

Tehnične novice

V. Internacionalna konferenca o vakuumski metalurgiji in električnem pretaljevanju v München-u (ZRN) 11. do 15. oktober 1976

B. Koroušič, M. Dobovišek, J. Rodič

1. UVOD

Namen V. internacionalne konference v Münchenu je bil, da nadaljuje s tradicijo, ki se je začela s 1. konferenco iz leta 1964. Sestanek ekspertov iz celega sveta je izredna priložnost, da se izmenjajo mišljenja in rezultati na področju vakuumske metalurgije in sekundarnih rafinacijskih postopkov. Diskusija je zajela tako praktične kakor tudi teoretične aspekte tega zelo perspektivnega področja.

Področje električnega pretaljevanja pod žlindro je vključeno v konferenco zaradi tesne tehnične povezanosti z analognimi procesi. Posebna pozornost je posvečena reševanju problemov na tem področju tudi zaradi naraščajočega interesa v rafinaciji pomembnejših neželeznih kovin.

Na posvetovanju je bilo prečitano okoli 60 predavanj, ki so zajela naslednja področja:

1. Fizikalno-kemični procesi v vakuumski metalurgiji,
2. Vakuumska obdelava tekočega jekla,
3. Vakuumska obdelava tekočih neželeznih kovin z vključno vakuumsko destilacijo,
4. Talilni in pretaljevalni procesi pod vakuumom,
5. Analogni procesi in toplotna obdelava v vakuumu,
6. Fizikalno-kemični problemi EPŽ-procesa,
7. Karakteristike EPŽ-naprav in tehnološke izkušnje,
8. Izdelava težkih kovaških odkovkov po EPŽ-postopku,
9. Ekonomski aspekti in avtomatizacija EPŽ-procesa,
10. Procesni modeli in metode, vakuumsko-metalurških procesov.

Vsa navedena poglavja na konferenci niso bila seveda enakovredno obdelana, kar je tudi razumljivo glede na obseg predavanj in časovne omejitve. Predavanja bodo v celoti objavljena od organizatorja v obliki »proceedings«, tako, da se v tem poročilu lahko omejimo le na najpomembnejša izvajanja.

V. internacionalne konference v Münchenu se je udeležilo okoli 200 ekspertov iz 26 dežel (ZDA, SSSR, ZRN, Avstrije, Francije, ČSSR, Japonske, Italije, Anglije, Švice, Švedske itd.). Organizacijo kongresa je zelo uspešno izpeljala firma Leybold-Heraeus GmbH & Co. KG iz Hanau, ZRN pod vodstvom prof. M. Wahlster.

2. NAJPOMEMBNEJSI DOSEŽKI NA PODROČJU VAKUUMSKE METALURGIJE

W. Kurz je v svojih izvajanjih opozoril na veliki pomen sekundarnih faz (kot so: nekovinski vključki in pare) na plastične lastnosti kovin in zlitin. Tvorba sekundarnih faz je na splošno ozko povezana z mehanizmom strjevanja zlitin. Dendritna morfologija in faktorji, ki določajo porazdelitev faz v končni fazi strjevanja igrajo pomembno vlogo pri študiju plastičnosti in so predmet številnih raziskav.

K. Lange, Institut für Eisenhüttenkunde, Tech. Hochschule, Aachen je obdelal pomembno področje kinetike izmenjave vodika in dušika med plinsko fazo in tekočim železom v vakuumu in pri preprihanju tekočega jekla z argonom. Z uporabo Sievertsove metode je določil koefi-

ciente masnega prenosa K_H in K_N v binarnih, tekočih zlitinah Fe-Cr, Fe-Mn, Fe-Ni in Fe-Si.

Zelo zanimivo je bilo predavanje **H. Jacobi z Max-Planck Instituta, Düsseldorf** o prenosu toplote med ingotom in kokilo med litjem železa v vakuumu in različnih plinskih atmosferah. Rezultati laboratorijskih preiskav so pokazali, da je kvaliteta litega ingota zelo močno odvisna od vrste uporabljene atmosfere, kar avtor povezuje z vplivom plinov na površinsko medfazno napetost med kokilo in tekočo talino.

O mehanizmu odtranjevanja in koagulacije oksidnih vključkov pri vakuumski obdelavi jekla sta poročala dva avtorja: **M. Kepka s sodelavci (Škoda, Plzen, ČSSR) in G. Zahs s sodelavci (Vacmetal GmbH, Duisburg, ZRN)**. V prvem predavanju je bilo govora o mehanizmu nastanka oksidnih vključkov pri vakuumskem litju kovaških ingotov teže 48 do 71 ton za 4 različne kvalitete jekla z 0,2 do 0,85 % C legirana s Mn, Ni, Cr, Mo in Zr. Rezultati teh preiskav so pokazali, da je sestava oksidnih vključkov v strjenem jeklu v konsistenci s sestavo žlindre in produkti dezoksidacije. G. Zahs in sodelavci so izdelali matematični model, ki sloni na kompliciranem statističnem vrednotenju z uporabo energije disipacije. Numerična izračunavanja za več znanih vakuumskih procesov pod različnimi pogoji so potrdila veljavnost uporabljenega modela.

G. Maas s sodelavci je opisal delovanje 150 tonske RH-vakuumske naprave v jeklarni Thyssen, Henrichshütte AG in podal nekatere rezultate vakuumske obdelave LD-talini. Naprava je konstruirana za kapaciteto okoli 70.000 t jekla mesečno in je opremljena z dodatnim kisikovim tokom (pretok 1500 m³ O₂/h) za obdelavo nerjavnih jekel.

Zanimivi so tudi rezultati **H. Nashiva in T. Nagahata (Wakayama Works of Sumimots Metal Industries, Japan)**, o najnovejših dosežkih pri tehnologiji DH-postopka. Njihovi rezultati so npr. pokazali, da natančnejša kontrola temperature preboda (v mejah $\pm 10^\circ\text{C}$) občutno prispeva k boljši kontroli vsebnosti aluminija v obdelanem jeklu.

Za proizvodnjo visoko-legiranih jekel (npr. nerjavnih jekel) je prav gotovo zanimiva aplikacija BV-procesa (Fried. Krupp Hüttenwerke AG) o katerem sta poročala **J. Berve, W. Hallemeir, G. Stolte**. Postopek se deli v nekaj sekvenc, pri čemer se izkorišča ogrevanje taline v loncu (z električno energijo — obločno ali s kemično energijo — kisikov, vakuumski rafinacijski sistem). Vakuumiranje jekla se izvaja lahko preko curka (sistem lonec — lonec), kar je zelo primerno za izdelavo jekel pri katerih se izvaja odžvepljanje preko vpihavanja kalcija. Pri BV-procesu je dana možnost avtomatičnega legiranja jekla.

Podobne izkušnje pri uporabi vakuuma so podali **Kaiser, G in A. Eggenhofer (Vereinigte Edeltalwerke AG, Ternitz — Avstrija)**. Postopek je znan v literaturi in ga zato ne bomo posebej predstavljali.

Kot zadnje predavanje iz področja vakuumske obdelave tekočega jekla je imel **G. Patelsky s sodelavci (Thyssen Edeltalwerke, AG, Witten, ZRN)**. S posebno vgrajenim senzorjem (kisikova sonda) je vršena meritev parcialnega pritiska kisika v plinih pri vakuumski obdelavi jekla v 50 tonski VOD — napravi. Dobljeni rezultati so pokazali,

da obstaja direktna zveza med pO_2 v plinih in hitrostjo razogljčenja jekla. Poskusi so zelo natančno pokazali, da je pri VOD-postopku zelo pomemben vpliv vpihavanja argona. Zanimivi so tudi rezultati termodinamičnih izračunavanj v cilju določevanja kritične vsebnosti ogljika pri vakuumski obdelavi nerjavnih jekel (začetek »odgora« kroma).

3. NAJPOMEMBNEJSI DOSEŽKI NA PODROČJU ELEKTRIČNEGA PRETALJEVANJA POD ŽLINDRO (EPZ-POSTOPEK)

Uvodno predavanje prof. K. Schwerdtfegerja je orisalo nekatere osnovne probleme iz teorije EPZ-procesa. Teoretični model, ki ga je le omenil avtor odpira široke možnosti pri študiju vodika v jeklu, »odgora« titana v nerjavnih jeklih in pdb. Zlasti zanimivi so poskusi merjenja električne prevodnosti žlindre pri različnih frekvencah toka.

Prof. T. El Gammal in G. Pateisky sta podala rezultate laboratorijskih in industrijskih poskusov uporabe žlindre tipa $CaO-Al_2O_3$ na mesto standardnih CaF_2 — žlinder. Čeprav kvaliteta površine ingotov ni bila povsem zadovoljiva, sledi iz industrijskih poskusov ugotovitev, da žlindre tipa $CaO-Al_2O_3$ lahko v nekaterih primerih nadomestijo standardne EPZ-žlindre.

Matematični model toke žlindre in kovine pri EPZ-postopku, ki sta ga podala prof. J. Szekely in A. H. Dilawari (Massachusetts Institute of Technology, ZDA) daje dokaj nazorno sliko tokovnih dogajanj v žlindrini in kovinski kopeli. Toda, enako kot pri vseh dosedanjih modelih, avtorji izhajajo iz zelo poenostavljene slike EPZ procesa, kar nekoliko zmanjšuje vrednost dobljenih rezultatov.

V predavanju W. Thomasa (Leybold-Heraeus) o vplivu elektrode in posebej elektrodnega konusa na tehnološke značilnosti EPZ-peči je podana teoretična analiza EPZ-procesa z električnega stališča. Zaradi številnih predpostavk na katerih sloni model je vrsta vprašanj o veljavnosti izpeljanih odvisnosti.

Venal, W. V., H. J. Klein, E. W. Kelley, K. L. Love (Cabot-Stellite in US Air Force Moter. Labor.) so podali rezultate izdelave votlih ingotov (508 OD \times 254 OD mm) iz jekla 4330 Mod. Preiskave makro in mikrostrukture, morfologija in porazdelitev nekovinskih vključkov ter meritve in interpretacija medendritnih razdalj so pokazale, da ima lita struktura votlih ingotov vrsto prednosti v primerjavi z standardnimi ingoti.

Analogne preiskave s EPZ-ingoti premera \varnothing 400 do \varnothing 760 mm iz istega jekla so pokazale, da se žilavost pretaljenega jekla bistveno ne spreminja s stopnjo kovanja, razen v začetni fazi (1:1), ko se opaža močan padec.

O tehnoloških značilnostih najnovejše 50 tonske EPZ peči v Thyssen Henrichshütte sta poročala L. Rohde in D. Lohr. Peč je zgrajena na sodobnih principih (tehnika zamenjave elektrod, dvizna kokila, čistilne naprave za pline itd.). Premer ingotov se giblje med \varnothing 600 in 1340 mm in max. višina 4,5 m. Možna je tudi izdelava slabov: 650 \times 1320 mm. Zelo zanimivi so podatki o izkoristkih: elektroda — EPZ ingot: 95–98 %, EPZ-ingot — odkovk: 94 % v poprečju. Avtorja sta posebej poudarila pomen obvladovanja metalurških reakcij pri pretaljevanju jekel, kar velja zlasti za kontrolo aluminija.

Lherbier, L. V., F. M. Richmond (Cyclop Corporation, ZDA) sta obravnavala zelo pomembno področje in sicer primerjava lastnosti 12 % Cr nerjavnega jekla izdelanega po vakuumskem obločnem postopku (VAR) in po EPZ-postopku.

Njihovi rezultati so potrdili dosedanje empirične ugotovitve, da VAR-postopek ugodno vpliva na nižjo vsebnost plinov in oligoelementov medtem ko EPZ občutno izboljšuje čistočo jekla, daje boljše površino ingota in s tem večje izkoristke pri nadaljnji predelavi. Iz zaključkov sledi, da EPZ ni primeren za vse vrste specialnih jekel, čeprav avtorja priznavata, da je pri tem dokaj neraziskano področje optimalne tehnologije pretaljevanja.

Do analognih zaključkov so prišli tudi Ballantyne, A. K., A. Mitchell in R. J. Kennedy (Teledyne-Allvac, ZDA), ki so še bolj poudarili vpliv tehnoloških parametrov na kvaliteto pretaljenega jekla.

Nishiwaki, M., T. Yamaguchi, M. Koba (Nippon Steel Co. Japonska) so poročali o izkušnjah pri delu z veliko, bifilarno EPZ-napravo za izdelavo slabov, kakor tudi o kvaliteti izdelanih slabov in debele pločevine (dimenzije slabov 510 \times 2400 \times 4200 mm = 40 ton, 510 \times 1900 \times 3800 mm = 29 ton, 300 \times 1900 \times 3800 mm = 17 ton). Peč ima 5600 kVA, monofazna A. C. = 60 Hz., 4 elektrode z dvojno bifilarno tehniko, dvizni kristalizator. Praktične izkušnje so pokazale veliki vpliv tehnologije taljenja na makro-segregacije (V-segregacije), zlasti pomemben je vpliv sekundarnega hlajenja. Zelo pereč problem predstavlja prenos vodika iz zračne atmosfere v jeklo, kar so dokaj uspešno rešili z uporabo kontrolirane plinske atmosfere ($N_2 + O_2$) nad žlindro.

Izdelava valjev za toplo in hladno valjanje predstavlja že dalj časa zelo interesantno področje za EPZ-postopek. Jäger, H., Ch. Kubisch (Vereinigte Edelstahlwerke, Avstrija) sta poročala o izboljšanju lastnosti valjev za hladno predelavo, izdelanih po EPZ-postopku. Avtorja sta posebno pozornost posvetila ekonomski analizi (primerjava konvencionalno in po EPZ-izdelani valji). Iz zaključkov sledi, da poleg izboljšane mikrohomogenosti treba posebej poudariti povečanje življenjske dobe valjev za 20–40 % v enakih delovnih pogojih. EPZ-valji so manj občutljivi na tvorbo razpok kar uporabniki valjev navajajo kot največjo prednost.

Prof. Medovar (Paton inštitut za varilno tehniko — SSSR) je opozoril na zelo ugodne rezultate, ki se dobijo pri uporabi elektrod litih iz LD-kvalitet jekel. Legiranje osnovne taline med taljenjem je mogoče izvršiti na standardni način z dodatki v žlindro, ali preko pomožne elektrode. Oba načina legiranja imata znatne prednosti v primerjavi z legiranjem osnovne taline v LD-konvertorju, ker se dosežejo boljši učinki in ugodnejša porazdelitev legirnih elementov.

O izdelavi 12 % Cr nerjavnega jekla (za rotorje modernih, visoko-turažnih parnih turbin) preko EPZ-tehnologije so poročali Kühnelt, G., A. Diebold, Th. Skamletz, E. Krainer (Vereinigte Edelstahlwerke, Avstrija). EPZ-ingoti, \varnothing 1000 mm so bili izdelani pod žlindro $CaF_2-Al_2O_3-CaO$ pri čemer je uporabljena specialna tehnika za pretaljevanje in in dezoksidacijo, ki omogoča kontrolo vsebnosti Al pod 0,01 %. Po kovanju ingota na ustrezne dimenzije ($F_o/F = 3,6$) in primerni toplotni obdelavi so mehanske preiskave pokazale zelo ugodne lastnosti (visoke vrednosti 0,2 meje in ugodna žilavost).

Izdelava velikih kovaških ingotov predstavlja velik problem in vse razvite tehnologije iščejo še vedno optimalne rešitve. V zadnjem času je bilo veliko govora o treh principiellno različnih metodah, ki pa vse izkoriščajo EPZ-postopek kot osnovo:

1. Izdelava EPZ-ingotov v preničnem kristalizatorju z uporabo več-elektrodnega sistema (tehnika zamenjave elektrod),

2. Izdelava EPZ-ingota z uporabno kokilo, tki. MHKW-postopek pri čemer kot kokila služi večji votli ingot, katerega jedro natalimo z porab. elektrodo.

3. Kombinacija klasičnega litja z EPZ-tehniko, tki. BEST-postopek, pri katerem se zapolnitev »glave« ingota izvrši z nataljevanjem porabne elektrode.

O prvi metodi so izčrpno poročali A. Choudhury, R. Jauch, H. Löwenkamp (Stahlwerke Röchlting - Burbach, ZRN). Izdelava velikih kovaških ingotov, premera do 2300 mm predstavlja nedvomno največji uspeh na področju EPZ-tehnologije. Procesne značilnosti so pri tako velikih presekih toliko specifične, da zahtevajo maksimalne parametre taljenja, optimalno izbiro žlindre, preprečitev reakcij med žlindro in plinsko fazo itd. Obvladanje toplotnih in na splošno energetskih parametrov je posebej poudarjeno pri tem postopku. Zaradi dendritne rasti je struktura zelo homogena v primerjavi z konvencionalno, litimi

ingoti. Gostota litega jekla (26 Ni Cr MoV 11 5) doseže po celem preseku vrednosti $7,84 \text{ g/cm}^3$. Čistoča glede nekovinskih vključkov je izredno visoka, kar je pogoj za visoke mehanske lastnosti jekla.

Isti avtorji so podali tudi zelo zanimive rezultate o izdelavi 30 tonskih EPZ-ingotov iz jekla 12 %Cr za rotorje ($\varnothing 1000 \text{ mm}$ in dolžina 5000 mm). Dobljeni so odlični rezultati glede mehanskih lastnosti za diske in rotorje turbin. Ultrazvočne preiskave rotorjev so pokazale, da ni notranjih napak in makrosegregacij. Tudi vsebnost deltaferita je občutno nižja kot pri konvencionalno izdelanih ingotih.

Predavanje **R. Schumann-a (Leybold-Heraeus)** je služilo kot dopolnilo in je dalo dodatne informacije o tehnologiji izdelave velikih EPZ-ingotov.

W. Austel, Ch. Maidron sta opisala tehnološke značilnosti novega MHKW-procesa in pretaljevalne naprave v Klöckner-Werke-Osnabrück (ZRN). Dobljeni rezultati kažejo, da je s to tehnologijo mogoče izdelati visoko-kvalitetne EPZ-ingote največjih dimenzij. Glede na dejstvo, da je postopek šele pred kratkim dosegel industrijsko zrelost je še vrsta vprašanj, ki so vezani na tehnologijo taljenja.

Z naraščajočo velikostjo ingota naraščajo tudi težave glede vsebnosti nekovinskih vključkov (zlasti v »nogi« ingota), segreg, ogljika, žvepla, fosforja in kisika. BEST-postopek o katerem so poročali **Machner, P., H. Jäger, G. Kühnelt, E. Plöckinger (Vereinigte Edelstahlwerke, Avstrija)**

predstavlja kombinacijo klasičnega litja in EPZ-postopka. Postopek je v literaturi že dovolj poznan zato ga ne bomo ponovno predstavljali.

Zanimiva je predvsem primerjava ekonomskih pokazateljev med BEST in EPZ-postopkom. Primerjava je izvršena na jeklu za rotorje (NiCrMoV) — teža ingota 22 ton. Analiza je pokazala, da stroški izdelave ingota po BEST-postopku znašajo le 1/3 tistih za EPZ-ingot. Izkoristki so pri kovanju za 70 % nižji pri BEST, kot pri konvencionalno izdelanem jeklu. Avtorji so poudarili, da je BEST-postopek, posebej zanimiv za izdelavo zelo velikih kovaških ingotov in glede na dejstvo, da je oprema za ta postopek veliko cenejša kot pri analogni EPZ-napravi je treba temu postopku tudi pri nas posvetiti večjo pozornost.

Peta konferenca o vakuumski metalurgiji in električnem pretaljevanju pod žlindro v Münchenu, ZRN je ponovno pokazala, da je internacionalna izmenjava raziskovalnih dosežkov na področju procesne tehnike in reševanja številnih metalurških problemov edina možna in ekonomsko upravičena pot. Izredno visoke stroške za raziskave je danes mogoče občutno znižati le z povezovanjem in transferom znanja. Vedno večje zahteve porabnikov specialnih jekel in zlitin narekujejo uporabo novih postopkov, katerih izbira, optimizacija in racionalizacija zahteva visokostrokovno znanje, pri čemer je informiranost strokovnjakov, ki delajo na teh področjih eden od ključnih pogojev.