

# Tehnologija izdelave in predelave jekel, legiranih z borom

UDK: 669.183.3; 669.14.254  
ASM/SLA: D2g, CN-g-A9

Anton Razinger, Jože Arh

## 1. UVOD

### 1.1 Izhodišča raziskave in delovna hipoteza

Za izdelavo serijskih delov za potrebe avtomobil-ske industrije, industrije motorjev, gospodinjskih strojev, elektro industrije ipd., se tudi v Jugoslaviji vedno hitreje uveljavlja tehnologija masivnega preoblikovanja v hladnem. Ta postopek odlikuje vrsta odločilnih prednosti pred drugimi postopki oblikovanja (vroče utopno kovanje, odrezovanje), zato se ta tehnologija obravnava kot zelo perspektivna. Postopek hladnega masivnega preoblikovanja je pot k večji ekonomiki oblikovanja strojnih delov zaradi visokega izkoristka materiala in visoke produktivnosti.

Odločilen dejavnik za uspešno aplikacijo tehnologije masivnega preoblikovanja v hladnem so jekla, ki morajo biti sposobna za velike plastične deformacije v hladnem. Z raziskovalnim delom v zadnjih letih smo v ZPSŽ Železarne Jesenice osvojili kvaliteto in proizvodnjo maloogljicnih nelegiranih in nizkolegiranih jekel za masivno preoblikovanje v hladnem (JMP 10, JMP 15, JMP 60 Cr, JMP 80 Mn Cr ter KV 10, ROMAT, KV 35).<sup>3</sup> Da pa bi lahko zadovoljili tudi potrebe po jeklih za masivno preoblikovanje v hladnem, ki se toplotno obdelujejo, moramo osvojiti tudi jekla, ki jim je dolegiran element bor (B-jekla). Prednosti uporabe B-jekel za hladno masivno preoblikovanje so v novejši literaturi dobro opisane. Iz podatkov, ki so navedeni v literaturi, je razvidna široka aplikacija jekel, legiranih z B, predvsem na področju izdelave vijakov in matic, pa tudi drugih strojnih delov, čemur posvečajo v vseh industrijskih državah velik pomen. Iz domače strokovne literature ni razvidno, da bi se v kateri od ostalih železarn, oz. inštitutov ukvarjali z nakazano problematiko B-jekel. Opisane so določene preiskave vpliva B na izboljšanje kaljivosti konstrukcijskih jekel ter izboljšanje preoblikovalnosti v vročem visokolegiranih jekel.

Osvajanje tehnologije izdelave in predelave jekel, legiranih z B, bi omogočilo razširitev kvalitetnega asortimenta jekel za hladno masivno preoblikovanje in dalo kovinsko-predelovalni industriji možnost za osvajanje novih kvalitetnih proizvodov, obenem pa bi se zmanjšal tudi uvoz teh jekel.

### 1.2 Splošno o trendu razvoja in uporabnosti B jekel v svetu

Prve raziskave B v jeklu segajo v začetek tega stoletja (L. Guillet). R. Walter je bil prvi, ki je ugotovil, da že zelo majhna vsebnost tega elementa izboljša lastnosti jekel. Industrijski razvoj B jekel datira po letu 1937. Legiranje jekel z B se je že zelo zgodaj uveljavilo na področju konstrukcijskih jekel za poboljšanje, kjer B poveča kaljivost, in na področju visokolegiranih jekel, kjer B izboljša preoblikovalnost v hladnem. V ZDA je proizvodnja B zelo hitro narasla na 1 mio ton, jekla so dobila stalno mesto v proizvodnji, potrošnji in standardih, v Evropi in na Japonskem pa ta jekla še vedno raziskujejo. Zdi se, da so B jekla značilen primer, kako težko je včasih najti pravičen odnos med racionalnostjo in izborom jekel, oziroma, kako različno lahko na ta odnos vplivajo specifične ekonomske razmere in tehnologije v posameznih državah. Velik prodor B jekel v vseh industrijsko razvitih državah v zadnjih desetih letih je pripisati vedno večji proizvodnji nerjavnih jekel, še bolj pa zahtevam po čim bolj racionalni proizvodnji strojnih delov v industriji motorjev.

V Jugoslaviji se z raziskovalnim delom na področju osvajanja jekel, legiranih z B, ukvarjamo deset let. Delo poteka v treh smereh:

a) izboljšanje plastičnosti nerjavnih jekel z dodatkom B. Na tem področju so nam poznani napor v železarni Nikšić, železarni Ravne in železarni Jesenice (1);

b) osvajanje enega (ali več) tipa jekla za cementacijo, ki bi nadomestil vrsto dragih nizko legiranih jekel za izdelavo zobnikov in zobatih letev. S tem problemom se ukvarjajo v inštitutu Hasan Brkič v Zenici in v železarni Ravne (2);

c) razvoj familije nizko legiranih jekel za poboljšanje, ki se oblikujejo s hladnim masivnim preoblikovanjem. Na tem področju delajo v železarni Jesenice. Razvoj tehnologije izdelave in predelave teh jekel je tudi predmet obravnavane naloge.

### 1.3 Bor v jeklih za hladno masivno preoblikovanje

Uporabnost B v jeklih za hladno masivno preoblikovanje temelji na doseganju enakega prekaljenega preseka ob znatno nižji vsebnosti C in legirnih elementov, kot pri klasičnih jeklih za poboljšanje. S stališča prekaljivosti lahko nekaj desetstotink B zamenja znatne vsebnosti C, Mn,

To je povzetek elaborata, ki je bil izdelan s sofinanciranjem Raziskovalne skupnosti Slovenije — naloga 569, september 1978

Cr, Ni, Mo, W, ne more pa nadomestiti drugih efektov teh legirnih elementov na fizikalne lastnosti jekel. Za dobro preoblikovalnost v hladnem se zahteva nizka vsebnost C in legirnih elementov. B v jeklih za poboljšanje ima torej posredni vpliv na izboljšanje preoblikovalnosti v hladnem, ker dosežemo kaljivost ob prisotnosti B z nižjo vsebnostjo drugih elementov, sam B pa v tako majhnih količinah nima zaznavnega vpliva na plastičnost jekla. Poleg manjše preoblikovalne trdnosti kažejo B jekla še niz drugih prednosti pred analognimi jekli brez B v pogledu žilavosti, kalilnih efektov, varivosti, obdelovalnosti ipd., kar se najbolj odraža v nižji ceni končnih izdelkov. Na starem konceptu so torej B jekla dobila novo uporabnost, kar ima za posledico vedno večje zanimanje za B jekla (4).

Optimizacijo kemične sestave jekla za doseganje čim nižje preoblikovalne trdnosti v hladnem in zahtevane prekaljivosti jekel z uporabo B kot legirnega elementa in pa razvoj familije jekel za izdelavo visoko trdnih strojnih delov s hladnim masivnim preoblikovanjem in poboljšanjem obravnava vrsta člankov v novejši strokovni literaturi. (5) (6) (7) (8)

Vključevanje B jekel v tehnologijo hladnega masivnega preoblikovanja je dobilo mesto tudi na različnih strokovnih posvetovanjih po vsem svetu. (9) (10)

Ker smo v našem raziskovalnem delu izbrali kot osnovo jekla za kvalitetne vijake, navajamo pregled literature tudi s tega področja: (11) (12) (13) (14)

V domači strokovni literaturi je objavljeno sorazmerno malo rezultatov raziskovalnega dela, ki je bilo izvršeno na področju razvoja in uporabe B jekel. Objavljena dela vsekakor ne predstavljajo celotnega obsega dela, ki je bilo v naših železarnah izvršeno na tem področju, žal pa nam rezultati, ki so objavljeni v internih poročilih, niso bili dosegljivi. (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21)

#### 1.4 Povzetek novejših dognanj o topnosti B v jeklu in vplivu B na premeno — $\gamma \rightarrow \alpha$

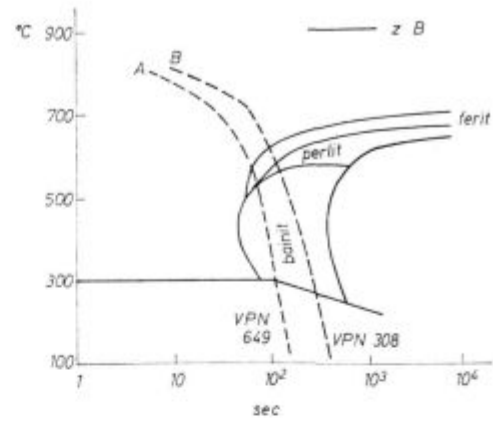
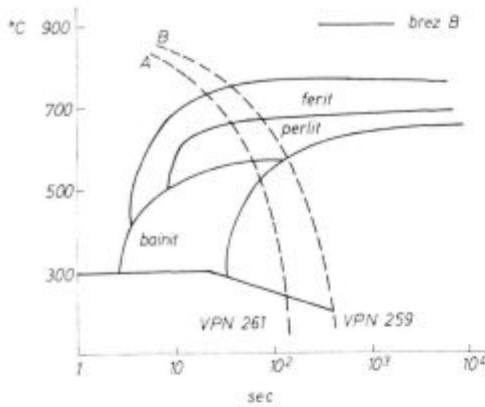
Topnost atomov B v Fe je pri vseh temperaturah nižja kakor topnost atomov C in N (22). Topnost B v feritu narašča s temperaturo od 20 do 80 ppm pri temperaturi 910°C, v avstenitu pa od 55 do 260 ppm pri temperaturi 1147°C (23). V zlitinah železa pa je topnost odvisna od »čistosti«<sup>8</sup> bazne kovine. Mnenja raziskovalcev glede načina raztapljanja B v železu so si zelo različna. Največ dokazov govori v prid substitucijskemu načinu raztapljanja B v Fe in intersticijskem načinu v Fe. Novejše preiskave kažejo, da lahko B v bcc mreži  $\alpha$ Fe zasede oboje — intersticijska in substitucijska mesta in da lahko substitucijsko raztopljeni atomi B medsebojno reagirajo z drugimi intersticijsko raztopljenimi atomi C in N. Opazovanja prostorskih razmer B v fcc mreži  $\gamma$ Fe kažejo, da je premer B (1,85 Å) za mesta v mreži

premajhen, za mesta med mrežami pa prevelik. Prav s temi neugodnimi prostorskimi razmerami, na katere naletijo atomi B v fcc  $\gamma$ Fe, je pojasnjena visoka afiniteta B k razširjenim medmrežnim prostorom (24). Na osnovi teoretičnega modela segregacij B k mrežam zrn se pojasnjuje efekt B na povečanje prekaljivosti jekla.

Efekt B na povečanje prekaljivosti pod-evektoidnih jekel, nelegiranih in nizkolegiranih, se odraža v tem, da se zakasni začetek premene avstenita v poligonalni in bajnitni ferit v primerjavi z analognimi jekli brez B.

Ker dodatek B nima zaznavnega vpliva na hitrost pretvorbe avstenita, je torej efekt B na povečanje prekaljivosti posledica zmanjšanja števila kritičnih kali podevektoidnega ferita. Te kali se sicer tvorijo predvsem na mejah zrn, dislokacijah, intersticijah, vrzelih, kamor difundira tudi B, raztopljen v avstenitu. Dokazan je mehanizem difuzije B s pomočjo vrzeli (25) med ohlajanjem iz temperature avstenitizacije (26). Ni še dokazano, ali se B na mejah zrn in napakah mreže nahaja v atomarni obliki ali kot izloček, dokazano pa je, da je za povečanje prekaljivosti odgovoren le tisti del v avstenitu raztopljenega B, ki je koncentriran v mejah avstenitnih zrn (28).

Večina jekel se v praksi avstenitizira na temperaturah od 820 do 930°C in pri ohlajanju s teh temperatur pride tudi do obravnavanih segregacij B, s čimer je izpolnjen pogoj za povečanje kaljivosti. Vpliv temperature in časa avstenitizacije na učinek B je podan kompleksno z istočasnim prekrivanjem več efektov. Z ohlajanjem iz višje temperature avstenitizacije naj bi se povečala difuzija atomov B na meje avstenitnih zrn in s tem učinkovitost večjega deleža raztopljenega B. Ker pa pri teh pogojih naraste tudi  $\gamma$  zrno, se zmanjša razmerje površine k volumnu zrn, zato se poveča pokritje energetske ugodnih mest z atomi B. Nasprotno tem pozitivnim učinkom pa se zaradi povečane koncentracije B na mejah zrn lahko ustvarijo pogoji za tvorbo B vsebujoče stabilne faze, kar vodi k zmanjšanju učinkovitosti B na povečanje kaljivosti (27). Obstaja torej neka optimalna  $T_A$  in  $t_A$ , pri kateri je B najbolj učinkovit. Pri normalnih dodatkih B v jeklu pod 0,005 % naj se v obravnavanih jeklih ne bi pojavljale stabilne B vsebujoče faze. Z avtoradiografskimi studijami so dokazali (24) tudi to, da B difundira k fcc karbidom, kar daje borokarbide tipa  $M_{23}(BC)_6$ , pa tudi  $V_4(BC)_3$ , Nb(C). Dokazi so (26), da, če so ti izločki dovolj majhni, odigrajo vlogo zadrževalcev tvorbe ferita, ko pa narastejo in postanejo grobi, pa so pospeševalci tvorbe ferita. Glavne stabilne B vsebujoče faze v jeklih so borokarbidi, v katerih B nadomesti C v karbidih, tipa  $M_{23}(BC)_6$  in cementitu  $Fe_3(BC)$ . Poznani so tudi boridi, tipa  $FeB$ ,  $M_3B_2$ . Bor ima visoko afiniteto do kisika in dušika v jeklu. Z N tvori zelo stabilen BN s heksagonalno strukturo. Zmanjšanje vpliva B zaradi vezanja na O gre verjetno analogno s tvorbo rombične ali amorfne faze  $B_2O_3$ .



Slika 1/a-b

Kontinuirana TTT diagrama za jeklo SAE 1541 brez in z dodatkom bora

Fig. 1

Continuous TTT diagrams for SAE 1541 steel without and with alloyed boron

Z analizo mehanizma povečanja kaljivosti s C in B se da razložiti tudi medsebojni vpliv (interakcija) teh elementov na povečanje kaljivosti jekel z različno vsebnostjo C. Učinek B na kaljivost se pokaže šele potem, ko doseže vsebnost C mejo topnosti v feritu. Z naraščajočo vsebnostjo C zasedejo za energetsko ugodno difuzijo razpoložljive razširjene mrežne prostore vedno bolj samo atomi C. Nadaljnja difuzija C potem nujno poteka preko razširjenih medmrežnih prostorov, s tem pa se učinek B vedno bolj prekriva z učinkovanjem C na povečanje kaljivosti, dokler pri eutektoidnem C popolnoma ne izgine.

B ima torej vpliv na povečanje kaljivosti le pri tistih jeklih, ki imajo v TTT diagramih pred perlitno pretvorbo območje proeutektoidnega ferita. Premik krivulj k večjim inkubacijskim časom je bolj izrazit v območju poligonalnega proeutektoidnega ferita, kot v območju acikularnega probajnitnega ferita. Za ilustracijo sta iz literature (29) na sliki 1 navedena značilna kontinuirna TTT diagrama C-Mn jekla SAE 1541 z dodatkom B in brez dodatka z vrisanimi krivuljami ohlajanja v vodi (A) in olju (B).

Iz diagrama je razvidno, da pri enaki ohlajevalni hitrosti pri varianti jekla, ki vsebuje B, laže dosežemo zaželeno trdoto po kaljenju kot pri varianti jekla, ki ne vsebuje B. Bor ima zelo majhen vpliv na temperaturo  $M_s$ , kar predstavlja veliko prednost pred ostalimi legirnimi elementi, ki ob povečanju kaljivosti znižujejo  $M_s$  temperaturo in s tem večjajo možnost nastanka kalilnih razpok. Domnevamo, da B ni karbidotvoren element in da ne spremeni premenskih točk pri ogrevanju jekla Ac 1 in Ac 3, zniža pa premensko točko pri ohlajanju Ar 3 za ca. 30 % (30).

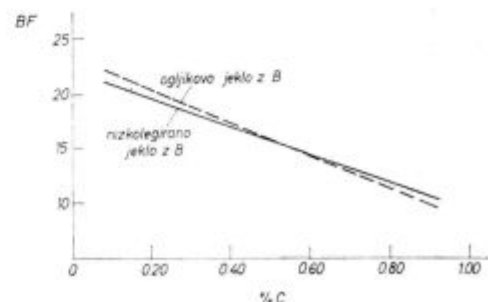
Različni podatki, na katere naletimo v strokovni literaturi, o vrednosti BF v odvisnosti od vsebnosti C v jeklih, so posledica deleža martenzita, ki se vzame za kriterij prekaljivosti (19). Dokazan je tudi vpliv ostalih legirnih elementov, ki

so prisotni v jeklu (30) in vplivajo na eutektoidno vsebnost C ali pa zmanjšujejo topnost B v avstenitu. Ker je paleta legirnih elementov v nizko legiranih jeklih zelo široka, je efekt B potrebno ugotoviti za vsako družino jekel posebej.

Odkrivanje in določevanje položaja atomov B v jeklu, kar je edino merilo za pričakovani efekt B na kaljivost, je zelo težko, in sicer iz razloga, ker je vsebnost B v jeklu zelo majhna in ker ima B zelo nizko at. število 5, kar otežuje njegovo identifikacijo z elektronskim mikroanalizatorjem. Večina poznanih eksperimentalnih tehnik za odkrivanje prisotnosti B ne da prostorske razporeditve B in je premalo občutljiva za majhne koncentracijske razlike.

V pogledu uporabnosti kemičnih metod za določevanje vsebnosti B, ki so občutljive do 1 ppm B v jeklu, je dokazano (29), da delež topnega B, določen po dianthimid fotometrični metodi, ustreza deležu učinkovitega B v jeklu. To ugotovitev, ki močno olajša delo, potrjujejo tudi avtoradiografske študije (24).

V novejšem času se je uveljavila avtoradiografska metoda, ki je rešila problem študija porazdelitve B v strukturi jekla (24) (30)



Slika 2

Efektivnost bora v nelegiranih in nizkolegiranih jeklih

Fig. 2

Boron effectiveness in unalloyed and low alloyed steel

**2. RAZVOJ TEHNOLOGIJE IZDELAVE JEKLA**

Maksimalna učinkovitost B v jeklu, enakomernost kvalitete in reproducibilnost finalnih proizvodov so osnovne smernice in naloge raziskovalnega dela na področju osvajanja tehnologije izdelave in predelave B jekel.

Osvojiti je potrebno takšno tehnologijo legiranja B v jeklo, da bo mogoče:

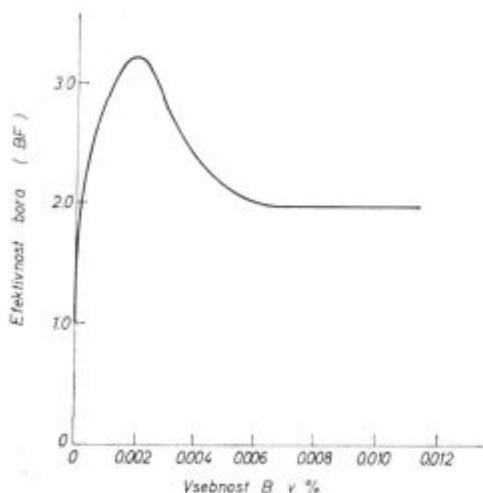
- doseči optimalno vsebnost B v jeklu
- zaščititi B pred vezavo z N in O
- doseči enakomerno porazdelitev B v talini

**2.1 Optimalna vsebnost B v jeklu**

Vsebnost B, ki je potrebna za doseganje železnega efekta B na kaljivost jekel, je zelo majhna in se giblje v mejah od 0,0005 do 0,003 %. Večina raziskovalcev B jekel je enotna glede optimalne vsebnosti B, pri kateri je dosežena največja prekaljivost posameznih vrst jekel. Optimalna vsebnost — 0,0015—0,0020 % B je pri vseh jeklih zelo jasno izražena (4) (29) (34). Z naraščajočo vsebnostjo B vrednost BF pada, dokler ne doseže neko konstantno vrednost, kar je shematsko prikazano na sliki 3. V literaturi so navedeni tudi dokazi, da so v takšnem optimalnem območju vsebnosti B dosežene tudi optimalne trdnostne lastnosti in žilavost jekel v poboljšanem stanju. (4)

**2.2 Legiranje bora v jeklo**

Problematika izdelave B jekel je od vsega začetka povezana s preprečevanjem izgube učinkovitega B zaradi velike afinitete B do kisika in dušika, torej plinov, ki sta obilno prisotna v procesu izdelave jekla. Legiranje B v jeklo v obliki ferolegure FeB se ni pokazalo kot primerno, saj je bila dosežena kvaliteta jekla v pogledu prekaljivosti zelo neenakomerna, kar je predstavljalo veliko oviro uporabnosti B jekel. Da bi dosegli

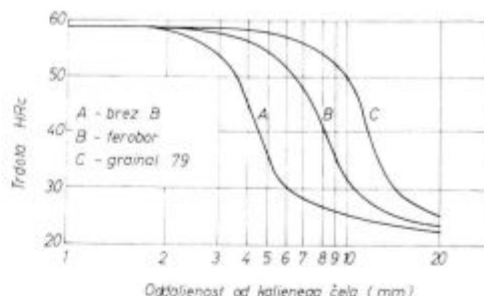


Slika 3

Odvisnost učinkovitosti B (BF) od vsebnosti B v jeklu

Fig. 3

Relationship between the boron effectiveness (BF) and the boron content in steel



Slika 4

Efekt dveh B zlitin na kaljivost jekla SAE 1041

Fig. 4

Effect of two boron alloys on the hardenability of SAE 1041 steel

učinkovito vezavo plinov v jeklu in tako zaščitili B, so bile razvite kompleksne zlitine z majhno vsebnostjo B ter visoko vsebnostjo Ti, Al in Zr, torej elementov, ki kažejo močnejšo reaktivnost z N in O kot B.

Ker vsebnost kisika in dušika v jeklu variira s sestavo jekla in načinom izdelave in vlivanja jekla, je potrebno vrsto in količino kompleksnih zlitin B ugotoviti s poizkusi. Posledica različne jeklarske prakse so tudi nihanja v učinkovitosti B pri posameznih proizvajalcih jekel. Poizkusi so pokazali, da je za zaščito B Ti bolj učinkovit kot Zr, dokazano pa je tudi, da je za vezavo plinov učinkovito le ca. 70 % dodanega Ti, oz. 40 % Zr (34). Da bi bil B v jeklu učinkovit, je potrebno že v samem postopku izdelave jekla čimbolj reducirati vsebnost kisika in dušika in pa nevtralizirati vpliv preostale vsebnosti N in O z vezavo na druge elemente.

Če je dana možnost vlivanja jekla v vakuumu, se lahko uporabijo kompleksne zlitine z višjo vsebnostjo B (ca. 8 %), če pa se jeklo vlija na zraku, pa se mora B legirati v kompleksnih zlitinah z nižjo vsebnostjo B (pod 6 %), kar seveda podraži postopek.

V tabeli 1 je prikazana smerna analiza kompleksnih zlitin, tipa BATS, ki jih dobavlja firma Ferrolegeringar AG iz Züricha.

Tabela 1: Smerna analiza kompleksnih zlitin BATS

Oznaka zlitine	Vsebnost elementov (%)						
	B	Al	Ti	Si	Mn	V	Zr
BATS 2	2	10	30	10	—	—	—
BATS 4	4	10	30	10	—	—	—
BATS 6	6	10	30	10	—	—	—
BATS 8	7	12	25	7	—	—	—
BATS 79	0,5	13	20	5	8	—	4
V-BATS	0,3	9	15	1	—	24	—

Za pravilno uporabo posameznih zlitin so dana naslednja navodila:

— Zlitine BATS 2, 4 in 6 naj bi se uporabile, kadar je potrebno izdelati jeklo z 0,001 do 0,10 % B. Izbira zlitine je odvisna predvsem od načina (teh-

nike) izdelave jekla v jeklarni. Te zlitine so posebno primerne za izdelavo ogljikovih in nizko-legiranih B jekel, kjer v glavnem poudarjamo doseženo prekaljivost jekla in kjer naj bi B nadomestil določeno količino ostalih legirnih elementov, kot Ni, Mn. Takšna jekla so predvsem uporabna za izdelavo strojnih delov, ki se oblikujejo s hladnim masivnim preoblikovanjem.

— Zlitina BATS 79 je kompleksna zlitina z večjim razmerjem legirnih elementov proti B, kar prispeva k popolni zaščiti B in splošnemu dvigu kvalitete jekla, posebno v pogledu žilavosti. Ta zlitina se zato uporablja za legiranje B višje legiranih jekel, kot so nerjavna jekla in jekla, obstojna pri visoki temperaturi, kjer ima dodatek B v količini ca. 0,003 % namen izboljšati predelavnost jekla. V literaturi so navedeni primeri, ko so to zlitino uporabili za doseganje drobnega zrna in boljših mehanskih lastnosti v vlitkih iz visoko legiranih jekel.

Četudi te kompleksne zlitine vsebujejo elemente, ki imajo večjo afinitev do N in O kot B, pa je kljub temu pred dodajanjem kompleksne zlitine B talino potrebno čimbolj popolno dezoksidirati in denitrirati. Kompleksna legura B se mora torej dodati potem, ko so dodane vse druge ferolegure za dezoksidacijo in legiranje jekla. Kompleksna legura B se doda v curek jekla med prebodom. Dodatek B je najbolj učinkovit, če se kompleksna zlitina dodaja v času, ko sega talina do tretjine ponovce in dokler se ne pojavi prva žilindra, vendar pa je to le priporočilo iz nekaterih jeklarn.

Ker torej ni mogoče zagotoviti enakih pogojev, ima vsaka jeklarna svoj FB, ki ga lahko upoštevamo kot indeks kvalitete dela v določeni jeklarni.

Lahko trdimo, da je bil v preteklosti primarni vzrok nestabilnosti pri izdelavi B jekel in doseženi kvaliteti nepopolna vezava plinov v jeklu. Z uporabo kompleksnih dezoksidantov pa so dosegli veliko zanesljivost, kar ima za posledico tudi naraščanje trenda proizvodnje B jekel, ne samo v ZDA, ampak tudi v Evropi.

### 2.3 Izdelava poskusnih talin

Poizkuse legiranja B smo opravljali v industrijskih talinah, izdelanih v SM pečeh. Jeklo je bilo vilito v normalno konične kokile kvadratnega preseka  $650 \times 650$  mm skozi lijak. Teža vlitih blokov 5.4 t.

Legiranje B smo opravljali na dva načina

A. legiranje B v zlitini FeB skupaj z zlitinami FeTi, ZrSi in Al. Takšno kompleksno mešanico zlitin smo zdrobili, dobro premešali in z njo napolnili tankostenske jeklene cevi, deb. 1 mm. Ustrezno število cevi smo s pomočjo posebnega nosilca vložili v kokile pred vlitvijo jekla, kakor kaže sl. 5. Ko se je med vlitvijo jeklo dvigalo, so se tankostenske cevi, napolnjene z mešanico zlitin, enakomerno odtapljale, B, Ti, Zr in Al pa

so tako enakomerno prehajali v talino. Dobro mešanje taline zaradi tokov med komunicirajočim vlitvijo naj bi zagotovilo enakomerno porazdelitev B in ostalih elementov.

Da bi kar najbolj vezali O in N že pred legiranjem B, smo talino že v ponovci močneje dezoksidirali z Al in Ti.

Po opisanem postopku smo izdelali več poskusnih blokov jekla, pri čemer smo varirali dodatek B:

0,0020 %
0,0040 %
0,0060 %
0,0080 %

Pri dodatku B 0,0080 % smo mešanico legur vstavili v 4 tankostenske cevi, premera 20 mm, s skupnim volumnom  $1,7 \text{ dm}^3$ , do višine polnjenja 1,6 m.

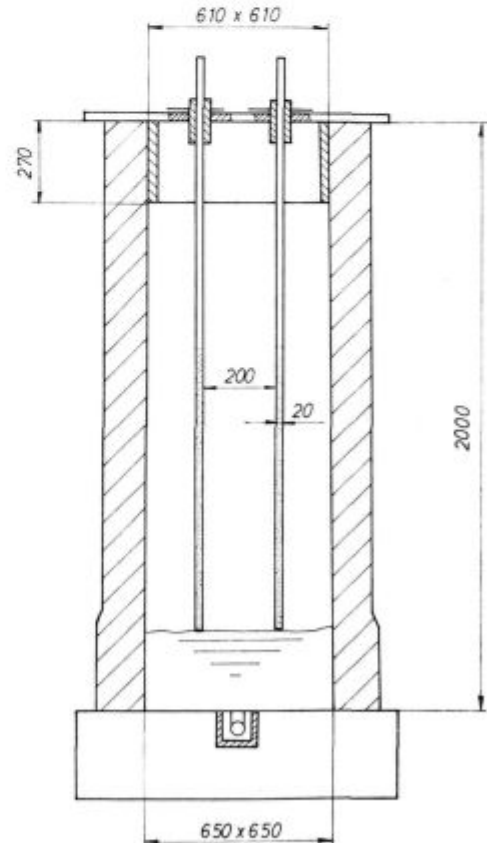
Zmešali smo naslednje količine zlitin:

2,4 kg FeB, 1,3 kg FeTi, 0,65 kg Al in 0,65 kg ZrSi.

Preračunano na težo bloka 5,4 t je preračunana vsebnost elementov v jeklu naslednja:

0,008 % B, 0,01 % Ti, 0,012 % Al in 0,004 % Zr.

Saržna analiza nam zaradi takšnega načina legiranja B ne pokaže prave vsebnosti elementov B, Ti, Al in Zr ter O in N v jeklu.



Slika 5

Legiranje B v jeklo s pomočjo tankostenskih cevi

Fig. 5

Alloying boron into steel with thin-walled tubes

B. legiranje B v zlitini BATS v ponovco (cela šarža).

Na osnovi izkušenj, ki smo jih pridobili v prvi fazi izdelave poizkusnih talin, smo za legiranje celih šarž izbrali zlitino BATS 2. Jeklo smo pred vlivanjem v ponovco dezoksidirali v peči s SiMn, zrcalovino in FeAl (1—1,2 kg/t). V curek jekla smo med vlivanjem najprej dodali Al in ostale Fe zlitine, kompleksno zlitino BATS 2 pa smo dodajali v curek jekla v intervalu, ko je bila tretjina ponovce napolnjena z jeklom, pa do pojava prve žindre. Tako izdelano jeklo je bilo vlitno komunicirajoče v kokile. Šaržna analiza nam v tem primeru pokaže dejansko vsebnost B, Al, Ti in Zr ter O in N v jeklu.

Šaržne analize in analize vzorcev poizkusnih talin so navedene v tabelah 2 in 3

Tabela 2: Šaržna analiza in analiza vzorcev jekla MBA20

St. šarže	Vsebnost elementov v %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
03 4300	0,19	0,22	0,44	0,013	0,022	0,12	—	0,45
S	C16	0,19	0,27	0,37	0,013	0,023	0,14	0,13
	D16	0,19	0,29	0,48	0,016	0,023	0,14	0,15
04 3335	0,21	0,30	0,44	0,011	0,024	0,11	0,24	0,09
S	C16	0,20	0,27	0,43	0,009	0,023	0,13	0,25
	D16	0,20	0,26	0,43	0,009	0,024	0,12	0,24
01 0910	0,19	0,36	1,10	0,013	0,018	0,07	0,16	0,11
S	0,20	0,37	1,18	0,015	0,024	0,07	0,16	0,10
	0,18	0,35	1,07	0,014	0,017	0,23	0,18	0,09
07 6168	0,17	0,35	1,14	0,024	0,020	0,09	0,21	0,06
S	0,17	0,35	1,16	0,022	0,022	0,09	0,20	0,06
	0,21	0,10	1,22	0,025	0,013	0,11	0,21	0,05
G	A3	0,21	1,21	0,025		0,10		
	B3	0,22	0,08	1,19	0,028	0,015	0,09	0,20
S	A10	0,21	0,08	1,21	0,025		0,10	
	B10	0,21	0,07	1,19	0,028	0,015	0,09	0,20
N	A20	0,21	0,08	1,21	0,025		0,10	
	B20	0,21	0,07	1,19	0,028	0,015	0,09	0,20

Tabela 3: Šaržna analiza in analiza vzorcev jekla KVB 30

St. šarže	Vsebnost elementov v %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
02 4912	0,35	0,33	0,63	0,014	0,025	0,39	0,22	0,07
S	0,35	0,33	0,67	0,012	0,018	0,35	0,22	0,06
	0,30	0,30	0,62	0,010	0,023	0,35	0,23	0,06
S	0,31	0,31	0,63	0,011	0,024	0,33	0,21	0,06
	0,36	0,07	0,67	0,010	0,013	0,07	0,14	0,07
S	0,36	0,09	0,68	0,012	0,014	0,08	0,13	0,08
	0,37	0,08	0,77	0,014	0,017	0,06	0,06	0,18
S	0,39	0,08	0,81	0,017	0,018	0,06	0,08	
	0,44	0,15	0,80	0,017	0,016	0,17	0,16	0,16
S	0,42	0,14	0,87	0,018	0,019	0,13	0,19	



Slika 6

Porazdelitev B v vzorcu jekla MBA 20 šarže 03 4855

Fig. 6

Distribution of boron in the MBA 20 steel sample of the 03 4855 melt



Slika 7

Porazdelitev B v vzorcu jekla KVB 30 šarže 03 4852

Fig. 7

Distribution of boron in the KVB 30 sample of the 03 4852 melt

### 2.3.1 Pogoji ogrevanja in vroče predelave blokov

Bloki jekel so bili ogrevani v globinskih pečeh po regulativih, ki veljajo za ogljikova nelegirana in nizko legirana jekla.

Valjanje blokov v blume preseka 135 × 135 mm je potekalo po ustaljenem planu prevlekov za ogljikova nelegirana in nizko legirana jekla. Pogoji ohlajevanja blumov po valjanju so normalni na zraku.

## 3. REZULTATI PREISKAV

Na vzorcih jekel, legiranih z B smo izvršili določene laboratorijske preiskave, katerih rezultati naj bi potrdili uspešnost osvojene tehnologije legiranja B v jeklu. Rezultati teh preiskav so naslednji:

### 3.1 Kemična analiza vsebnosti B v jeklu

Kemično vsebnost B v jeklu smo določili po dianthimid fotometrični metodi v laborat. metalurškega inštituta v Ljubljani. Rezultati preiskav so zbrani v tabelah 4 in 5.

### 3.2 Porazdelitev B v vzorcih jekla

Porazdelitev B v vzorcih jekla smo preiskali z avtoradiografsko metodo. Preizkusi so bili izvedeni na inštitutu »Jožef Stefan« v Ljubljani v naslednjih eksperimentalnih pogojih:

detektor sledi LR 115 6  $\mu\text{m}$

mesto obsevanja suha celica reaktorja TRIGA

Mark II

neutronska ekspozicija  $5,8 \cdot 10^{12}$  neutronov  $\text{cm}^{-2}$   
jedkanje detektorske folije 2,5 N KOH  $60^\circ\text{C} \pm \pm 0,1^\circ\text{C}$  15 min.

Preiskani so bili vzorci šarže 02 5036 MBA 20 (nač. leg A)

03 4855 G, S, N MBA 20 in 03 4852 G, S, N KVB 30.

Porazdelitev B je prikazana na slikah 6 in 7.

### 3.3 Prekaljivost jekla

Prekaljivost jekla smo preiskali po metodi Jominy. Optimalno temperaturo kaljenja smo določili na osnovi izdelave kalilne vrste in dilato-

Tabela 4: Vsebnost B, Al, Ti ter plinov v vzorcih jekla MBA 20

St. šarže	Dod. B %	Loka- cija	Vsebnost elementov v %						
			B top.	B net.	Al top.	Ti	N	O	
03 4300	0,002 [A]	G C 3	< 0,0001	< 0,0001	0,098	0,036	0,0052	0,0013	
			D 3	"	"	0,093	0,030	0,0056	0,0013
		Sr C 16	"	"	0,100	0,035	0,0052	0,0021	
			D 16	"	"	0,093	0,031	0,0049	0,0021
		N C 21	"	"	0,098	0,035	0,0049	0,0017	
			D 20	"	"	0,095	0,029	0,0048	0,0023
04 3335	0,004 [A]	G C 3	0,0017	< 0,0001	0,088	0,040	0,0046	0,0019	
			D 3	0,0001	"	0,085	0,044	0,0050	0,0023
		S C 11	0,0014	"	0,087	0,045	0,0048	0,0021	
			D 11	0,0008	0,0002	0,084	0,044	0,0053	0,0029
		N C 20	0,0014	0,0002	0,086	0,040	0,0051	0,0021	
			D 20	0,0001	< 0,0001	0,087	0,040	0,0051	0,0025
01 0910 A	0,005 [A]	G A 2	0,0035	0,0007	0,060	0,06	0,0061	0,0020	
			0,0042	0,0003					
		S A 11	0,0038	0,0001					
			0,0039	0,0004					
		N A 20	0,0034	0,0001					
			0,0034	0,0001					
		0,0032	0,0004						
	0,008 [A]	G B 2	0,0044	0,0022					
			0,0041	0,0014					
		S B 11	0,0062	0,0008					
			0,0058						
		N B 20	0,0046	0,0006					
0,0033			0,0024						
02 5036	0,008 [A]	S A 10	0,0042	0,0014	0,075	0,08	0,0060	0,0022	
			0,0050	0,0008					
07 6168	0,006 [A]	S	0,0032	0,0003	0,057	0,05	0,0064	0,0028	
03 4855	BATS 2 0,006 [B]	G A	0,0026	0,0016	0,047	0,06	0,0050	0,0020	
			0,0033	0,0006					
		N A	0,0043	"					
			0,0044	"					
		S A	0,0033	0,0008		0,0050	0,0028		
			0,0037	0,0005					

Tabela 5: Vsebnost B, Al, Ti in plinov v vzorcih jekla KVB 30

St. šarže	Dod. B %	Loka- cija	Vsebnost elementov (%)					
			B top.	B net.	Al top.	Ti	N	O
02 4912	0,008 [A]	S	0,0041 0,0042	0,0002	0,052	0,09	0,0058	0,0040
02 5153	0,006 [A]	S	0,0017 0,0019	< 0,0001 0,0005	0,042	0,08	0,0061	0,0036
04 3914	BATS 2 0,006 [B]	S	0,0024 0,0018	< 0,0001 0,0002	0,044	0,04	0,0064	0,0025
		G	0,0044 0,0040	< 0,0001 0,0001	0,056	0,04	0,0054	0,0024
03 4852	BATS 2 0,006 [B]	S	0,0041 0,0033	< 0,0001 0,0001	0,046	0,04	0,0056	0,0033
		N	0,0040 0,0036	< 0,0001 0,0005	0,048	0,04	0,0052	0,0039
04 3897	BATS 2 0,006 [B]	S	0,0030 0,0031	0,0004 0,0003	0,133	0,04	0,0057	0,0036

metrične preiskave premenskih točk. Rezultati preizkusov prekaljivosti so zbrani v tabelah 6 in 7.

Tabela 6: Rezultati preizkusov prekaljivosti jekla MBA 20 T<sub>A</sub> 900° C

St. šarže	Od. hl. str. pr.	Trdota po dolžini preizkušanca HRc									
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
03 4300	1 S	15	9	7	5	3	2	2	—	—	—
	2 S	10	8	6	5	3	2	2	—	—	—
04 3335	1 S	40	37	29	17	13	10	8	7	—	—
	2 S	40	37	28	17	13	10	8	7	—	—
01 0910	1 S	42	41	40	36	28	20	15	12	—	—
	2 S	43	42	41	37	27	20	15	12	—	—
02 5036	1 S	39	38	36	32	24	21	18	15	—	—
	2 S	41	39	37	34	29	24	20	16	—	—
07 6168	1 S	41	40	40	37	30	20	18	14	—	—
	2 S	41	40	39	37	32	23	18	13	—	—
03 4855	1 S	44	43	42	41	37	31	25	20	—	—
	2 S	45	44	42	41	37	29	25	21	—	—

Tabela 7: Rezultati preizkusov prekaljivosti jekla KVB 30 T<sub>A</sub> 860° C

šarže St.	mm od hl. čela	Trdota po dolžini preizkušanca HRc									
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
02 4912		53	51	49	47	42	35	30	25	—	—
02 5153		52	49	47	44	39	30	25	22	—	—
04 3914		52	49	44	24	21	20	20	20	—	—
03 4852	G	53	51	50	39	28	24	23	21	—	—
	S	54	52	51	43	28	25	23	22	—	—
	N	54	52	50	43	28	25	23	22	—	—
04 3897		55	54	53	53	47	34	28	27	—	—
Italijanski vzorec		46	45	44	31	19	17	16	14	—	—

V tabeli 8 so navedene vrednosti faktorja BF, ki je izračunan iz razmerja dejanskega DI (jeklo z B) in izračunanega DI iz kemične sestave za jeklo brez B.

Tabela 8: Vrednosti idealnih premerov kaljenja in BF

šarže St.	Zrno ASTM N°	Kval. jekla	Di (J) jeklo z B in	DI jeklo brez B in	BF DI (J): DI	HRc 50	Xj (mm)
03 4300	8	MBA 20	—	0.56	—	32	—
04 3335	7	"	1.7	0.57	2.98	32	5
01 0910	8	"	2.5	1.08	2.31	32	9.5
02 5036	8	"	2.6	1.15	2.26	30	10
07 6168	8	"	2.6	0.92	2.83	30	11
03 4855	7	"	2.7	0.94	2.87	33	11.5
02 4912	8	KVB 30	2.6	1.38	1.88	41	10.5
02 5153	7	"	2.6	1.22	2.13	37	10.5
04 3914	8	"	2.0	0.75	2.66	45	6.5
03 4852	8	"	2.2	0.91	2.42	42	8
04 3897	8	"	2.8	1.22	2.29	44	11

V tabeli 9 so navedeni tudi rezultati preiskav trdnostnih lastnosti nekaj jekel, legiranih z B v popoljšanem stanju, ki naj pokažejo uporabnost izdelanih talin za izdelavo kvalitetnih vijakov, za kar so ta jekla tudi namenjena.

### 3.4 Spособnost jekel za preoblikovanje v hladnem

Spособnost jekel za plastično preoblikovanje v hladnem smo preizkusili s tlačnim preizkusom (35). Preizkusi so bili izvršeni v laboratoriju za plastično preoblikovanje pri fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Režim nakrčevanja, t. j. stroj,



Tabela 9: Trdnostne lastnosti v poboljšanem stanju

Št. šarže	Kval.	Poz.	Temperatura napuščanja											
			400° C				500° C				600° C			
			$\sigma_m$	$\sigma_v$	$\delta_s$	$\psi$	$\sigma_m$	$\sigma_v$	$\delta_s$	$\psi$	$\sigma_m$	$\sigma_v$	$\delta_s$	$\psi$
04 3335	MBA 20	S	678	530	25	63	749	642	25	63	549	392	25	64
01 0910	"	S	1090	961	15	64	853	834	16	67	775	736	17	70
02 5036	"	S	1069	1030	15	55	853	814	18	60	765	745	20	71
03 4855	"	G	1128	1108	15	62	893	843	19	66	795	775	20	70
	"	S	1138	1109	14	62	993	843	17	65	785	745	20	70
	"	N	1108	1089	14	62	993	843	17	68	785	736	20	69
02 5153	KVB 30	S	1265	1116	12	61	951	922	14	65	833	765	18	67
02 4912	"	S	1304	1245	12	60	990	951	14	63	844	785	18	67

mazivo, hitrost deformacije ( $\dot{\phi} = 10^{-2} \text{ S}^{-1}$ ), metoda merjenja ter način vrednotenja rezultatov je bil enak za vse preizkušance. Ustreznost potence funkcije kot modela krivulje plastičnosti smo testirali s F-testom, pomembnost eksponenta utrjevanja pa s t-testom. Oba testa sta pokazala, da je tveganje  $< 0,5\%$  korelacijski koeficient  $k_f \sqrt{1/\phi_v} > 0,99$ . Vse to daje možnost izvajanja relativno trdnih zaključkov. Rezultati, prikazani v tabeli, predstavljajo srednjo vrednost dveh paralelnih vzorcev jekla MBA 20 so bili preiskani v vroče valjanem stanju, vzorci jekla MVB 30 pa v sferoidizacijsko žarjenem stanju. Karakteristične vrednosti krivulj plastičnosti so navedene v tabeli 10.

Tabela 10: Karakteristične vrednosti krivulj plastičnosti

MBA 20			KVB 30		
St. šarže	$k_f$ [N/mm <sup>2</sup> ]	n	St. šarže	$k_f$ [N/mm <sup>2</sup> ]	n
04 3335	871	0.195	02 4912	943	0.231
01 0910	944	0.176	02 5153	883	0.202
02 5036	1061	0.160	04 3914	869	0.214
07 6168	1014	0.170	03 4852 G	894	0.214
04 4855 G	1056	0.123	03 4852 S	901	0.208
04 4855 S	1048	0.154	03 4852 N	869	0.212
04 4855 N	1071	0.145	04 3897	869	0.222

### 3.4.1 Značilnosti mikrostrukture jekel

Da bi lažje ocenili prikazane rezultate plastičnosti v hladnem, smo izvršili tudi metalografske preiskave vzorcev posameznih šarž jekla. Značilnosti mikrostrukture obravnavanih vrst jekel so naslednje:

Vzorci jekel kvalitete MBA 20 imajo strukturo iz ferita in lamelnega perlita. Velikost kristalnih zrn ter oblika in velikost posameznih strukturnih komponent kažeta na neenakomeren režim ohlajanja po valjanju in nizko končno temperaturo pri valjanju. Na vzorcih jekel, ki pripadajo šaržam 02 5036 in 04 4855 opazimo poleg feritnih in perlitnih zrn tudi bajnit, mogoče celo martenzit.

Razlike v velikosti mikrostrukturnih komponent v vzorcih jekla iz šarž 04 3335 (0,42 % Mn) in

01 0910 (1,11 % Mn), ki sta bili valjani pod enakimi pogoji, lahko pripišemo razliki v sestavi jekel.

Ce izvzamemo zaključke Ti karbonitrida, so vsa jekla zelo čista. Sulfidni in oksidni vključki so drobni.

V mikrostrukturi jekel opazimo drobne oglete vključke Ti karbonitrida, posamične nize in skupine zelo drobnih oksidnih vključkov ter enakomerno porazdeljene drobne sulfide.

## 4. ANALIZA REZULTATOV

Uporabljeni eksperimentalni postopek legiranja B v posamezne bloke jekla s pomočjo tankostenkih cevi, napolnjenih z mešanico zlitin B, Ti, Zr in Al je omogočil študij zahtevane minimalne količine B v vložku, da bi se čim bolj približali optimalni vsebnosti B v jeklu. Izkazalo se je, da naj bo vsebnost B v vložku med 0,005 in 0,006 %. Za izdelavo celih šarž B jekla smo uporabili kompleksno zlitino BATS 2, ki vsebuje največ B in jo je zato potrebno najmanj, kar se ugodno odraža tudi v ekonomičnosti proizvodnje B jekel. Vsebnost B v jeklih, kjer smo legirali 0,006 % v B obliki kompleksne zlitine BATS 2, je povprečno 0,0035 % z raztrosom  $\pm 0,0005\%$ .

Na osnovi eksperimentiranja z večjim številom šarž bi bilo ob takšnem raztrosu priporočljivo še nadalje zniževati količino kompleksne zlitine, t. j. B, da bi se približali optimalni vsebnosti B v jeklu. Mnenja smo, da bi bil pri dani tehnologiji izdelave in vlivanja jekla na zraku optimum dosežen pri dodatku med 0,004 in 0,005 % B. Vsebnost netopnega B močno variira, v večini primerov pa je pod 0,0005 %, kar kaže na dobro vezavo plinov v jeklu. Dosežena je željena vsebnost Ti. Ker se B legira v obliki kompleksne zlitine z 2 % B, je potrebno v kratkem času vreči v curek jekla med vlivanjem iz peči v ponovno veliko količino zlitine. Samo doziranje tako predstavlja določen problem, čemur lahko pripišemo tudi določen delež raztrosa pri vsebnosti B v jeklu. Praksa izdelave večjih količin B jekel bo gotovo pokazala določene pomenovitve pri doziranju zlitine B v jeklo, kar naj olajša napore, ki jih imamo ob tej tehnologiji.

V okviru te naloge smo izdelali veliko blokov in šarž, legiranih z B. Vsi bloki so bili normalno ogrevani v globinskih pečeh in valjani na blumingu po ustaljenem planu prevlekov za nelegirana srednje ogljična jekla. Med samim valjanjem nismo opazili nobenih anomalij. Blumi so bili ohlajeni na zraku. Kontrola homogenosti z neporušnimi preiskavami in odtisi žvepla tudi ni pokazala nobenih posebnosti v primerjavi z enakimi jekli brez B. Laboratorijskih preiskav, ki naj bi pokazale sposobnost B jekel za preoblikovalnost v vročem, žal nismo naredili, četudi so bile predvidene in so bili za torzijski preizkus v vročem izdelani tudi preizkušanci. Te preiskave bi morale biti sestavni del nadaljevanja preiskav vpliva B na fizikalne in tehnološke lastnosti jekel.

Preiskave vsebnosti B v različnih pozicijah enega bloka in več blokov ene šarže kažejo na dobro homogenost makroskopske porazdelitve B. Avtoradiografske preiskave porazdelitve B v mikrostrukturi jekla kažejo na enakomerno porazdelitev B v mikrostrukturi, pri tem pa je jasno izražena tendenca koncentracije B na mejah zrn. Tudi v tem primeru ni bistvenih razlik v porazdelitvi bora med posameznimi šaržami in lokacijami znotraj enega bloka.

Uspešnost osvojene tehnologije naj bi se potrdila predvsem z izkazano učinkovitostjo B pri povečanju prekaljivosti jekla. V ta namen so bile vključene v preiskave tudi druge spremenljivke v sestavi jekel. V pogledu vsebnosti C so bile poizkusne šarže izdelane z vsebnostjo C v mejah.

- a) 0,18 — 0,22 % C za jeklo MBA 20 in
- b) 0,32 — 0,38 % C za jeklo KVB 30

Večja odstopanja od smerne analize so posledica tehnoloških odstopanj in niso zavestna. Pri jeklu MBA 20 sta prvi dve šarži (bloka) z nizko vsebnostjo Mn, pri ostalih blokih, oz. šaržah pa z višjo vsebnostjo Mn 1,10 — 1,20 %. Da bi dosegli boljšo plastičnost jekel v hladnem, smo pri obeh kvalitetah v primeru, ko smo B legirali v cele šarže, na osnovi priporočil iz literature izdelali šarže z nizko vsebnostjo Si.

Če ocenjujemo efekt B v jeklu na osnovi doseženega faktorja BF, potem vidimo, da je vrednost BF pri jeklu MBA 20 višja kakor pri jeklu KVB 30. To lahko pripišemo različni vsebnosti C pri obeh jeklih. V vseh primerih so dosežene vrednosti BF pri eksperimentalnih šaržah višje od navedenih vrednosti BF v literaturi. Znotraj posameznih kvalitet opažamo razlike med posameznimi šaržami. Pri jeklu MBA 20 kažeta najvišjo vrednost BF šarži 07 6168 in 03 4855 (B je bil dolegiran po različnih postopkih), ki imata višjo vsebnost Mn kot šarži 01 0910 in 02 5036, kjer je BF nižji.

Pri kvaliteti z višjo vsebnostjo C je dosežen najvišji BF pri šarži 04 3914, ki ima vsebnost B v optimalnih mejah, najnižji pa pri šarži 02 4912, ki ima najvišjo vsebnost B (dod. 0,008 %). Za stati-

stično vrednotenje kvantitativnih vplivov imamo na voljo premalo rezultatov, zato smo omenili le najbolj zaznavne.

Za uporabnost posameznih kvalitet B jekel pa nas zanima tudi sam potek Jominy krivulj in pa dosežene mehanske vrednosti po kaljenju in napuščanju. V tem delu smo se tega področja lotili le toliko, da bi potrdili smer za nadaljevanje poizkusov osvajanja kvalitete jekel za kvalitetne vijake razreda 8,8, 10,9 in 12,9.

Jeklo MBA 20 naj bi doseglo trdnostne lastnosti v poboljšanem stanju kot jeklo KV 35, imelo pa naj bi boljšo sposobnost za hladno masivno preoblikovanje (36). Na osnovi dosežene trdote po dolžini preizkušanca je razvidno, da smo dosegli zahtevano trdoto 40 HRC na v globini 6 mm od kaljenega čela pri vseh šaržah z vsebnostjo Mn > 1,10 %. V tem pogledu se je kot neustrezna pokazala šarža 02 5036, ki ima tudi najnižji BF, in pa šarža z normalno vsebnostjo Mn 04 3335, kar dokazuje že večkrat omenjeno optimalno kombinacijo elementov C, Mn in B. Pri temperaturi napuščanja 500° C (550° C) je pri vseh šaržah, razen 04 3335, ki ne vsebuje B, mogoče zanesljivo doseči zahtevane trdnostne lastnosti kvalitetnih vijakov razreda 8,8.

Pri jeklu KVB 30 smo v primerjavi z jeklom KV 35 želeli doseči večjo globino prekaljivosti in s tem jeklom omogočiti izdelavo kvalitetnih vijakov, debeline nad 12 mm. Željeno trdoto 40 HRC smo dosegli do oddaljenosti 10 mm od kaljenega čela pri šaržah 02 4912 in 04 3897, ki ima najvišjo vsebnost C, pri ostalih šaržah pa le 8 mm. Trdnostne lastnosti v poboljšanem stanju, ki smo jih preiskali le pri dveh šaržah 02 5153 in 02 4912, dajejo upanje, da bi jeklo KVB 35 lahko uporabili za izdelavo kvalitetnih vijakov razreda 10,9 omejenega premera. Vsekakor pa je jeklo KVB 35 primerno za izdelavo kvalitetnih vijakov premera do 18 mm. V vsakem primeru pa je pred uporabo jekla v določene namene potrebna stroga kontrola kvalitete jekla v pogledu prekaljivosti. Statistično tudi ni dokazana nikakršna korelacija med vsebnostjo B v jeklu in doseženo trdoto jekla po kaljenju.

Preiskave sposobnosti B jekel MBA 20 in KVB 30 za plastično preoblikovanje v hladnem so pokazale naslednje značilnosti:

Vzorci jekla MBA 20 so slabo plastični. Med posameznimi šaržami in vzorci ene šarže so velike razlike, ki pa jih lahko pripišemo neenakomerni mikrostrukturi, ki je posledica nizke končne temperature valjanja in hitrega ohlajanja po končanem valjanju. Da bi dosegli željeni ekonomski efekt, bo potrebna stroga kontrola temperaturnega režima valjanja in ohlajanja. Karakteristike krivulje plastičnosti jekla KVB 35 so bolj enakomerne, saj so bili vzorci pred preizkusi sferoidizacijsko žarjeni. Krivulja tečenja je pri vseh preiskanih vzorcih nižja od krivulje tečenja jekla KV 35. B torej ne kaže direktnega vpliva na sposobnost jekel za plastično preoblikovanje v hladnem.

## 5. ZAKLJUČKI

5.1 Borova jekla je mogoče izdelovati v SM pečeh ob nekoliko spremenjeni tehnologiji dezoksidacije jekla. Jeklo je treba že v peči intenzivno dezoksidirati z aluminijem, pri čemer se je kot najbolj ugodna pokazala zlitina feroaluminij. Kot primerna zlitina za dodajanje bora se je izkazala kompleksna zlitina BATS 2 z 2 % bora.

5.2 Optimalni dodatek bora v vložku je pri dani tehnologiji 0,005 %. Doseženi izkoristek bora je med 50 in 60 %. Jeklo se s tem podraži za 150 din/t zaradi dodatka zlitine BATS 2.

Analize bora kažejo, da je bor porazdeljen enakomerno in v ozkih analiznih mejah po bloku in šarži.

5.3 Učinkovitost bora v jeklu, določena z borovim faktorjem (BF), potrjuje uspešnost osvojene tehnologije legiranja jekla z borom, saj je le-ta vedno večji od 2.

5.4 Na osnovi povečane prekaljivosti jekel kot posledica legiranja z borom smo osvojili dve kvaliteti ogljičnih jekel za izdelavo kvalitetnih vijakov in matic razreda 8,8 in 10,9, ki jih že lahko proizvajamo v industrijskem merilu.

5.5 Na osnovi doseženih rezultatov te raziskovalne naloge naj bi se preiskave nadaljevale na električnih obločnih pečeh z razširitvijo kvalitetnega asortimenta na nizko legirana jekla za hladno masivno preoblikovanje.

Osvojeno tehnologijo je treba še nadalje preverjati in dopolnjevati na osnovi večjega števila šarž, kvaliteto jekla pa na osnovi še bolj poglobljenih preiskav fizikalnih in tehnoloških lastnosti jekel.

## 6. Uporabljena literatura

1. A. Ažman: Interno poročilo RO Železarne Jesenice, december 1977
2. Zapisnik sestanka proizvajalcev in potrošnikov jekel za cementacijo v Privredni komori Jugoslavije, Beograd, 16. 2. 1977
3. A. Razinger: »Razvoj specialnih jekel za hladno masivno preoblikovanje«, predavanje na XI. Svetovanje za proizvodstveno mašinstvo, Ohrid, junij 1977
4. M. Kishen Koul, C. L. Mc Vicker: Metal Progress, nov. 1966, str. 40—44
5. D. J. Blichwede: Metal Progress, maj 1970, str. 76—80

6. K. Sieber: Metal Progress, jan. 1971, str. 93—98
7. D. F. Buxter: Metal Progress, oct. 1972, str. 77—86, nov. 1972, str. 47—60
8. K. Sah: Wire Industry, jan. 1975, str.
9. IV. Stahlagung, 6 — 8. 11. 1974, Baabe, DDR
10. H. H. Domalski: Draht, febr. 2 1976, str. 53—55
11. H. C. Weidner: Wire — Wire Products, nov. 1968, str. 56 do 58 in 108—110
12. J. A. Rinebolt: Metal Progress, sept. 1969, str. 117—122
13. G. Cesti, M. Macuz, C. Maccarini: La metalurgia Italiana 1972, št. 5, str. 256—260
14. M. Savettata: Matériaux et techniques 1975, jan.-febr., str. 17—23
15. T. Lavrič: »Določevanje B v jeklu«, Poročilo M. I. Ljubljana, maj 1968
16. A. Kveder, J. Žvokelj: »B v jeklih za poboljšanje«, Poročilo M. I. Ljubljana, maj 1968
17. J. Žvokelj: »B v jeklih za masivno preoblikovanje v hladnem«, Poročilo M. I. Ljubljana, maj 1976
18. Đ. Kraksnev: Zaštita materiala, 1972, št. 5/6, str. 90—92
19. Đ. Kraksnev: Zaštita materiala, 1971, št. 10/11, str. 374 do 380
20. Đ. Kraksnev: Zaštita materiala, 1972, št. 5/6, str. 93—97
21. Đ. Kraksnev: Zaštita materiala, 1972, št. 11/12, str. 213 do 218
22. V. Ustahal, K. Stransky: Hutnicke listy, št. 7, 1976, str.
23. A. Brown, J. D. Garnisch, R. W. K. Haneycombe: Metal Science, št. 8, 1974, str. 317
24. S. R. Keown, F. B. Pickering: Metal Science, št. 7, 1977, str. 225—233
25. T. M. Williams, A. M. Stoneham, D. R. Harries: Metal Science
26. P. Maitrepierre: Metalurgical Transaction, feb. 1975
27. W. Polanschütz: Radex Rundschau, 1976, št. 4, str. 843 do 849
28. R. Kawamura: Transaction ISIY, 1976, št. 16, str. 545 do 550
29. R. W. Morris: Special Steel Technical Rewieu BSC, aug. 1975
30. J. Glen: Symposium on the Hardenability of Steel ISI Special Report, N° 36, 1946, str. 356—400
31. W. F. Iandesha, I. E. Morral: Metalurgical Transaction
32. H. Bugger: Härtereie — Technische Mitteilungen, št. 1, 1961, str. 12—18
33. R. H. Cobbett: Metal Progress, may 1977, str. 35—37
34. G. F. Melloy, P. R. Slimman, PP Podgursky: Metalurgical Transaction, vol. 4, oct. 1973, str. 2279—2289
35. B. M. Kapadia, R. M. Brown, W. J. Murphy: Transactions of the Metalurgical Society of AIME, vol. 242, aug. 1968, str. 1689—1694
36. K. Kuzman, A. Razinger: Železarski zbornik, 1974, št. 2, str. 189—197
37. A. Razinger: Savremeni materiali, 1. 5., št. 314, str. 26—28

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Borlegierten Stähle können in SM Öfen erzeugt werden wenn die Desoxydation entsprechend modifiziert wird um Sauerstoff und Stickstoff im Stahl fest zu binden.

Als best geeignete Legierung zum Legieren von Bor in den Stahl hat sich die Legierung BATS 2 mit 2 % B erwiesen. Die optimale Bor zugabe beträgt bei der gegebenen Technologie 0.005 %, was bei einem Ausbringen von 50—60 % den gewünschten Borgehalt ergibt.

Die Analysen des Borgehaltes ergaben, dass das Bor in einzelnen Blöcken und gesamten Schmelzen in engen Analysengrenzen gleichmässig verteilt ist.

Der erzielte Borfaktor der immer grösser als 2 ist bestätigt die Wirksamkeit von Bor im Stahl und den Erfolg der entwickelten Technologie.

Auf Grund der ausgearbeiteten Technologie des Legierens von Stahl mit Bor und der erzielten Durchhärtung die eine Folge des richtigen Borgehaltes, der Form und Verteilung ist, sind zwei neue Stahlorten der Kohlenstoffstähle für die Erzeugung von Qualitätsschrauben und Muttern der Festigkeitsklasse 8.8 und 10.9 entwickelt worden. Die Stähle werden im Industrieausmass hergestellt.

## SUMMARY

Boron steel can be produced in open-hearth furnaces by a slightly modified technology of steel deoxidation for binding oxygen and nitrogen gases.

The complex BATS master alloy with 2 % boron proved to be suitable for alloying boron into steel. The optimal addition of boron for the given technology is 0.005 % where 50 to 60 % yield is already taken in account.

B 15 to 20 ppm. Analyses of boron showed that it is uniformly distributed in single ingots and the whole batches in narrow analytical limits. Boron effectiveness in

steel determined by the BF factor confirms the efficiency of adopted technology since the achieved BF factors were always higher than 2.

By the adopted technology of alloying boron into steel and the achieved through hardenability as a consequence of the correct content, shape and distribution of boron in steel, two new qualities of carbon steel for high-grade screws and nuts of 8.8 and 10.9 strength grade were successfully introduced into the manufacturing program. The steel can be manufactured in industrial scale.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стали, легированные с бором можно, при несколько измененной технологии раскисления для улучшения связи с кислородом и азотом, изготавливать также в мартеновских печах.

Соответствующий сплав, в форме которого выполняется легирование оказался комплексный сплав BATS с содержанием 2 % бора. При этой технологии оптимальная добавка бора составляет 0,005 %, а средний выход в величине 50—60 % можно считать удовлетворительным.

Выполненные исследования показали, что в отдельных сант-

ках и целых плавак бор распределён равномерно в узких аналитических пределах. Воздействие бора в сталях определено с BF фактором; полученный BF превышает значение 2, что доказывает успех в примененной технологии.

На основании усвоенной технологии легирования бора в сталь и полученной закалки, которые подтверждают выбранное содержание бора, его форму и распределение, усвоены две новые марки углеродистых сталей, предназначенных для изготовления качественных винтов и гаек класса прочности 8,8 и 10,9. Эти стали можно изготовлять в промышленном масштабе.