

## Vzpostavljanje navideznega ravnotežja med žlindro in kovino pri dezoksidaciji jekla in varjenju\*

DK: 669.046.557 : 621.791

ASM/SLA: D11r, K1a

Rajko Kejžar

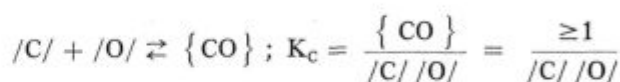
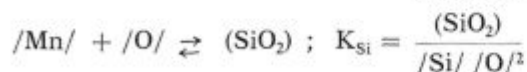
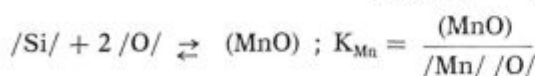
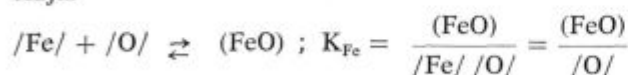
Za dezoksidacijo jekla pri varjenju je karakterističen zelo kratek čas, ki je na razpolago za potek reakcij. Med žlindro in varom se vzpostavi navidezno ravnotežje, iz taline vara pa se uspe izločiti le del oksidnih vključkov, ki so dezoksidacijskega in žlindrne izvora.

Potek fizikalno-kemičnih procesov med varjenjem z oplaščenimi elektrodami je v članku pojasnjen na osnovi matematične obdelave rezultatov raziskav. Ugotovljene so zakonitosti glede prenosa kisika iz plinske faze v talino žlindre in talino vara in zakonitosti redukcije varilne žlindre (vzpostavljanja navideznega ravnotežja).

Opisane zakonitosti poteka reakcij med varjenjem omogočajo izračunavanje optimalne sestave oplaščenja za elektrode glede na postavljene zahteve.

### UVOD

Pri dezoksidaciji jekla poteka med raztaljeno žlindro in kovinsko talino vrsta oksidacijsko redukcijskih reakcij, ki teže k vzpostavljanju ravnotežja.



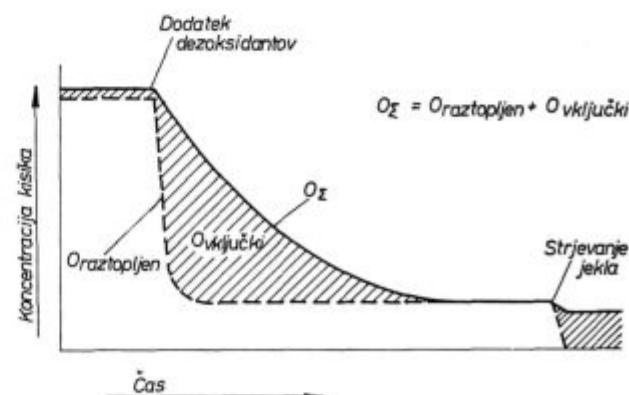
Vzpostavljanje ravnotežja poteka v skladu z naslednjo ravnotežno enačbo:

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

### I. DEZOKSIDACIJA JEKLA IN VARJENJE Z OPLAŠČENIMI ELEKTRODAMI

Za spremljanje količine kisika v jeklu — študij poteka dezoksidacije jekla v odvisnosti od časa — je bistvenega pomena, da ločimo celotno vsebnost kisika v jeklu na kisik, ki je raztopljen v jeklu, in na kisik, ki je v vključkih (glej sliko 1\*\*)

Po dodatku dezoksidantov v talino jekla se koncentracija raztopljenega kisika v jeklu hitro zniža, celotna vsebnost kisika v jeklu, ki je od-



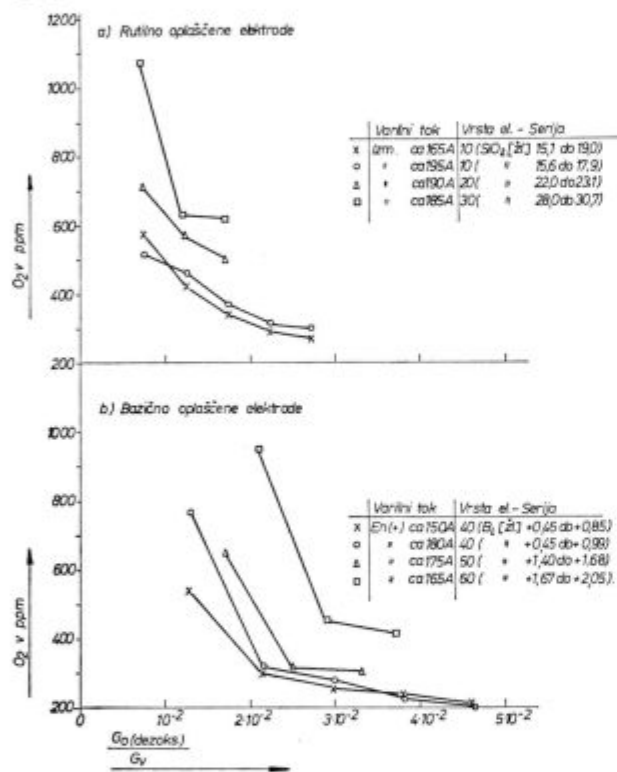
Slika 1  
Potek dezoksidacije jekla

\* Članek je povzetek predavanja z enakim naslovom, ki ga je imel dr. mag. Kejžar Rajko, dne 4. 9. 1974 na jesenskem srečanju slovenskih metalurgov v Portorožu in izvleček iz doktorske disertacije na Metalurškem odseku Oddelka za montanistiko Fakultete za NT Univerze v Ljubljani z naslovom »Vpliv dezoksidantov na prenos kisika, pri varjenju z oplaščenimi elektrodami«, ki jo je avtor članka obrnil 3. 7. 1974.

\*\* I. N. Golikov / G. M. Ickovič: Stalj (1973), št. 7, str. 591—616

visna tudi od hitrosti izločanja dezoksidacijskih vključkov, pa znatno počasneje.

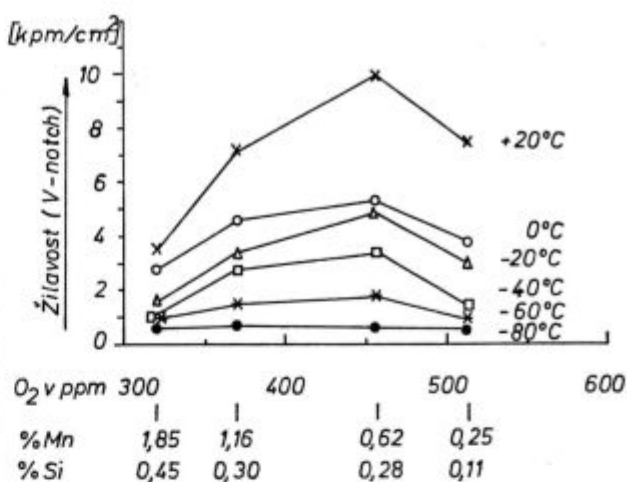
Za dezoksidacijo vara pri varjenju z oplasčeniimi elektrodami so karakteristične visoke temperature, intenzivno mešanje kopeli pod elektrodo in zelo kratek čas, ki je na razpolago za potek reakcij. Od raztalitve do zamrznjenja vara, ko so reakcije možne, je le 3 do 8 sekund. Reakcije ne potečejo do ravnotežja — vzpostavi se navidezno ravnotežje. Iz taline vara se izloči le del oksidnih vključkov, ki so dezoksidacijskega in žilindrnege izvora. Ti preostali oksidni vključki so vzrok za visoke vsebnosti kisika v varih. Pri visoki vsebnosti dezoksidantov v elektrodi nadaljnji dodatek dezoksidantov v elektrodno oblogo le malenkostno vpliva na znižanje celotne vsebnosti kisika v varu (glej sliko 2).



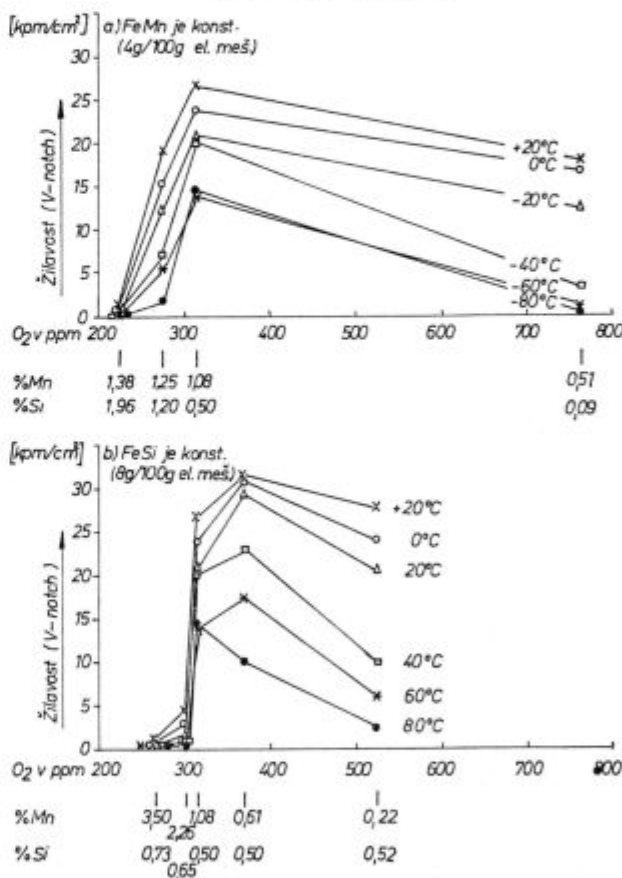
Slika 2 Vpliv dodatka dezoksidantov v elektrodni oblogi na celotno vsebnost kisika v varu

Previsoka vsebnost dezoksidantov v elektrodi pa je vzrok tudi za poslabšanje žilavosti vara (glej sliko 3 in 4).

Na sliki 3 je prikazan vpliv dezoksidacije na žilavost vara pri varjenju z rutilno oplasčeniimi elektrodami, na sliki 4 pa vpliv dezoksidacije na žilavost vara pri varjenju z bazično oplasčeniimi elektrodami. Z zviševanjem vsebnosti dezoksidantov v elektrodni oblogi, ki povzroči znižanje kisika v varu, se najprej žilavost vara zvišuje ter doseže pri neki določeni vsebnosti kisika v varu optimalno vrednost. Nadaljnje zviševanje vsebnosti dezoksidantov pa povzroči poslabšanje žilavosti zaradi legiranja vara s Si in Mn.



Slika 3 Vpliv dezoksidacije na žilavost vara pri varjenju z rutilno oplasčeniimi elektrodami



Slika 4 Vpliv dezoksidacije na žilavost vara pri varjenju z bazično oplasčeniimi elektrodami

## II. POTREBE PO DEZOKSIDANTIH PRI VARJENJU Z OPLASČENIMI ELEKTRODAMI

Količina dezoksidantov, ki mora biti v elektrodi, da dobimo po varjenju optimalno žilavost vara, je odvisna predvsem od sestave in debeline oplasčenja.

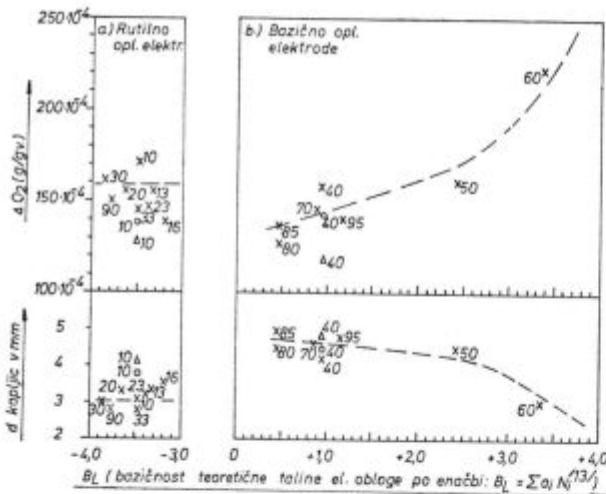
Med varjenjem poteka oksidacija elementov (dezoksidantov) le s kisikom, ki pride iz plinske faze v talino žlindre in talino vara, ter s kisikom, ki vstopa v reakcije vzpostavljanja navideznega ravnotežja zaradi redukcije varilne žlindre, to je redukcije Fe in Mn-oksidi ter SiO<sub>2</sub> in TiO<sub>2</sub>.

**1.) Prenos kisika — reakcije s plinsko fazo**

Prenos kisika iz plinske faze v talino žlindre in talino vara ima najpomembnejši vpliv na porabo dezoksidantov. Ker je vezan na nastanek feritov, na prenos vodika v var in na oksidacijo površine kapljice, je odvisen predvsem od sestave in debeline oplaščenja ter jakosti varilnega toka.

Vzrok za velik vpliv sestave elektrodne obloge na »prenos kisika« je predvsem bazičnost nastajajoče varilne žlindre. Zvišanje bazičnosti, to je povečanje koncentracije prostih disociiranih O<sup>2-</sup> ionov v talini varilne žlindre, ima za posledico pospešitev reakcij s plinsko fazo.

Bazičnost teoretične taline elektrodne obloge, to je žlindre, ki nastaja ob nastanku kapljic, je eden najpomembnejših pokazateljev za oceno prenosa kisika iz plinske faze v talino žlindre in talino vara (glej sliko 5).



x označuje srednje vrednosti za  $\Delta O_2$ (g/gv) in  $d$  kapljic v mm za:  
 a.) rutilno oplašene elektrode, ki so sušene pri temp. 250°C in smo z njimi varili z izmeničnim tokom  
 b.) bazično oplašene elektrode, ki so sušene pri temp. 450°C in smo z njimi varili z enosmernim tokom na + pol  
 o označuje srednje vrednosti pri znižani jakosti el. toka  
 Δ označuje srednje vrednosti pri zmanjšanem f-oplaščenju (zmanjšano razmerje G<sub>Zl</sub>/G<sub>v</sub> in znižano jakost toka)  
 Op-Številka ob točki pomeni serijo el. obloge

Slika 5

**Prenos kisika iz plinske faze v talino žlindre in kovine v odvisnosti od sestave elektrodne obloge (bazičnosti) in odtaljevanja**

Zelo pomembno vlogo pri »prenosu kisika«, ki je v veliki meri vezan na oksidacijo površine kapljice, pa ima tudi odtaljevanje. Povečanje velikosti kapljic, ki ima za posledico zmanjšanje površine na enoto teže kapljic, povzroči zmanj-

šanje prenosa kisika iz plinske faze v talino žlindre in talino vara. Ta razlaga pojasnjuje vpliv debeline oplaščenja in jakosti varilnega toka na »prenos kisika«. V diagramu na sliki 5 je to prikazano s serijama elektrod 10 in 40. Vpliv odtaljevanja pa pojasnjuje tudi sorazmerno visok »prenos kisika« pri varjenju z rutilno oplaščenimi elektrodami.

**2.) Vzpostavljanje navideznega ravnotežja med žlindro in varom**

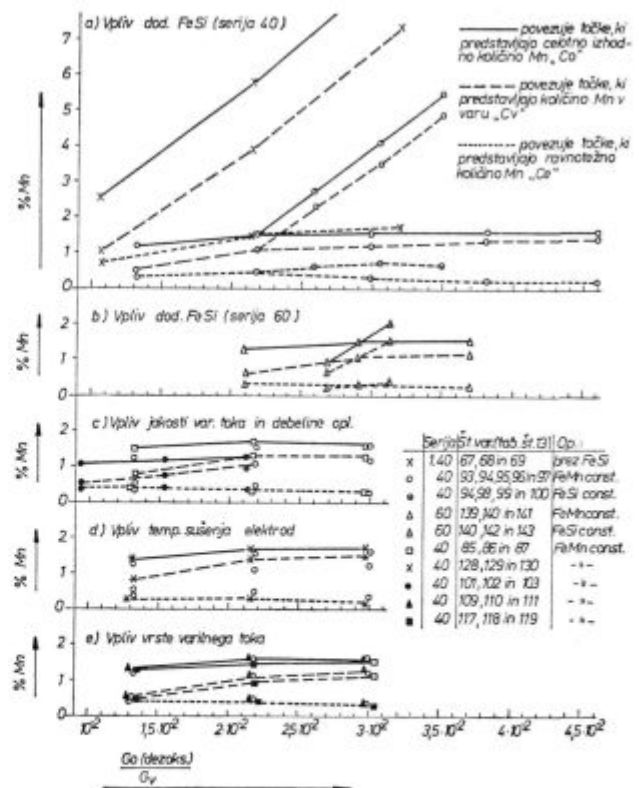
Zaradi redukcije varilne žlindre je razmerje med količino žlindre in količino vara (G<sub>Zl</sub>/G<sub>v</sub>) tudi zelo pomembno za porabo dezoksidantov. Potrebe po dezoksidantih se povečujejo z naraščanjem količine žlindre na enoto vara.

Redukcija varilne žlindre — vzpostavljanje navideznega ravnotežja — poteka v skladu z naslednjo ravnotežno enačbo:

$$a/O/ = \frac{a(FeO)}{K^{a_{Fe}}} = \frac{a(MnO)}{K^{a_{Mn}} \cdot a_{/Mn/}} = \sqrt{\frac{a(SiO_2)}{K^{a_{Si}} \cdot a_{/Si/}}} \quad (\text{en. 2})$$

Ker pa reakcije med raztaljeno žlindro in kovinsko talino vara ne potečejo do ravnotežja, moramo pri razlagi fizikalno-kemičnih procesov med varjenjem upoštevati tudi njihovo hitrost.

Oksidacija Mn in Si pri varjenju z bazično oplaščenimi elektrodami je prikazana na diagra-



Slika 6

**Oksidacija Mn pri varjenju z bazično oplaščenimi elektrodami**

mih na slikah 6 in 7, oksidacija Mn pri varjenju z rutilno oplaščenimi elektrodami pa na diagramih na sliki 8.

Reakciji med Mn in kisikom ter Si in kisikom, ki so raztopljeni v kovinski kopeli, sta hitri ter potečeta skoraj do ravnotežja. Pri elektrodah, ki vsebujejo nizek dodatek dezoksidantov, je namreč razlika med dejansko ( $\approx C_v$ ) in ravnotežno ( $\approx C_o$ ) koncentracijo Mn in Si v varu majhna (glej slike 6, 7 in 8).

Pri ostalih bazično oplaščenih elektrodah (sliki 6 in 7) je oksidacija Mn in Si med varjenjem vezana na raztapljanje kisika (FeO) v kovinski talini. Razlika med začetno ( $\approx C_o$ ) in dejansko ( $\approx C_v$ ) koncentracijo Mn in Si v varu ostane zato kljub do-

dajanju dezoksidantov v elektrodno oblogo skoraj nespremenjena. Spremeni pa se s spremembo bazičnosti, ki povzroči spremembo v prenosu kisika iz plinske faze v talino žlindre in talino vara, in ob prisotnosti drugih dezoksidantov, ki tudi reagirajo z raztopljenim kisikom v varu (glej sliki 6 in 7). To je vzrok tudi za zmanjšanje navidezne hitrosti oksidacije Mn in Si pri varjenju z elektrodami, ki so sušene pri nižji temperaturi (glej sliki 6 in 7 diagrama »d« — Posledica sušenja pri nižji temperaturi je preostanek višje vsebnosti ogljika v elektrodni oblogi).

Pri rutilno oplaščenih elektrodah (slika 8) pa je oksidacija Mn med varjenjem vezana na raztapljanje kisika (FeO) v kovinski talini in na redukcijo  $SiO_2$  in  $TiO_2$  v varilni žlindri (Redukcija  $SiO_2$  in  $TiO_2$  je pri žlindrah rutilno oplaščenih elektrod izrazitejša zato, ker je aktivnost  $SiO_2$  in  $TiO_2$  v teh žlindrah bistveno višja kot v žlindrah bazično oplaščenih elektrod).

Zaradi redukcije  $SiO_2$  in  $TiO_2$  se pri varjenju z rutilno oplaščenimi elektrodami razlika med začetno ( $\approx C_o$ ) in dejansko ( $\approx C_v$ ) koncentracijo Mn v varu povečuje z zviševanjem vsebnosti FeMn v elektrodni oblogi (glej sliko 8).

V diagramih na slikah 2, 6, 7 in 8 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. Tako sem poenotil prikazovanje, to je izravnal razlike, ki nastopijo pri elektrodah zaradi razlik v izbiri in količini dezoksidantov ter sestavi in debelini oplaščenja.

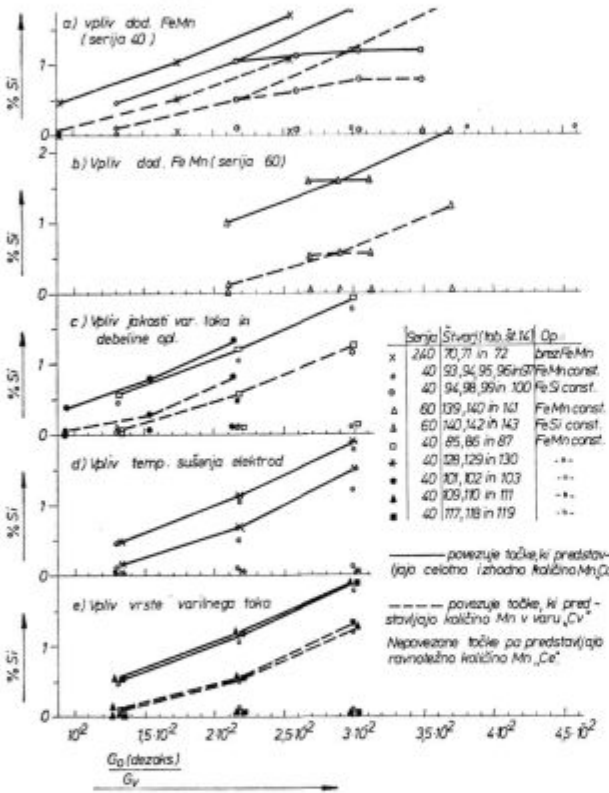
Pri računanju ravnotežnih koncentracij sem v vseh primerih upošteval aktivnosti prisotnih sestavin. Koeficiente termodinamične aktivnosti elementov v jeklu sem računal s pomočjo konstant medsebojnega vpliva, koeficiente termodinamične aktivnosti sestavin žlinder pa po enačbah, ki sem jih izpeljal za varilne žlindre na osnovi ionske teorije in termodinamike žlinder v skladu s teoretskimi izpeljavami Kožuevova.

Izpeljava enačb temelji na enačbah notranje energije, entropije in proste energije večkomponentnega sistema.

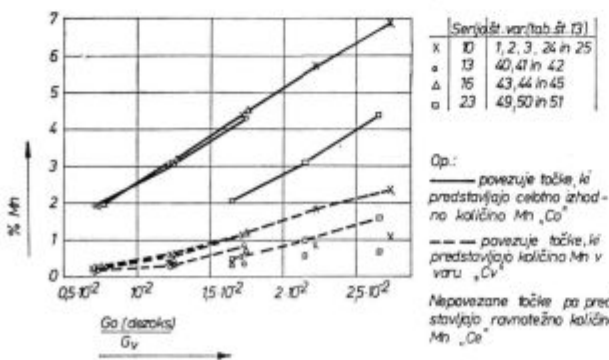
$$F(\text{prosta energija}) = E - TS = \sum_{i=1}^K X_i \cdot F_i + RT \sum_{i=1}^K X_i \cdot \ln X_i + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K X_i \cdot X_j \cdot Q_{ij} \quad (\text{en. 3})$$

$$X_i = \frac{\nu_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^K \nu_i \cdot n_i}$$

$X_i$  — ionski ulomek komponente »i«  
 $n_i$  — koncentracija komponente »i« v g-molih  
 $\nu_i$  — število kovinskih atomov v molekuli komponente »i«



Slika 7 Oksidacija Si pri varjenju z bazično oplaščenimi elektrodami



Slika 8 Oksidacija Mn pri varjenju z rutilno oplaščenimi elektrodami

Iz enačbe za kemijski potencial izbrane komponente lahko izrazimo enačbo za izračunavanje koeficienta termodinamične aktivnosti te komponente v raztaljeni žilindri.

$$\mu_L = \frac{\partial F'}{\partial n_L} = \nu_L \cdot (F_L + RT \ln X_L + \sum_{i=1}^{L-1} X_i \cdot Q_{iL} + \sum_{i=L+1}^K X_i \cdot Q_{Li} - \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K X_i \cdot X_j \cdot Q_{ij}) = \nu_L (F_L + RT \ln X_L + RT \cdot \ln f_L) \quad (\text{en. 4})$$

$$RT \ln f_L = \sum_{i=1}^{L-1} X_i \cdot Q_{iL} + \sum_{i=L+1}^K X_i \cdot Q_{Li} - \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K X_i \cdot X_j \cdot Q_{ij} \quad (\text{en. 5})$$

Enačbe 3, 4 in 5 veljajo le za bazične žilindre. Pri kislih žilindrah pa moramo zaradi polimerizacije upoštevati še povečanje notranje in proste energije s členom, ki ima nekoliko poenostavljen v primeru varilnih žilinder naslednjo obliko:

$$[2(X_5 + X_6) - \sum_{i=1}^3 X_i - 0,5 X_4]^2 \cdot \sum_{i=1}^4 X_i \cdot q_i$$

Op.:  $X_1, X_2 \dots X_i \dots$  do  $X_9$  so ionski ulomki komponent varilne žilindre. Označil sem jih s številkami od 1 do 9 v naslednjem vrstnem redu: FeO, MnO, CaO, ( $K_2O + Na_2O$ ),  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  in  $CaF_2$ .

Enačba proste energije, prirejena za varilne žilindre, ki je bila izhodišče za izpeljavo enačb za izračunavanje koeficientov termodinamične aktivnosti, je imela torej naslednjo obliko:

$$F' = F \sum_{i=1}^9 \nu_i n_i = \sum_{i=1}^9 \nu_i \cdot n_i \cdot F_i + RT \sum_{i=1}^9 \nu_i \cdot n_i \cdot \ln X_i + \frac{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=i+1}^9 \nu_i \cdot \nu_j \cdot n_i \cdot n_j \cdot Q_{ij}}{\sum_{i=1}^9 \nu_i \cdot n_i} + \left[ \frac{2(\nu_4 n_5 + \nu_6 n_6) - \sum_{i=1}^3 \nu_i n_i - 0,5 \nu_4 n_4}{\sum_{i=1}^9 \nu_i n_i} \right]^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \nu_i \cdot n_i \cdot q_i \quad (\text{en. 6})$$

(Z enačbami od 3 do 6 je na kratko prikazana izpeljava enačb za izračunavanje koeficientov termodinamične aktivnosti komponent v talinah varilnih žilinder).

V skladu z ravnotežno enačbo (en. 2) in ugotovitvami glede hitrosti poteka fizikalno-kemičnih procesov med varjenjem smo z obdelavo rezultatov raziskav (kemičnih analiz) na računalniku IBM 360/30 ugotovili, da velja v območju raziskav (od 0,02 do 0,1 ut % celotne vsebnosti kisika v varu) linearna zveza med celotno vsebnostjo kisika v varu ([O]) ter naslednjimi členi:

$$(\% \text{ FeO}^*), \frac{\% \text{ MnO}}{\% \text{ Mn}} \text{ in } \sqrt{\frac{\% \text{ SiO}_2}{\% \text{ Si}}}$$

Op.: (% FeO\*) = (% FeO) + 1,35 (% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);

$$\frac{M_{\text{FeO}}}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} \cdot 3 = 1,35$$

Pri izpeljavi enačb sem vpliv aktivnosti sestavin in vpliv navidezne hitrosti vzpostavljanja ravnotežja upošteval tako, da sem ločeno obdelal bazično in rutilno oplaščene elektrode ter da sem enačbe izpeljal s členoma % SiO<sub>2</sub> in B<sub>L</sub> (bazičnost varilne žilindre), ki sta v zvezi z redukcijo žilindre in prenosom kisika iz plinske faze v talino žilindre in talino vara ter zato odločilno vplivata na navidezno hitrost vzpostavljanja ravnotežja med žlindrom in varom.

#### Bazično oplaščene elektrode

(% FeO\*) = 4,72 + 78,7 · [O] - 0,114 % · SiO<sub>2</sub> - 0,32 B<sub>L</sub> ; 93,1 %-na korelacija (en. 7)

$\frac{(\% \text{ MnO})}{\% \text{ Mn}} = 1,76 + 176,0 \cdot [O] - 0,144 \cdot \% \text{ SiO}_2 - 1,55 B_L$  ; 94,7 %-na korelacija (en. 8)

$\sqrt{\frac{(\% \text{ SiO}_2)}{\% \text{ Si}}} = 5,53 + 179,3 \cdot [O] - 0,264 \cdot \% \text{ SiO}_2$  ; 93,8 %-na korelacija (en. 9)

Redukcija TiO<sub>2</sub> je neznatna

Op. Enačbe 7, 8 in 9 veljajo za elektrode, ki so osušene na temperaturi 450° C, za varjenja z enosmernim tokom na + pol

#### Rutilno oplaščene elektrode

(% FeO\*) = 6,83 + 179,6 · [O] - 0,33 % SiO<sub>2</sub> ; 86,4 %-na korelacija (en. 10)

$\frac{(\% \text{ MnO})}{\% \text{ Mn}} = 11,49 + 688,7 \cdot [O] - 1,00 \cdot \% \text{ SiO}_2$  ; 84,9 %-na korelacija (en. 11)

$\sqrt{\frac{(\% \text{ SiO}_2)}{\% \text{ Si}}} = 3,36 + 121,3 \cdot [O]$  ; 87,0 %-na korelacija (en. 12)

Redukcija TiO<sub>2</sub>:

$\Delta O_2$  (red. TiO<sub>2</sub> v g/g v) = 10<sup>-4</sup> · (51,7 - 440,3 · [O] + 163,2  $\frac{G_{Z1}}{G_v} - 3,49 \frac{Q}{G_v} - 0,52 \% \text{ TiO}_2$ ) ; 91,6 %-na korelacija (en. 13)

Op.: Enačbe 10, 11, 12 in 13 veljajo za elektrode, ki vsebujejo do okoli 10 % kaolina v elektrodni oblogi in so osušene pri temperaturi 250° C, za varjenja z izmeničnim tokom.

Legenda oznak v podanih enačbah:

% FeO, % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % MnO, % SiO<sub>2</sub> in % TiO<sub>2</sub> — sestava varilne žlindre (ut. %)

% Mn in % Si — sestava vara (ut. %)

[O] — celotna vsebnost kisika v varu (ut. %)

G<sub>z</sub> in G<sub>v</sub> — količina žlindre in vara v g (računano na eno elektrodo)

Q = I · U · t — porabljena energija v KWs (računano na eno elektrodo)

B<sub>L</sub> = Σ a<sub>i</sub>N<sub>i</sub> — bazičnost varilne žlindre

Δ O<sub>2</sub> (red. TiO<sub>2</sub> v g/gv) — količina kisika, ki odgovarja redukciji TiO<sub>2</sub> (računano na 1 gram vara)

### III. PRAKTIČNA UPORABNOST UGOTOVITEV PRI VARJENJU IN IZPOPOLNJEVANJU VARILNIH OPLAŠČENIH ELEKTROD

Ugotovljene odvisnosti med oplaščenjem in »prenosom kisika«, izpeljane zakonitosti redukcije TiO<sub>2</sub> in zakonitosti vzpostavljanja navideznega ravnotežja med žlindro in varom ter poznavanje poteka reakcij, ki se odvijajo že pri sušenju elektrod, nam omogočajo, da lahko že na osnovi izbrana izkoristka varjenja, količine žlindre ter sestave vara in sestave žlindre (glede na njene fizikalne lastnosti) izračunamo optimalno sestavo oplaščenja za elektrodo glede na postavljene zahteve.

Izkoristek varjenja ter količino in sestavo varilne žlindre izberemo na osnovi zahtevanih varilno tehničnih lastnosti, ki jih mora imeti elektroda.

Izbrana sestava vara je le orientacija za računanje. Z računom namreč ugotovimo tudi, kakšna bo optimalna sestava vara v izbranem primeru (izbran izkoristek varjenja ter količina in sestava varilne žlindre).

Teoretično izračunavanje optimalne sestave in debeline oplaščenja glede na zahtevane lastnosti, ki jih mora imeti elektroda, omogoča hiter razvoj in izpopolnjevanje varilnih oplaščenih elektrod ter s tem hitro prilagajanje zahtevam tržišča.

#### Literatura

1. Koch: »Handbuch der Schweisstechnologie Lichtbogenschweissen« (Deutscher Verlag für Schweisstechnik — DVS — GMBH, Düsseldorf 1961).
2. D. Seferijan: »Metalurgija zavarivanja« (Građevinska knjiga, Beograd 1969).
3. M. Beckert, A. Neumann: »Grundlagen der Schweisstechnik« (VEB Verlag Technik, Berlin 1969).
4. V. D. E.: »Die physikalische Chemie der Eisen und Stahlerzeugung« (Verlag Stahleisen M. B. H., Düsseldorf 1964).
5. J. F. Elliott, M. Gleiser: »Thermochemistry for Steelmaking—II« (Addison-Wesley Publishing Co INC, London 1960).

6. Ernest M. Levin, Howard F. McMurdie, F. P. Hall: »Phase Diagrams for Ceramists« (The American Ceramic Society, Ohio 1956).
7. Walter J. Moore: »Fizička hemija« (Naučna knjiga, Beograd 1962).
8. I. Kuščer, A. Moljk: »Fizika — 3« (Državna založba Slovenije, Ljubljana 1963).
9. P. Stular: »Studij varjenja pod žlindro — I.« (Poročilo Zavoda za varjenje SRS — Ljubljana 1968).
10. M. G. Froberg, M. L. Kapoor: »Schweissen und Schneiden 24 (1972), št. 8, str. 293/295.
11. J. H. Palm: »Welding Journal 51 (1972), št. 7, str. 358—360-s.
12. Segawa, Tsunetomi, Nakamura, Katayama: »Transactions Iron and Steel Inst. Japan 9 (1969), št. 2, str. 96—99.
13. Eüchi Tsunetomi, Haruo Fujita: »Soud. Techn. conn 26 (1972), št. 3/4, str. 125/139.
14. H. Miska, M. Wahlster: »Archiv für das Eisenhüttenwesen 44 (1973), št. 1, str. 19/25.
15. E. Grethen, L. Philippe: »Revue de Metallurgie 68 (1971), št. 10, str. 647/654.
16. G. Pomey, B. Trentini: »Revue de Metallurgie 68 (1971), št. 10, str. 603/623.
17. A. A. Erohin, G. N. Kotov: Avtomatičeskaja svarka (1970), št. 2, str. 68/69.
18. A. A. Erohin: Fizika i hemija obrabotki materialov (1969), št. 5, str. 56/61.
19. V. A. Beshlebnij, L. K. Lešinskij: Svaročnoe proizvodstvo (1972), št. 4, str. 11/13.
20. N. F. Rjižov, K. V. Bagrjanskij: Svaročnoe proizvodstvo (1972), št. 3, str. 11/12.
21. V. M. Panovko, E. G. Bioškin: Svaročnoe proizvodstvo (1970), št. 8, str. 33/35.
22. A. N. Bjikov, A. A. Erohin: Svaročnoe proizvodstvo (1965), št. 7, str. 25/28.
23. A. N. Bjikov, A. A. Erohin: Svaročnoe proizvodstvo (1963), št. 7, str. 1/4.
24. A. N. Bjikov, A. A. Erohin: Avtomatičeskaja svarka (1961), št. 9, str. 10/19.
25. A. A. Erohin, A. N. Bjikov, O. M. Kuznecov: Avtomatičeskaja svarka (1961), št. 8, str. 13/19.
26. A. A. Erohin: Svaročnoe proizvodstvo (1957), št. 12, str. 5/9.
27. A. N. Bjikov: Svaročnoe proizvodstvo (1968), št. 12, str. 6/8.
28. A. A. Erohin, G. N. Kotov: Avtomatičeskaja svarka (1967), št. 10, str. 16/20.
29. I. K. Pohodnja, I. R. Javdošin, G. G. Koričikij, A. P. Paljcevič: Avtomatičeskaja svarka (1969), št. 1, str. 18/22.
30. I. V. Ljahovaja, D. M. Kušnerev, V. V. Podgaekij: Avtomatičeskaja svarka (1972), št. 9, str. 31/35.
31. V. A. Beshlebnij, K. V. Bagrjanskij, L. F. Lavrik, L. K. Lešinskij: Svaročnoe proizvodstvo (1968), št. 12, str. 9/10.
32. I. G. Noskov: Avtomatičeskaja svarka (1970), št. 12, str. 36/39.
33. J. Heuschkel: Ekspres informacija — Svarka (1971), št. 10, str. 1/46; Weld. J. 48 (1969), št. 8, str. 328/347.
34. A. A. Erohin, O. M. Kuznecov: Avtomatičeskaja svarka (1972), št. 2, str. 72/73.
35. V. S. Bender, V. S. Tokarev, V. I. Galinič, V. V. Podgaekij: Avtomatičeskaja svarka (1972), št. 7, str. 69.
36. Kl. A. Olejničenko N. G. Zavarika, K. A. Olejničenko: Avtomatičeskaja svarka (1971), št. 1, str. 74/75.
37. I. K. Pohodnja, I. R. Javdošin: Avtomatičeskaja svarka (1971), št. 10, str. 21/23.
38. J. Ruge, V. Jürgens, R. Müller: Technische Mitteilungen 64 (1971), št. 7, str. 301/304.

39. W. Hummitzsch: Schweissen und Schneiden 13 (1961), št. 5, str. 187/195.
40. W. Hummitzsch, L. Hense: Schweissen und Schneiden 14 (1962), št. 5, str. 201/210.
41. F. Rapatz, W. Hummitzsch: Stahl und Eisen 65 (1945), št. 9/10, str. 109/118 in 141/148.
42. A. Prešeren: Metalurgija II (1972), št. 2, str. 3/12.
43. R. Killing: Draht-Welt 58 (1972), št. 5, str. 259/266.
44. W. Hummitzsch: Schweisstechnik 4 (1950), št. 11, str. 1/10.
45. W. Röhl: Der Praktiker (1971), št. 12, str. 254/256.
46. R. Kežar: Železarski zbornik 6 (1972), št. 1, str. 47-63.
47. I. K. Pohodnja, I. R. Javdošin: Avtomatičeskaja svarka (1972), št. 3, str. 9/12.
48. G. G. Korickij, I. K. Pohodnja: Avtomatičeskaja svarka (1970), št. 7, str. 17/19.
49. I. K. Pohodnja, G. G. Korickij: Svaročnoe proizvodstvo (1970), št. 8, str. 32/33.
50. I. K. Pohodnja, A. E. Marčenko, B. A. Kostenko: Avtomatičeskaja svarka (1965), št. 5, str. 8/10.
51. V. V. Stepanov, B. E. Lopaev: Avtomatičeskaja svarka (1965), št. 11, str. 28/30.
52. B. E. Lopaev, A. A. Pliševskij, V. V. Stepanov: Avtomatičeskaja svarka (1966), št. 1, str. 27/29.
53. P. P. Evseev: Avtomatičeskaja svarka (1967), št. 11, str. 42/45.
54. A. I. Sergienko: Avtomatičeskaja svarka (1965), št. 6, str. 26/31.
55. A. I. Bočorišvili, S. B. Jakobašvili: Svaročnoe proizvodstvo (1968), št. 10, str. 13/15.
56. S. B. Jakobašvili, T. G. Mudžiri, A. V. Skljarov: Avtomatičeskaja svarka (1965), št. 8, str. 44/45.
57. H. J. Klingelhöfer, P. Mathis, A. Choudhury: Archiv für das Eisenhüttenwesen 42 (1971), št. 5, str. 299/306.
58. M. Beckert, U. Franz, N. Neschanjan: Schweisstechnik 21 (1971), št. 6, str. 245/247.
59. V. Schmidt: Schweissen und Schneiden 23 (1971), št. 1, str. 22/24.
60. W. Hummitzsch: Draht-Welt 51 (1965), št. 7, str. 362/365.
61. F. Erdmann-Jesnitzer, D. Rehfeldt, H. Kroker: Schweisstechnik 26 (1972), št. 8, str. 169/175.
62. F. Erdmann-Jesnitzer, D. Rehfeldt: Technische Mitteilungen 63 (1970), št. 11, str. 566/573.
63. O. Becken: Schweissen und Schneiden 22 (1970), št. 11, str. 478/479.
64. G. Rabensteiner, H. Rettenbacher: Schweisstechnik 25 (1971), št. 1, str. 17/24.
65. H. E. Weinschenk: Beitrag zur Veränderung des Abschmelzcharakters von ummantelten Elektroden durch den elektrischen Anschlusskreis (Akademie-Verlag, Berlin 1960).
66. Jevdjič Krsto: Diplomsko delo »Izdelava in umerjanje viskozimetra« (Ljubljana 1962).
67. L. Knez: Priručnik za upotrebu dodatnog materiala kod zavarivanja topljenjem (Železarna Jesenice 1964).
68. Spravočnik himika I. (Gosudarstvennoe naučno-tehničeskoe izdateljstvo himičeskoj literaturji, Leningrad-Moskva 1962).
69. Spravočnik himika II. (Gosudarstvennoe naučno-tehničeskoe izdateljstvo himičeskoj literaturji, Leningrad-Moskva 1963).
70. Metalurški priročnik (Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 1972).
71. Laboratorijski priročnik (Slovensko kemijsko društvo, Ljubljana 1967).
72. D. Ja. Povolockij: Razkisljenje stali (Izdateljstvo »Metallurgija«, Moskva 1972).
73. W. Hinz: Silikate (VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1963).
74. H. Salmang: Die Keramik (Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1958).
75. K. Konopicky: Feuerfeste Baustoffe (Verlag Stahleisen M. B. H., Düsseldorf 1957).
76. V. A. Kožurov: Termodinamika metallurģičeskih šlakov (Gosudarstvennoe naučno-tehničeskoe izdateljstvo literaturji po černoj i cvetnoj metallurgii — Sverdlovskoe otdelenie, Sverdlovsk 1955).
77. A. A. Kazakov: Kislorod v židkoj stali (Izdateljstvo »Metallurgija«, Moskva 1972).

## ZUSAMMENFASSUNG

Für die Desoxydation des Schweissgutes beim Schweissen mit ummantelten Elektroden ist charakteristisch, dass eine sehr kurze Zeit für den Verlauf der Reaktionen zur Verfügung ist. Die Reaktionen zwischen der erschmolzenen Schweisschlacke und der Schmelze des Schweissgutes verlaufen nicht bis zu dem Gleichgewicht. Zwischen der Schmelze und Schlacke stellt sich ein scheinbares Gleichgewicht auf. Aus der Schweissgutschmelze scheidet sich nur ein Teil der oxydischen Einschlüsse aus, welche als Desoxydationsprodukte entstanden sind, oder von der Schweisschlacke her stammen. Diese verbliebenen oxydischen Einschlüsse sind die Ursache, dass mit einer grösseren Menge der Desoxydationselemente der Gesamtsauerstoffgehalt im Schweissgut nur bis zu einer bestimmten Grenze erniedrigt werden kann. Eine zu grosse Menge der Desoxydationselemente in der Schweisselektrode verursacht das Verschlechtern der Zähigkeit wegen des Legierens des Schweissgutes mit Si und Mn.

Während des Schweissens verläuft die Oxydation der Desoxydationselemente nur mit Sauerstoff, welcher aus der Gasphase in die Schlacken und Stahlschmelze und mit dem Sauerstoff, welcher in die Reaktionen bei der Einstellung des scheinbaren Gleichgewichtes aus der Reduktion der Schweisschlacke, das heisst, der Fe und Mn Oxide des SiO<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> übergeht.

Den wichtigsten Einfluss auf den Verbrauch der Desoxydationsmittel beim Schweissen mit umhüllten Elektroden hat der Übergang des Sauerstoffes aus der Gaspha-

se in die Schlacken und Stahlschmelze, welcher wieder von der Zusammensetzung und der Ummantelungsdicke, und der Stromstärke abhängig ist.

Ein Richtwert für die Bewertung des Sauerstoffüberganges ist die Basizität der theoretischen Schmelze, der Elektrodenummantelung (Schlacke beim Entstehen der Tropfen). Eine wichtige Rolle bei dem Sauerstoffübergang hat auch das Abschmelzen (die Grösse der Tropfen welche beim Schweissen abschmelzen).

Der Desoxydationsmittelverbrauch ist auch von dem Verhältnis zwischen der Schlackenmenge und der Schweissgutmenge ( $G_{sl}/G_s$ ) abhängig. Der Desoxydationsmittelverbrauch wird grösser beim wachsen dieses Verhältnisses. Der Grund dafür ist die Reduktion der Schweisschlacke — das Einstellen des scheinbaren Gleichgewichtes. Diese Reaktionen verlaufen in Übereinstimmung mit der folgenden Gleichgewichtsgleichung:

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

Da diese vor der Gleichgewichtseinstellung einfrieren, muss bei der Erläuterung der physikalisch-chemischen Prozesse während des Schweissens auch deren Geschwindigkeit berücksichtigt werden. Für die Verständigung des Einstellens des scheinbaren Gleichgewichtes zwischen der

Schlacke und Schweissgut sind folgende Feststellungen von besonderer Wichtigkeit:

— Die Reaktionen zwischen Mangan und Sauerstoff, und Silizium und Sauerstoff, welche im Metallbad gelöst sind, verlaufen schnell und fast bis zum Gleichgewicht.

— Die Oxydation des Mangans und Siliziums während des Schweißens ist nur von der Lösungsgeschwindigkeit des Sauerstoffes in der Stahlschmelze abhängig (die langsamste Reaktion). Diese ist von der Schweisstemperatur, von der Reduktionsfähigkeit der entstehenden Schweisschlacke und vom Übergang des Sauerstoffes aus der Gasphase in die Schlacken und Stahlschmelze abhängig, das heisst, von der Basizität der entstehenden Schweisschlacke und des Abschmelzens.

Mit der Berücksichtigung der Aktivität der Bestandteile und der Geschwindigkeit der Gleichgewichtseinstellung bei dem Reaktionsverlauf während des Schweißens mit ummantelten Elektroden, wird in Übereinstimmung

mit der Gleichgewichtsgleiche im Bereich der Untersuchungen (von 0.02 bis 0.1 Gewichtsprozent des Gesamtsauerstoffes im Schweissgut eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Gesamtsauerstoffgehalt im Schweissgut ([O]) und folgenden Gliedern erreicht:

$$(\% \text{FeO}^*), \frac{(\% \text{MnO})}{\% \text{Mn}/} \text{ und } \sqrt{\frac{(\% \text{SiO}_2)}{\% \text{Si}/}}$$

Mit der Auswahl des Schweißausbringens, der Schlackenmenge, der Schweissgutzusammensetzung und der Schlackenzusammensetzung im Bezug auf deren physikalische Eigenschaften, kann auf Grund der beschriebenen Gesetzmässigkeiten (Diagramme und ausführte Gleichungen) bei dem Reaktionsverlauf beim Schweißen, eine optimale Zusammensetzung der Elektrodenummantelung im Bezug auf die vorgeschriebenen Eigenschaften ausgerechnet werden.

## SUMMARY

Deoxidation of the weld in welding coated electrodes is characterized by a very short time available for reactions. No equilibrium is achieved between the welding slag and the molten metal. Only a part of oxide inclusions precipitates from the melt. They are originated either from the slag or due to deoxidation. The oxide inclusions which do not precipitate cause that oxygen content can be reduced only to a certain degree though the amount of deoxidizing agents in the electrode is increased. Too high content of deoxidizing agents reduces toughness because the Si and Mn content in weld increases.

Oxidation of elements during welding is caused only by the oxygen which comes from the gaseous phase into the molten slag or metal phase and by the oxygen from the reduction of iron and manganese oxides, and of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  when quasi-equilibrium is reached.

The consumption of deoxidizing agents in welding with coated electrodes is in greater part influenced by the oxygen transfer from the gaseous phase into the molten slag and metal which depends mainly on the composition and thickness of the electrode coating and the intensity of the welding current. Basicity of theoretical melt of the electrode coating (i. e. slag which is formed at the formation of drops) can be an indicator for the oxygen transfer. Also the melting rate (size of drops in welding) cannot be neglected.

Consumption of deoxidizing agents depends further also on the ratio between the amount of slag and the amount of weld ( $G_{\text{sl}}/G_{\text{v}}$ ). The consumption increases with the increased amount of slag per weld unit. It is caused by the reduction of welding slag — establishing of a quasi equilibrium. The reactions follow the equilibrium equation:

$$a_{\text{O}} = \frac{a_{\text{FeO}}}{K_{\text{Fe}}^a} = \frac{a_{\text{MnO}}}{K_{\text{Mn}}^a \cdot a_{\text{Mn}/}} = \sqrt{\frac{a_{\text{SiO}_2}}{K_{\text{Si}}^a \cdot a_{\text{Si}/}}}$$

Because the system freezes before the equilibrium is established the rate of chemical processes must be taken in account when the physico-chemical processes in welding are to be explained. To understand the establishing the quasi-equilibrium between the slag and the metal the following findings are essential:

— reactions between manganese and oxygen, and silicon and oxygen which are dissolved in metal bath are fast and they nearly reach the equilibrium,

— oxydation of manganese and silicon during welding depends only on the dissolution rate of oxygen in molten steel (the slowest step) which further depends on the welding temperature, reducibility of the formed welding slag, and on the oxygen transfer between the gaseous phase and the molten slag and metal, i. e. on the basicity of the formed welding slag and the melting rate.

A linear relationship between the total oxygen content in the weld, ([O]), and the terms  $(\% \text{FeO}^*)$ ,  $\frac{(\% \text{MnO})}{(\% \text{Mn}/)}$ , and

$\sqrt{\frac{(\% \text{SiO}_2)}{\% \text{Si}/}}$  was obtained in the region of investigations

(total oxygen content in the weld varied from 0.02 to 0.1 wt. %) when activities of components and the rate of establishing the equilibrium during welding with coated electrodes were taken in account. The relationship corresponds to the equilibrium equation. When welding yield, amount of slag, weld composition, and the composition of the welding slag according to its physical properties are known the optimal composition of the electrode coatings can be calculated according to the previously described relationships.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При раскислении сварочного шва при сварки с покрытыми электродами примечательно очень короткое время, которое в распоряжении для течения реакции. Реакция между расплавленным сварочным шлаком и расплавом сварочного шва не заканчивается с равновесием. Между шлаком и сварочным швом восстанавливается кажущийся равновесие. Из расплава сварочного шва выделяется только часть окисленных включений как результат окисления и шлака. Эти остаточные включения оксидов причина того, что несмотря на добавку увеличенного количества раскислителей в электроде, уменьшение содержания кислорода в свароч-

ном шву удаётся лишь до определённой границы. Слишком высокое содержание раскислителей в электроде уменьшает вязкость шва вследствие легирования шва с Si и Mn.

Во время сварки процесс окисления элементов (раскислителей) происходит только вследствие действия кислорода, который переходит в расплав шлака и расплав шва из газовой фазы, также и с кислородом который вступает в реакцию восстановлением кажущийся равновесия вследствие редукции сварочного шлака, т. е. редукции оксидов железа и марганца и  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ .



Самое большое значение на расход раскислителей при сварки с покрытыми электродами представляет собой передача кислорода из газовой фазы в расплав шлака и металла; это же зависит главным образом от состава и от толщины обмазки электродов и от напряжённости сварочного тока.

Показатель для оценки «передачи кислорода» представляет собой основность теоретического расплава электродной обмазки (шлака, который получается при образовании капель). Важную роль при «передачи кислорода» имеет также расплавление (величина капель, которые расплавляются во время сварки).

Расход раскислителей зависит также от отношения между количеством шлака и количества сварочного шва (Гшла/Гш). Расход раскислителей увеличивается с увеличением количества шлака на единицу сварочного шва. Причина этого: редукция сварочного шлака-восстановление кажущийся равновесия.

Эти реакции протекают в согласии с следующим уравнением равновесия:

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

Так как замерзание наступает до восстановления равновесия, надо при объяснении физико-химических процессов учесть также ихнюю быстроту. Для понимания процесса восстановления кажущийся равновесия между шлаком и сварным швом важны следующие констатации:

— Реакция между марганцем и кислородом а также кремнием и кислородом, которые находятся в расплавленном состоянии в расплаве металла, происходят быстро, почти до равновесия.

— Окисление марганца и кремния во время сварки зависит только от быстроты расплавления кислорода в расплаве стали (самая медленная реакция). Быстрота окисления этих элементов зависит от темп-ры сварки, восстанавливаемости сварного шлака и от передачи кислорода из газовой фазы в расплав шлака и металла, т. е. од основности образованного сварочного шлака и от расплавления.

Взяв во внимание активность составных компонент и быстроту восстановления равновесия при процессе реакций во время сварки с покрытыми электродами, молучим в согласии с уравнением равновесия в области исследований (между 0.02 до 0.1 вес. % общего содержания кислорода в сварочном шву) линейную связь между общим содержанием кислорода в сварочном шву /O/ и следующими членами:

$$(% FeO^*), \frac{(% MnO)}{/% Mn/} \text{ и } \sqrt{\frac{(% SiO_2)}{/% Si/}}$$

Выбором: выхода сварки, количества шлака, состава сварочного шва, состава сварочного шлака что касается его физических качеств, можно на основании описанных закономерностей (диаграммов и выполненных уравнений) тока реакций во время сварки высчитать оптимальный состав обмазки для электрод взяв во внимание предписанные требования.