacija krivulje v diagramu, ki podaja temperaturno odvisnost iztekanja žlindre, na 0 %-no iztekanje) in temperatura, ko je žlindra lahko tekoča (80 %-no iztekanje)^(6, 24).

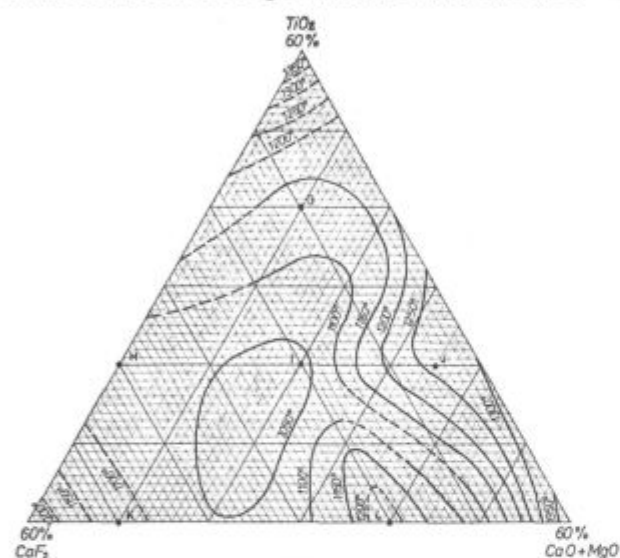
Trokomponentni diagrami temperatur zmeščiča, temperatur taljenja in temperatur lahko teko-

Tabela 1 — Povprečna sestava varilne žilindre (solidna dezoksidacija vara — Pr 18/8)

CaF ₂ (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	MnO (%)	FeO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Nb ₂ O ₅ (%)	alk. oks. (%)
5—45	5—30*	0—40	ca. 20	ca. 3	ca. 5	ca. 7	ca. 3	0—5*	ca. 2	ca. 2

* v trokomponentnih diagramih (slike 1, 2 in 3) je s spreminjanjem vsote (CaO + MgO) od 0—60% zajeto tudi področje bolj bazičnih žilinder, ki je zanimivo za razvoj elektrod za varjenja v smeri od zgoraj navzdol.

čega stanja za področje žilinder, ki nastajajo pri varjenju visoko legiranih prokron jekel z oplaščenimi elektrodami so podani na slikah 1, 2 in 3⁽²⁴⁾.

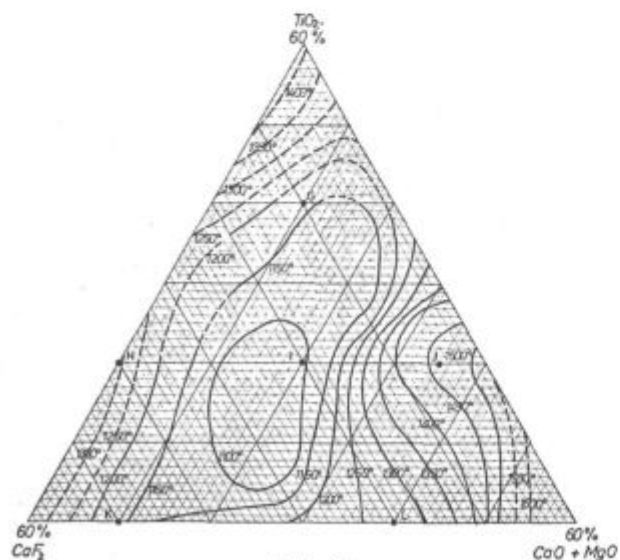


Slika 1

Trokomponentni diagram zmečklišč varilnih žilinder

Fig. 1

Ternary diagram of softening points for welding slags

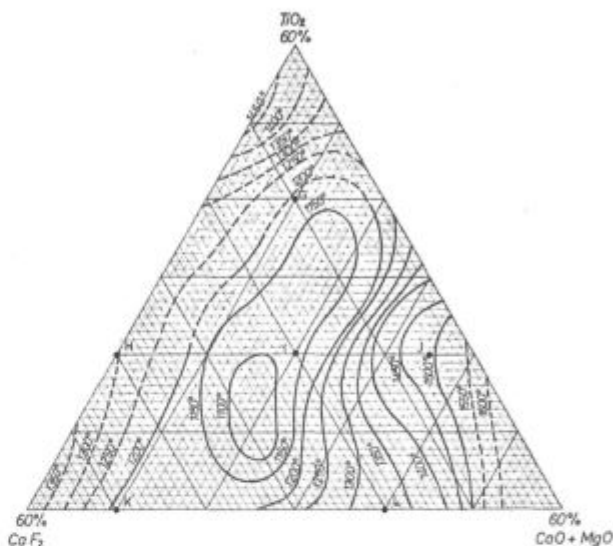


Slika 2

Trokomponentni diagram taljenja varilnih žilinder

Fig. 2

Ternary diagrams of melting for welding slags



Slika 3

Trokomponentni diagram lahko tekočega stanja varilnih žilinder

Fig. 3

Ternary diagram of low viscous state for welding slags

Pri vseh treh diagramih (slika 1, 2 in 3) smo opazovali vpliv (CaO + MgO), CaF₂ in TiO₂ na stanje žilindre. Vsebnost ostalih oksidov, ki so običajno tudi v varilni žilindri, pa je bila približno naslednja: 6,3 % Cr₂O₃, 3,3 % MnO, 3,0 % FeO, 1,3 % Fe₂O₃, 20,4 % SiO₂, 3,7 % Al₂O₃ in 2 % K₂O.

Izbrane sestave varilnih žilinder, ki naj nastajajo med varjenjem s poizkusnimi visokolegiranimi elektrodami za varjenje prokron jekel, so v trokomponentnih diagramih označene z »G«, »H«, »I«, »J«, »K« in »L«.

Žilindre omenjenih (izbranih sestav nastajajo pri varjenju z drugo elektrodo vsake od poizkusnih serij (količina dezoksidantov je pri teh elektrodah izbrana tako, da je čisti var skoraj optimalno dezoksidiran). Elektrode iste serije se med seboj razlikujejo le v vsebnosti dezoksidantov, ki je pri prvi elektrodni serije najmanjša (elektroda vsebuje le legirne dodatke — je brez posebej dodanih dezoksidantov) ter sem jo pri ostalih elektrodah povečeval na račun dodatka Fe v prahu. Zaradi razlik v vsebnosti dezoksidantov v elektrodni oblogi se varilne žilindre iste serije elektrod med seboj nekoliko razlikujejo v vsebnosti FeO, MnO, SiO₂, Nb₂O₅ in Cr₂O₃.

Pri varjenju visoko legiranih prokron jekel — razvoju elektrod za varjenje teh jekel — je zelo problematično zapekanje žilindre na var. Odvisno je od sestave varilne žilindre, to je njene kristalne

rešetke na varu — prisotnosti FeO, TiO₂ in špinelov (Fe, Mn) O. Cr₂O₃⁽²⁸⁾. Pri naših raziskavah so se zapekale na var žlindre sestave »I« in »J«. V tem delu trokomponentnega diagrama je torej področje kemičnih sestav varilnih žlindrov (z okoli 20 % TiO₂ in nad 10 % CaO), ki niso primerne, da bi nastajale med varjenjem.

2. Vpliv načina legiranja vara na minimalni izkoristek varjenja

Oplaščenja poizkusnih elektrod sem izbral na osnovi izračunanih orientacijskih sestav elektrodnih mešanic in izračunanih faktorjev oplaščenja. Oboje sem izračunal iz izbranih sestav varilnih žlindrov za oblikovanje na elektrodne žice sestave EO, EPP Cr 6 in Pr 18/8 (glej tabelo 2).

Tabela 2 — Sestave elektrodnih žic

Vrsta žice	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Nb (%)
EO	0,04	0,02	0,47	—	—	—	—
EPP Cr 6	0,09	0,25	0,70	6,75	0,35	0,55	—
Pr 18/8	0,06	0,40	1,35	19,50	9,50	—	0,5

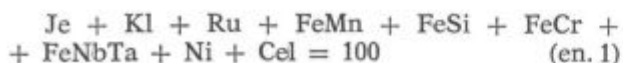
Vzpostavljanje navideznega ravnotežja sem pri računanju orientacijske sestave elektrodne mešanice in faktorja oplaščenja upošteval tako, da sem ju izračunal na osnovi povprečne vsebnosti Si, Mn, Cr, Ni in Nb v solidno dezoksidiranem varu (glej tabelo 3) in odgovarjajoče povprečne vsebnosti FeO, MnO, SiO₂ in Cr₂O₃ v varilni žilindri (glej tabelo 1).

Tabela 3 — Povprečna sestava solidno dezoksidirane visoko legiranega vara (Pr 18/8)

Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Nb (%)
0,5	1,0	18,5	8,5	ca. 1,0

Poseben problem, ki se pojavi pri izdelavi visoko legiranih elektrod (legiranje vara iz plašča), pa je visok minimalen izkoristek varjenja. Te vrste elektrode imajo tudi visok faktor oplaščenja.

Pri visoko produktivnih elektrodah zvišujemo izkoristek varjenja z dodatkom »Fe v prahu« v elektrodno mešanico (plašč). Elektrode, ki v plašču nimajo »Fe v prahu«, imajo minimalen izkoristek varjenja — elektrodna mešanica (en. 1) ne vsebuje Fe v prahu.



Izkoristek varjenja se poveča le zaradi legiranja vara

$$\eta = \frac{G_z + G_{kov}}{G_z} \quad (\text{en. 2})$$

$$G_{kov}: [(\text{FeMn} + \text{FeSi} + \text{FeCr} + \text{NbTa} + \text{Ni}) - (\text{Fe}_{oks} + \text{Mn}_{oks} + \text{Si}_{oks} + \text{Cr}_{oks} + \text{Nb}_{oks})] = \frac{G_{z1}}{Zl} = \frac{G_v}{G_v} \cdot \frac{G_v}{Zl} = \frac{V_z \cdot 0,231 \cdot 7,8 \cdot \eta}{100 \cdot z} \quad (\text{en. 3})$$

$$\frac{G_{z1}}{G_v} = 0,231 \quad (\text{isto razmerje kot pri bazično oplaščenih elektrodah za varjenje nelegiranih in nizko legiranih jekel — lit. 6})$$

$$Zl = 100 \cdot z$$

$$G_v = V_z \cdot 7,8 \cdot \eta$$

Legenda oznak pri enačbah 1, 2 in 3:

Je, Kl, Ru, FeMn, FeSi, FeCr, FeNbTa, Ni in Cel — % jedavca, kalcita, rutila, FeMn, FeSi, FeCr, FeNbTa, Ni v prahu in celita v elektrodni mešanici (tudi količina v gramih na 100 g elektrodne mešanice)

Zl — količina varilne žilindre; računano v gramih na 100 g elektrodne mešanice

Fe_{oks}, Mn_{oks}, Si_{oks}, Cr_{oks} in Nb_{oks} — količina Fe, Mn, Si, Cr in Nb, ki se oksidira; računamo v gramih na 100 g elektrodne mešanice

G_z, G_v, G_{z1} in G_{kov} — količina žice, vara, žilindre in količina kovine, ki pridejo v var iz elektrodne obloge; računano v gramih na količino žice:

$$G_z = 7,8 \cdot V_z$$

$$V_z — \text{volumen žice } (V_z = \frac{h \cdot \pi \cdot d^2}{4})$$

η — izkoristek varjenja

z — konstanta; določa razmerje med količino neke sestave v žilindri in elektrodni mešanici pri izbrani elektrodi

Opomba: Izračunavanje orientacijskih sestav elektrodnih mešanic, faktorjev oplaščenja in minimalnih izkoristkov varjenja je podrobno obdelano v prilogi literature 6 in poročilu Metalurškega inštituta v Ljubljani z istim naslovom, kot ga ima članek (članek je izveček iz tega poročila).

Za izdelavo visokolegiranih oplaščenih elektrod (Pr 18/8) sem izračunal po enačbah 1, 2 in 3 (z upoštevanjem sestave žice, vara in žilindre;

$$\text{primer: FeMn} = \frac{(\text{Mn}_v - \text{Mn}_z) + \text{Mn}_{z1}}{0,8}$$

$$\text{in Mn}_{oks} = \frac{\% \text{ MnO}}{100} \cdot \frac{55}{71} \cdot Zl$$

Mn_z, Mn_v in Mn_{z1} — količina Mn v žici, varu in žilindri; računano v gramih na 100 g elektrodne mešanice.

% MnO — vsebnost MnO v varilni žilindri], da so v primeru žilindre sestave »G« pri razmerju G_{z1}/G_v = 0,231 in oblikovanju na žice EO, EPP Cr 6 in Pr 18/8 naslednje minimalne vrednosti za

izkoristek varjenja (η_{\min}) in faktor oplaščenja (f_{\min}):

EO — žica	$\eta_{\min} = 1,71$	$f_{\min} = 1,96$
EPP Cr 6 — žica	$\eta_{\min} = 1,51$	$f_{\min} = 1,88$
PR 18/8 — žica	$\eta_{\min} = 0,995$	$f_{\min} = 1,57$

Pri izdelavi visokolegiranih elektrod (legiranje vara s kromom iz plašča) pride do omejitev le zato, ker imajo te elektrode vedno visok minimalen izkoristek varjenja in so zato neprimerne za posebne zahteve varjenja. Nizek izkoristek varjenja — varjenje v tankih slojih — je le pri visoko legiranih elektrodah, pri katerih je legiranje vara s kromom iz elektrodne žice.

II. POTEK REAKCIJ MED VARJENJEM

1. Dezoksidacija vara

Pri varjenju z oplaščenimi elektrodami se iz taline vara ne uspe izločiti celotna količina oksidnih vključkov. Preostali oksidni vključki zvišujejo vsebnost kisika v varu. Ta je v varih, ki so zavarjeni z elektrodami za varjenje nelegiranih in nizko legiranih jekel, redno nad 200 ppm (glej literaturo 6 in 30), v varih, ki so zavarjeni z elektrodami za varjenje visoko legiranih prokron jekel, pa nad 500 ppm (glej sliko 4). Razlike nastopijo zaradi razlik v koeficientih termodinamične aktivnosti, ki jih lahko izračunamo s pomočjo konstant medsebojnega vpliva $\epsilon_{e_i(j)}$ (4, 5) po naslednji enačbi (6, 7):

$$\log f_o = e_o(C) (\% C) + e_o(Si) (\% Si) + e_o(Mn) (\% Mn) + e_o(Cr) (\% Cr) + e_o(Ni) (\% Ni)$$

$$\log f_o = -10^{-2} (13 \cdot \% C + 14 \cdot \% Si + 4,1 \cdot \% Cr - 0,6 \cdot \% Ni) \quad (\text{en. 4})$$

a) Nizko legiran var (0,08 % C, 0,5 % Si, 0,9 % Mn);

$$f_o = 0,83$$

b) Visoko legiran var (0,07 % C, 0,5 % Si, 1,0 % Mn, 18,5 % Cr, 8,5 % Ni);

$$f_o = 0,13$$

Ravnotežne vsebnosti kisika pri optimalno dezoksidiranih varih (optimalna žilavost vara), ki so zavarjeni z elektrodami za varjenje nelegiranih in nizko legiranih jekel, so okoli 50 ppm (6). Ravnotežna vsebnost kisika pri enako dezoksidiranih varih, zavarjenih z elektrodami za varjenje prokron jekel, bo torej naslednja:

$\% O/$ — nizko legiran var = $\% O/$ — visoko legiran var (pogoj, da sta vara enako dezoksidirana) / $\% O/ \cdot f_o = \text{konst.};$
(50 ppm $O_2 = 0,0050 \% O_2$)

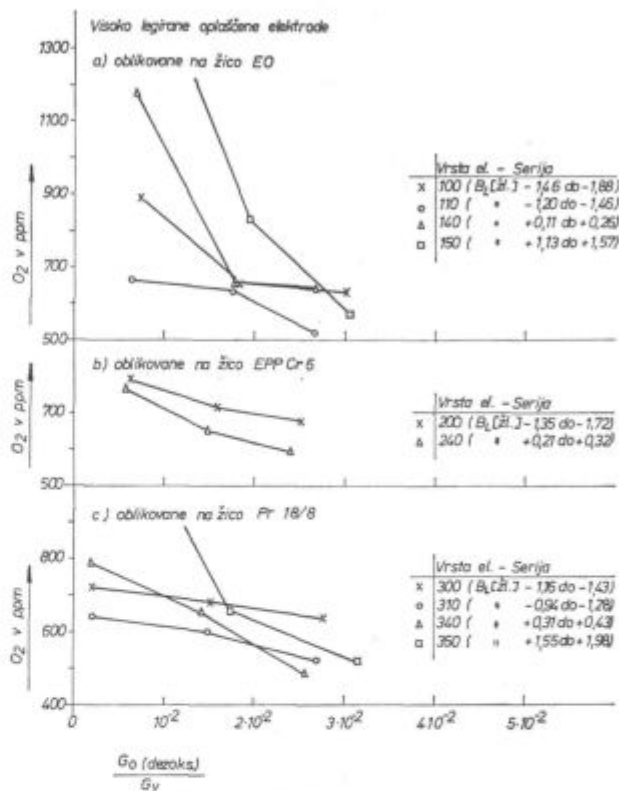
$$\% O/ \text{ — visoko legiran var} = \frac{0,0050 \cdot 0,83}{0,13} =$$

$$= 0,0320; 320 \text{ ppm } O_2$$

Če prištejemo izračunani ravnotežni vsebnosti kisika še kisik, ki je vezan v vključkih (ta je pri

legiranih in nelegiranih varih približno enak — nad 150 ppm), dobimo, da je celotna vsebnost kisika v varu nad 470 ppm. To se povsem ujema tudi s praktičnimi ugotovitvami, da je vsebnost kisika v visokolegiranih varih (Pr 18/8), ki so optimalno dezoksidirani, običajno nad 500 ppm.

Celotna vsebnost kisika v visoko legiranem varu (Pr 18/8) je v odvisnosti od dodatka dezoksidantov v elektrodni oblogi prikazana na sliki 4.



Slika 4

Vpliv dodatka dezoksidantov v elektrodni oblogi na celotno vsebnost kisika v varu

Fig. 4

Influence of addition of deoxidizing agents in the electrode coating on the total oxygen content in the weld

V diagramu sem dodatek dezoksidanta v elektrodni oblogi prikazoval kot $\% G_{O(\text{dezoks.})} / G_v$, to je kot količino kisika, ki jo teoretično lahko vežejo dezoksidanti v elektrodni oblogi na enoto vara. Računal sem jo po naslednji enačbi (6):

$$\frac{G_{O(\text{dezoks.})}}{G_v} = \sum (\text{dezoks.} \Sigma \% \text{ Me v dezoks.} \frac{y \cdot 16}{x \cdot M_{\text{Me}}} \cdot 10^{-2}) \cdot \frac{G_{\text{Zl}}}{Zl \cdot G_v} \quad (\text{en. 5})$$

dezoks. — so % FeMn, % FeSi, % FeTi, % FeCr in % FeNbTa v elektrodni mešanici

% Me v dezoks. — vsebnost kovin (Mn, Si, Ti, Al in C) v dezoksidantih

M_{Me} — atomska masa kovine »Me«, ki tvori oksid Me_xO_y

Iz slike 4 je razvidno, da pri visoko legiranih elektrodah tudi legirni elementi vplivajo na dezoksidacijo vara. Le pri močno bazično oplášenih elektrodah (glej B_L [žl.] na sliki 4) je po varjenju z visoko legiranimi elektrodami z nizko vsebnostjo dezoksidantov v plašču (prva elektroda vsake serije elektrod je bila pripravljena brez dodatka dezoksidanta — FeSi) celotna vsebnost kisika v varu zelo visoka.

Previsok dodatek dezoksidantov v elektrodi ne vpliva bistveno na znižanje celotne vsebnosti kisika v varu, povzroči pa poslabšanje žilavosti vara zaradi legiranja vara s Si in Mn.

Količina dezoksidantov, ki mora biti v elektrodi, da dobimo po varjenju optimalno žilavost vara, je odvisna predvsem od sestave in debeline oplášenja^{6/}.

Med varjenjem poteka oksidacija elementov (poraba dezoksidantov) le s kisikom, ki pride iz plinske faze v talino žlindre in vara, ter kisikom, ki vstopa v reakcije vzpostavljanja navideznega ravnotežja zaradi redukcije varilne žlindre^{6/}.

2. Prenos kisika iz plinske faze v talino žlindre in vara

Vzrok za prenos kisika iz plinske faze v talino žlindre in kovine je oksidacija površine kapljice^{6, 12/}, nastanek feritov^{19/} in prenos vodika v var^{14/}.

Prenos kisika iz plinske faze v talino žlindre in vara je odvisen od sestave elektrode na naslednji način:

a) elektrodna obloga

— fizikalne lastnosti in bazičnost teoretične taline elektrodne obloge, to je žlindre, ki nastaja ob nastanku kapljic, vplivajo na hitrost reakcij s plinsko fazo (zvišanje bazičnosti jih pospešuje)

— sestava varilne žlindre in količina plinov, ki nastajajo med varjenjem, pa vplivata na odtaljevanje (velikost kapljic)

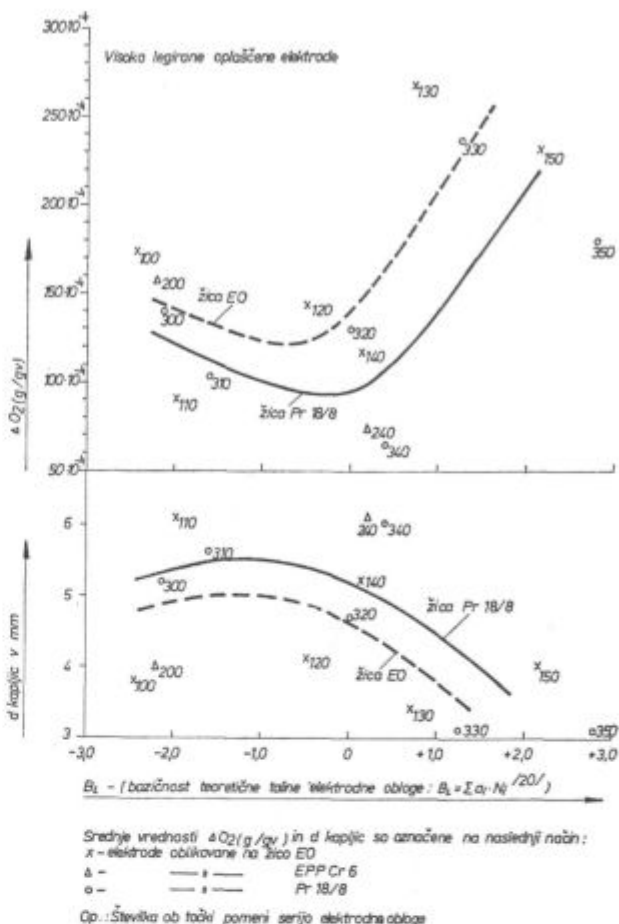
b) elektrodna žica

— na odtaljevanje, to je velikost kapljic, vpliva tudi dezoksidiranost kapljic.

Prenos kisika iz plinske faze v talino žlindre in vara za varjenje z visoko legiranimi elektrodami (Pr 18/8) je v odvisnosti od bazičnosti teoretične taline in odtaljevanja podan na sliki 5.

Ugotovitve se ujema z ugotovitvami glede velikosti odtaljenih kapljic in »prenosa kisika« pri varjenju nelegiranih in nizkolegiranih jekel (glej literaturo 6 in 30). Dopolnjene pa so še glede vpliva uporabe različno dezoksidiranih in legiranih žic pri izdelavi elektrod ter glede vpliva nastajajočih plinov CO₂ na velikost odtaljenih kapljic in »prenos kisika«.

Kapljice, ki se odtaljujejo pri varjenju z oplášenimi elektrodami oblikovanimi na žico EO, ki vsebuje bistveno manj dezoksidantov kot žica Pr 18/8 (glej tabelo 2), so ob nastajanju slabše dezoksidirane kot kapljice, ki se odtaljujejo pri varje-



Slika 5

Odvisnost prenosa kisika iz plinske faze v talino kovine in žlindre od sestave elektrodne žice in elektrodne obloge (bazičnosti teoretične taline elektrodne obloge in odtaljevanja — poprečne velikosti kapljic)

Fig. 5

Relationship between the oxygen transfer from the gaseous phase into the molten metal and slag, and the composition of electrode wire and electrode coating (basicity of theoretical melt of the electrode coating and melting rate — average size of drops)

nju z ustreznimi elektrodami, oblikovanimi na žico Pr 18/8. Ker je kisik površinsko aktivna snov, ki zmanjšuje površinsko napetost ter s tem v zvezi velikost kapljic^{27/}, je razumljivo, da so slabše dezoksidirane kapljice, ki nastajajo pri varjenju z oplášenimi elektrodami, oblikovanimi na EO — žico, manjše velikosti (črtkana krivulja v spodnjem diagramu na sliki 5). Odtaljevanje v drobnejših kapljicah pa je vzrok za višji »prenos kisika« pri varjenju z oplášenimi elektrodami oblikovanimi na EO — žico (črtkana krivulja v zgornjem diagramu na sliki 5).

Odstopanja od krivulj pojasnjuje vpliv, ki ga ima sestava elektrodne obloge, to je sestava varilne žlindre (fizikalne lastnosti; temp. taljenja in viskoznost) in količina nastajajočih plinov CO₂ (glej tabelo 4 — zvišanje količine nastajajočih plinov CO₂ povzroči odtaljevanje v drobnejših kapljicah ter s tem povečanje »prenosa kisika«), na hitrost reakcij s plinsko fazo in odtaljevanje.

Tabela 4: Vpliv sestave elektrodne obloge (bazičnosti teoretične taline in količine nastajajočih plinov G_{CO_2} v g/g v) na prenos kisika » ΔO_2 (g/gv)« in velikost kapljic v odvisnosti od sestave elektrodne žice

El. žica Serija	EO 100	110	120	130	140	150
B_L — teor. talina	-2,42	-1,97	-0,47	+0,73	+0,15	+2,16
ΔO_2 (10^{-4} g/gv)	173	91	144	268	117	232
d kapljic v mm	3,8	5,0	4,1	3,4	5,2	4,0
G_{CO_2} (10^{-2} g/gv)	2,0	∅	3,4	6,9	1,9	7,7
El. žica Serija	EPP Cr 6 200				240	
B_L — teor. talina	-2,20				+0,19	
ΔO_2 (10^{-4} g/g v)	158				74	
d kapljic v mm	4,0				6,1	
G_{CO_2} (10^{-2} g/g v)	2,0				1,6	
El. žica Serija	Pr 18/8 300	310	320	330	340	350
B_L — teor. talina	-2,12	-1,59	+0,02	+1,27	+0,41	+2,84
ΔO_2 (10^{-4} g/g v)	140	103	130	237	65	180
d kapljic v mm	5,2	5,6	4,7	3,1	6,0	3,1
G_{CO_2} (10^{-2} g/g v)	1,7	∅	3,1	6,9	1,1	7,5

Opomba: ΔO_2 (10^{-4} g/g v) in d kapljic v mm sta srednji vrednosti prvih treh elektrod serije (pri vseh serijah vsebuje prva elektroda serije le legirne dodatke, druga toliko FeSi, da je var skoraj optimalno dezoksidiran, tretja pa prebitek FeSi)

Tudi dodatek kromita v elektrodno oblogo ne vpliva bistveno na »prenos kisika« (tabela 5). Dezoksidacija s FeTi (namesto s FeSi) pa povzroči zvišanje »prenosa kisika« (tabela 5). Zadnja ugotovitev se ujema tudi z ugotovitvami glede vpliva dezoksidantov na »prenos kisika« v literaturi 6. Ta je najvišji pri dezoksidaciji s FeMn, najnižja pa pri dezoksidaciji s FeSi. Glede »prenosa kisika« si dezoksidanti slede v približno naslednjem vrstnem redu: FeMn, FeTi, ZrSi, Al, CaSi, in FeSi.^{6/}

3. Reakcije med raztaljeno žlindro in kovinsko talino

Vzpostavljane ravnotežja med raztaljeno žlindro in talino vara (redukcija varilne žlindre) poteka po naslednji ravnotežni enačbi:

$$a_{O/} = \frac{a_{(FeO)}}{K_{Fe}^a} = \frac{a_{(MnO)}}{K_{Mn}^a \cdot a_{/Mn/}} = \sqrt{\frac{a_{(SiO_2)}}{K_{Si}^a \cdot a_{/Si/}}} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{a_{(Cr_2O_3)}}{K_{Cr}^a \cdot a_{/Cr/}^2}} = \sqrt[5]{\frac{a_{(Nb_2O_5)}}{K_{Nb}^a \cdot a_{/Nb/}^2}} \quad (\text{en. 6})$$

V skladu z ravnotežno enačbo (en. 6) in ugotovitvami glede hitrosti poteka fizikalno-kemičnih procesov med varjenjem (glej lit. 6 in 30) smo z obdelavo rezultatov raziskav na računalniku IBM 360/30 po metodi najmanjših kvadratov izpeljali

enačbe vzpostavljanja navideznega ravnotežja med žlindro in varom tudi za varjenje z visoko legiranimi oplaščenimi elektrodami. Izpeljane enačbe veljajo v območju raziskav (od 0,05 do 0,15 ut % celotne vsebnosti kisika v varu) za visoko legirane oplaščene elektrode, ki so osušene pri temperaturi 450° C, za varjenje z enosmernim tokom na + pol.

Praktično dobljeni rezultati se glede na razmere pri varjenju (pogoji dezoksidacije vara z opla-

Tabela 5: Vpliv kromita in FeTi v elektrodni oblogi prenos kisika » ΔO_2 (g/gv)«

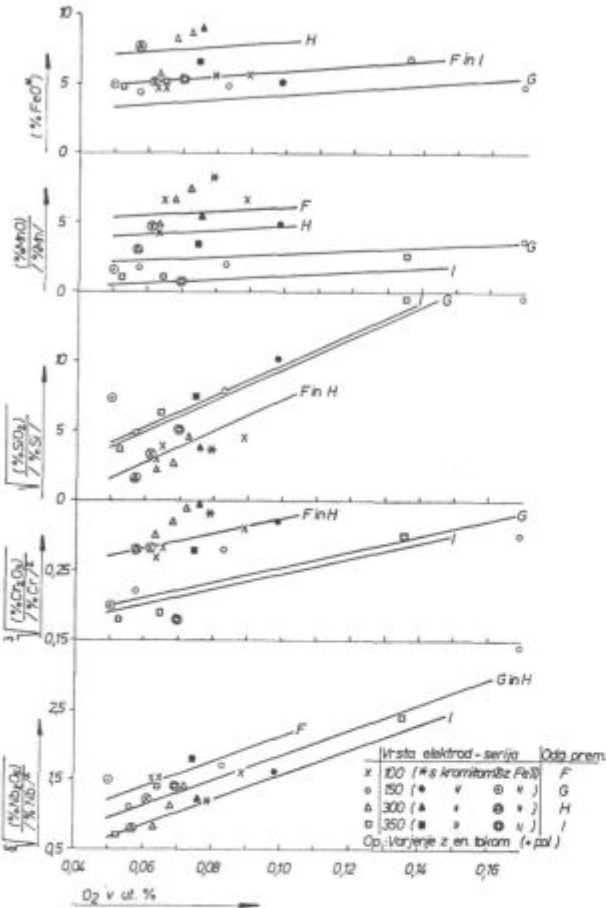
Serija	ΔO_2 (10^{-4} g/g v)*	ΔO_2 (10^{-4} g/g v)**	ΔO_2 (10^{-4} g/g v)***
100	173	198	211
110	91	97	133
140	117	103	122
150	232	252	223
200	158	168	208
240	74	85	78
300	140	153	185
310	103	133	143
340	65	85	110
350	180	176	219

* Srednja vrednost prvih treh elektrod serije.

** Elektrode s kromitom v plašču (10 % FeCr v elektrodni mešanici je zamenjano s kromitom. V elektrodno mešanico pa je dodana tudi dodatna količina FeSi, ki je potrebna za redukcijo kromita).

*** Elektrode s FeTi v plašču (Optimalna dezoksidacija vara s FeTi. Dodatek FeSi pri drugi elektrodni seriji smo zamenjali z ustrežno količino FeTi).

ščenimi elektrodami so veliko odvisni od varilca: drža in odmaknjenost elektrode ter hitrost varjenja močno vplivajo na temperaturo varjenja, obliko kopeli in debelino vara) zelo dobro ujemajo z izpeljanimi enačbami. Ujemanje je razvidno iz stopnje korelacije, prikazano pa je tudi na sliki 6. sliki 6.



Slika 6

Vzpostavljane navideznega ravnotežja med žlindro in varom pri varjenju z visokolegiranimi oplasčenimi elektrodami (elektrode za varjenje prokron jekel)

Fig. 6

Achievement of quasi-equilibrium between the slag and the weld in welding with high-alloyed coated electrodes (electrode for welding Prokron steel)

Premice, vrisane v diagramih na sliki 6, so bile izračunane po naslednjih enačbah vzpostavljanja navideznega ravnotežja med žlindro in varom pri varjenju z visokolegiranimi oplasčenimi elektrodami (Pr 18/8):

$$(\% \text{FeO}^*) = 9,88 + 18,2 \cdot [\text{O}] - 0,033 \cdot \% \text{SiO}_2 - 0,61 \cdot B_L - 3,12 \cdot \eta;$$

71,2 % na korelacija (en. 7)

$$\frac{(\% \text{MnO})}{\% \text{Mn}} = 0,98 + 14,4 \cdot [\text{O}] - 0,128 \cdot \% \text{SiO}_2 - 0,78 \cdot B_L + 2,18 \cdot \eta;$$

75,7 % na korelacija (en. 8)

$$\sqrt{\frac{(\% \text{SiO}_2)}{\% \text{Si}}} = -4,11 + 112,4 \cdot [\text{O}] + 0,061 \cdot \% \text{SiO}_2 + 0,64 \cdot B_L + 0,11 \cdot \eta;$$

91,9 % na korelacija (en. 9)

$$\sqrt[3]{\frac{(\% \text{Cr}_2\text{O}_3)}{\% \text{Cr}^2}} = 0,21 + 1,1 \cdot [\text{O}] - 0,002 \cdot \% \text{SiO}_2 - 0,02 \cdot B_L;$$

79,1 % na korelacija (en. 10)

$$\sqrt[5]{\frac{(\% \text{Nb}_2\text{O}_5)}{\% \text{Nb}^2}} = -0,38 + 18,0 \cdot [\text{O}] - 0,013 \cdot \% \text{SiO}_2 - 0,05 \cdot B_L + 0,40 \cdot \eta;$$

92,7 % na korelacija (en. 11)

Legenda oznak v podanih enačbah:

(% FeO*) = (% FeO) + 1,35 (% Fe₂O₃)
 % FeO, % Fe₂O₃, % MnO, % SiO₂, % Cr₂O₃ in % Nb₂O₅ — sestavine varilne žlindre (ut. %)
 % Mn, % Si, % Cr in % Nb — sestavine vara (ut. %)
 [O] — celotna vsebnost kisika v varu (ut. %)

$B_L = \sum a_i N_i^{1/6, 20/}$; bazičnost varilne žlindre

η = izkoristek varjenja (računano na težo oddaljene elektrodne žice)

Pogoji za izračun premic (slika 6) so bili naslednji:

Oznaka premice	% SiO ₂ v žlindri	B _L žlindre	η -varjenja	Serijs*
F	ca. 17	— ca. 1,7	ca. 2,05	100
G	ca. 23	+ ca. 1,1	ca. 1,95	150
H	ca. 11	— ca. 1,2	ca. 1,29	300
I	ca. 20	+ ca. 1,9	ca. 1,30	350

* Serija je podana le informativno.

Poleg dobrega ujemanja praktično dobljenih rezultatov (točke) z izpeljanimi enačbami (premiče) je iz diagramov na sliki 6 razvidno še, da se tudi rezultati, ki smo jih dobili pri varjenju z elektrodami, pri katerih smo var dezoksidirali z FeTi, dobro ujemajo z izpeljanimi enačbami (odgovarjajočimi premicami). V vseh primerih so nekoliko višji le rezultati porazdelitve kroma med žlindro in varom pri elektrodah, ki smo jim dodali v oblogo kromit (vedno nad odgovarjajočo premico — glej sliko 6).

ZAKLJUČEK

1. Za področje kemičnih sestav žlinder, ki nastajajo pri varjenju prokron jekel z visoko legiranimi oplasčenimi elektrodami (Pr 18/8), izdelani trokomponentni diagrami temp. zmehčišč, taljenja

in lahko tekočega stanja podajajo sestave varilnih žlinder, ki so primerne, da nastajajo med varjenjem. Zaradi zapekanja žlindre na var pa ni zaželeno, da med varjenjem nastajajo žlindre, podobne sestavama »I« in »J«, to je žlindre, ki vsebujejo nad 10 % CaO in okoli 20 % TiO₂.

2. Vsebnosti kisika v čistih varih, ki so zavarjeni z visoko legiranimi elektrodami, so redno nad 500 ppm. Vzrok za višjo vsebnost kisika v teh varih, v primerjavi z nelegiranimi in nizkolegiranimi vari (nad 200 ppm), je znatno nižji koeficient termodinamične aktivnosti kisika v talini visoko legiranega vara.

3. Pri visoko legiranih elektrodah (legiranje vara s kromom iz plašča) pride do omejitev uporabnosti teh elektrod le zato, ker imajo te vrste elektrod vedno visok minimalen izkoristek varjenja in so zato neprimerne za posebne zahteve varjenja. Nizek izkoristek varjenja (varjenje v tankih slojih) je možen le pri visokolegiranih elektrodah, pri katerih je legiranje vara s kromom iz elektrodne žice.

4. Teoretično izračunavanje sestave in debeline oplaščenja temelji na poteku fizikalno kemičnih procesov med varjenjem, to je na zakonitostih prenosa kisika iz plinske faze v talino žlindre in kovine (slika 5) in zakonitostih vzpostavljanja navideznega ravnotežja med žlindro in varom (enačbe 7, 8, 9, 10 in 11).

5. Prenos kisika iz plinske faze v talino žlindre in vara je pri elektrodah, ki so oblikovane na legirano žico »EO«, nekoliko višji kot pri elektrodah, ki so oblikovane na legirani žici »EPP Cr 6 in Pr 18/8« (razlike v oddaljevanju). Razlike v porazdelitvi kroma med žlindro in varom pa so kljub razlikam v načinu legiranja vara s kromom neznatne (med premicama F in H na sliki 6 pri porazdelitvi Cr ni razlike, premici G in I pa se le malenkost razlikujeta — premici F in G predstavljata legiranje vara s kromom iz plašča, premici H in I pa iz žice). Le pri elektrodah, ki imajo v plašču kromit, se vzpostavi po varjenju nekoliko

višje razmerje
$$\sqrt[3]{\frac{(\% \text{Cr}_2\text{O}_3)}{\% \text{Cr}^2}}$$

6. Z izbiro izkoristka varjenja, količine in sestave žlindre (diagrami stanja) ter sestave vara (Schaefflerjev diagram) lahko na osnovi ugotovljenih zakonitosti poteka reakcij med varjenjem izračunamo optimalno sestavo in debelino oplaščenja za elektrodo, da bo ustrezala predpisanim zahtevam.

Literatura

1. J. H. Palm: *Welding Journal* 51 (1972), št. 7, str. 358-s/360-s.
2. I. N. Golikov/G. M. Icković: *Stalj* (1973), št. 7, str. 591/616.
3. W. Hummützsch, L. Hense: *Schweissen und Schneiden* 14 (1962), št. 5, str. 201/210.
4. J. F. Elliot, M. Gleiser: *Thermochemistry for Steelmaking — II*, (Addison — Wesley Publishing Co INC, London 1960)
5. D. Ja. Povolockij: *Razkisljenje stali* (Izdateljstvo »Metallurgija«, Moskva 1972).
6. R. Kejžar: *Vpliv dezoksidantov na prenos kisika pri varjenju z oplaščenimi elektrodami* (Disertacija — Fakulteta za NT, Univerza v Ljubljani, Ljubljana 1974).
7. E. Plöckinger, H. Straube, G. Kühnelt: *Radex — Rundschau* (1965), št. 2, str. 447/460.
8. M. Beckert, A. Neumann: *Grundlagen der Schweiss-technik* (VEB Verlag Technik, Berlin 1969).
9. Koch: *Handbuch der Schweiss-technologie Lichtbogen-schweissen* (Deutscher Verlag für Schweiss-technik — DVS — GMBH, Düsseldorf 1961).
10. D. Seferijan: *Metalurgija zavarivanja* (Gradjevska knjiga, Beograd 1969).
11. W. Hummützsch: *Schweissen und Schneiden* 13 (1961), št. 5, str. 187/195.
12. A. N. Bjikov, A. A. Erohin: *Svaročnoe proizvodstvo* (1965), št. 7, str. 25/28.
13. A. A. Erohin: *Fizika i hemija obrabotki materialov* (1969), št. 5, str. 56/61.
14. P. Stular: *Studij varjenja pod žlindro — I*. (Poročilo Zavoda za varjenje SRS, Ljubljana 1968).
15. M. G. Froberg, M. L. Kapoor: *Schweissen und Schneiden* 24 (1972), št. 8, str. 293/295.
16. B. E. Lopaev, A. A. Pliševskij, V. V. Stepanov: *Avtomatičeskaja svarka* (1966), št. 1, str. 27/29.
17. A. I. Bočorišvili, S. B. Jakobašvili: *Svaročnoe proizvodstvo* (1968), št. 10, str. 13/15.
18. V. D. E.: *Die physikalische Chemie der Eisen und Stahlerzeugung* (Verlag Stahleisen M. B. H., Düsseldorf 1964)
19. H. Miska, M. Wahlster: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 44 (1973), št. 1, str. 19/25.
20. Eūchi Tsunetomi, Haruo Fujita: *Soud. Techn. conn* 26 (1972), št. 3/4, str. 125/139.
21. H. Samang: *Die Keramik* (Springer — Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1958).
22. *Spravočnik himika I*. (Gosudarstvennoe naučno-tehničeskoe izdateljstvo himičeskoj literaturji, Leningrad/Moskva 1962).
23. A. Rosina, F. Seme, B. Hofbauer: *Nadaljevanje študije strukture staljenih metalurških žlinder in silikatnih talin — II*. (Poročilo Metalurškega inštituta, Ljubljana 1973).
24. D. Sikošek: *Nekatere fizikalne lastnosti varilnih žlinder pri varjenju prokron jekel* (Diplomsko delo — Fakulteta za NT, Univerza v Ljubljani, Ljubljana 1974).
25. M. Kosec: *Poročilo o preiskavi žlinder* (Poročilo inštituta »Jožef Stefana«, Ljubljana 1974).
26. R. Kejžar: *Železarski zbornik* 6 (1972), št. 1, str. 47/63.
27. I. K. Pohodnja, G. G. Korickij: *Svaročnoe proizvodstvo* (1970), št. 8, str. 32/33.
28. I. K. Pohodnja, I. R. Javdošin, V. I. Karmanov, V. G. Vojtkević: *Avtomatičeskaja svarka* (1974), št. 5, str. 5/9.
29. I. Limpel: *Zavarivanje* (1974), št. 5, str. 159/167.
30. R. Kejžar: *Železarski zbornik* 8 (1974), št. 4, str. 193—201.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Gesetzmässigkeiten, im Reaktionsverlauf während des Schweißens, sind auf Grund der mathematischen Datenverarbeitung der Untersuchungsergebnisse bestimmt worden.

Die Anwendung des EO Drahtes bei der Erzeugung von Schweißelektroden verursacht, dass die Sauerstoffübertragung während des Schweißens etwas grösser ist. Die

Verteilung von Chrom zwischen der Schlacke und dem Schweißgut ist von der Legierungsart fast unabhängig.

Die Anwendung der hochlegierten Elektroden (legieren aus dem Mantel) ist mit einem hohen minimalen Ausbringen beim Schweißen begrenz).

Die ausgearbeiteten Schlackenzustandsdiagramme und die festgestellten Gesetzmässigkeiten beim Reaktionsverlauf während des Schweißens, sind die Grundlage für die theoretische Ausrechnung der optimalen Zusammensetzung und der Dicke der Elektrodenummantelung.

SUMMARY

Rules connected to the chemical reactions occurring during welding were determined by mathematical treatment of investigation results.

Use of EO wire in electrode manufacturing causes a relatively higher «oxygen transfer» during welding. Distribution of chromium between the slag and the weld is nearly independent of the way of alloying the weld.

Applicability of high-alloyed electrodes (alloying from the electrode coating) is limited by a high minimal yield of welding.

Constructed phase diagrams for slags and the determined rules for the course of chemical reactions during the welding are basis for theoretical evaluation of the optimal composition and thickness of electrode coating.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закономерности течения реакций во время сварки определены на основании обработки полученных результатов исследования. Применение проволоки - EO для изготовления электродов причиняет немного повышенный «перенос кислорода» во время сварки. Распределение хрома между шлаком и сварным швом почти независимо от легирования шва.

Употребление высоко легированных электрод (легирование из оболочки) ограничена высоким минимальным выходом сварки.

Предложенные диаграммы о состоянии шлака и утвержденные закономерности процесса течения реакций во время сварки представляют собой основание для теоретического расчёта оптимального состава и толщины оболочки электрод.