

Prigor in odgor elementov (silicija in mangana) pri varjenju pod praškoma EP 10 in EP 50

DK: 669.014.648
621.791.01
ASM/SLA: K1e, K9n

Rajko Kežar

Taljeni silikatni visoko manganski prašek EP 10 je primeren za varjenje v kombinaciji z nizko legiranimi žicami (EPP 1 in EPP 2), taljeni visoko silikatni prašek EP 50 pa je primeren za varjenje v kombinaciji z visoko legiranimi žicami (EPP 3).

Pri varjenju pod varilnimi praški (1, 2) poteka med raztaljeno žlindro in talino vara oksidacijsko redukcijske reakcije, ki teže k vzpostavitvi ravnotežja. Potek omenjenih reakcij je odvisen od kemične sestave žlindre in vara ter odločilen za prigor in odgor elementov med varjenjem.

UVOD

Vzpostavljanje ravnotežja med talino žlindre in vara poteka v skladu z naslednjo ravnotežno enačbo^{3, 11}.

$$a_{O/} = \frac{a_{(FeO)}}{K_{Fe}^a} = \frac{a_{(MnO)}}{K_{Mn}^a \cdot a_{Mn/}} = \sqrt{\frac{a_{(SiO_2)}}{K_{Si}^a \cdot a_{Si/}}} = \frac{\geq 1}{K_C^a \cdot a_{C/}} \quad (\text{en. 1})$$

Zaradi kratkega časa, ki je med varjenjem pod varilnimi praški na razpolago za potek reakcij (ko sta varilna žlindra in kovina vara v raztaljenem stanju), te ne potečejo do konca — med žlindro in varom se vzpostavi navidezno ravnotežje.

I. ZAKONITOSTI PRIGORA, OZ. ODGORA SI IN Mn MED VARJENJEM POD VARILNIMA PRAŠKOMA EP 10 IN EP 50

1. Varjenje ter kemične analize žic, čistih varov in varilnih žlinder

Vzpostavljanje navideznega ravnotežja med žlindro in varom smo raziskali za varjenja z žicami EPP 1, EPP 2 in EPP 3 pod varilnima praškoma EP 10 in EP 50.

Vsa varjenja smo izvedli z žicami, dimenzije $\varnothing 4$ mm, pod približno enakimi pogoji ($I = \text{ca.}$

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 Zvezni železarni Jesenice.

600 A, $U = \text{ca. } 35$ V in hitrostjo varjenja $\text{ca. } 50$ cm v minuti).

Kemične analize žic, ki smo jih uporabljali pri varjenju, so podane v tabeli 1, čistih varov v tabeli 2, varilnih žlinder pa v tabeli 3.

Tabela 1: Kemična analiza žic

	% C	% Si	% Mn
EPP 1	0,08	0,14	0,60
EPP 2	0,11	0,18	1,18
EPP 3	0,10	0,17	1,61

Tabela 2: Kemična analiza čistih varov

	% C	% Si	% Mn
EPP 1/EP 10	0,03	0,32	1,17
EPP 1/EP 50	0,03	0,50	0,42
EPP 2/EP 10	0,04	0,36	1,45
EPP 2/EP 50	0,06	0,68	0,67
EPP 3/EP 10	0,05	0,35	1,64
EPP 3/EP 50	0,06	0,61	0,71

2. Računanje ravnotežne vsebnosti Mn in Si ($\approx \text{Ce}$)¹²

Oksidacijsko redukcijske reakcije, ki potekajo med talino žlindre in vara, teže k vzpostavitvi ravnotežja. H kateri količini Mn in Si v varu pa v izbranem primeru teže, sem izračunal iz naslednjih enačb:

$$K'_{Mn, Fe} = \frac{a_{(MnO)}}{a_{(FeO)} \cdot \% Mn/}$$

$$\text{in } K'_{Si, Fe} = \frac{a_{(SiO_2)}}{a_{(FeO)}^2 \cdot \% Si/}$$

ki sem jih izpeljal iz enačb⁴:

$$\log K'_{Fe} = \log \frac{a_{(FeO)}}{\% O/} = \frac{6320}{T} - 2,73 \quad (\text{en. 2})$$

$$\log K'_{Mn} = \log \frac{a_{(MnO)}}{\% Mn/ \cdot \% O/} = \frac{12760}{T} - 5,68 \quad (\text{en. 3})$$

$$\log K'_{Si} = \log \frac{a_{(SiO_2)}}{\% Si/ \cdot \% O/} = \frac{28300}{T} - 10,6 \quad (\text{en. 4})$$

Tabela 3: Kemična analiza varilnih žlinder

	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% FeO	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% CaO	% MgO	% CaF ₂
EPP 1/EP 10	38,40	6,45	4,30	0,74	29,38	6,15	4,04	8,20
EPP 1/EP 50	47,00	3,00	3,00	0,31	3,96	27,33	6,66	6,00
EPP 2/EP 10	37,20	6,40	4,38	0,50	29,59	6,02	4,45	7,60
EPP 2/EP 50	47,20	3,10	2,43	0,64	4,33	26,89	6,26	7,00
EPP 3/EP 10	37,40	6,76	4,38	1,12	28,64	6,27	4,64	7,80
EPP 3/EP 50	47,70	3,87	2,86	0,63	4,26	26,91	6,70	7,00

Ravnotežne vsebnosti »C_e« sem izračunal pri srednji temperaturi varjenja 2050° K^{5, 6}

$$\log K'_{Mn, Fe} = \log K'_{Mn} - \log K'_{Fe} = \frac{6440}{T} - 2,95; K'_{Mn, Fe} = 1,55$$

$$C_e = \% Mn / = \frac{X_{MnO} \cdot f_{MnO}(2050^\circ K)}{X_{FeO} \cdot f_{FeO}(2050^\circ K) \cdot 1,55} \quad (\text{en. 5})$$

$$\log K'_{Si, Fe} = \log K'_{Si} - 2 \cdot \log K'_{Fe} = \frac{15660}{T} - 5,14;$$

$$K'_{Si, Fe} = 316$$

$$C_e = \% Si / = \frac{X_{SiO_2} \cdot f_{SiO_2}(2050^\circ K)}{X_{FeO}^2 \cdot f_{FeO}^2(2050^\circ K) \cdot 316} \quad (\text{en. 6})$$

Op.: V izpeljanih enačbah nista upoštevana koeficienta termodinamične aktivnosti f_{Mn} in f_{Si} . Za temperaturo 1600° C jih lahko izračunamo s pomočjo konstant medsebojnega vpliva »e_i«^{7, 8}

$f_{Mn} = ca. 1; \log f_{Si} = e_{Si}^{(C)} (\% C) + e_{Si}^{(Si)} (\% Si) = -2$
 $= 10 (24 \% C + 32 \% Si)$. Ker pa je v našem primeru temperatura višja (2050° K) se vrednosti za koeficient aktivnosti približajo vrednosti 1. Temperaturna odvisnost konstant medsebojnega vpliva je naslednja⁹:

$$e_i^{(j)} = A(j) \exp. \left(\frac{\Delta E}{RT} \right)$$

X_{FeO} , X_{MnO} in X_{SiO_2} so ionski ulomki komponent FeO, MnO in SiO₂ v varilni žilindri. Računal sem jih po naslednji splošni enačbi^{10, 11}:

$$X_j = \frac{v_j \cdot n_j}{K \sum_{i=1}^K v_i \cdot n_i} \quad (\text{en. 7})$$

v_j — število kovinskih atomov v molekuli izbrane komponente
 n_j — koncentracija izbrane komponente varilne žilindre v g - molih

Koeficiente termodinamične aktivnosti komponent varilne žilindre » f_{FeO} «, » f_{MnO} « in » f_{SiO_2} « pri temperaturi 1600° C sem računal po naslednjih enačbah, ki sem jih izpeljal na osnovi ionske teorije in termodinamike žlinder v skladu s teoret-

skimi izpeljavami Kožeuropa^{10, 11}:

$$\log f_{FeO} = X_{SiO_2} [1,16 X_{MnO} + 3,15 (X_{CaO} + X_{MgO})] + 0,268 (2 X_{SiO_2} - X_{FeO} - X_{MnO} - X_{CaO} - X_{MgO})^2 - 2 (2 X_{SiO_2} - X_{FeO} - X_{MnO} - X_{CaO} - X_{MgO}) \cdot (3 X_{SiO_2} + X_{Al_2O_3} + X_{Fe_2O_3} + X_{CaF_2}) \cdot [0,268 X_{FeO} + 0,606 X_{MnO} + 0,734 (X_{CaO} + X_{MgO})] \quad (\text{en. 8})$$

$$\log f_{MnO} = \log f_{FeO} - 1,16 X_{SiO_2} + 0,338 (2 X_{SiO_2} - X_{FeO} - X_{MnO} - X_{CaO} - X_{MgO})^2 \quad (\text{en. 9})$$

$$\log f_{SiO_2} = \log f_{FeO} - 1,16 X_{MnO} - 3,15 (X_{CaO} + X_{MgO}) - 0,268 \cdot (2 X_{SiO_2} - X_{FeO} - X_{MnO} - X_{CaO} - X_{MgO})^2 + 6 (2 X_{SiO_2} - X_{FeO} - X_{MnO} - X_{CaO} - X_{MgO}) \cdot [0,268 X_{FeO} + 0,606 X_{MnO} + 0,734 (X_{CaO} + X_{MgO})] \quad (\text{en. 10})$$

Enačbe 8, 9 in 10 veljajo za kisle žilindre, to je v našem primeru, ko velja pogoj: $2 X_{SiO_2} > (X_{FeO} + X_{MnO} + X_{CaO} + X_{MgO})$. Če ta pogoj ni izpolnjen (bazične žilindre), pa odpadejo členi, ki upoštevajo polimerizacijo, in enačbe 8, 9 in 10 preidejo v naslednje oblike:

$$\log f_{FeO} = X_{SiO_2} [1,16 X_{MnO} + 3,15 (X_{CaO} + X_{MgO})] \quad (\text{en. 11})$$

$$\log f_{MnO} = \log f_{FeO} - 1,16 X_{SiO_2} \quad (\text{en. 12})$$

$$\log f_{SiO_2} = \log f_{FeO} - 1,16 X_{MnO} - 3,15 (X_{CaO} + X_{MgO}) \quad (\text{en. 13})$$

Enačbe za izračunavanje koeficientov termodinamične aktivnosti za naš sistem varilnih žlinder sem izpeljal z naslednjimi poenostavitvami¹¹:

— CaF₂ z ostalimi sestavinami ne tvori spojina
 — Vpliv Al₂O₃ in Fe₂O₃ je zanemarljivo majhen (izraz za količino vezi Me—O—Me, ki je pomembna za upoštevanje polimerizacije, sem izpeljal s predpostavko, da oksida Fe₂O₃ in Al₂O₃ ne oddajata, pa tudi ne vežeta O²⁻ ionov — vpliv polimerizacije Fe₂O₃ in Al₂O₃ je v primerjavi z vplivom polimerizacije SiO₂ na koeficiente aktivnosti zanemarljiv).
 — Med vplivom CaO in MgO na koeficiente aktivnosti ni bistvene razlike.

Enačbe od 8 do 13 so izpeljane za računanje koeficientov termodinamične aktivnosti pri temperaturi 1600° C. Če bi jih izpeljal za katero drugo temperaturo, bi se spremenili v podanih enačbah

le izračunani faktorji $\frac{Q_{ij}}{4,575 T} \ln \frac{q_i}{4,575 T}$, to je številke 1,16; 3,15; 0,268; 0,606; 0,734 in 0,338

(Q_{ij} — toplote mešanja: $Q_{FeO, MnO} = Q_{FeO, CaO} = Q_{FeO, SiO_2} = Q_{MnO, CaO} = 0$, $Q_{MnO, SiO_2} = -10\ 000$ kal, $Q_{CaO, SiO_2} = -27\ 000$ kal;

q_i — toplote polimerizacije: $q_{FeO} = 2300$ kal, $q_{MnO} = 5200$ kal, $q_{CaO} = 6300$ kal)¹⁰

Splošna enačba za izračun koeficienta termodinamične aktivnosti izbrane komponente v talini žilindre je naslednja:

$$\log f_L = \sum_{i=1}^{L-1} X_i \cdot \frac{Q_{iL}}{4,575 \cdot T} + \sum_{i=L+1}^K X_i \cdot \frac{Q_{Li}}{4,575 \cdot T} - \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K X_i \cdot X_j \cdot \frac{Q_{ij}}{4,575 \cdot T}$$

(velja le za bazične žilindre — pri kislih žilindrah moramo upoštevati še povečanje notranje in proste energije zaradi polimerizacije).

Za računanje koeficientov aktivnosti komponent varilne žilindre pri srednji temperaturi varjenja 2050° K nisem postavjal posebnih enačb, temveč sem iz splošne enačbe za izračunavanje koeficienta aktivnosti izpostavil T (temperaturo) ter dobil naslednjo temperaturno odvisnost:

$$T \cdot \log f_L = \text{const.}$$

$$1873 \cdot \log f_{Me_2O_3} (1873^\circ K) = 2050 \cdot \log f_{Me_2O_3} (2050^\circ K)$$

Koeficiente termodinamične aktivnosti, ki sem jih po enačbah od 8 do 13 računal za temperaturo 1600° C, sem preračunal na temperaturo 2050° K po naslednji enačbi¹¹:

$$\log f_{Me_2O_3} (2050^\circ K) = \frac{1873}{2050} \cdot \log f_{Me_2O_3} (1873^\circ K) \quad (\text{en. 14})$$

Tabela 4: Prikaz smeri, kako poteka vzpostavljanje ravnotežja med talino žilindre in kovine vara pri varjenju pod varilnima praškoma EP 10 in EP 50 za reakciji: /Mn/ + (FeO) \rightleftharpoons /Fe/ + (MnO) in /Si/ + 2 (FeO) \rightleftharpoons 2 /Fe/ + (SiO₂)

	Reakcija: /Mn/ + (FeO) \rightleftharpoons /Fe/ + (MnO)			Reakcija: /Si/ + 2 (FeO) \rightleftharpoons 2 /Fe/ + (SiO ₂)			
	C _z	C _v	C _e	C _z	C _v	C _e	(C _e [*])
EPP 1/EP 10	0,60	→ 1,17	→ 1,83	0,14	→ 0,32	→ 0,58	(0,43)
EPP 1/EP 50	0,60	→ 0,42	→ 0,31	0,14	→ 0,50	→ 0,65	(0,46)
EPP 2/EP 10	1,18	→ 1,45	→ 1,82	0,18	→ 0,36	→ 0,46	(0,36)
EPP 2/EP 50	1,18	→ 0,67	→ 0,44	0,18	→ 0,68	→ 1,14	(0,69)
EPP 3/EP 10	1,61	→ 1,64	→ 1,77	0,17	→ 0,35	→ 0,45	(0,35)
EPP 3/EP 50	1,61	→ 0,71	→ 0,37	0,17	→ 0,61	→ 0,80	(0,54)

C_z — vsebnost Mn in Si v varilni žici (ut. %)

C_v — vsebnost Mn in Si v čistem varu (ut. %)

C_e^{*} — ravnotežna vsebnost Mn in Si (ut. %); računana s predpostavko, da je f_{Si} = 1

C_e — ravnotežna vsebnost Mn in Si (ut. %); računana s f_{Si} (1600° C) = 0,32 . % Si

V tabeli 4 in diagramih na slikah od 1 do 4 je prikazan potek vzpostavljanja ravnotežja med raztaljeno žilindro in kovinsko talino vara pri varjenju pod varilnimi praški. Vsebnosti Mn in Si v varilni žici in čistem varu so analizirane, ravnotežne koncentracije Mn in Si pa izračunane iz analiz žilinder (tabela 3) po enačbah 5 in 6.

Op.: Dejanska ravnotežna vsebnost Si je med obema izračunanima vrednostima (višja od C_e^{*} in nekoliko nižja od C_e — glej tabelo 4).

Iz tabele 4 in diagramov na slikah od 1 do 4 je razvidno, da je vsebnost Mn in Si v čistem varu »C_v« vedno med vsebnostjo Mn in Si v žici »C_z« in ravnotežno vsebnostjo Mn in Si »C_e«. To dokazuje, da reakcije med žilindro in kovino vara niso dokončane ter da bo nastopil odgor elementa v tistih primerih, ko je ravnotežna vsebnost elementa »C_e«, ki je izračunana iz analize varilne žilindre, nižja od vsebnosti elementa v žici »C_z«.

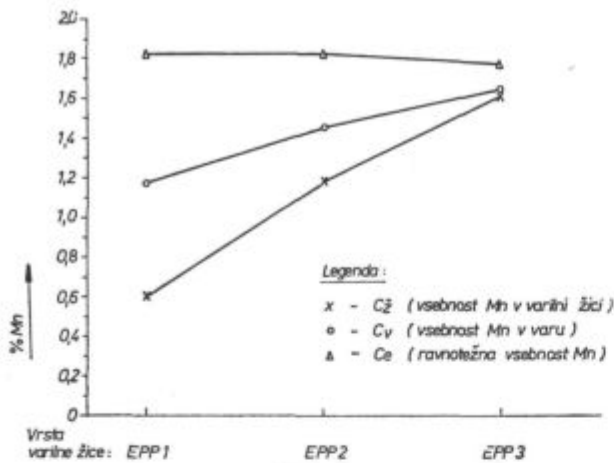
C_e < C_z — odgor elementa

C_e > C_z — prigor elementa

3. Računanje ravnotežne aktivnosti kisika v talni kovine vara pri srednji temperaturi varjenja 2050° K

Potek oksidacijsko redukcijskih reakcij med raztaljeno žilindro in talino vara pri varjenju pod varilnimi praški je lepo viden tudi iz primerjave ravnotežnih aktivnosti kisika, ki so izračunane na osnovi vsebnosti FeO v žilindri (s pomočjo konstante K_{Fe}^a), na osnovi vsebnosti MnO v žilindri in Mn v varu (s pomočjo konstante K_{Mn}^a) in na osnovi vsebnosti SiO₂ v žilindri in Si v varu (s pomočjo konstante K_{Si}^a).

Konstante K_{Fe}^a, K_{Mn}^a in K_{Si}^a sem za temperaturo 2050° K izračunal iz enačb 1, 3 in 4, ki sem jih pisal v obliki aktivnosti, ker so količine Si v varu

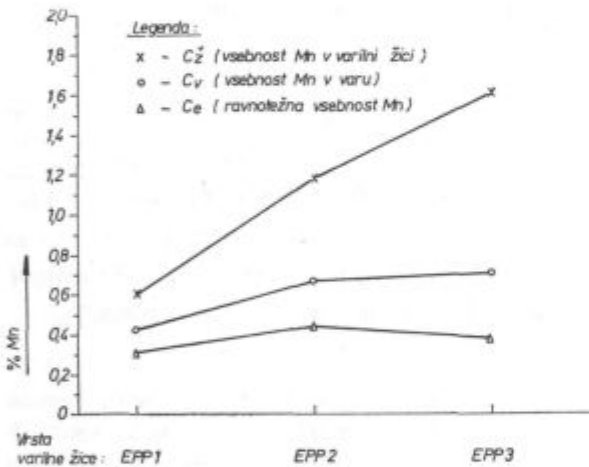


Slika 1

Vzpostavljanje navideznega ravnotežja reakcije: $Mn + (FeO) \rightleftharpoons Fe + (MnO)$, pri varjenju pod praškom EP 10 z žicami EPP 1, EPP 2 in EPP 3

Fig. 1

Established quasi-equilibrium of the reaction $Mn + (FeO) \rightleftharpoons Fe + (MnO)$ in submerged arc welding using EP 10 powder and EPP 1, EPP 2, and EPP 3 wires



Slika 2

Vzpostavljanje navideznega ravnotežja reakcije: $Mn + (FeO) \rightleftharpoons Fe + (MnO)$, pri varjenju pod praškom EP 50 z žicami EPP 1, EPP 2 in EPP 3

Fig. 2

Established quasi-equilibrium of the reaction $Mn + (FeO) \rightleftharpoons Fe + (MnO)$ in submerged arc welding using EP 50 powder and EPP 1, EPP 2, and EPP 3 wires

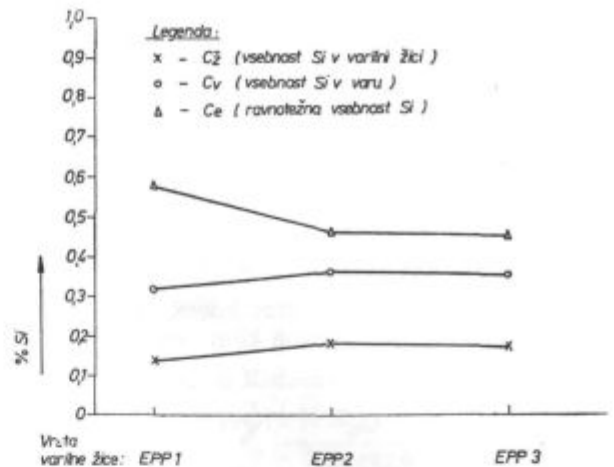
znatne ter jih moramo zato kljub visoki srednji temperaturi varjenja upoštevati.¹¹

$$K_{Fe}^a = \frac{X_{FeO} \cdot f_{FeO} (2050^{\circ} K)}{a_{O/}} = 2,26$$

$$K_{Mn}^a = \frac{X_{MnO} \cdot f_{MnO} (2050^{\circ} K)}{a_{O/} \cdot \% Mn/} = 3,47$$

$$K_{Si}^a = \frac{X_{SiO_2} \cdot f_{SiO_2} (2050^{\circ} K)}{a_{O/}^2 \cdot \% Si/ \cdot f_{Si} (2050^{\circ} K)} = 1585$$

Studij poteka reakcij na osnovi primerjanja ravnotežnih aktivnosti kisikov izvira iz ravnotežne

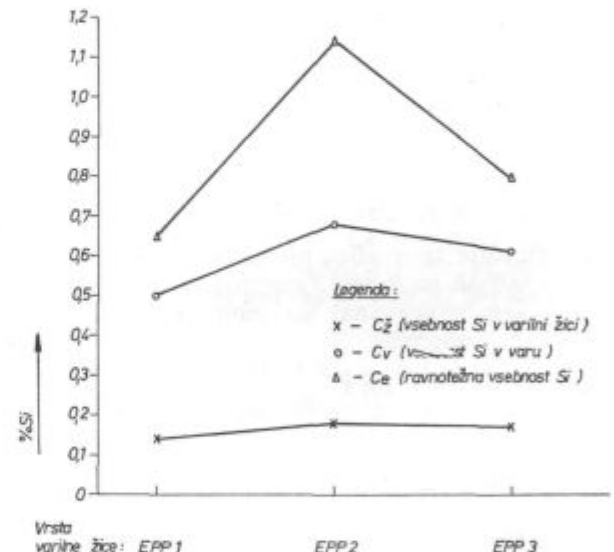


Slika 3

Vzpostavljanje navideznega ravnotežja reakcije: $Si + 2(FeO) \rightleftharpoons 2Fe + (SiO_2)$, pri varjenju pod praškom EP 10 z žicami EPP 1, EPP 2 in EPP 3

Fig. 3

Established quasi-equilibrium of the reaction $Si + 2(FeO) \rightleftharpoons 2Fe + (SiO_2)$ in submerged arc welding using EP 10 powder and EPP 1, EPP 2, and EPP 3 wires



Slika 4

Vzpostavljanje navideznega ravnotežja reakcije: $Si + 2(FeO) \rightleftharpoons 2Fe + (SiO_2)$, pri varjenju pod praškom EP 50 z žicami EPP 1, EPP 2 in EPP 3

Fig. 4

Established quasi-equilibrium of the reaction $Si + 2(FeO) \rightleftharpoons 2Fe + (SiO_2)$ in submerged arc welding using EP 50 powder and EPP 1, EPP 2, and EPP 3 wires

enačbe (en. 1), ki jo lahko pišemo v naslednji obliki:

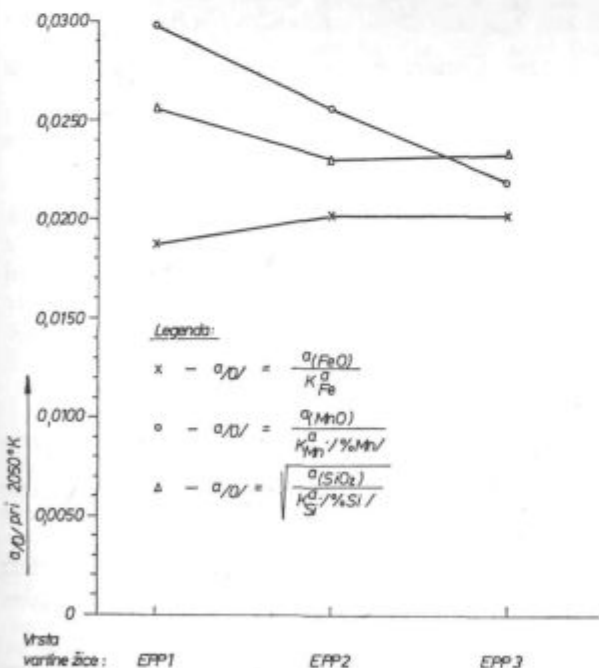
$$a_{O/} = \frac{X_{FeO} \cdot f_{FeO} (2050^{\circ} K)}{2,26} = \frac{X_{MnO} \cdot f_{MnO} (2050^{\circ} K)}{3,47 \cdot \% Mn/} = \sqrt{\frac{X_{SiO_2} \cdot f_{SiO_2} (2050^{\circ} K)}{1585 \cdot \% Si/ \cdot f_{Si} (2050^{\circ} K)}} \quad (\text{en. 15})$$

V tabeli 5 in diagramih na slikah 5 in 6 so podane izračunane ravnotežne aktivnosti kisikov v talini kovine vara pri temperaturi 2050^o K.

Tabela 5: Primerjava ravnotežnih aktivnosti kisikov v talini kovine vara (2050^o K), ki so izračunane s pomočjo konstant K_{Fe}^a , K_{Mn}^a in K_{Si}^a

	$\frac{a(FeO)}{K_{Fe}^a}$	$\frac{a(MnO)}{K_{Mn}^a \cdot a/Mn/}$	$\sqrt{\frac{a(SiO_2)}{K_{Si}^a \cdot a/Si/}}$
EPP 1/EP 10	0,0188	0,0298	0,0256 (0,0227)
EPP 1/EP 50	0,0169	0,0125	0,0194 (0,0158)
EPP 2/EP 10	0,0202	0,0256	0,0230 (0,0200)
EPP 2/EP 50	0,0131	0,0087	0,0171 (0,0131)
EPP 3/EP 10	0,0202	0,0219	0,0233 (0,0202)
EPP 3/EP 50	0,0151	0,0081	0,0175 (0,0138)

Op.: Ravnotežne aktivnosti kisikov v talini kovine vara (2050^o K) s pomočjo konstante K_{Si}^a sem računal tako, da sem enkrat predpostavljal, da je $f_{Si} = 1$, drugič pa sem računal kar z f_{Si} (1600^o C) (podatek v oklepaju). Dejanska ravnotežna aktivnost kisika je med obema izračunanima vrednostma.

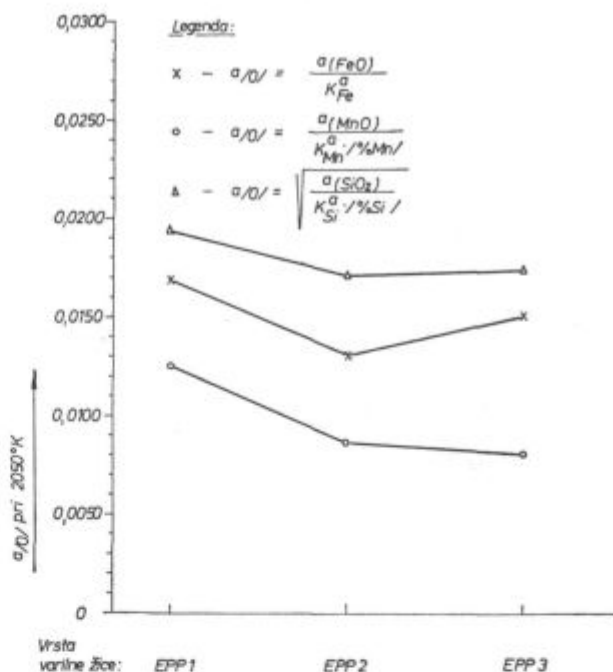


Slika 5

Izračunane ravnotežne aktivnosti kisikov v talini kovine vara (2050^o K) pri varjenju pod praškom EP 10 z žicami EPP 1, EPP 2 in EPP 3

Fig. 5

Calculated equilibrium oxygen activities in the metal melt of the weld (2050 K) in submerged arc welding using EP 10 powder and EPP 1, EPP 2, and EPP 3 wires



Slika 6

Izračunane ravnotežne aktivnosti kisikov v talini kovine vara (2050^o K) pri varjenju pod praškom EP 50 z žicami EPP 1, EPP 2 in EPP 3

Fig. 6

Calculated equilibrium oxygen activities in the metal melt of the weld (2050 K) in submerged arc welding using EP 50 powder and EPP 1, EPP 2, and EPP 3 wires

Ravnotežne aktivnosti kisikov, ki so izračunane s pomočjo različnih konstant (K_{Fe}^a , K_{Mn}^a in K_{Si}^a), se v istem primeru varjenja med seboj razlikujejo zato, ker oksidacijsko redukcijsko reakcije med raztaljeno žilindro in talino kovine vara ne utegnejo poteči do konca. Žilindra in var zamrzneti pred vzpostavitvijo ravnotežja — vzpostavi se navidezno ravnotežje.

Prigor Si in odgor Mn med varjenjem nastopi v primeru, če ju železo reducira iz varilne žilindre (glej sliko 5 in tabelo 5 — primeri varjenja EPP 1/EP 10, EPP 2/EP 10 in EPP 3/EP 10):

$$\frac{X_{FeO} \cdot f_{FeO}}{K_a^{Fe}} < \frac{X_{MnO} \cdot f_{MnO}}{K_{Mn}^a \cdot \%Mn/} \text{ in}$$

$$\frac{X_{FeO} \cdot f_{FeO}}{K_{Fe}^a} < \sqrt{\frac{X_{SiO_2} \cdot f_{SiO_2}}{K_{Si}^a \cdot \%Si/ \cdot f_{Si}}}$$

V opisanem primeru redukcije z železom je koncentracija MnO, oziroma SiO₂ v varilni žilindri večja, koncentracija Mn oziroma Si v varu pa manjša, kot bi odgovarjalo ravnotežnim pogojem.

Prigor Si in odgor Mn med varjenjem pa nastopi, če Mn reducira Si iz varilne žilindre (glej sliko 6 in tabelo 5 — primeri varjenja EPP 1/EP 50, EPP 2/EP 50 in EPP 3/EP 50):

Tabela 6: Mehanske vrednosti čistih varov

	meja raztezanja (kp/mm ²)	trdnost (kp/mm ²)	raztezek %	kontrakcija (%)	žilavost po V Notch (kpm/cm ²)		
					+ 20° C	0° C	- 20° C
EPP 1/EP 10	39,3	48,9	28,0	64,0	10,7	7,8	4,9
EPP 1/EP 50	40,4	49,2	18,0	28,5	6,3	4,5	4,2
EPP 2/EP 10	41,7	53,0	30,0	64,1	9,2	7,2	4,7
EPP 2/EP 50	43,0	54,3	28,0	53,0	8,1	5,3	3,7
EPP 3/EP 10	40,8	52,2	26,0	52,5	9,1	2,8	1,3
EPP 3/EP 50	41,5	52,2	30,0	66,4	9,7	5,0	4,3

$$\frac{X_{\text{MnO}} \cdot f_{\text{MnO}}}{K_{\text{Mn}}^a \cdot \% \text{ Mn}} < \sqrt{\frac{X_{\text{SiO}_2} \cdot f_{\text{SiO}_2}}{K_{\text{Si}}^a \cdot \% \text{ Si} \cdot f_{\text{Si}}}}$$

V tem primeru reducira Mn poleg Si tudi Fe iz varilne žindre:

$$\frac{X_{\text{MnO}} \cdot f_{\text{MnO}}}{K_{\text{Mn}}^a \cdot \% \text{ Mn}} < \frac{X_{\text{FeO}} \cdot f_{\text{FeO}}}{K_{\text{Fe}}^a}$$

V primeru redukcije varilne žindre z Mn je koncentracija SiO₂, oziroma FeO v varilni žindri večja, koncentracija Si v varu pa manjša, kot bi odgovarjalo ravnotežnim pogojem.

II. FIZIKALNE LASTNOSTI ČISTIH VAROV, VARJENIH Z ŽICAMI EPP 1, EPP 2 IN EPP 3 POD VARILNIMA PRAŠKOMA EP 10 IN EP 50

Čistim varom vseh opisanih kombinacij varjenj smo določili fizikalne lastnosti. Rezultati mehanskih preiskav so podani v tabeli 6.

Iz mehanskih vrednosti je razvidno, da sta za varjenje pod taljenim silikatnim visoko manganskim praškom EP 10 primerni žici EPP 1 in EPP 2, za varjenje pod taljenim visoko silikatnim praškom EP 50 pa žica EPP 3. Solidne mehanske vrednosti dobimo pri varjenju pod praškom EP 50 tudi z žico EPP 2.

ZAKLJUČEK

1. Oksidacijsko redukcijske reakcije med raztaljeno varilno žindro in kovinsko talino vara pri varjenju pod varilnimi praški ne potečejo do konca. Žindra in var zamrzneta pred vzpostavitvijo ravnotežja — vzpostavi se navidezno ravnotežje.

2. Vsebnost Mn in Si v čistem varu »C_v« je vedno med vsebnostjo Mn in Si v žici »C₂« in ravnotežno vsebnostjo Mn in Si »C_e«, ki je izračunana iz analize varilne žindre.

Odgor elementa bo nastopil, če bo: C_e < C₂, prigor pa v primeru, če bo C_e > C₂.

3. Potek oksidacijsko redukcijskih reakcij med raztaljeno žindro in talino vara pri varjenju pod varilnimi praški je viden tudi iz primerjave ravn-

težnih vsebnosti kisika, ki so izračunane s pomočjo različnih konstant (K_a^{Fe}, K_{Mn}^a in K_{Si}^a) za isti primer varjenja. Te se zaradi nedokončanega poteka oksidacijsko redukcijskih reakcij med seboj razlikujejo.

Prigor Si in Mn med varjenjem nastopi v primeru, če ju železo reducira iz varilne žindre:

$$\frac{X_{\text{FeO}} \cdot f_{\text{FeO}}}{K_{\text{Fe}}^a} < \frac{X_{\text{MnO}} \cdot f_{\text{MnO}}}{K_{\text{Mn}}^a \cdot \% \text{ Mn}}$$

$$\frac{X_{\text{FeO}} \cdot f_{\text{FeO}}}{K_{\text{Fe}}^a} < \sqrt{\frac{X_{\text{SiO}_2} \cdot f_{\text{SiO}_2}}{K_{\text{Si}}^a \cdot \% \text{ Si} \cdot f_{\text{Si}}}}$$

Prigor Si in odgor Mn med varjenjem pa nastopi, če Mn reducira Si iz varilne žindre:

$$\frac{X_{\text{MnO}} \cdot f_{\text{MnO}}}{K_{\text{Mn}}^a \cdot \% \text{ Mn}} < \sqrt{\frac{X_{\text{SiO}_2} \cdot f_{\text{SiO}_2}}{K_{\text{Si}}^a \cdot \% \text{ Si} \cdot f_{\text{Si}}}}$$

V tem primeru reducira Mn poleg Si tudi Fe iz varilne žindre:

$$\frac{X_{\text{MnO}} \cdot f_{\text{MnO}}}{K_{\text{Mn}}^a \cdot \% \text{ Mn}} < \frac{X_{\text{FeO}} \cdot f_{\text{FeO}}}{K_{\text{Fe}}^a}$$

4. Taljeni silikatni visoko manganski prašek EP 10 je primeren za varjenje v kombinaciji z nizko legiranimi žicama EPP 1 in EPP 2, taljeni visoko silikatni prašek EP 50 pa je primeren za varjenje v kombinaciji z visoko legirano žico EPP 3.

Literatura

1. Kock: »Handbuch der Schweisstechnologie Lichtbogen-schweissen« — Düsseldorf 1961
2. D. Seferijan: »Metalurgija zavarivanja« — Beograd 1969
3. J. H. Palm: Welding Journal 51 (1972), št. 7, str. 358-S/360-S
4. A. A. Kazakov: »Kislorod v židkoi stali« — Moskva 1972
5. A. A. Erohin: Fizika i hemija obrabotki materialov (1969), št. 5, str. 56/61
6. L. Limpel: Varilna tehnika 22 (1973), št. 1 str. 1/5
7. J. F. Elliott, M. Gleiser: »Thermochemistry for Steel-making — II« — London 1960
8. D. Ja. Povolockij: »Razkisenie stali« — Moskva 1972
9. V. I. Javojskij: »Theorie der Stahlerzeugung« — Leipzig 1969
10. V. A. Kožurov: »Termodinamika metallurģičeskikh šlakov« — Sverdlovsk 1955
11. R. Kejžar: »Vpliv dezoksidantov na prenos kisika pri varjenju z oplasčenimi elektrodami« (Disertacija — Fakulteta za NT Univerza v Ljubljani, Ljubljana 1974)

ZUSAMMENFASSUNG

Beim Unterpulverschweißen verlaufen zwischen der Schweißschlacke und der Schweißgutschmelze Oxydations-reduktionsreaktionen, welche zu der Einstellung des Gleichgewichtes neigen. Der Verlauf der genannten Reaktionen ist von der chemischen Zusammensetzung der Schlacke und des Schweißgutes abhängig und entscheidend für den Zubrand und Abbrand der Legierungselemente während des Schweißens.

Der Gehalt von Mn und Si ist im Schweißgut »C_z« immer zwischen dem Mn und Si Gehalt im Draht »C_z« und dem Gleichgewichtsgehalt des Mn und Si »C_g«, welcher aus der chemischen Zusammensetzung der Schweißschlacke ausgerechnet ist (Abbrand: C_z < C_g, Zubrand: C_z > C_g)

Ein Zubrand von Si und Mn während des Schweißens tritt auf im Falle, wenn diese durch den Eisen aus der Schweißschlacke reduziert werden:

$$\frac{X_{FeO} f_{FeO}}{K_{Fe}^a} < \frac{X_{MnO} f_{MnO}}{K_{Mn}^a / \% Mn/} \text{ und}$$

$$\frac{X_{FeO} f_{FeO}}{K_{Fe}^a} < \sqrt{\frac{X_{SiO_2} E_{SiO_2}}{K_{Si}^a / \% Si/ E_{Si}}}$$

Ein Zubrand von Si und Abbrand von Mn während des Schweißens teilt auf, wenn Mn den Si aus der Schweißschlacke reduziert:

$$\frac{X_{MnO} f_{MnO}}{K_{Mn}^a / \% Mn/} < \sqrt{\frac{X_{SiO_2} f_{SiO_2}}{K_{Si}^a / \% Si/ E_{Si}}}$$

In diesem Fall reduziert Mn neben Si auch Fe aus der Schweißschlacke:

$$\frac{X_{MnO} f_{MnO}}{K_{Mn}^a / \% Mn/} < \frac{X_{FeO} f_{FeO}}{K_{Fe}^a}$$

Unterschiede zwischen einzelnen Gliedern der Gleichgewichtsgleiche treten auf wegen des Einfrierens der Reaktionen zwischen der Schlacke und dem Schweißgut vor der Einstellung des Gleichgewichtes.

SUMMARY

In submerged arc welding redox reactions between molten slag and metal take place in order to achieve the equilibrium. Course of the mentioned reactions depends mainly on the chemical composition of slag and weld and it is essential for loss or gain of alloying elements.

Mn and Si content in pure weld »C_z« lies always between the Mn and Si content in the rod »C_z« and the equilibrium content of Mn and Si, »C_g«, calculated from the analysis of welding slag (gain: C_z > C_g, loss: C_z < C_g).

Gain of Si and Mn during welding occurs if they are reduced from the welding slag by iron:

$$\frac{X_{FeO} f_{FeO}}{K_{Fe}^a} < \frac{X_{MnO} f_{MnO}}{K_{Mn}^a / \% Mn/} \text{ and}$$

$$\frac{X_{FeO} f_{FeO}}{K_{Fe}^a} < \sqrt{\frac{X_{SiO_2} E_{SiO_2}}{K_{Si}^a / \% Si/ E_{Si}}}$$

Gain of Si and loss of Mn during welding occurs when Si is reduced from the slag by Mn:

$$\frac{X_{MnO} f_{MnO}}{K_{Mn}^a / \% Mn/} < \sqrt{\frac{X_{SiO_2} f_{SiO_2}}{K_{Si}^a / \% Si/ E_{Si}}}$$

In this case also Fe from the slag is reduced by Mn:

$$\frac{X_{MnO} f_{MnO}}{K_{Mn}^a / \% Mn/} < \frac{X_{FeO} f_{FeO}}{K_{Fe}^a}$$

Differences between the single terms of the equilibrium equation (equation 1) appear due to freezing of the system before the equilibrium is achieved.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При сварки под сварочными порошками между расплавленным шлаком и расплавленным металлом происходят окислительно-редукционные реакции, которые стремятся восстановить равновесие. Поток этих реакций зависит от химического состава шлака и сварного шва и имеет главную роль на увеличение выхода элементов и угар элементов во время сварки.

Содержание Mn и Si в чистом сварочном шве »C_z« находится всегда в пределах содержания Mn и Si в проволоки »C_z« и содержанием равновесия Mn и Si в »C_g«, которое высчитана из анализа сварочного шлака (угар: C_z < C_g; пригор: C_z > C_g). Увеличение выхода Si и Mn во время сварки наступает в случаи, если их железо редуцирует из сварочного шлака.

$$\frac{X_{FeO} f_{FeO}}{K_{Fe}^a} < \frac{X_{MnO} f_{MnO}}{K_{Mn}^a / \% Mn/}$$

$$\frac{X_{FeO} f_{FeO}}{K_{Fe}^a} < \sqrt{\frac{X_{SiO_2} E_{SiO_2}}{K_{Si}^a / \% Si/ E_{Si}}}$$

Увеличение выхода и угар во время сварки наступает тогда, когда редуцирует из сварочного шлака:

$$\frac{X_{MnO} f_{MnO}}{K_{Mn}^a / \% Mn/} < \sqrt{\frac{X_{SiO_2} f_{SiO_2}}{K_{Si}^a / \% Si/ E_{Si}}}$$

В этом случае Mn редуцирует кроме Si также Fe из сварочного шлака:

$$\frac{X_{MnO} f_{MnO}}{K_{Mn}^a / \% Mn/} < \frac{X_{FeO} f_{FeO}}{K_{Fe}^a}$$

Разницы между отдельными членами уравнения равновесия (уравни. 1) наступят вследствие замораживания реакций между шлаком и сварочным швом до восстановления равновесия.