

Izboljšanje kvalitete visoko legiranih jekel s pretaljevanjem pod žlindro (EPŽ-postopek)

DK: 669.187.26; 669.046.54
ASM/SLA: D 8 n

Blaženko Koroušič,

Članek podaja rezultate večletnih raziskav na področju pretaljevanja visoko legiranih jekel pod žlindro (EPŽ-postopek). Opisane so tehnološke značilnosti postopka ter njihov vpliv na potek taljenja. Makroskopske in mikroskopske preiskave jekla v litem in predelanem stanju. Kemična analiza jekla pred pretaljevanjem in po pretaljevanju pod žlindro s posebnim poudarkom na obnašanje silicija, žvepla in kisika. Na kraju je podana diskusija o vplivu kristalizacijskih pogojev na homogenost EPŽ-jekla v litem in predelanem stanju.

1. UVOD

Na Metalurškem inštitutu v Ljubljani smo začeli z osvajanjem in razvojem na področju elektro pretaljevanja visoko legiranih jekel pod žlindro 1970. leta.

Pričeli smo s pretaljevanjem jekel za kroglične ležaje¹ in nato razširili aplikacijo EPŽ-postopka tudi na brzorezna², utopna, nekatera ognjeodporna in nerjavna jekla³.

Razvojni program EPŽ-postopka smo razdelili v dve osnovni skupini, kar izhaja iz osnovnih značilnosti EPŽ-postopka:

1. izboljšanje čistoče jekla zaradi ugodnih rafinacijskih pogojev (visoka temperatura, reakcijska površina in kemično aktivna žlindra),

2. izboljšanje makro in mikrostrukturne homogenosti jekla zaradi usmerjene kristalizacije.

2. EPŽ-naprava

Laboratorijska EPŽ-naprava, instalirana na Metalurškem inštitutu je prva naprava tega tipa v Jugoslaviji. Namenjena je predvsem za raziskovanje.

Njena izvedba je monofaznega tipa z nepremičnim kristalizatorjem, premera 118 mm in efektiv-

* Članek predstavlja skrajšani povzetek predavanja, ki ga je imel avtor na prvem jugoslovanskem posvetovanju Električno pretaljevanje jekel pod žlindro v prireditelji Zvezne Ravnice in Metalurškega inštituta iz Ljubljane na Ravnah na Koroškem, septembra 1973.

Avtor je diplomirani inženir metalurgije in doktor metalurških znanosti ter samostojni raziskovalec na metalurškem inštitutu v Ljubljani.

no višino ingota do 600 mm. Maksimalna teža ingota znaša 50 kg.

Pečni transformator ima naslednje karakteristike:

| | |
|-------------------------------------|-------------|
| Primarna moč | 140 kVA |
| sekundarna napetost (4 stopnje) | 38—54 V |
| maksimalna jakost toka (sekundarna) | 1800 A |
| hitrost premika elektrode | 0—50 mm/min |

Naprava je opremljena z elektronsko regulacijo hitrosti taljenja, kakor tudi z elektronskim sistemom za odčitavanje nivoja elektrode (kontrola hitrosti taljenja).

Posebej izdelana monofazna grafitna peč služi za taljenje žlindre (tekoči vžig).

3. Metalurška praksa

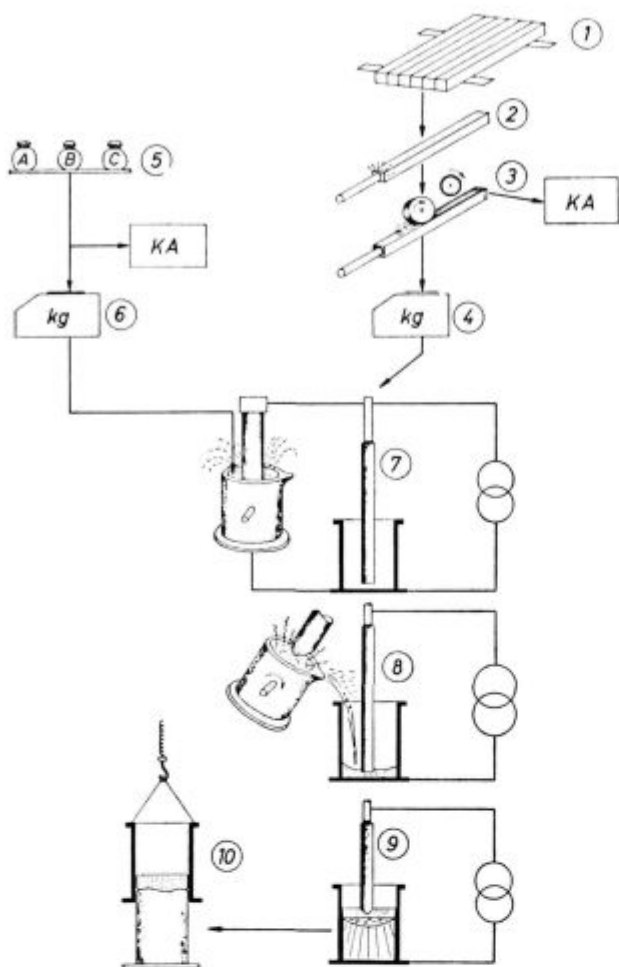
Potek priprave elektrod, tekoče žlindre, vžig ter vodenje postopka taljenja je prikazano v grafični obliki na sliki 1.

Na palice okroglega ali kvadratnega preseka 50—60 mm in dolžine maks. 3,5 m se navari elektrodni nastavek. V primeru, da je površina palic (v nadaljnjem elektrod) zelo oksidirana ali če gre za jekla, ki jim postavljamo visoke zahteve glede čistoče, se izvede mehansko čiščenje elektrod (poz. 3). Da bi natančneje kontrolirali proces taljenja in materialno bilanco procesa, se elektroda tehta (poz. 4) in nato vpne v elektrodni sistem EPŽ-naprave (poz. 7).

Izbrana vrsta in količina žlindre (normalno 5—6 % od teže jekla) se po vzetem vzorcu za kemično analizo (KA) in tehtanju šaržira v elektro peč, v kateri se z uporovnim taljenjem stali v času 8—10 min.

Nato se žlindra prelije iz grafitne peči v kristalizator, v katerem jeklena elektroda (ki je pod napetostjo) takoj prevzame funkcijo ogrevanja in nekaj sekund za tem se tudi sama začne odtaljevati.

Za ponovno stabilizacijo procesa (ponovno ogrevanje žlindre na delovno temperaturo) je potrebno ponavadi 5—7 min., nakar proces taljenja jekla poteka zelo mirno in ga je mogoče v celoti prepustiti avtomatski kontroli taljenja.



Slika 1:

Tehnološka shema izdelave EPŽ-ingotov na polindustrijski EPŽ-napravi na Metalurškem inštitutu v Ljubljani

S časom taljenja se zmanjšuje dolžina elektrode, kar pri konstantni napetosti (in praviloma tudi konstantni ohmski upornosti žlindre) vodi do povečanja moči v žlindro in s tem se tudi poveča hitrost taljenja jekla. Zato je potrebno kontrolno taljenja voditi tako, da je dovedena moč v žlindro konstantna, kar se doseže z optimalno izbiro napetosti ali vključevanjem induktivne upornosti (dušilke) v primarno stran transformatorja.

Kvaliteta površine ingota je odvisna predvsem od toplotnih pogojev v žilindrni kopeli, oziroma od ravnotežja med dovedeno količino toplote v žlindro in izgubami v žilindrni kopeli.

Pri veliki razdalji elektrodnega konusa od tekoče kopeli jekla narašča ohmska upornost žlindre in pada jakost toka, kar vodi do zmanjšanja moči (s kvadratom toka) in padca temperature žlindre. Pri zelo majhni razdalji narašča jakost toka, toda dovedena moč kljub temu pada, kar se ponovno pokaže v padcu temperature žlindre.

V obeh ekstremnih primerih nastaja skorja žlindre z neenakomerno debelino, kar vodi do zelo slabe kvalitete površine EPŽ-ingota in s tem

tudi do poslabšanja izkoristka kovine pri njegovi nadaljni predelavi.

Na sliki 2 so prikazane nekatere značilnosti površin EPŽ-ingotov, ki jasno kažejo energetska stabilnost procesa.

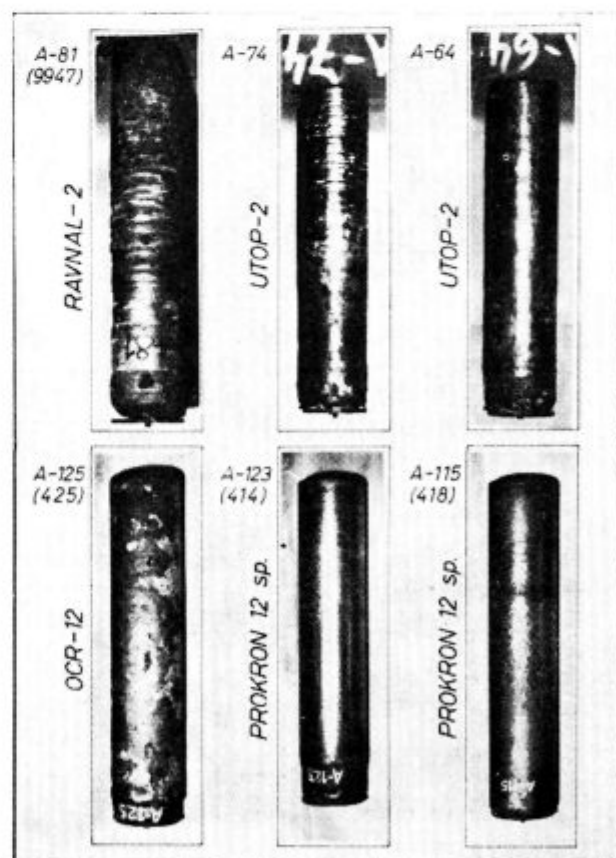
4. REZULTATI

V prvi fazi osvajanja in razvoja EPŽ-procesa smo osnovno pozornost posvetili obnašanju kemičnih elementov in spremembam makro in mikrostrukture jekel med pretaljevanjem pod žlindro.

4.1 Kemična analiza jekel

Analiza kemične sestave žlindre med procesom kaže, da se s časom taljenja spreminja predvsem vsebnost CaO in SiO₂ ter v manjši stopnji vsebnost ostalih sestavin žlindre (CaF₂, Al₂O₃, MnO, FeO, C, S).

Primerjava kemične sestave izhodnega jekla (elektrode), lite strukture »glava« in »noga« EPŽ-ingota in jekla v predelanem stanju (po kovanju EPŽ-ingota) nam pokaže, da obnašanje elementov v jeklu lahko razdelimo v štiri osnovne skupine:



Slika 2:

Nekateri tipični obliki površine EPŽ-ingotov pretaljenih pod žlindro CaF₂-Al₂O₃-CaO

1) elementi, katerih vsebnost v pretaljenem jeklu ostane nespremenjena: Co, Ni, C, Mo, W, C ter primesi As, Sn, Sb, Cu, Zn in Pb,

2. elementi, katerih vsebnost se spremeni za manj kot 10—15 %: Mn, N, P,

3. elementi, katerih vsebnost se spremeni med 10 do 80 %: Si, O in S,

4. elementi, katerih vsebnost variira, odvisno od pogojev taljenja (»odgor« ali prirastek): Al, Ti.

4.1.1 Silicij

Silicij ima od vseh elementov največjo aktivnost pri visoko legiranih jeklih med pretaljevanjem pod CaF_2 -žlindrami in je zato tudi najmočnejši dezoksidant (razen pri jeklih z zelo visoko vsebnostjo Al, Ti, B itd.).

»Odgor« silicija iz elektrode je posledica njegove reakcije s kisikom na fazni meji: elektrodni konus — žindra. Čim večja je bazičnost žindre in čim večja je vsebnost (FeO) v žindri, tem močnejši je njegov »odgor«.

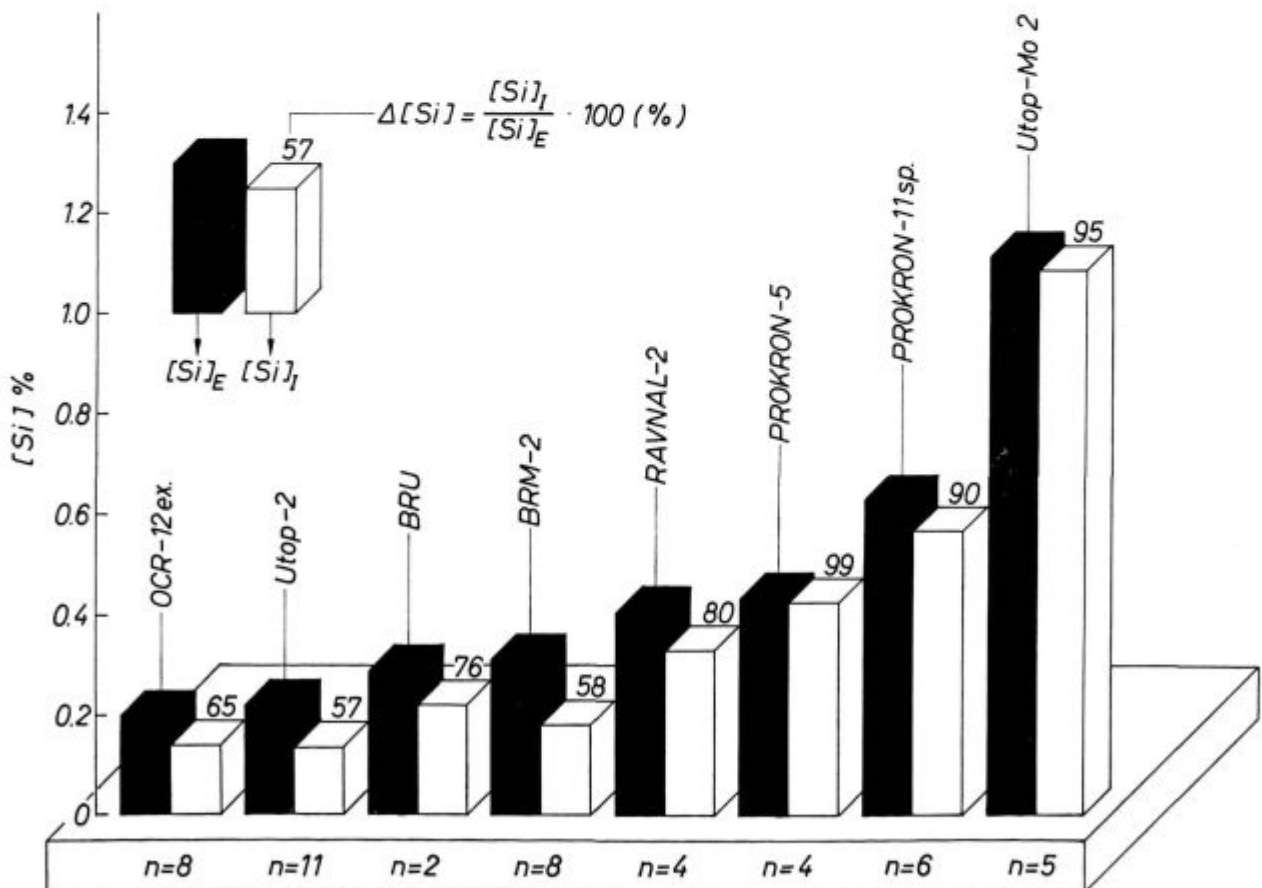
Na sliki 3 je prikazan povprečni izkoristek silicija nekaterih visoko legiranih jekel, pretaljenih pod žlindrami iz sistema $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$. $[\text{Si}]_E$ in

$[\text{Si}]_I$ pomenita povprečno vsebnost silicija v elektrodi in EPŽ-ingotu (glava) in »n« število preiskanih ingotov.

Iz teh rezultatov je razvidno, da je odgor silicija pri jeklih s $\text{Si} \geq 0,4\%$ manjši od 10 %, medtem ko je pri jeklih z nižjim silicijem znatno večji in doseže vrednosti med 40—45 %. Odgor silicija kakor tudi drugih elementov je mogoče preprečiti s kontinuirano dezoksidacijo žindre med procesom taljenja (z doziranjem aluminija v žindro). V začetni fazi taljenja (noga ingota) je bazičnost žindre največja, kar ima za posledico maksimalno aktivnost silicija v jeklu. Kemična analiza žindre, vzete direktno iz kristalizatorja v različnih fazah taljenja jekla, nam pokaže, da vsebnost SiO_2 v žindri s časom taljenja nenehno narašča. Ker vsebnost CaO ne narašča z enako stopnjo, bazičnost žindre pada od noge proti glavi ingota. Posledica tega je poslabšanje pogojev za reakcijo silicija s kisikom in drugimi komponentami sistema kovina — žindra, kakor tudi zmanjšanje stopnje odžveplanja.

4.1.2 Kisik

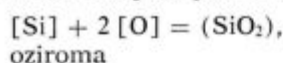
Obnašanje kisika v EPŽ-jeklu je tesno povezano z obnašanjem silicija in aluminija. Pri jeklih,



Slika 3:

Obnašanje silicija med pretaljevanjem visoko-legiranih jekel pod žindro
 $[\text{Si}]_E$, $[\text{Si}]_I$ — vsebnost silicija v elektrodi oziroma ingotu n — število pregledanih ingotov

pri katerih je silicij najmočnejši dezoksidant, je vsebnost kisika v jeklu določena s termodinamičnim ravnotežjem po reakciji⁴:



$$[\% \text{O}]^2 = \frac{a_{\text{SiO}_2}}{K_{\text{Si}, \text{O}} \cdot [\% \text{Si}] \cdot f_{\text{O}} \cdot f_{\text{Si}}^2}$$

Iz te enačbe je razvidno, da bo pri konstantni temperaturi in vsebnosti silicija v jeklu vsebnost kisika v jeklu tem večja, čim večja je aktivnost SiO_2 v žlindri (oziroma čim manjša je bazičnost žlindre).

Analiza vsebnosti kisika v nogi, sredini in glavi EPZ-ingotov potrjuje to ugotovitev, ker kisik praviloma narašča z naraščajočo vsebnostjo SiO_2 v žlindri.

Pri konstantni vsebnosti SiO_2 v žlindri (konstantni aktivnosti SiO_2) in konstantni temperaturi bi morala obstajati (glede na omenjeno odvisnost med $[\text{Si}]$ in $[\text{O}]$) direktna odvisnost med kisikom in silicijem, tj. čim večja je vsebnost silicija v jeklu, tem nižja je vsebnost kisika.

Praktični poskusi so pokazali, da vsebnost silicija le delno vpliva na vsebnost kisika v jeklu in da so vplivi temperature, bazičnosti žlindre in vsebnosti kisika v izhodni elektrodi znatno močnejši.

Na sliki 4 je pokazana povprečna stopnja odprave kisika med pretaljevanjem različnih visoko legiranih jekel.

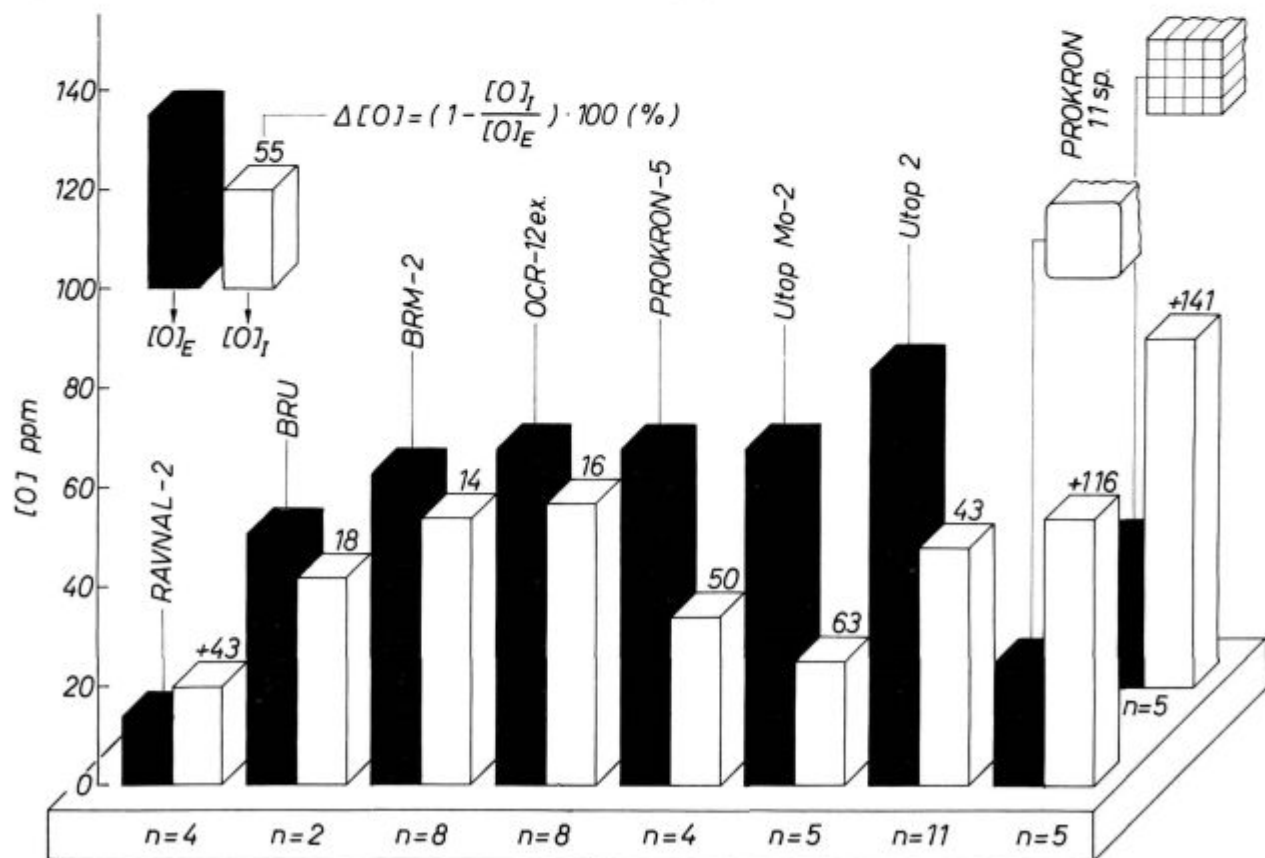
Iz podanih rezultatov je razvidno, da je zmanjšanje kisika v pretaljenem ingotu v povprečju zelo različno, od 14 do 63 %, in da pri jeklih z zelo nizko vsebnostjo kisika v izhodnem stanju (če niso izvršeni nikakršni ukrepi za preprečitev oksidacije — uporaba nevtralne atmosfere, dezoksidacija žlindre med taljenjem) lahko pride celo do povečanja vsebnosti kisika.

Vpliv oksidacije površine elektrode med pretaljevanjem jasno kaže primer pretaljevanja nerjavnega jekla Prokron 11 sp., pri katerem je uporabljena poleg navadne še sestavljena elektroda. Povečanje površine elektrode v razmerju 4:1 je prineslo povečanje vsebnosti kisika v razmerju 2,5:1 pod sicer enakimi ostalimi pogoji pretaljevanja.

4.1.3 Žveplo

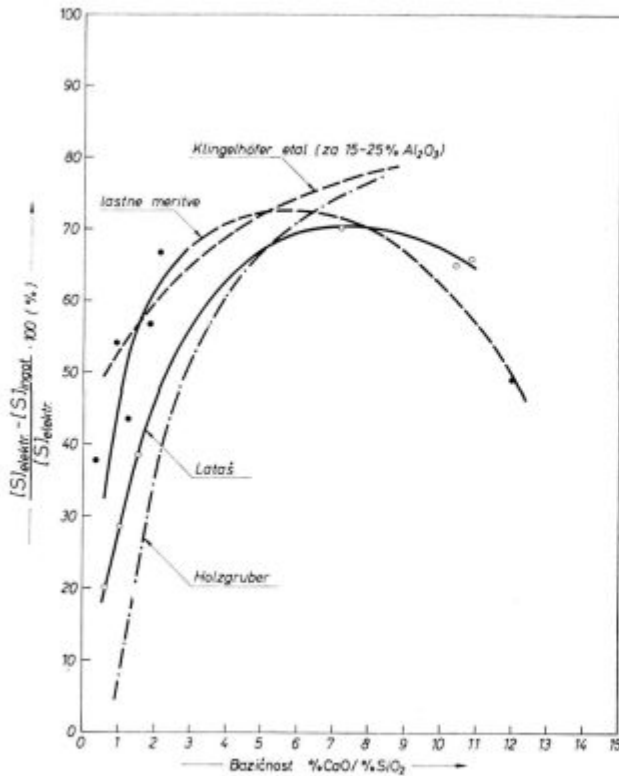
Ena od osnovnih značilnosti EPZ-postopka je visoka stopnja odžveplanja jekla, pretaljenega pod CaF_2 -žlindrami. Stopnja odžveplanja narašča z bazičnostjo žlindre, kot je to razvidno iz slike 5.

Povprečna stopnja odžveplanja analiziranih jekel se giblje med 25—74 %. Absolutna vsebnost žvepla analiziranih jekel leži med 40—100 ppm (glej sliko 6).



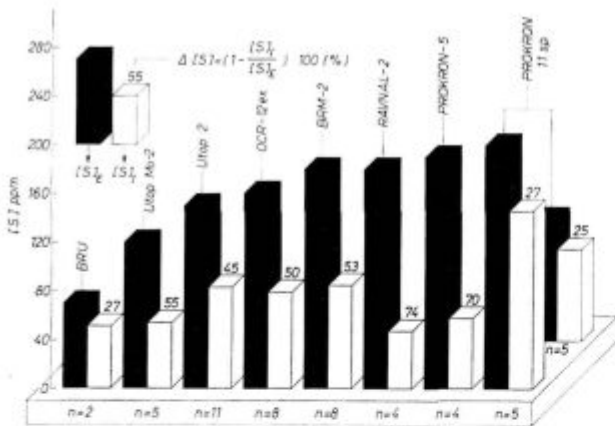
Slika 4:

Obnašanje kisika med pretaljevanjem visoko-legiranih jekel pod žlindro (oznake enako kot na sliki 3)



Slika 5:

Vpliv bazičnosti na stopnja razžveplanja med talenjem jekla po EPZ-postopku (Rezultati Lataša izračunani na osnovi podatkov o sestavi žilindre po talenju jekla in vsebnosti žvepla v elektrodi in ingotih)



Slika 6:

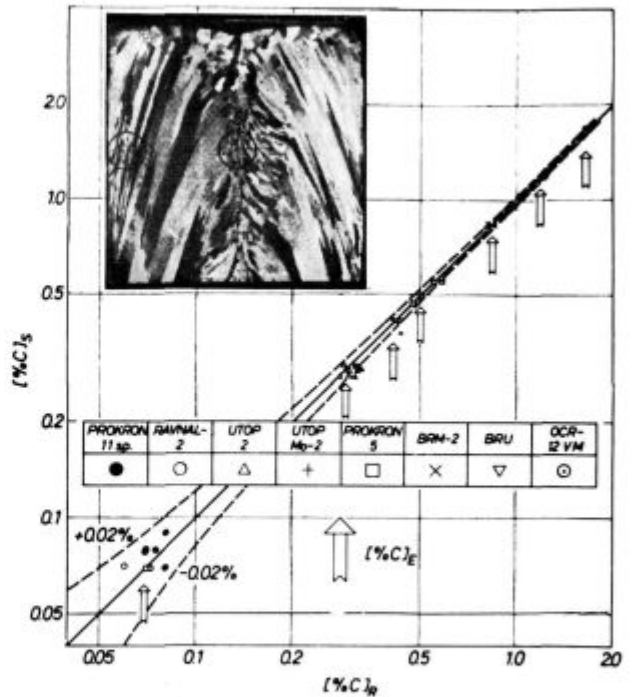
Žveplo in stopnja odžveplanja v visoko-legiranih jeklih pretaljenih po EPZ-postopku (oznake enako kot na sliki 3)

4.1.4 Ostali elementi

Sprememba vsebnosti ostalih elementov v analiziranih kvalitetah jekel je zanemarljivo majhna.

Vsebnost ogljika leži v mejah natančnosti analitske tehnike in ni opaziti bistvenih razlik med nogo in glavo ter robom in sredino EPZ-ingota (glej sliko 7).

Vsebnost aluminija se zmanjšuje z naraščajočo višino ingota, in sicer tem močneje, čim nižja je njegova vsebnost v izhodni elektrodi. Vsebnost



Slika 7:

Odvisnost med vsebnostjo ogljika v obrobem [%C]_R in srednjem delu EPZ-ingota [%C]_S — [%C]_R — povprečna vsebnost ogljika v elektrodi

mangana, dušika, fosforja in bakra je v povprečju 5—10 % nižja kot v izhodni elektrodi.

Vsebnost legirnih elementov in primesi ostane v mejah izhodne elektrode.

4.2 Izboljšanje strukture visoko legiranih jekel

Strukturne značilnosti pretaljenih jekel smo analizirali v litem in predelanem stanju.

4.2.1 Makrostruktura EPZ-ingotov

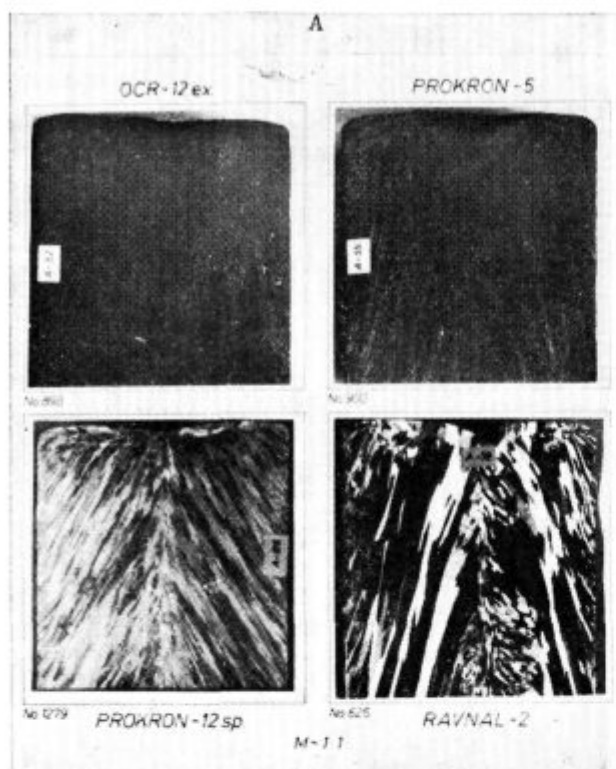
Makrostruktura EPZ-ingotov se razlikuje od makrostrukture konvencionalno litih ingotov predvsem po načinu kristalizacije, kar je pogojeno z načinom odvajanja toplote.

Makrosegregacije in poroznost strukture v srednjem delu ingota, ki so značilne za standardno ulite ingote, zlasti pri večjih dimenzijah, so pri EPZ-ingotih skoraj popolnoma izključene.

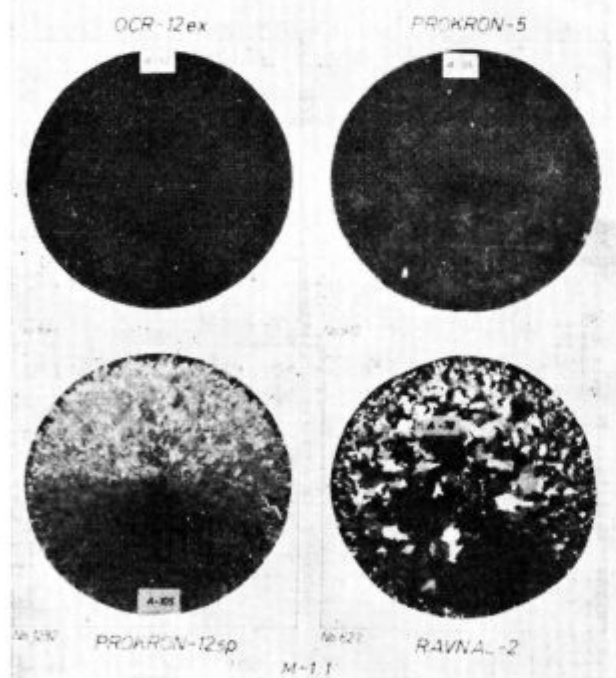
Osnovna značilnost EPZ-ingotov je usmerjena kristalizacija ter gosta in homogena struktura.

Na sliki 8 (A in B) je pokazana makrostruktura v vzdolžni in prečni smeri za štiri različne kvalitete jekel.

- A — 52: ledeburitno jeklo (OCR-12)
- A — 55: martenzitno jeklo s 13 % Cr (Prokron 5)
- A — 105: nerjavno avstenitno jeklo (Prokron 12 sp)
- A — 78: feritno, ognjeodporno jeklo (Ravnal 2)



B



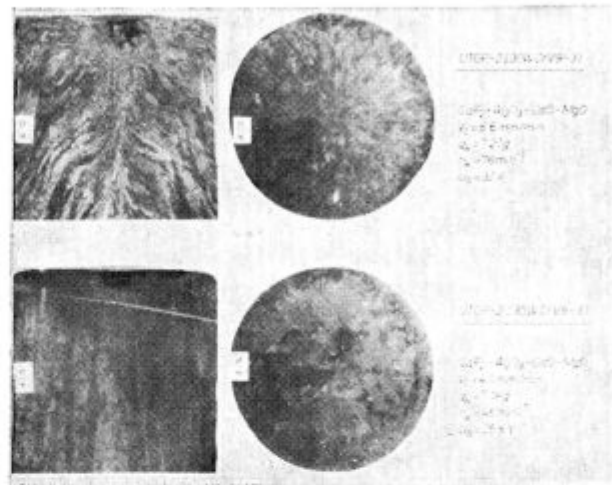
Slika 8:

Makrostruktura nekaterih visoko-legiranih jekel pretaljenih pod žlindro v vzdolžnem (A) in prečnem preseku (B)

Naklon kristalov in gostota jekla je odvisna predvsem od talilnih pogojev, kot so količina dovedene električne moči v žlindro, količina in vrste žlindre, velikost polnilnega faktorja $k = (d_E/D_K)^2$

in drugih, ki v kompleksni obliki vplivajo na hitrost taljenja in s tem tudi na geometrijo kovinske kopeli.

Na sliki 9 je ilustriran primer vpliva hitrosti taljenja na makrostrukturo EPZ-ingotov (hitrost naraščanja ingota — v_I (mm/min) je direktno proporcionalna hitrosti prenosa kapelj — n_K (min⁻¹). Pri omenjenih poskusih je spreminjana količina dovedene moči v žlindrno kopel, medtem ko so vsi ostali pogoji ostali nespremenjeni. Iz primer-



Slika 9:

Makrostruktura utopnega jekla pretaljenega pod žlindro $CaF_2-Al_2O_3-CaO-MgO$ pri dveh različnih hitrostih taljenja

jave makrostruktur je razvidno, da so pri večjih hitrostih naraščanja ingota zelo močni konvektivni tokovi v kovinski kopeli pred kristalizacijsko fronto, kar ima znaten vpliv na kvaliteto pretaljenega jekla.

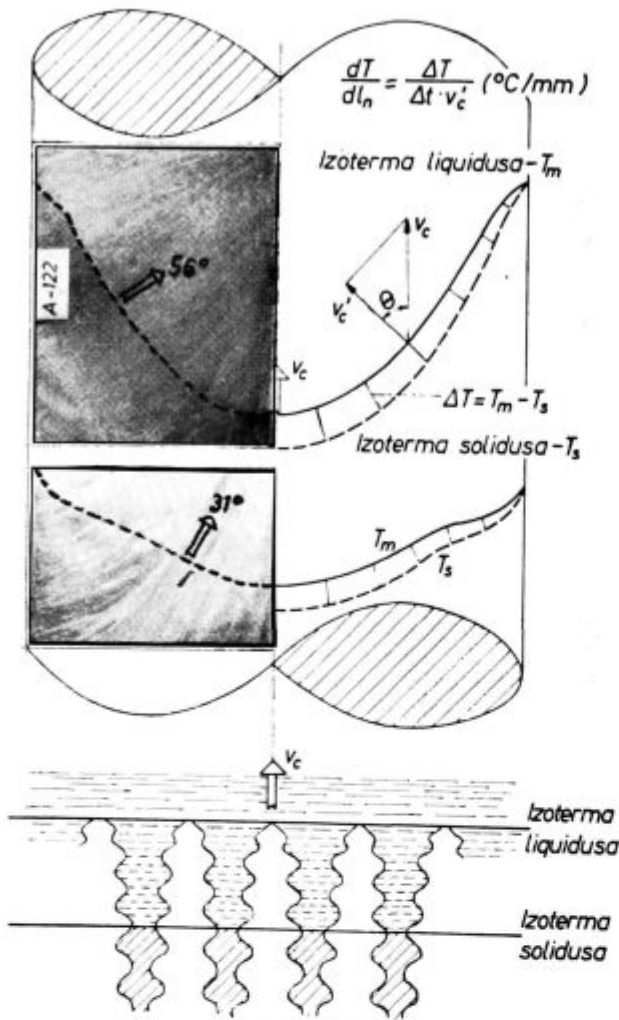
4.2.2 Mikrostruktura EPZ-ingotov

Številne raziskave o kristalizaciji EPZ-ingotov so pokazale, da obstaja direktna odvisnost med mikrostrukturo jekla v litem stanju (npr. razdalja med sekundarnimi vejami dendritov) in temperaturnim gradientom na kristalizacijski fronti⁸.

Toplotni pogoji v kovinski kopeli se pokažejo, kot smo že omenili, v njeni geometriji. Velikost temperaturnega gradienta dT/dl_n (°C/mm) je odvisna od⁹: temperaturnega intervala strjevanja — ΔT , lokalnega časa strjevanja — Δt in komponente hitrosti strjevanja — v_e' (glej sl. 10).

Čim večja je vrednost gradienta dT/dl_n , tem manjša je razdalja med dendritnimi osmi in tem manjša je kemična heterogenost v mikro področjih.

Interval taljenja legiranih jekel z visoko vsebnostjo ogljika (kot so orodna jekla) je ponavadi zelo širok (reda velikosti 100—200° C), zato so tudi lokalni časi strjevanja zelo veliki. Ker velja predpostavka, da karbidi rastejo le v dvofaznem območju, pomeni, da je pri nizki hitrosti taljenja



Slika 10:

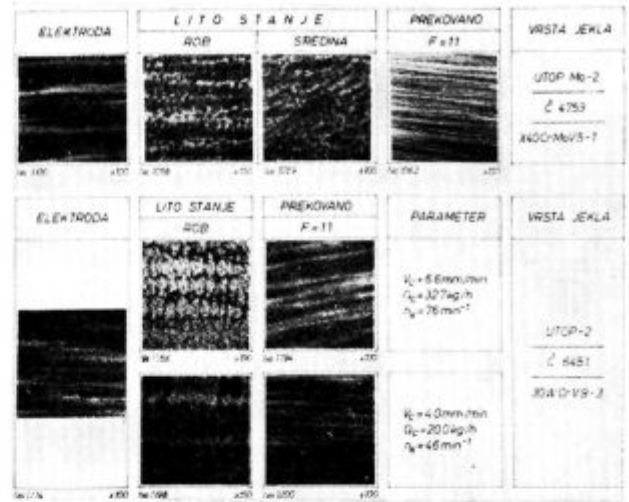
Shematska ponazoritev liquidus in solidus izoterm ter poenostavljen model dvofaznega območja (Mellberg in Sandberg)*

lokalni čas (Δt) daljši in so zato karbidi večji. Seveda je treba pri tem poudariti, da z naraščanjem velikosti ingota narašča tudi čas strjevanja, kar govori, da je potrebno za vsako vrsto jekla določiti optimalno velikost ingota in optimalno hitrost taljenja.

Prednosti EPŽ-postopka v primerjavi s konvencionalnimi postopki izdelave visoko legiranih jekel se kažejo v možnosti vodenja kristalizacije v kontroliranih pogojih (spreminjanje hitrosti taljenja in geometrije kovinske kopeli), ki se manifestirajo v spreminjanju homogenosti jekla (močan vpliv na plastične lastnosti jekel) in čistotě jekla od nekovinskih vključkov.

Na sliki 11 je prikazana mikrostruktura dveh tipičnih predstavnikov orodnih jekel — utop Mo 2 in utop 2. Zaradi lažje primerjave je na sliki podana struktura elektrode (predelano stanje), EPŽ-ingota v litem stanju (rob in sredina) in prekovani ingot s stopnjo deformacije ($F_0/F = 11$).

Iz podane slike je razvidno, da je struktura predelane EPŽ-ingota znatno drobnejša kot

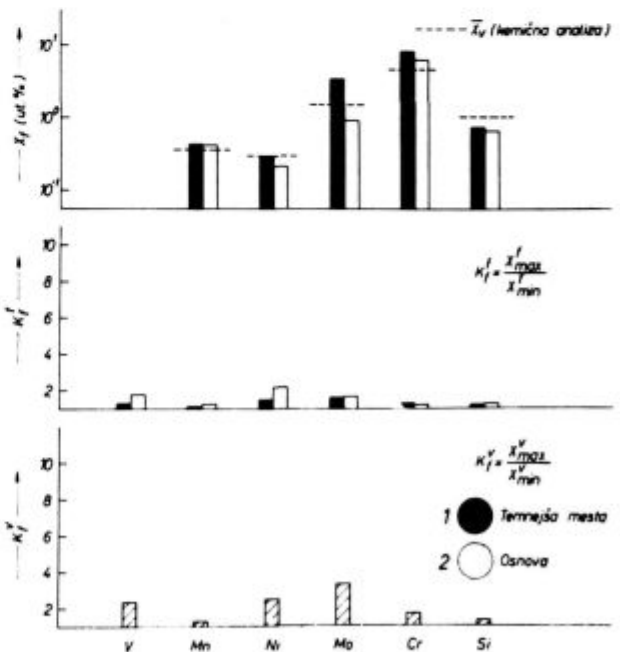
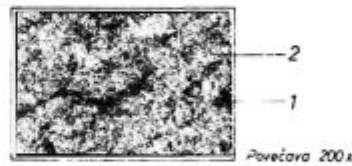


Slika 11:

Mikrostruktura EPŽ-jekel utop Mo 2 in utop 2 v litem in predelanem stanju

struktura izhodnega jekla, čeprav je stopnja deformacije elektrodnega materiala veliko večja.

Vpliv hitrosti taljenja pri jeklu utop 2 v predelanem stanju ni več tako izrazit kot pri makrostrukturi (glej sl. 9), čeprav je trakasta struktura pri manjši hitrosti taljenja drobnejša in enakomernejša.



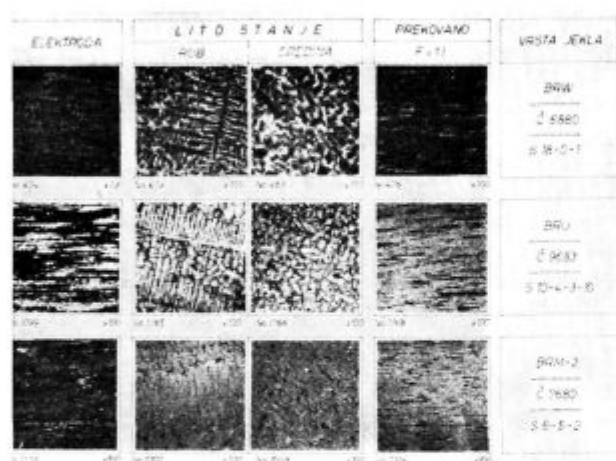
Slika 12:

Porazdelitev kemičnih elementov v mikrostrukturi EPŽ-jekla utop Mo 2 (A-38) v prekovanem stanju ($F = 11$)

Na sliki 12 je prikazana porazdelitev kemičnih elementov v mikrostrukturi EPŽ-jekla utop Mo 2 v prekovanem stanju ($F_0/F = 11$) (preiskave z mikrosondo).

Iz podanih rezultatov je razvidno, da je homogenost analiziranih elementov v eni strukturalni fazi ($k_f^x = x_{\max}^x/x_{\min}^x$) kakor tudi v celotnem vzorcu ($k_f^v = x_{\max}^v/x_{\min}^v$) zelo visoka, kar se ujema z analognimi ugotovitvami drugih avtorjev pri enaki kvaliteti jekla¹⁰.

Kot nadaljni primer kažemo primerjavo mikrostruktur za tri tipične predstavnike brzoreznil jekel: BRW (S 18-0-1), BRU (S 10-4-3-10) in BRM 2 (S 6-5-2), in sicer za izhodno elektrodo, EPŽ-ingot v litem stanju (rob in sredino) in EPŽ-jeklo v predelavnem stanju (stopnja deformacije $F_0/F = 11$) (slika 13).



Slika 13:

Mikrostruktura treh predstavnikov brzoreznil jekel pretaljenih pod žlindro (v litem in predelanem stanju)

Mikroskopska analiza je pokazala, da v liti strukturi EPŽ-ingotov opazamo dve strukturalni komponenti: v območju od roba do približno 1/4 radija ingota so prisotni dendritni kristali z zelo majhno meddendritno razdaljo ($d_{II} = 30-40$ mikronov), medtem ko se v srednji coni ingota nahajajo globularni kristali ($d_{II} = 40-55$ mikronov). Primerjava lite strukture EPŽ-ingotov z analogno strukturo konvencionalno litih ingotov (pri enaki velikosti ingota) pokaže, da je oblika, velikost in porazdelitev karbidov v predelanem stanju znatno ugodnejša kot v izhodnem jeklu (elektrodi). Pri tem moramo poudariti, da se vse omenjene primerjave nanašajo na isti presek in stopnjo deformacije.

Superiornost EPŽ-jekel se pokaže najbolj pri primerjavi strukturalnih lastnosti jekel pri večjih dimenzijah ingotov.

Ugotovljeno je, da stopnja karbidnih segregacij in velikost karbidov narašča linearno s premerom ingota¹¹, iz česar sledi, da EPŽ-tehnologija omogoča izdelavo večjih ingotov pri znatno nižji

stopnji deformacije. Stroške za pretaljevanje jekel je mogoče pri optimalno izbrani tehnologiji v večini primerov kompenzirati s povečanjem izkoristka pri termo-mehanski predelavi.

ZAKLJUČKI

Obsežni laboratorijski poskusi pretaljevanja visoko legiranih jekel po EPŽ-postopku so pokazali, da so osnovne značilnosti pretaljenih jekel:

1. znatno izboljšanje čistoče jekel, zlasti kisika in žvepla, ter v zvezi s tem v znižanju vsebnosti nekovinskih vključkov,

2. izboljšanje kemične in strukturne homogenosti.

Tehnologija izdelave EPŽ-ingotov v laboratorijskih pogojih se razlikuje od industrijskih pogojev v naslednjih značilnostih:

a. rafinacijski učinki žlindre so močno odvisni od temperature procesa, spremembe kemične sestave žlindre in dovedene moči v žlindrno kopel;

b. vpliv polnilnega faktorja — $k = \left(\frac{d_E}{D_K}\right)^2$, koli-

čine žlindre, intenzitete hlajenja in hitrosti taljenja na kvaliteto površine ingota je znatno močnejši kot pri velikih EPŽ-napravah;

3. izrednega pomena je optimalna izbira vrste in količine žlindre.

4. uporaba tekoče žlindre v začetni periodi znatno skrajša obdobje nestabilnosti procesa in prispeva k izboljšanju kvalitete površine v spodnjem delu ingota.

Analiza kemične sestave pretaljenih jekel je pokazala, da je kontrola visoko oksidativnih elementov odvisna od kemizma žlindre in pogojev taljenja. Na splošno veljajo naslednje ugotovitve:

1. vsebnost silicija se zniža v povprečju med 40—45 % pri jeklih z vsebnostjo Si $\leq 0,4$ % in pri jeklih z vsebnostjo silicija nad to mejo manj kot 10 %;

2. vsebnost kisika se pri večini analiziranih jekel zniža od 14 do 60 %. Pri jeklih z zelo nizko vsebnostjo kisika v izhodnem jeklu (20—25 ppm) se opaža delno povečanje vsebnosti kisika;

3. stopnja odžveplanja jekla je odvisna od bazičnosti žlindre, ki kaže maksimalne vrednosti pri $\% \text{CaO} / \% \text{SiO}_2 = 5-8$. Povprečna stopnja odžveplanja pri analiziranih jeklih se giblje med 25—75 %, odvisno od vrste jekla, vsebnosti žvepla v izhodnem materialu in vrste uporabljene žlindre.

4. Sprememba vsebnosti ostalih elementov je pri analiziranih jeklih manjša od 10 %, izjemo predstavljata le Al in Ti, katerih sestava je odvisna od tehnoloških pogojev.

Makrostruktura EPŽ-ingotov je znatno boljše kot pri konvencionalno izdelanih ingotih pri enakem prečnem preseku. Ni opaziti nikakršnih napak tipa, centralne poroznosti, lunkerja, grobih makro vključkov in podobno.

Zaradi zelo ugodnih kristalizacijskih pogojev (kratek čas bivanja taline v dvofaznem območju), je kemična homogenost v mikroobmočju zelo visoka. Meddendritne razdalje (disperznost strukture) in z njimi povezani segregacijski pojavi se bistveno ne razlikujejo od analognih podatkov za konvencionalno izdelane ingote. Kljub temu opazamo, da je porazdelitev in velikost karbidov (npr. v brzoreznih in ledeburitnih jeklih) v predelanem stanju občutno boljša.

Nadaljne preiskave mehanskih lastnosti in eksploatacija EPŽ jekla v praktičnih pogojih bodo pokazali, kakšne so prednosti in ekonomski učinki EPŽ-jekla v primerjavi s konvencionalno izdelanim jeklom. To velja zlasti za visoko legirana jekla, izdelana na večjih EPŽ-napravah, pri katerih je v večini primerov mogoče povečanje cene EPŽ-jekla zaradi pretaljevalnih stroškov kompenzirati z izboljšanjem izkoristka, manjšimi predelevalnimi stroški in predvsem z boljšo kvaliteto jekla.

Literatura

1. Koroušič, B.: Vpliv elektropretaljevanja pod žlindro na kvaliteto jekla za kroglične ležaje (OCR-4 ex. sp.), Zelezarski zbornik 4 (1971) 193—198

2. Koroušič, B., A. Rodič: Informacija o vplivu kinetike nastajanja kapelj na velikost karbidov v brzoreznem jeklu BRM-2 (S6-5-2) pretaljenem po metodi EPŽ, Rudarsko metalurški zbornik 1 (1972) 73—79
3. Koroušič, B.: Metalurške reakcije pri pretaljevanju kvalitetnih jekel pod žlindro (EPŽ), Zelezarski zbornik 1 (1973) 23—29
4. Holzgruber, W., E. Plöckinger: Das Elektroschlacke-Umschmelzen ein neues Verfahren zur Verbesserung der Qualität von Edelmählen, Berg. u. Hüttenmanhefte 3 (1968) 83—93 (1458)
5. Klingelhöfer et al: Ein Beitrag zur Metallurgie des Elektro-Schlacke-Umschmelzen, Archiv Eisenhüttenwes 5 (1971) 299—306 (1459)
6. Holzgruber, W.: Dr.-Diss. Mont. Hochschule, Leoben 1967
7. Lataš, Ju., V.: Issledovanie metallurģičeskikh procesov pri elektrošlakovom pereplave stali, Avtomatič. svaraka 9 (1965) 25—29 (1850)
8. Holzgruber, W. et al: Einfluss der Umschmelzbedingungen auf die Makro- und Mikrostruktur elektroschlacke-umgeschmelzener Blöcke unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse beim Elektrodenwechsel, Neue Hütte 9, 10 (1971) 606—610 (2135)
9. Melberg, P. O., H. Sandberg: Solidification studied by ESR Remelting of High-speed steel, Scand. Journ. of Metall, 2 (1973) 83—86 (2405)
10. Wahlster, M.: Review of current application of ESR and its products, ISI/SMEA, 10—11 januar 1973
11. Kajioka, H. et al: Effects of various melting parameters on the qualities of elektro-slag remelting ingots, Proc. 4th international. symp. on ESR, Tokyo 7—8 June (1973) 102—114

ZUSAMMENFASSUNG

Umfangreiche laboratorische Versuche des Umschmelzens hochlegierter Stähle nach dem ESU Verfahren zeigten folgende grundlegende Eigenheiten der umgeschmolzenen Stähle:

1. Erhebliche Verbesserung der Reinheit des Stahles, besonders Verminderung des Sauerstoffes und Schwefels und die damit verbundene Verminderung des Einschlussgehaltes.

2. Verbesserung der chemischen und Gefügehomo-genität.

Technologie der Erzeugung der ESU Blöcke in laboratorischen Bedingungen unterscheidet sich von den Betriebsbedingungen in folgenden Eigenheiten:

a. Raffinationseffekt der Schlacke ist stark von der Temperaturführung, von der Änderung der chemischen Zusammensetzung der Schlacke und von der zugeführten Energie in das Schlackenbad abhängig.

b. Einfluss des Füllungsfaktors — $K = \left(\frac{d_g}{D_h}\right)^2$ der

Schlackenmenge, der Kühlintensität, der Schmelzgeschwindigkeit auf Oberflächenbeschaffenheit des Ingots ist bedeutend stärker als bei grossen ESU Anlagen.

3. Eine optimale Wahl der Schlackenqualität und Schlackenmenge ist von ausserordentlicher Bedeutung.

4. Die Anwendung flüssiger Schlacke in der Anfangsperiode verkürzt erheblich den Zeitabschnitt des nicht-stabilen Prozesses und trägt zu der Oberflächenqualitätsverbesserung im unteren Blockteil bei.

Analyse der chemischen Zusammensetzung der umgeschmolzenen Stähle zeigte, dass die Kontrolle der Hochsauerstoffaffinen Elemente von der Schlackenchemie und Schmelzbedingungen abhängig ist. Im allgemeinen gelten folgende Feststellungen:

1. Der Siliziumgehalt vermindert sich durchschnittlich von 40—45 % bei Stählen mit Si Gehalt unter 0,4 % und bei Stählen mit Si Gehalt über diese Grenze für weniger als 10 %.

2. Der Sauerstoffgehalt vermindert sich bei den meisten analysierten Stählen von 14 bis 60 %. Bei Stählen mit

sehr niedrigen Sauerstoffgehalt in der Elektrode (20 bis 25 ppm) wird ein leichter Sauerstoffanstieg beobachtet.

3. Der Entschwefelungsgrad des Stahles ist von der Schlackenbasizität abhängig. Maximale Werte werden bei % CaO/% SiO₂ = 5—8 erreicht. Der durchschnittliche Entschwefelungsgrad bei den analysierten Stählen variiert zwischen 25—75 %, abhängig von der Stahlsorte, von dem Schwefelgehalt im Ausgangsstadium und der angewendeten Schlackenqualität.

4. Die Gehaltsänderung anderer Elemente ist bei analysierten Stählen kleiner als 10 %, eine Ausnahme bilden Al und Ti, dessen Zusammensetzung von den technologischen Bedingungen abhängig ist.

Das Makrogefüge der ESU Blöcke ist bedeutend besser als bei den konventionell erzeugten Blöcken beim gleichen Durchmesser. Es können keine Fehler beobachtet werden, wie innere Porosität, Lunker, grobe Makro-einschlüsse und ähnliches.

Wegen der günstigen Kristallisationsbedingungen, (kurzer Aufenthalt der Schmelze im Zweiphasenbereich) ist chemische Homogenität im Mikrobereich sehr hoch. Die Entfernungen zwischen den Dendriten und damit verbundenen Segregationserscheinungen unterscheiden sich nicht wesentlich von den analogen Daten für konventionell erzeugte Blöcke. Es kann trotzdem beobachtet werden, dass die Verteilung und Karbidgrösse, (in Schnelldreh- und ledeburitischen Stählen) im verarbeiteten Zustand bedeutend besser ist.

Die weitere Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften und die Ausbeutung des ESU Verfahrens in praktischen Bedingungen werden zeigen, wie gross die Vorteile und ökonomische Effekte des ESU Stahles im Vergleich zum konventionell erzeugten Stahl sind. Das gilt besonders für hochlegierte Stähle, welche auf grösseren ESU Einheiten erzeugt werden, bei welchen in den meisten Fällen eine Erhöhung des Preises der ESU Stähle wegen der Umschmelzkosten, mit einem besseren Ausbringen, kleineren Verarbeitungskosten, und vor allem, mit einer besseren Qualität kompensiert werden kann.

SUMMARY

Comprehensive laboratory experiments of remelting of high-alloyed steels by ESR process showed the following basic characteristics of the remelted steel:

1. considerably improved purity of steel, mainly in respect to oxygen and sulphur, and consequently the reduced quantity of non-metallic inclusions,

2. improved chemical and structural homogeneity.

Manufacturing technology of ESR ingots in laboratory scale differs from the industrial conditions in the following characteristics:

a. refining effects of slag are highly dependent on process temperature, change in chemical composition of slag, and power input into the slag melt,

b. influence of the parameter $k = \left(\frac{d_E}{D_k}\right)^2$, slag quantity,

cooling rate, and melting rate is considerably higher on the surface quality of the ingot than in an industrial ESR plant,

3. extremely important is the optimal choice of the type and the quantity of slag,

4. application of molten slag in the initial period considerably shortens the instability period of the process and contributes to the improved surface quality in the lower part of the ingot.

Analysis of chemical composition of the remelted steel showed that the control of high oxidative elements depends on the slag chemistry and the conditions of melting. The following findings are generally valid:

1. Silicon content is reduced in average for 40 to 45 % in steel with $Si \leq 0.4\%$, and for 10 % in steel with higher silicon.

2. Oxygen content was in the majority of analyzed steels reduced for 14 to 60 %. In steel with a very low

oxygen content in the initial state (20 to 25 ppm) a partial increase of the oxygen content was observed.

3. The degree of desulphurisation of steel depends on the slag basicity, and the optimal values were obtained when $\% CaO/\% SiO_2$ was 5 to 8. The average degree of desulphurisation in the analyzed steels was 25 to 75 % depending on steel type, sulphur content in the initial state, and on the type of the applied slag.

4. Change in the content of other elements was in the analyzed steels lower than 10 %, the exceptions are only Al and Ti which content depends on the technological conditions of the process.

Macrostructure of ESR ingots is considerably better than in conventionally made ingots of the same cross section. No defects of any type, neither porosity in the centre, nor pipe, coarse inclusions, etc. were observed.

Due to very favourable crystallization (short retention time of the melt in the two-phase region) the chemical homogeneity in the micro-region is very good. Interdendrite distances (structure dispersity) and the connected segregation phenomena does not differ essentially from the analogous data for the conventionally manufactured ingots. But the distribution and the size of carbides was observed (e.g. high speed and ledeburite steels) to be considerably more favourable after the working.

Further investigations of mechanical properties and use of ESR steel for practical purposes shall show the advantages and economical effects of ESR steel comparing it with the conventionally manufactures steel. This is especially valid for high-alloyed steel manufactured in industrial ESR plants where often the higher costs of ESR steel due to remelting can be compensated by the improved yield, lower working costs, and mainly by the better steel quality.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обширные лабораторные опыты переплавки высоколегированных сталей способом ЭШП (электрошлаковый переплав) указали на свойства, которые можно считать как основными переплавленных сталей. Исследования указали на следующее:

1. значительное улучшение чистоты стали в особенности что касается кислорода и серы и, (в связи с этим уменьшение неметаллических включений);

2. улучшение химического состава и однородности структуры.

Надо упомянуть, что технология производства ЭШП-слитков в лабораторных условиях различается от условий в промышленности, и т. в следующем:

а) Эффективность рафинирования шлака очень зависит от температуры процесса, неустойчивости химического состава шлака и теплоты дewardной в ванну при плавки;

б. от влияния фактора навалки — $k = \left(\frac{d_E}{D_k}\right)^2$ количества

шлака, интенсивности охлаждения и быстроты плавки на качество поверхности слитка гораздо сильнее чем это случай при больших установках ЭШП-способа;

3. большое значение имеет оптимальный выбор сорта и количества шлака;

4. Применение жидкого шлака в начальной этапе процесса значительно сокращает период неустойчивости процесса и способствует улучшению качества поверхности нижней части слитка.

Анализ химического состава переплавленных сталей показал, что контроль элементов высокой окислительности зависит от химизма шлака и от условий при плавки.

В общем можно считать с следующими констатациями:

1. При сталях с содержанием $Si \leq 0.40\%$ содержание кремния уменьшается в среднем за 40—45 % а при сталях с выше 0.40 % Si, уменьшение кремния в шлаке не превышает 10 %;

2. Содержание кислорода в большинстве анализированных сталей уменьшено от 14 до 60 %. При сталях с начальным очень

низким кислородом установлено частично незначительное повышение O₂;

3. Степень десульфурации стали зависит от основности шлака, максимальная предельная величина которого $\% CaO : \% SiO_2 = 5 - 8$. Степень десульфурации анализированных сталей была в среднем в пределах 25—75 % а зависела от содержания серы в основном материале и от сорта употребленного шлака;

4. Изменение содержания остальных элементов анализированных сталей не превышало 10 %; исключение представляли только элементы Al и Ti, содержание которых зависит от технологических условий производства.

В сравнении с нормальным производством, микроструктура ЭШП-слитков гораздо лучше, при одном и том же сечении. Не обнаружены никакие пороки как и, пр.: усадочные раковины, центральная пористость, грубые макро-включения и подобное.

Вследствие того, что расплавленный металл находится в двухфазной среде очень короткое время, т. е. в весьма благоприятных условиях для кристаллизации то химическая однородность в микро-зоне очень хорошая.

Расстояние между дендритами (структурная дисперсность) и, в связи с этим, появления сегрегации существенно не различается от аналогичных данных конвенционально произведенных слитков. Несмотря на это, установлено, что поразделение и величина карбидов (и, пр. в быстрорежущих и ледебуритных сталях) в обработанном состоянии существенно лучше.

В продолжении исследований механических качеств Э Ш П-сталей и её применении покажут какие преимущества и какой экономический эффект можно ожидать при эксплуатации этой стали в сравнении с сталями конвенционального производства. Это касается главным образом высококачественных сталей, произведенных в больших Э Ш П-установках при которых, в большинстве случаев, увеличение расходов вследствие переплавки компенсируется улучшением выхода, уменьшением расходов переработки и, в особенности, улучшением качества стали.