

Vpliv modifikatorjev na mehanizem strjevanja, homogenost in naravo karbidov brzoreznih jekel, izdelanih po postopku EPŽ

UDK: 669, 4.018,252.3
ASM/SLA: D8n, AD — ps 6
UDK: 669.046.428
ASM/SLA: B15r

B. Koroušić, J. Rodič, A. Rodič, F. Vodopivec, J. Pšeničnik

Pretaljevanje brzoreznega jekla Č.7680 (BRM-2) po EPŽ-postopku: Študij dodatka modifikatorja Al + Mg + Ti + N na makro- in mikrostrukturo jekla v litem in predelanem stanju. Kritična ocena vpliva dodatkov modifikatorja na velikost in porazdelitev karbidov. Mehanske lastnosti jekla: velikost avstenitnega zrna, vpliv temperature kaljenja na velikost avstenitnega zrna, trdota jekla, popuščni efekti.

UVOD

Kvaliteta orodnih jekel in posebej brzoreznih jekel, izdelanih s konvencionalnimi metodami, je močno odvisna od lite strukture. Značilnost brzoreznih in drugih orodnih jekel je tvorba grobe karbidne (ledeburitne) mreže, ki jo je potrebno eliminirati (»razbiti«), če želimo doseči visoko kvaliteto jekla.

Standardni načini za učinkovito odpravo karbidne mreže, t.j. kontrolirana toplotno-mehanska predelava, se uspešno izvaja, ko gre za izdelke, pri katerih je mogoče doseči visoko stopnjo predelave (stopnja redukcije nad 90 %).

V vseh drugih primerih je vprašanje odprave grobe karbidne mreže zelo aktualno. Zato že dalj časa delajo v vseh razvitih državah poskuse za razvoj in aplikacijo metod, ki bi imele učinkovit vpliv na mehanizem nastanka karbidov v fazi strjevanja.

Načelno obstajata le dve poti, kateri je z manjšim ali večjim uspehom mogoče uporabiti.

1) sprememba strjevalnih pogojev (regulacija hitrosti strjevanja, mešanje taline, itd.)

2) modifikacija lite strukture.

V literaturi je precej podatkov o industrijskih in laboratorijskih preiskavah, ki slonijo na principih, opisanih pri točki 1. Praktično ta metoda ni dala pozitivnih rezultatov.

Znatno manj podatkov zasledimo v literaturi o modifikaciji lite strukture orodnih jekel^[1-9].

Razvoj EPŽ-postopka je prinesel nove možnosti na področju modifikacije lite strukture zaradi številnih prednosti, ki jih ima ta postopek v primerjavi s standardnim litjem jekel.

V literaturi zasledimo nekaj rezultatov v tej smeri^[10-14]. Kritično oceno dobljenih rezultatov ni mogoče podati zaradi pomanjkanja natančnih podatkov o poteku poskusov in nadaljnji termomehanski predelavi. Na splošno je mogoče ugotoviti, da imajo dodatki modifikatorjev preko porabne elektrode, oziroma preko žilindre nekatere pozitivne učinke, ki jih lahko vrednotimo kot uspešne rešitve.

Praktični poskusi

Praktične poskuse električnega pretaljevanja pod žlindro smo opravljali na polindustrijski EPŽ-napravi na Metalurškem inštitutu v Ljubljani. EPŽ-naprava je najmodernejšega tipa s kontinuirano regulacijo sekundarne napetosti in s premično kokilo.

Elektrodni material

EPŽ-elektrode so bile izdelane v železarni Ravne. Njihova povprečna kemična sestava je prikazana v tabeli 1.

Elektrode so bile ulite v pesek in naknadno žarjene, ker se je pokazalo, da med taljenjem elektrod v »surovem stanju« nastajajo razpoke ali celo trenutne prekinitev procesa taljenja.

Ti problemi so z uvajanjem žarjenja v celoti odpravljeni.

Izbira žlinder

Pri izdelavi jekel z dvizno kokilo je potrebno upoštevati dejstvo, da na kvaliteto površine ingota vpliva veliko več parametrov kot pri stoječi kokili. Zato smo se odločili za standardno žlindro z interno oznako M 11.

Kemična sestava žlinder pred pretaljevanjem in po njem je prikazana v tabeli 2.

Pred pričetkom taljenja jekla smo žlindro žarili 8 ur na temperaturi 800 °C in jo vročo šaržirali v kokilo. Na ta način smo vsaj izključili vpliv zračne vlage v začetni fazi taljenja.

Tabela 1. Kemična sestava elektrodnega materiala

Vrsta jekla	Št. šarže	Kemična sestava										%Al _c	%Al _k
		%C	%S	%Si	%Cr	%V	%W	%Cu	%Mn	%Mo	%Ti		
Č.7680	Chg. 69561	0,80	0,018	0,35	3,80	2,03	6,40	0,21	0,27	5,65	0,10	—	—
Č.7680 (BRM-2)	E.144*	0,80	0,014	0,38	3,82	1,90	6,06	0,23	0,28	5,26	0,09	0,043	0,020

* Vsebnost plinov v elektrodi: O = 104 ppm, N = 316 ppm.

Opozorjamo na vsebnost titana v jeklu, ki služi kot osnovni modifikator že v izhodnem stanju.

Tabela 2. Kemična sestava EPŽ-žlinder pred pretaljevanjem in po njem jekla Č.7680 (BRM-2).

Jeklo	Oznaka ingota	Kemična sestava žlindre $\left(\begin{array}{c} \text{pred taljenjem jekla} \\ \text{po taljenju jekla} \end{array} \right)$										B = $\frac{\%CaO}{\%SiO_2}$
		%CaF ₂	%Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%TiO ₂	%SiO ₂	%MnO	%FeO*	%Cr ₂ O ₃	%S	
Č.7680 (BRM-2)	B.143	39,90	22,43	29,70	Ø	Ø	3,05	Ø	0,13	Ø	0,12	9,74
		29,30	27,90	29,00	0,50	0,67	6,00	0,15	0,514	0,365	0,21	4,83
	B.144	39,90	22,43	29,70	Ø	Ø	3,05	Ø	0,13	Ø	0,12	9,74
		26,60	24,50	29,40	1,50	2,05	3,90	0,06	1,286	1,18	0,26	7,54
	B.149	39,90	22,43	29,70	Ø	Ø	3,05	Ø	0,13	Ø	0,12	9,74
		31,20	24,90	29,70	1,80	1,50	3,40	0,09	0,386	0,55	0,34	8,74

* V žlindri B.144 smo zasledili nekaj kapljic jekla

Izbira modifikatorja

V literaturi najdemo zelo skope podatke o uporabi različnih modifikatorjev za brzorezna jekla. Zlasti so pomanjkljivi podatki o načinu dodajanja in naravi modifikatorjev pri pretaljevanju brzorezних jekel po EPŽ-postopku.

Zato smo se v tej študiji lotili selekcije vseh možnih kombinacij in prišli do naslednje sestave: modifikator MO-4* na osnovi Ti+Al+Mg z določeno količino dušika.

Dodatki aluminija in magnezija imajo nalogo reducirati vsebnost Fe- in Mn-oksidi v žlindri in tako preprečiti prekomerno oksidacijo titana.

Vodenje postopka taljenja jekel

Razlika med standardnim načinom taljenja jekel v dvižni kokili in postopkom z dodatkom modifikatorja se kaže predvsem v znatno večji nestabilnosti električnih parametrov. Vzroki za to so v dejstvu, da vsak dodatek v žlindro izziva spremembo fizikalno-kemičnih lastnosti žlindre (električna upornost, viskoznost, medfazna-površinska napetost itd.).

Tehnološki podatki o taljenju jekla Č. 7680 (BRM-2).

Potek taljenja je bil naslednji: Prvi ingot (B.143) smo pretalili v celoti brez dodatkov v žlin-

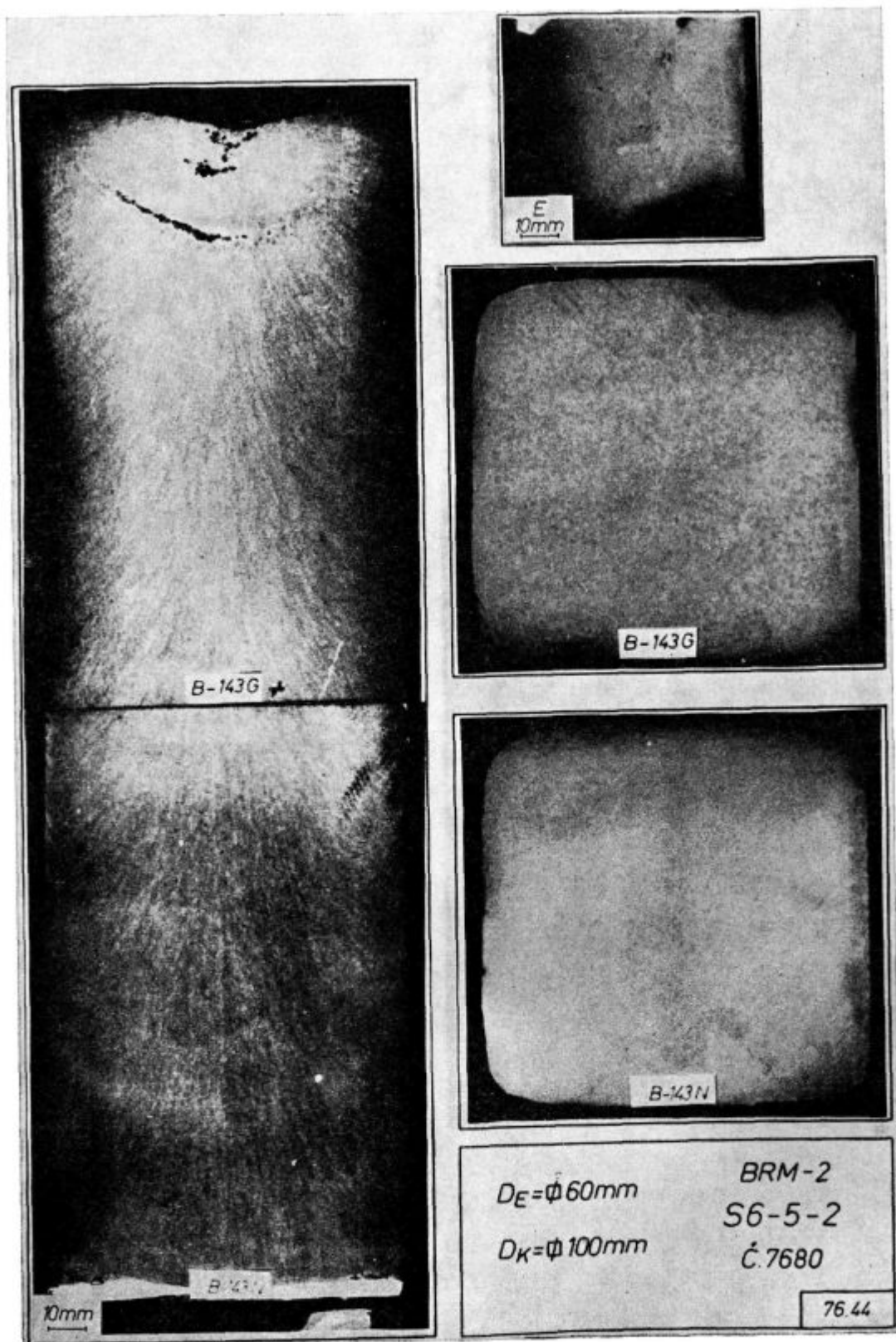
Tabela 3. Tehnološki parametri taljenja brzoreznega jekla Č.7680 (BRM-2) z dvižnim kristalizatorjem.

Parameter	Dimenzija	Številka ingota		
		B.143	B.144	B.149
Teža ingota	kg	60,6	62,1	60,5
Višina ingota	mm	700	725	700
Prečni presek ingota	cm ²	107	106	107
Prečni presek elektrode	cm ²	38,8	39,0	39,7
Celotni čas taljenja	min	84,60	61,70	69,75
Hitrost taljenja	kg/h	43,56	59,80	52,04
Hitrost kristaliz. ingota	mm/min	8,28	11,76	10,04
Moč	kW	70±4	68±4,5	75±2
Število kapelj	min ⁻¹	170	170	174
Povprečna teža kapelj	g	4,26	5,84	4,98
Količina žlindre	kg	1900	1900	1900
Količina dodatka modif. v žlind.**	%	Ø*	1,37	0,68
Polnilni faktor (K=A _E /A _K)	—	0,35	0,36	0,36

* V žlindro je dodano dejansko 65 g Al za dezoksidacijo žlindre.

** Računano na težo pretaljenega jekla.

* Sestava modifikatorja MO-4 je zaščitena na Metalurškem inštitutu kot interna inovacija.



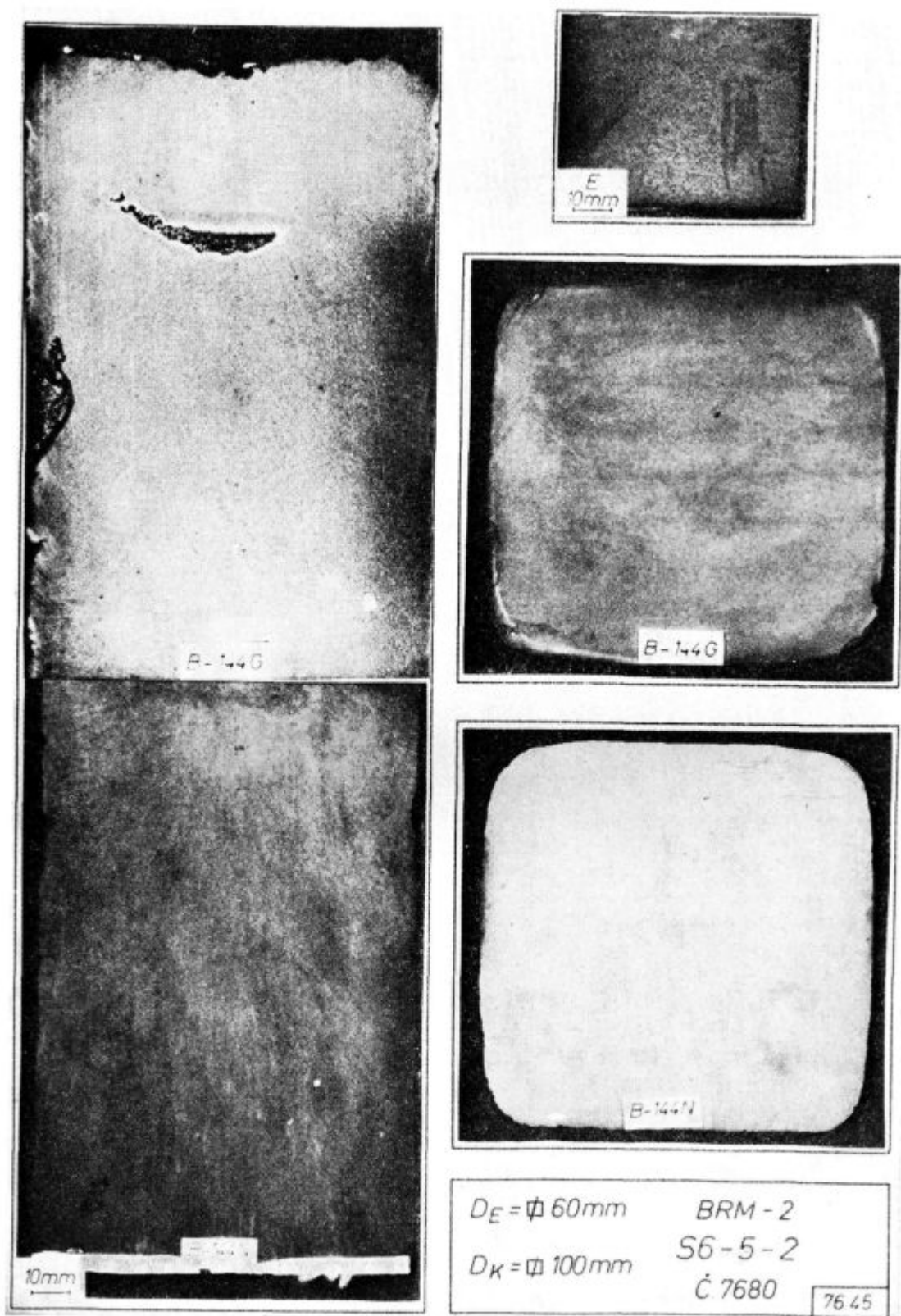
Slika 1:

Makrostruktura EPZ-jekla Č.7680 (BRM-2) v litem stanju (ca. 0,1 % Ti v elektrodi), brez dodatkov modifikatorja v žlindro
E: elektroda, G: glava EPZ-ingota, N-noga EPZ-ingota

Fig. 1

Macrostructure of Č.7680 (BRM-2) ESR steel as cast (about 0.1 % Ti in electrode), without addition of modifying agent
in to the slag

E: electrode, G: head of ESR ingot, N: foot of ESR ingot

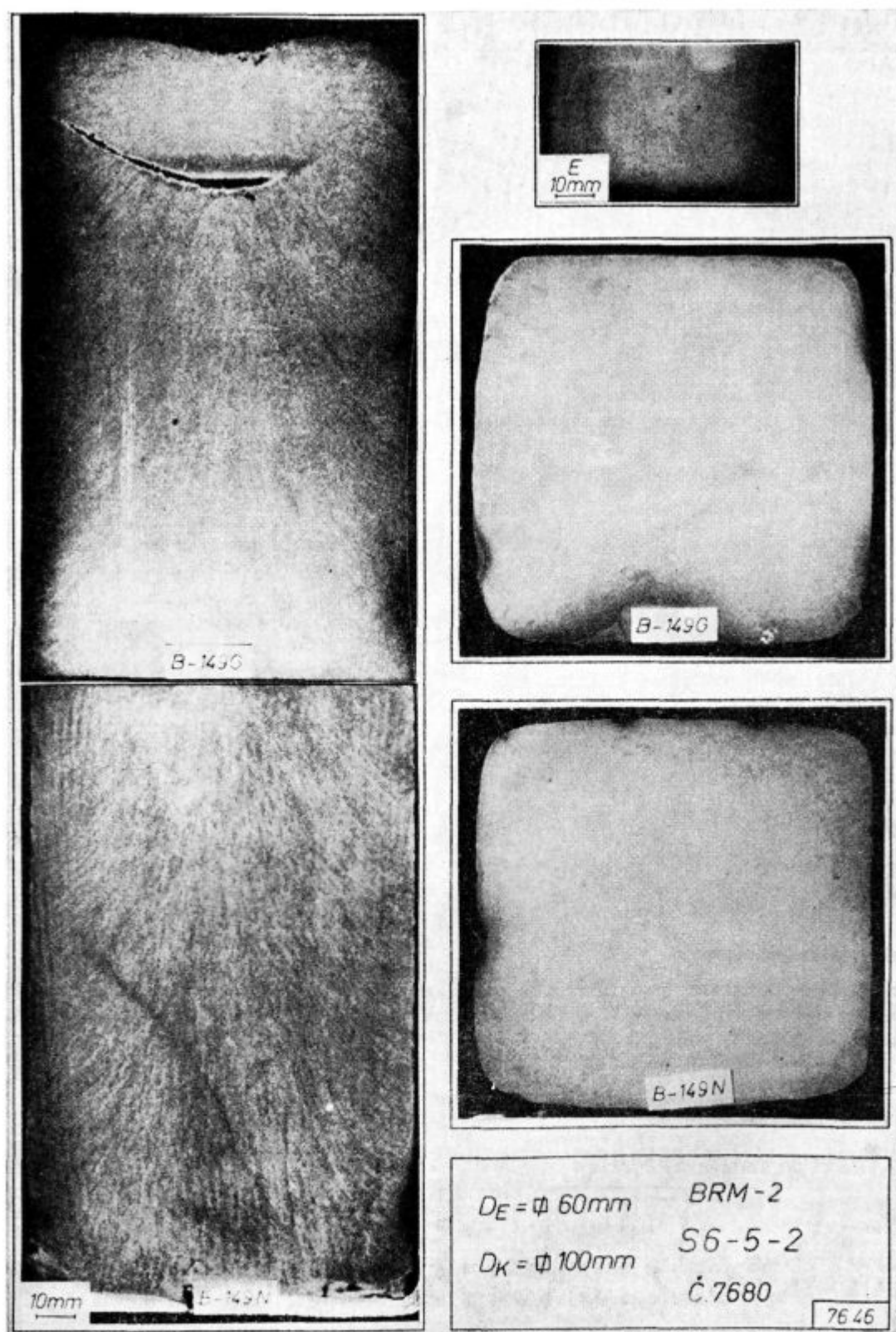


Slika 2:

Makrostruktura EPZ-jekla, Č.7680 (BRM-2) v litem stanju (jeklo je modificirano z MO.4)
E: elektroda, G: glava EPZ-ingota, N: noga EPZ-ingota

Fig. 2

Macrostructure of Č.7680 (BRM-2) ESR steel as cast (steel was modified with MO.4)
E: electrode, G: head of ESR ingot, N: foot of ESR ingot



Slika 3:

Makrostruktura EPZ-jekla Č 7680 (BRM-2) v litem stanju (modificiran z MO 4)
 E: elektroda, G: glava EPZ-ingota, N: noga EPZ-ingota

Fig. 3

Macrostructure of Č.7680 (BRM-2) ESR steel as cast (modified with MO.4)
 E: electrode, G: head of ESR ingot, N: foot of ESR ingot

dro. Naslednji ingot (B.149) smo pretalili z dodatkom modifikatorja MO-4 v količini 0,68 % in zadnji ingot (B.144) ravno tako z dodatkom modifikatorja MO-4 v dvojni količini, tj. 1,37 % od teže pretaljenega jekla.

Osnovni tehnološki podatki o taljenju poskusnih ingotov so razvidni iz *tabele 3*.

Analiza eksperimentalnih podatkov kaže, da dodatki modifikatorja v žlindro delno vplivajo na kinetiko tvorbe kapelj in s tem na celotne odnose glede hitrosti taljenja jekla. Ta vpliv se je manifestiral tudi na kvaliteto površine ingotov. Kvaliteta površine ingota je skoraj direktno proporcionalna količini dodatka v žlindro pri nespremenjenih električnih parametrih. Povečanje hitrosti taljenja tolmačimo z dodatnim eksotermnim efektom, ki ga ima modifikator pri raztapljanju v žlindri, oziroma kovinski kopeli, in vplivom modifikatorja na medfazno površinsko napetost na kontaktni površini elektroda-žlindra.

Rezultati preiskav

Kemična sestava jekla

Kemično sestavo jekla smo ugotavljali na dveh nivojih v EPŽ-ingotu; tj. pri »glavi« in »nogi« ingota¹⁵. V tabeli 4 je prikazana kemična analiza vseh preiskanih ingotov.

Za oceno uspešnosti dodatka modifikatorja je vsekakor pomembno vprašanje »izkoristkov«, oziroma »odgora« posameznih elementov.

Primerjava dejansko dodanih količin elementov modifikatorja (v elektrodi + dodatki preko žlindre) z njihovo količino v pretaljenem jeklu je pokazala, da znašajo izkoristki aluminija 33 % in titana okoli 30 %.

Metalografske preiskave

Metalografske preiskave strukture EPŽ-jekel smo opravili na vzorcih, vzeti iz EPŽ-ingotov (lito stanje), in kovanih palic (predelano stanje). Uporabljene so bile standardne metode za makro- in mikro jedkanje jekla¹⁵.

Vpliv dodatka modifikatorja na makrostrukturo jekla, kot je bilo pričakovati, ni opazen (glej sliko 1, 2 in 3). V strukturi ingotov so komaj vidne polkrožne plasti, ki nakazujejo geometrijo tekoče kopeli.

Mikrostruktura jekla Č. 7680 (BRM-2) v litem stanju

Izhodni material (elektroda-lito stanje)

Pregledali smo prečni vzorec od zunanjega roba do sredine elektrode. Dendritne strukture ni bilo opaziti, zrna so bila globulitična. Na nekaterih mestih smo opazili izredno kratke dendrite, ki so imeli le 3–4 sekundarne veje.

Evtektični karbidi so bili igličaste oblike in pahljačasto razprti, tu in tam so bili v evtektiku masivni karbidi (predvsem v sredini elektrode). Opazili smo titanove karbonitride in večje aluminatne vključke.

Struktura v žarjenem stanju je bila: zrnati perlit ter evtektični in sekundarni karbidi.

Opaziti je tudi določeno razliko v velikosti globulitičnih karbidov med zunanjo in površinsko plastjo, oziroma sredino vzorca. V zunanjem pasu so globuliti manjši kot v sredini. Obliko evtektičnih karbidov, strukturo in velikost globulitov elektrode vidimo na sliki 4 (povečano $\times 100$ in sliki 5 (povečava $\times 500$).

EPŽ-ingot, B.143 (brez dodatka modifikatorja v žlindro)

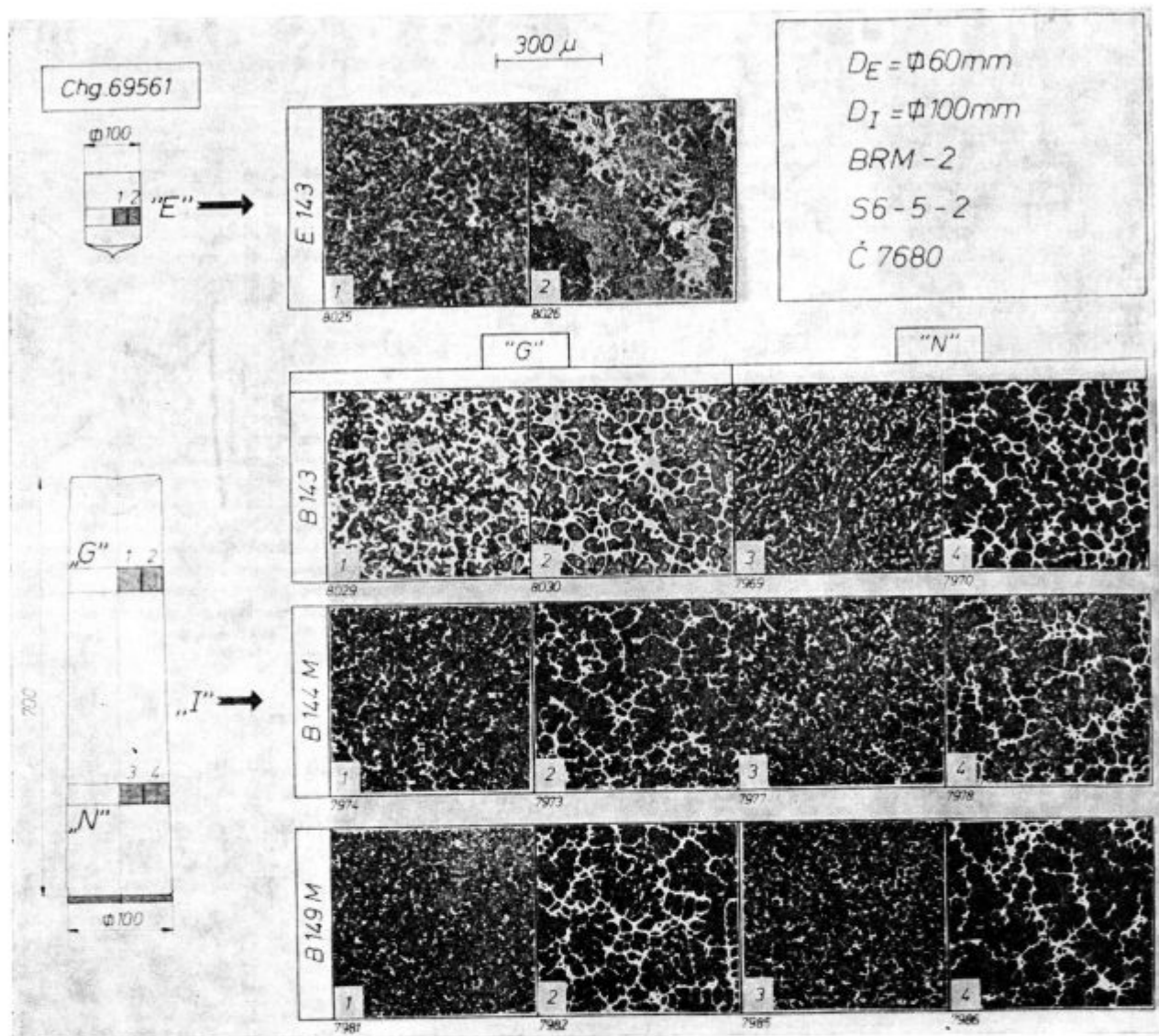
Iz EPŽ-ingota v žarjenem stanju smo izrezali po 4 obruse (glej sliko 4, oziroma sliko 5), ki so bili nato kaljeni in popuščani.

Metalografska analiza je pokazala, da ni opaziti klasične dendritne kristalizacije z močno primarno vejo in enakomernimi sekundarnimi vejami. Osnovna značilnost strukture je globulitična kristalizacija. Globulitna zrna obdaja praviloma evtektik. Evtektični karbidi so v značilni paličasto-lamelarni obliki, tu in tam so pahljačasto razporejeni.

Tabela 4. Kemična sestava EPŽ-jekla

Kvali- teta	Oznaka ingota		Kemična sestava jekla (»G« — glava, »N« — noga)														
			%C	%S	%Si	%Cr	%Ni	%V	%W	%Ti	%Al _c	%Al _k	%Cu	%Mn	%Mo	%P	%O
BRM-2	B.143	G*	0,83	0,009	0,28	3,83	0,25	1,94	6,39	0,04	0,026	0,022	0,21	0,28	5,71	0,024	0,0070
		N*	0,82	0,008	0,31	3,85	0,26	1,95	6,41	0,04	0,039	0,028	0,23	0,28	5,68	0,023	0,0072
BRM-2	B.144	G*	0,79	0,011	0,34	4,12	0,25	1,86	6,30	0,14	0,052	0,051	0,22	0,28	5,47	0,021	0,0077
		N*	0,82	0,010	0,34	4,13	0,26	1,95	6,38	0,11	0,056	0,049	0,22	0,28	5,57	0,024	0,0108
BRM-2	B.149	G*	0,82	0,010	0,30	4,00	0,25	1,87	6,43	0,08	0,032	0,029	0,22	0,28	5,77	0,023	0,0066
		N*	0,82	0,006	0,33	4,01	0,26	1,90	6,51	0,08	0,045	0,044	0,23	0,28	5,74	0,024	0,0074

* G — glava, N — noga EPŽ-ingota



Slika 4:
Mikrostruktura jekla Č.7680 (BRM-2) v litem stanju, in si. er:
E: elektroda z 0,1 % Ti

B.143: pretaljen ingot brez dodatkov v žlindro
B.144: pretaljen ingot z dodatkom modifikatorja MO.4 (1,37 %)
B.149: pretaljen ingot z dodatkom modifikatorja MO.4 (0,68 %)

Fig. 4

Microstructure of Č.7680 (BRM-2) ESR steel as cast: E: electrode with 0.1 % Ti
B.143: remelted ingot without addition to slag
B.144: remelted ingot with added MO.4 modifying agent (1.37 %)
B.149: remelted ingot with added MO.4 modifying agent (0.68 %)

Lamele, oziroma karbidne palice so tanke in krajše kot pri elektrodi, odebeljenih karbidov je bistveno manj kot pri elektrodi. V vzorcih iz predela glave smo opazili v evtektiku bolj grobe martenzitne igle in več zaostalega avstenita kot v osnovni masi.

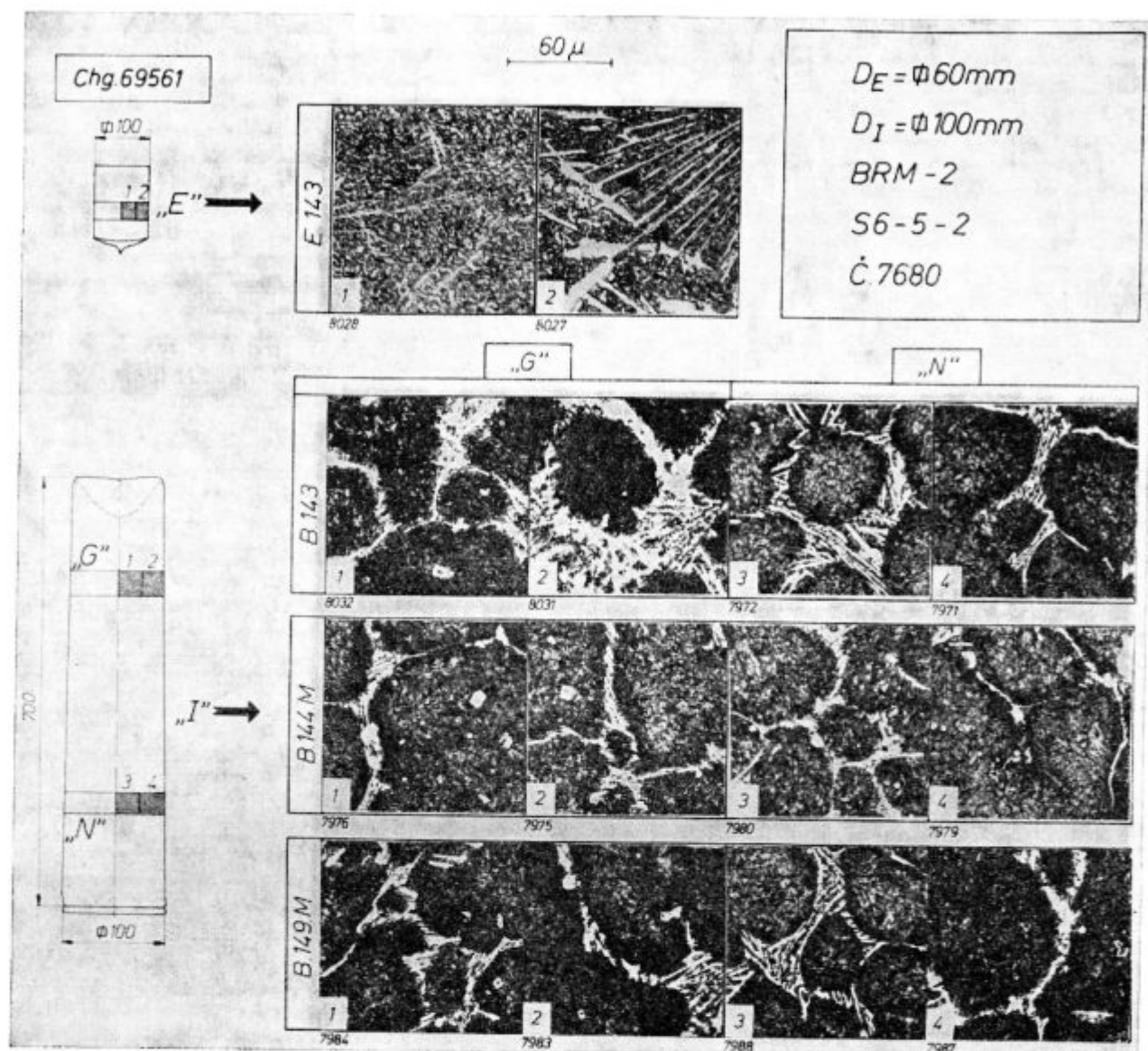
V osnovi zasledimo titanove karbonitride, nekaj jih je opaziti tudi med evtektičnimi karbidi.

Zanimivo dejstvo je, da so avstenitna zrna izredno drobna. Ocena velikosti zrna po Snyder Graffu je pokazala SG 16, kar je za brzorezna jekla v litem stanju zelo ugodno.

EPŽ-ingoti B.144 in B.149 (z dodatkom modifikatorja v žlindro)

Mikrostruktura je podobna kot pri ingotu B.143. Dendritne strukture ni opaziti, temveč le globulitna zrna. Globulitna zrna so drobna: ob robu 25—35 mikronov, v sredini je njihov povprečni premer 40—60 mikronov.

Nitridi so poligonalne oblike in v primerjavi z ingotom B.143 večji. Na sliki 5 se lepo vidi njihova prisotnost pod mikroskopom in značilne barve. Evtektični karbidi so v obliki iglic, oziroma



Slika 5:
Mikrostruktura jekla Č.7680 (BRM-2) v litem stanju, in sleer:
E: elektroda z 0,1 % Ti

B.143: pretaljen ingot brez dodatkov v žlindro
B.144: pretaljen ingot z dodatkom modifikatorja MO.4 (1,37 %)
B.149: pretaljen ingot z dodatkom modifikatorja MO.4 (0,68 %)

Fig. 5
Microstructure of Č.7680 (BRM-2) ESR steel as cast: E: electrode with 0.1 % Ti
B.143: remelted ingot without additions to slag
B.144: remelted ingot with added MO.4 modifying agent (1.37 %)
B.149: remelted ingot with added MO.4 modifying agent (0.68 %)

lamel. Avstenitna zrna so drobna, njihova velikost je dokaj identična kot pri ingotu B.143 in znaša ocena po Snyder-Graffu SG 17.

Preiskava jekla Č.7680 (BRM-2) v predelanem stanju ($F_0/F = 16$)

Metalografske preiskave vzorcev, vzetih iz kovanih palic, kvadrat 25 mm v vzdolžni smeri, so pokazale, da ima modificirano jeklo vse tiste značilnosti, ki so znane za brzorezno jeklo Č.7680

(BRM-2). Ni bilo opaziti nikakršnih bistvenih razlik v mikrostrukturi.

Večjo pozornost smo posvetili dodatnim raziskavam, ki bi bolj odkrile vpliv modifikatorjev:

- ocena velikosti karbidov,
- karbidne izceje po tabeli ŽR in tabeli Prüfblatt 1615,
- ocena velikosti avstenitnega zrna po Snyder-Graffu,
- kalilna vrsta v temperaturnem intervalu 1180 — 1240 °C,

- izdelava popuščnih diagramov,
- določitev popuščnih efektov.

Rezultati prvih treh preiskav, t. j. ocene velikosti karbidov, karbidnih izcej po metodi 2R in tabeli Prüfblatt 1615 in velikosti avstenitnega zrna so prikazani v tabeli 5.

Tabela 5. Rezultati preiskav jekla Č.7680 (BRM-2).

Oznaka ingota	Karbidne izceje 2R	Prüfblatt 1615	SG	Velikost karbidov
B.143, kv. 25	4,5	$1\frac{1}{2}$	15	5,5
B.144, kv. 25	4,5	$2\frac{1}{1}$	16	5,2
B.149, kv. 25	4,5	$2\frac{1}{1}$	16	5,6

Iz teh podatkov je razvidno, da je izdelano jeklo sposobno za izdelavo kakršnegakoli orodja.

Kalilna vrsta

Kalilno vrsto smo izdelali iz kovanih palic, kv. 25 mm, za vse tri EPŽ-ingote. Metalografsko smo ocenili samo velikost zrna po Snyder-Graffu. Opazili smo, da velikost zrna ne narašča z rastočo kalilno temperaturo v intervalu 1180 do 1240°C, kar pripisujemo vplivu dodatka modifikatorja.

Dobljeni rezultati so zbrani v tabeli 6.

Tabela 6. Ocena velikosti avstenitnega zrna v odvisnosti od kalilne temperature za jeklo Č.7680 (BRM-2).

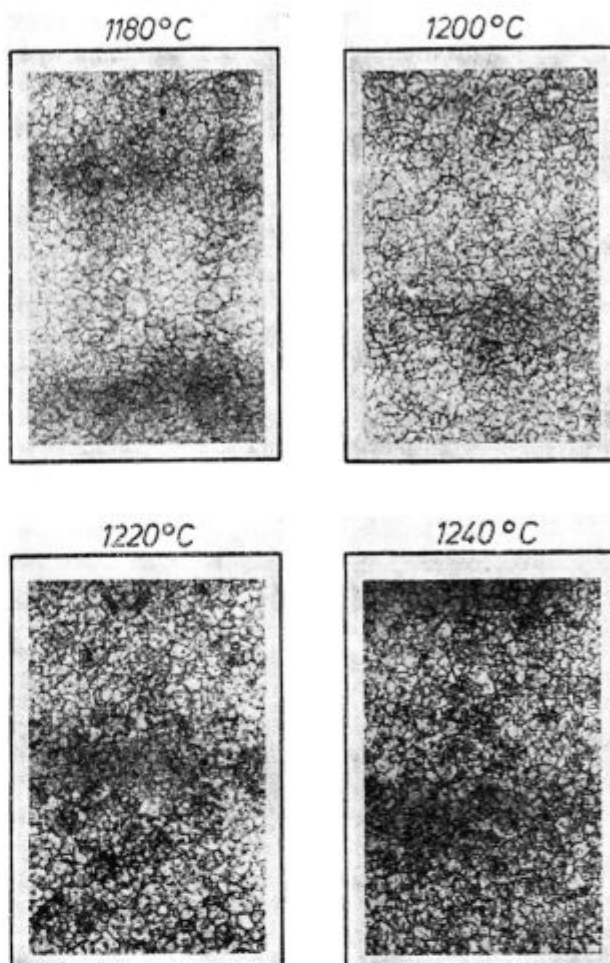
Temperatura kaljenja	Ocena velikosti avstenitnega zrna po metodi SG		
	B.143	B.144	B.149
1180°C	16	20	16
1200°C	16	18	16
1220°C	16	18	16
1240°C	14	18	14

Iz razpredelnice vidimo, da je jeklo ostalo fino-zrnato še pri kaljenju s temperaturo 1240°C. Direktna primerjava velikosti avstenitnega zrna v vzorcih iz ingota (lita struktura) z dobljenimi podatki pokaže, da smo imeli že v ingotih fino-zrnato strukturo, ki se med plastično predelavo ni bistveno spremenila.

Na sliki 6 je prikazana mikrostruktura jekla (vzorec iz ingota B.144) pri različnih kalilnih temperaturah.

Izdelava popuščnih diagramov

Analiza dobljenih rezultatov je pokazala, da med posameznimi ingoti ni bistvenih razlik. Opazna je le tendenca, da je pri modificiranem jeklu nekoliko boljša popuščna obstojnost. Pri



Slika 6:

Kalilna vrsta brzoreznega jekla Č.7680 (BRM-2) modificirana z MO.4 v žilindro
EPŽ-ingot B.144, F₀/F = 8
1180 °C: GS 02; 1200 °C: SG 18; 1220 °C: SG 18; 1240 °C: SG 18

Fig. 6

Quench line of high-speed Č.7680 (BRM-2) steel modified with MO.4 in to slag
ESR ingot B.144, F₀/F = 8
1180 °C: SG.20; 120 °C: SG.18; 1220 °C: SG.18; 1240 °C: SG.18

trikratnem popuščanju na 560°C v času 1 ure je dosežena trdota pri kalilni temperaturi 1240°C: 63 HRC in pri spodnji temperaturni meji 1180°C: 61,5 HRC. Ker ni bistvenih razlik v velikosti avstenitnega zrna, predpostavljamo, da bi dosegli večjo popuščno obstojnost pri zgornji kalilni temperaturi okoli 1260°C.

Določitev popuščnih efektov

Zanimivi so rezultati preiskav, ki smo jih opravili na vzorcih iz ingota B.143, ki smo jih kalili pri spodnji in zgornji predpisani kalilni temperaturi (1170—1240°C). Vzporedno z dilatometrijskimi vzorci smo kalili še vzorce za merjenje trdote in določitev avstenitnega zrna. Rezultati so zbrani v tabeli 7.

Tabela 7. Vpliv 3-kratnega popuščanja na trdoto in velikost avstenitnega zrna pri spodnji in zgornji kalilni temperaturi.

Temperatura kaljenja	Trdota (HRC)	Popuščanje na 550 °C, 90 minut			Velikost avstenitnega zrna (SG)
		I (HRC)	II (HRC)	III (HRC)	
1170° C	63,5	62,0	61,5	61,5	ni vidno
1240° C	65,0	65,0	65,0	65,0	15

Zaključki

Na polindustrijski EPZ-napravi s premično kokilo prečnega preseka kvadrat 100 mm smo pretalili tri lite elektrode kv. 60 × 60 mm teže okoli 60 kg iz jekla Č 7680 (BRM-2) s kemično sestavo: 0,80 % C, 0,018 % S, 0,35 % Si, 3,80 % Cr, 2,03 % V, 6,40 % W, 0,21 % Cu, 0,27 % Mn, 5,65 % Mo in 0,1 % Ti.

Pretaljevanje jekla je izvedeno pod žlindro M 11 (39,90 % CaF₂, 22,43 % Al₂O₃, 29,70 % CaO, 3,05 % SiO₂) s povprečno hitrostjo 52 kg/h.

Pri prvem ingotu (B.143) je pretaljevanje potekalo brez dodatka modifikatorja v žlindro. Dodali smo le aluminij zaradi (v količini 0,1 % teže jekla) kontrole oksidacijskega potenciala žlindre.

Pri naslednjih dveh ingotih (B.143 in B.149) smo kontinuirano dodajali modifikator (MO-4 na osnovi Al + Mg + Ti + N) v količinah 0,68 %, oziroma 2 × 0,68 % od teže jekla.

Po končanem taljenju smo opravili obsežne raziskave jekla v litem in predelanem (F₀/F = 16) stanju: kemična sestava jekla, metalografske preiskave makro in mikrostrukture, ocena karbidov, velikost avstenitnega zrna po Snyder-Graffu, kalilna vrsta, izdelava popuščnih efektov. Preiskave karbidov so potekale z mikrosondo, rezultati pa bodo objavljeni v II. delu članka.

Dobljeni rezultati so pokazali, da imajo dodatki titana v elektrodo (v količini 0,1 %) pozitiven vpliv na porazdelitev in velikost karbidne mreže, kar se manifestira v zelo finem avstenitnem zrnju.

Kombinacija dodatka modifikatorja (Al + Mg + Ti + N) v žlindro s prisotnim titanom v elektrodi ima dodatni pozitiven vpliv, ki se kaže v ekstremno finem avstenitnem zrnju (SG: 18 do 20) ter znatno boljši porazdelitvi in drobnejših karbidih. Zelo pomemben vpliv dodatka modifikatorja v žlindro se kaže v stabilnosti avstenitnega zrna v širokem temperaturnem območju 1180 do 1240° C. Trdota jekla je višja v modificiranem stanju za 0,5—1,0 HRC.

Izdelava brzoreznega jekla Č 7680 (BRM-2) po EPZ-postopku v kombinaciji z dodatkom modifikatorja v elektrodo, oziroma žlindro omogoča, da dosežemo najvišje kvalitete.

Nadaljnji poskusi bodo pokazali, kakšne so možnosti za industrijsko izkoriščanje tega postopka v železarni Ravne.

Literatura

1. Grainal, Werbeschrift d. Vanadium Corporation of America, New York, USA, 1962
2. Bats 79, US-Patent Nr. 2.809.109
3. Ineson, E., G. Hoyle: Metal Treatm. Drop. Forg. 23 (1956) S. 257—262
4. Felgel-Farnholz, O.: Diss. Montanistische Hochschule, Leoben 1957
5. Kunze, E., E. Horn: DEW-Techn. Ber. 1 (1961) S. 6—14
6. Tesche, K., W. Beuthner: DEW-Techn. Ber. 4 (1964) S. 51—64
7. Elsen, E., G. Elsen, M. Markworth: Metall 19 (1965) S. 334—345
8. Randak, A., J. Kurzeja, H. G. Jentges: Arch. f. Eisenhüttenwes. 36, Nr. 10 (1965) S. 730—731
9. Mitsche, R., E. Kudelka: Radex-Rundschau H.1 (1967) S. 407—413
10. Duckworth, W. E., D. J. Wooding: Vacuum Arc Or Elektroslog Melting (Vacuum Metallurgy Conference, Beverly Hills, California, 1968)
11. Kirk, F. A., H. C. Child, E. F. Love, J. T. Wilkins: In: ISI preprint Nr. 126 Materials for Metal Cutting Conference Scarborough 14.—16. 4. 1970, S. 59
12. Campbell, J., J. W. Bannister: Metals Technology, Sept. (1975) S. 409—415
13. Doronin, V. M., M. M. Kljujev, I. S. Prjašnikov, V. V. Topilin: Stal' 5 (1975), S. 453—455
14. Paschen, P.: Metall, 29 Jhg. H.2 (1975) S. 121—130
15. Koroušić, B., J. Rodič: Preiskave poiskusnih EPZ-ingotov. Interni predpis MI.17 (1971).

ZUSAMMENFASSUNG

Auf einer halbindustriellen ESU Anlage mit der beweglichen Kokille von 100 mm Quadrat im Durchschnitt sind drei gegossene Elektroden von 60 × 60 mm und einem Gewicht von 60 kg aus Stahl Č 7680 (BRM-2) umgeschmolzen worden. Chemische Zusammensetzung der Elektroden: 0,80 % C, 0,018 % S, 0,35 % Si, 3,80 % Cr, 2,03 % V, 6,4 % W, 0,21 % Cu, 0,27 % Mn, 5,65 % Mo und 0,1 % Ti.

Die Umschmelzung des Stahles ist unter der Schlacke M. 11 (39,90 % CaF₂, 22,43 % Al₂O₃, 29,70 % CaO, 3,05 % SiO₂) mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 52 kg/h durchgeführt worden.

Bei der Umschmelzung des ersten Blockes (B. 143) sind keine Impfmittel in die Schlacke zugegeben worden. Mit dem Zweck den oxydationspotenzial der Schlacke zu kon-

trollieren ist Aluminium von 0,1 % des Blockgewichtes zugegeben worden. Bei den folgenden zwei Blöcken (B. 143 und B. 149) ist kontinuierlich ein Modifikator (Mo-4 auf Grund der Elemente Al + Mg + Ti + N) in einer Menge von 0,68 % bzw. 2 × 0,68 % des Blockgewichtes zugegeben worden.

Nach dem Umschmelzen sind umfangreiche Untersuchungen des Stahles im gegossenen und verformten (F₀/F = 16) Zustand durchgeführt worden und zwar, der chemischen Zusammensetzung, metallographische Untersuchungen des Mikro und Makrogefüges, die Beurteilung der Karbide, Austenitkorngröße nach Snyder-Graff, Härtereihe, Ausarbeitung der Anlassdiagramme und Bestimmung der Anlassseffekte. Die Untersuchung der Karbide ist mit

der Mikrosonde untersucht worden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im zweiten Teil dieses Artikels dargegeben.

Die Ergebnisse zeigten, dass der Zusatz von 0,1 % Ti in die Elektrode einen positiven Einfluss auf die Verteilung und Grösse des Karbidnetzes hat. Die Folge davon ist ein feines Austenitkorn.

Die kombinierte Modifizierung des Stahles mit dem Impfmittel (Al + Mg + Ti + N) in die Schlacke, bei Anwesenheit von Titan in der Elektrode, hat einen zusätzlichen positiven Einfluss und äussert sich in einem extrem feinen Austenitkorn (SG: 18 bis 20), einer erheblich besseren Verteilung

und feineren Karbiden. Ein bemerkenswerter Einfluss des Impfmittelzusatzes in die Schlacke zeigt sich in der Stabilität des Austenitkornes im breiten Temperaturbereich von 1180 bis 1240°C. Die Härte des Stahles ist im modifizierten Zustand höher um 0,5 bis 1,0 HRC.

Die Erzeugung von Schnelldrehstahl C 7680 (BRM-2) nach dem ESU Verfahren macht es in der Kombination mit dem Zusatz der Impfmittel in der Elektrode bzw. Schlacke, die Erzeugung des Stahles höchster Güte möglich. Die weiteren Versuche sollen die Möglichkeiten für die industrielle Ausbeutung dieses Verfahrens im Hüttenwerk Ravne zeigen.

SUMMARY

Pilot plant ESR set-up with movable mould of 100 mm square cross section was applied in remelting three 60 × 60 mm cast electrodes of C. 7680 (BRM-2) steel with weight 60 kg. Their chemical composition was 0,80 % C, 0,018 % S, 0,35 % Si, 3,80 % Cr, 2,03 % V, 6,40 % W, 0,21 % Cu, 0,27 % Mn, 5,65 % Mo and 0,1 % Ti.

Slag M.11 with composition 39,90 % CaF₂, 22,43 % Al₂O₃, 29,70 % CaO, 3,05 % SiO₂ was used in remelting at an average rate of 52 kg/h.

The first ingot (B.143) was remelted without adding any modifying agent to the slag. Only aluminium (up to 0,1 % weight of steel) was added in order to control the oxidizing potential of the slag.

During remelting of the next two ingots (B.144 and B.149) the modifying agent (MO-4, based on Al + Mg + Ti + N) was continuously added, 0,68 % of the steel weight in the first case, and 2 times 0,68 % in the second case.

After completed remelting, extensive investigations of steel, as cast and worked ($F_0/F = 16$) were made: chemical composition, metallographic investigations of macro and micro structure, estimation of carbides, austenite grain size determination by Snyder-Graff, quenching line, tem-

pering diagrams, determination of tempering effects. Investigations on carbides were made by electron micro-analyzer, and the results will be presented in the second part of this paper.

The obtained results showed that addition of titanium (0,1 %) has favourable influence on the distribution and size of carbide net which is consequence of very fine austenite grain.

Combination of adding modifying agent (Al + Mg + Ti + N) to slag and the presence of titanium in electrode has additional favourable influence which is expressed in extremely fine austenite grain (SG: 18 to 20) and essentially better distribution and smaller size of carbides. A very important influence of adding the modifying agent to slag is expressed in stability of the austenite grain in wide temperature range between 1180 and 1240°C. The hardness of modified steel is higher for 0,5 to 1 HRC.

Manufacturing C. 7680 (BRM-2) high-speed steel by ESR process in combination with additions of modifying agents to electrode or to slag enables the highest steel qualities.

Further tests will show practical possibilities for industrial production by this method in the Ravne Iron-works.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На полупромышленной ЭПЖ-установки с передвижной изложницей квадратного сечения 100 мм переплавали три литых электрода квадратной формы сечения 60 × 60 мм, веса прибл. 60 кг из стали марки С. 7680 (BRM-2) химического состава: 0,80 % С, 0,018 % S, 0,35 % Si, 3,80 % Cr, 2,03 % V, 6,40 % W, 0,21 % Cu, 0,27 % Mn, 5,65 % Mo и 0,1 % Ti.

Переплав стали выполнен под шлаком М 11 (39,90 % CaF₂, 22,43 % Al₂O₃, 29,70 % CaO, 3,05 % SiO₂) при средней быстрой 52 кг/ч.

При первой слиток (Б. 143) переплав выполнялся без добавки модификаторов в шлак. Добавляли только алюминий (в количестве 0,1 % на вес стали) с целью проверки окислительного потенциала шлака.

При последующих двух слитках (Б. 143 и Б. 149) добавляли непрерывно модификаторов (МО-4 на базе Al + Mg + Ti + N) в количестве 0,68 % отн. 2 × 0,68 % на вес стали.

По окончании расплавления выполнены обширные исследования стали в литом и переработанном состоянии ($F_0/F = 16$), т. е. подан химический состав стали, металлографическое испытание макро и микроstructures, оценка карбидов, величина аустенитных зерен по Snyder — Graff-у, под закалки, разработка диаграмм отпуска стали, определение эффектов отпуска и пр.

Исследование карбидов, результаты которого будут рассмотрены во второй части этой работы, были выполнены с микронзондом. Полученные результаты показали, что добавка титана в электрод (в количестве 0,1 %) оказывает положительное влияние на распределение и величину карбидной сетки, что проявляется в очень мелких зернах аустенита.

Добавки модификатора (Al + Mg + Ti + N) в шлак, в сочетании с присутствием титана в электроде увеличивает положительное влияние. Это обнаруживается в экстремуме мелкозернистости зерен аустенита (СГ: 18 до 20), а также в лучшем распределении и более мелкой карбидной сетки.

Очень значительное влияние оказывает добавка модификатора в шлак на устойчивость зерен в широком t -ом диапазоне между 1180 до 1240°C.

В модифицированном состоянии твердость стали увеличена на 0,5—1,0 HRC.

Изготовление быстрорежущей стали марки С. 7680 (BRM-2) ЭПЖ-способом в комбинации с добавкой модификатора в электрод, отн. в шлак, дает возможность достижения самых высших качеств.

Последующие опытные работы укажут на возможности промышленного применения этого способа в металлургическом заводе Железница Равне.