

Vpliv bora na mikrostrukturo in lastnosti jekel

UDK: 669.14.018.298
ASM/SLA: CN-g, EG-j40

A. Kveder, J. Žvokelj

Preiskava je bila poskus preveriti vpliv bora na lastnosti visokotrdnih gradbenih jekel, znanih pod imenom HSLA. Ta jekla so nizkoogljikna, legirana z majhnimi dodatki elementov, ki jeklo disperzijsko ali kako drugače utrujejo.

A. UVOD

V letih 1977/78 je bil uresničen prvi del raziskovalnega programa o osvajanju tehnologije izdelave borovih jekel (A. Razinger: Tehnologija izdelave in predelave jekel, legiranih z borom). Vključno z raziskavo, ki je bila izdelana že pred nekaj leti (A. Kveder, J. Žvokelj: Bor v jeklih za poboljšanje, MI Ljubljana, 1968), predstavlja to delo dovolj obširen in zaključen del programa z zadovoljivimi rezultati. Kratko opisani zaključki te raziskave so taki:

Jekla z borom (raziskovani sta bili jekli MBA 20 in KVB 30, ki jih rabijo za kvalitetne vijake razredov 8,8 in 10,9) je mogoče izdelovati v SM pečeh z nekoliko spremenjeno tehnologijo dezoksidacije. Jeklo je treba intenzivno dezoksidirati že v peči, najbolje s feroaluminijem. Ustrezna zlitina za dodajanje bora je BATS 2 z 2 % B. Optimalni dodatek bora je 0,005 %, pri čemer je izkoristek med 50 in 60 %. Učinkovitost bora (vpliv na prekaljivost) je bila zelo dobra, saj je bil takoimenovani faktor kalilnosti bora vedno večji od 2. Končni sklep je bil, da sta prej omenjeni jekli z B osvojeni in jih je mogoče industrijsko proizvajati.

V nadaljevanju raziskav jekel z borom (leta 1979, nal. 660: Bor v jeklih, II. del) je bila predvidena razširitev asortimana na jekla za hladno masivno preoblikovanje. Program je bil spremenjen toliko, da smo se namesto teh jekel odločili za mikrolegirana konstrukcijska jekla. Za to sta bila v glavnem dva vzroka: ta jekla so bila v preteklih

letih predmet obširnih raziskav v železarni Jesenice in na metalurškem inštitutu, zato smo v to tematiko vključili tudi mikrolegiranje z borom, in drugič, o nizkoogljiknih jeklih z B nismo zasledili poročil v strokovni literaturi. Povzetek rezultatov te raziskave je na kratko naslednji: Bor (skupaj z Nb) močno poveča mejo plastičnosti, vendar le, če je jeklo v valjanem stanju ali žarjeno na 650° C. V normaliziranem stanju pa se meja plastičnosti zelo zniža, skoraj do vrednosti, ki jih imajo jekla brez B in Nb. Opaziti pa je bilo, da bor obenem z zvišanjem trdnostnih lastnosti (v valjanem stanju) občutno zniža žilavost jekla. Najboljše rezultate smo dobili po žarjenju na 650° C, pri čemer se je zelo popravila tudi žilavost. Ugotovili smo tudi, da B ne poslabša varilnih karakteristik jekla. Poudariti je treba, da so jekla vsebovala različne količine ogljika (od 0,04 do 0,18 % C) in da je B najbolj vpliven pri 0,07 do 0,09 % C.

V naslednji raziskavi, na katero se nanaša to poročilo, smo hoteli preveriti tudi vpliv drugih mikrolegiranih elementov (zraven B) in vpliv kompleksnejših sestav mikrolegiranih jekel pri približno enakih in nizkih količinah ogljika (od 0,04 do 0,06 % C).

Literarnih podatkov o B v nizkoogljiknih konstrukcijskih jeklih skorajda ni, nekaj smo jih navedli v prej omenjenem poročilu (naloge 660) (1—9).

B. EKSPERIMENTALNI DEL

1. Zasnova raziskav

Glavni namen raziskave je bil ugotoviti vpliv različnih kombinacij mikrolegiranih elementov na mehanske lastnosti, če je tem jeklom dodan tudi

bor. Na ogljik kot variabla nismo računali, vendar ga v vseh talinah ni popolnoma enako — giblje se med 0,04 do 0,06 %. Za preizkuse smo namenili vzorce v 4 stanjih, v valjanem in v treh toplotno obdelanih stanjih.

Nadalje smo izdelali še dva para talin:

— dve talini z zelo nizkim ogljikom, eno z Nb in drugo brez njega,

— dve talini dualnega jekla (jekla, ki ima po ustrezni toplotni obdelavi dualno feritno-martenzitno strukturo), eno z V, drugo pa z B.

Pri prvih dveh smo hoteli ugotoviti, v koliki meri je B vpliven tudi pri nizkih ogljikih, pri drugih dveh pa, ali lahko v dualnem jeklu B nadomesti V. Tudi te taline smo preizkusili v različnih stanjih.

2. Izdelava talin in kemične sestave

Jekla smo talili v SF indukcijski peči in jih ulivali v 18 kilogramske bloke. Osnovna sestava pri vseh jeklih naj bi bila približno:

0,5 % Si in

1,5 % Mn (razen pritalini 8 z 2,5 % Mn)

Ogljika pa naj bi bilo:

— v mikrolegiranih jeklih (chg 1 do 8) okoli 0,05 % C,

— v dveh nizkoogljikih (chg 9 in 10) okoli 0,015 % C,

— v dveh dualnih pa okoli 0,07 % C.

Talina 1 je brez mikrolegiranih dodatkov in služi le za primerjavo.

Bor smo dodajali z zlitino ferobor, ki vsebuje 19 % B. Za legiranje bora navadno uporabljajo kompleksnejše zlitine, ki vsebujejo tudi dezoksidacijske elemente in Ti. Titan je potreben za vezavo dušika, ki sicer zmanjšuje učinkovitost bora. Zato smo titan dodajali posebej, tako da ga je v jeklih okoli 0,02 %, vendar samo v tistih z borom.

Kemične sestave talin so v tabeli 1.

3. Predelava blokov v trakove

Taline 1 do 10: Bloke, katerih teža je bila 18 kg, smo predkovali v ploščate slabe z debelino 50 mm. Nadaljna predelava je potekala z valjanjem na eksperimentalnem ogrodju na trak s končno debelino 14 mm in širino 110 mm. Razmere valjanja so bile naslednje:

- začetna temperatura valjanja 1250° C,
- končna temperatura valjanja 850° C,
- število vtikov: 6,
- deformacije (konvencionalne): prva 10 %, ostale povprečno 20 %,
 - skupna deformacija (predkovanje in valjanje): konvencionalna 82,5 %, logaritmična 175 %,
 - ohlajanje po valjanju na zraku.

Tabela 1: Sestave talin v %

Talina	Dodatno legiranje	C	Si	Mn	Nb	V	Mo	B
1	—	0,05	0,59	1,6				
2	Nb	0,06	0,62	1,64	0,049			
3	B	0,04	0,48	1,44				0,0032
4	Nb-B	0,04	0,46	1,35	0,042			0,0030
5	V-B	0,04	0,54	1,52		0,11		0,0044
6	Nb-V-B	0,05	0,52	1,52	0,056	0,11		0,0026
7	Nb-Mo-B	0,04	0,48	1,39	0,045		0,25	0,0030
8	Mn-Nb-B	0,05	0,55	2,50	0,076			0,0031
9	-(nizek C)	0,017	0,57	1,58				
10	Nb							
	(nizek C)	0,015	0,53	1,62	0,026			
11	Dual z V	0,07	0,57	1,61				
12	Dual z B	0,07	0,77	1,61				0,0030

Opomba: Jekla vsebujejo še približno 0,025 % P, 0,022 % S, 0,01 % Al, jekla z borom pa še okoli 0,02 % Ti.

Talini 11 in 12: Valjanje do približne debeline 10 mm smo izvedli podobno kot pri talinah 1 do 10, nato pa smo trakove ponovno segrevali in jih izvaljali na debeline 4,5 mm. Dualna jekla se namreč zaradi specifičnosti pri kasnejši obdelavi (kratkotrajno segrevanje v medkritičnem temperaturnem območju in hitro ohlajanje) in namenov uporabe teh jekel uporabljajo največ do debelin okoli 6 mm.

4. Toplotne obdelave

Trakove smo za preizkušanje pripravili v štirih stanjih, oziroma toplotnih obdelavah:

- brez toplotne obdelave (valjano stanje) (oznaka V),
- normalizirano 920°/zrak (oznaka N),
- žarjeno na 650°/2 uri/zrak (oznaka Ž),
- medkritično žarjeno 800° C/10 minut/olje (oznaka MŽ).

5. Mehanske lastnosti

Preizkušance za natezne preizkuse smo izdelali v vzdolžni smeri, in sicer pri talinah 1 do 10 okroglega preseka 8 mm, pri talinah 11 in 12 pa ploščate, oboje z merami, ki ustrezajo kratkim proporcionalnim preizkušancem. Žilavostni preizkušanci so imeli zarezo ISO-V.

Jekla 1 od 8: Rezultati mehanskih preizkusov teh jekel so prikazani v tabeli 2 in na slikah 1 do 4. (Pripominjamo, da bi morali biti diagrami na teh slikah risani kot grafikoni, ker abscisa nima merske enote, vendar smo ugotovili, da bi bil tak način zelo nepregleden). Tudi ta jekla smo med-

Tabela 2: Mehanske lastnosti jekel 1 do 8

Tali- na	Dodatni elementi	Stanje	σ_V	σ_M	δ_5	ψ	Žilavost pri	
							+20°	-40°
1	—	V	350	461	—	77	208	185
		N	268	499	37	74	212	95
		Ž	307	420	36	78	235	172
		MŽ	284	581	28	63	—	—
2	Nb	V	397	606	29	62	122	30
		N	325	568	35	70	190	98
		Ž	441	512	30	75	197	64
		MŽ	334	669	29	63	—	—
3	B	V	321	454	36	69	198	15
		N	265	456	34	72	168	10
		Ž	308	420	36	75	210	8
		MŽ	278	548	27	67	—	—
4	Nb-B	V	410	567	28	70	168	58
		N	283	468	36	71	250	115
		Ž	455	518	28	73	175	50
		MŽ	369	590	26	66	—	—
5	V-B	V	330	510	32	70	90	10
		N	238	496	35	69	72	10
		Ž	422	530	29	73	92	10
		MŽ	308	582	29	64	—	—
6	Nb-V-B	V	446	676	26	60	50	10
		N	346	583	25	70	84	18
		Ž	527	559	25	69	15	8
		MŽ	391	673	26	64	—	—
7	Nb-Mo-B	V	500	684	20	63	48	10
		N	252	549	35	67	75	10
		Ž	563	641	22	64	25	10
		MŽ	497	703	21	64	—	—
8	Mn-Nb-B	V	586	580	19	60	65	12
		N	515	780	19	60	47	10
		Ž	578	682	22	65	90	13
		MŽ	634	910	18	62	—	—

Opomba k tabeli 2: Meja plastičnosti σ_V in natezna trdnost σ_M v N/mm², raztezek δ_5 in kontrakcija ψ v %, žilavost v J.

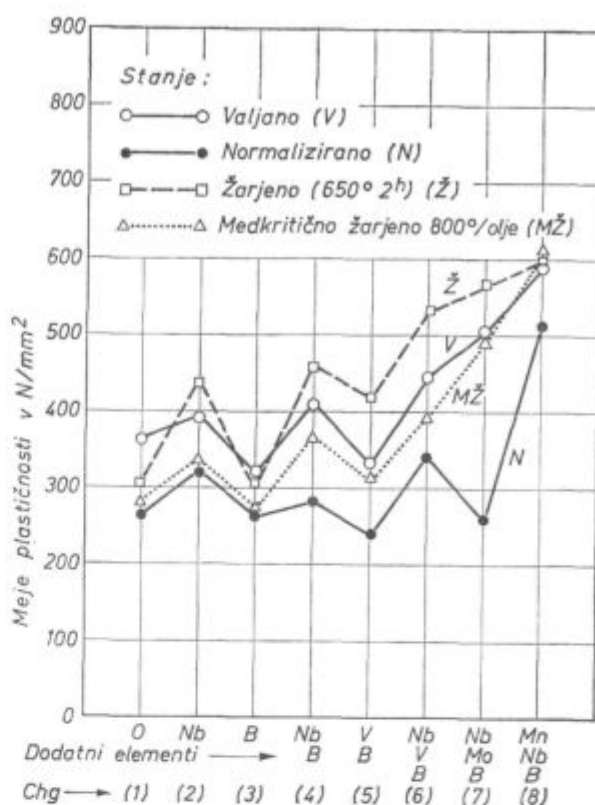
kritično toplotno obdelali (MŽ) in preizkusili, čeprav za prakso ta način pri teh debelinah (14 mm) ne pride v poštev. Vzrok za te preizkuse je v tem, da bi videli, kako B skupaj z drugimi dodanimi elementi vpliva na lastnosti v zaporedju povišanih temperatur, oziroma žarilnih struktur (feritna Ž, feritno-avstenitna MŽ, avstenitna N).

a) Meje plastičnosti se glede na sestavo mikrolegiranih elementov in glede na stanje oziroma toplotno obdelavo spreminjajo, in sicer:

Glede sestave mikrolegiranih elementov:

— Niobij (chg 2) poveča mejo plastičnosti (MP) v meri, ki je že poznana.

— Bor kot edini mikrolegirni element (chg 3) ne povečuje MP.



Slika 1
Meje plastičnosti
Fig. 1
Yield points

— Nb + B (chg 4) povečata MP bolj kot sam Nb (razen v normaliziranem stanju, kot smo že ugotovili v delu lit. 8 in 9).

— V + B kombinacija (chg 5) ima približno enak učinek na povečanje MP kot sam niobij (chg 2).

— Trojne sestave Nb + V + B, Nb + Mo + B in Mn + Nb + B (chg 6, 7 in 8) v tem vrstnem redu še povečuje MP.

Glede stanja, oziroma toplotne obdelave:

— V valjanem stanju niti B niti V + B nimata očitnega vpliva na MP, medtem ko ostale kombinacije povečujejo MP po naslednjem vrstnem redu:

Nb
Nb + B
Nb + V + B
Nb + Mo + B
Mn + Nb + B

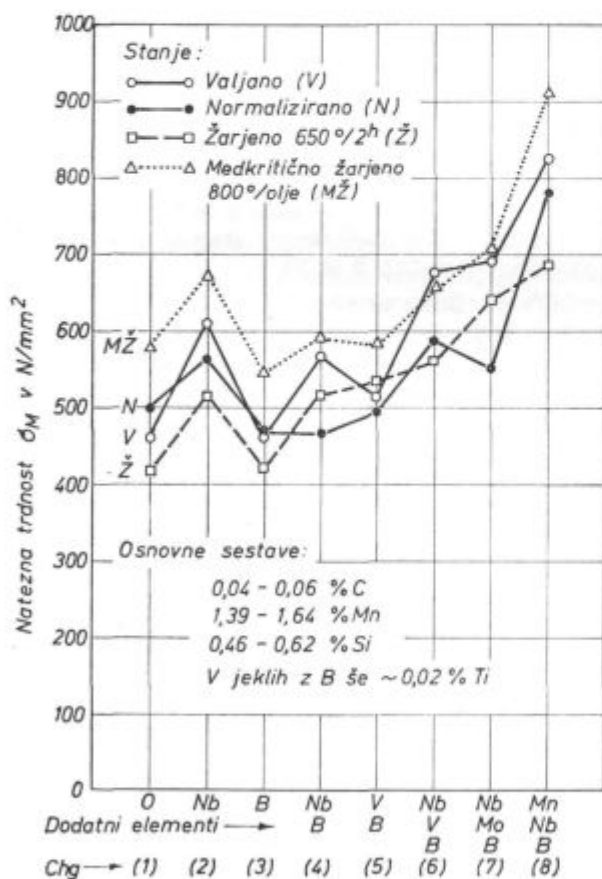
— V normaliziranem stanju je MP v večini sestavah, ki vsebujejo B, celo nižja kot pri jeklu 1, ki ne vsebuje nobenih dodatkov. Bor torej ne izniči izločevalnega efekta pri Nb jeklih (lit. 8, 9), temveč tudi pri drugih mikrolegiranih elementih in sestavah (razen pri jeklu 8 z 2,5 % Mn, kjer gre visoka MP na račun kalilnega učinka).

— Žarjenje pri 650° C da najvišje MP, predvsem pri tistih jeklih, ki vsebujejo izločevalne elemente (Nb, V) in kaže, da k temu dodatnemu učinku prispeva tudi bor.

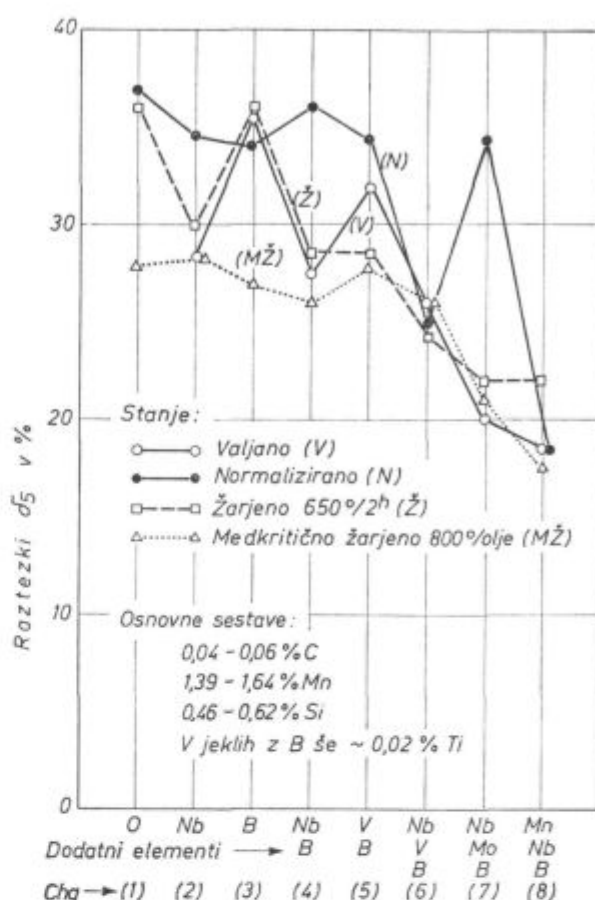
— Medkritično žarjenje zmanjša MP v primerjavi z valjanjem, in še bolj z žarjenim stanjem. Kljub hitremu ohlajanju in nastajanju prehodnih struktur (poleg ferita) se občutno zniža učinek izločevalnih elementov.

b) Natezna trdnost (slika 2) (NT) se glede na sestavo jekla giblje približno tako kot MP, glede na toplotno obdelavo pa je skorajda v nasprotju z MP. Povprečno najvišje vrednosti da medkritično žarjenje. Pri ostalih stanjih (V, N, Ž) so NT nižje in brez posebnih zakonitih odvisnosti od sestave jekel. Iz tega lahko sklepamo, da na višino NT v mnogo manjši meri vplivajo izločevalni procesi, kot je to pri MP, v tem večji meri pa sama struktura (velikost kristalnih zrn, nastajanje prebodnih struktur).

c) Raztezki (slika 3) so sorazmerno veliki in se znižajo na vrednosti okoli 20 % le pri trikomponentno legiranih in visokotrdnih jeklih 7 in 8. Povprečno najvišje raztezke da normalizirano stanje, najnižje pa medkritično žarjenje.



Slika 2
Natezna trdnosti
Fig. 2
Tensile strengths



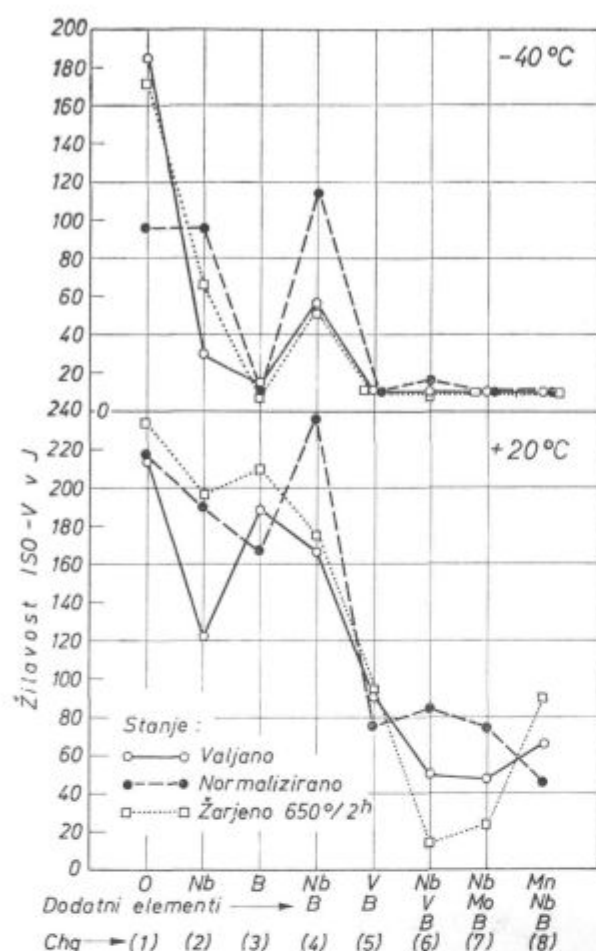
Slika 3
Raztezki
Fig. 3
Elongations

d) Žilavost (slika 4) pri +20° C je pri jeklih 1 do 4, torej pri jeklih brez mikrolegiranja ali legiranih z Nb, B in Nb + B izredno visoka, vanadij z borom in ostale trikomponentne kombinacije (jekla 5 do 8) pa žilavost občutno znižajo.

Pri -40° C pa s v žilavem do delno krhkem stanju le še jekla brez legiranja (chg 1) in jekli z Nb in Nb + B (chg 2 in 4). Jeklo z borom (chg 3) in vsa ostala jekla (chg 5 do 8) pa so že popolnoma krhka.

Jekli 9 in 10: To sta jekli z zelo nizkima količinama (0,017 in 0,015 % C), prvo brez mikrolegiranja, drugo z 0,026 % Nb. Rezultati mehanskih preiskav so prikazani v tabeli 3.

V valjanem in žarjenem stanju Nb izredno poveča mejo plastičnosti in tudi natezno trdnost, saj so vrednosti okoli 400, oziroma 480 N/mm² zares visoke, glede na to, da jeklo vsebuje le 0,015 % C. To je še toliko pomembnejše, ker ima pri tem jeklo še zelo dobre raztezke in kontrakcije, predvsem pa žilavosti. Najboljše je pravzaprav Nb jeklo v žarjenem stanju, saj ima prehodno temperaturo pod -100° C. To ponovno dokazuje (lit. 8,



Slika 4
Žilavosti pri +20 in -40°C
Fig. 4
Toughnesses at +20 and -40°C

9), da žarjenje pri 650°C ne le bolj ali manj utrdi jeklo, temveč mu tudi izboljša žilavost in zniža prehodno temperaturo žilavosti.

V normaliziranem stanju pa se učinek Nb izgubi, ker ima jeklo kljub dobri žilavosti zelo nizko mejo plastičnosti.

Jekli 11 in 12, prvo z V, drugo z B, sta bili izvaljani na debelino 4,5 mm kot dualni jekli, namenjeni medkritičnemu žarjenju. Obenem smo jih

Tabela 3: Mehanske lastnosti jekel 9 in 10

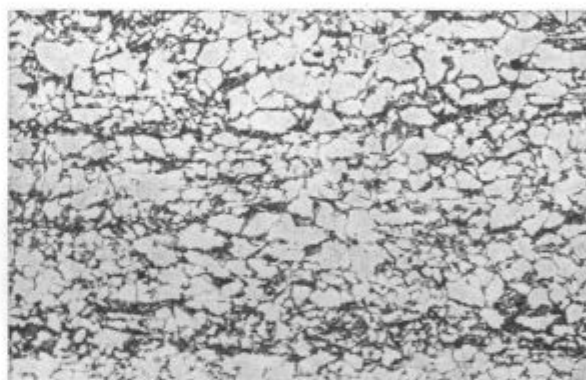
Stanje	Talina	σ_V	σ_M	δ_5	ψ	Žilavost ISO-V		
						+20°	-40°	-80°
V	11 (—)	339	432	40	80	248	234	30
	12 (Nb)	403	493	38	76	205	143	10
N	11 (—)	289	420	40	82	265	220	20
	12 (Nb)	268	405	39	80	232	220	170
Z	11 (—)	330	415	38	82	235	208	187
	12 (Nb)	411	468	33	78	227	192	152

Tabela 4: Mehanske lastnosti jekel 11 in 12

Stanje Talina		σ_V	σ_M	δ_5
V	11 (V)	428	632	—
	12 (B)	330	541	34
N	11 (V)	263	557	34
	12 (B)	268	568	33
MZ	11 (V)	353	643	—
	12 (B)	442	719	29

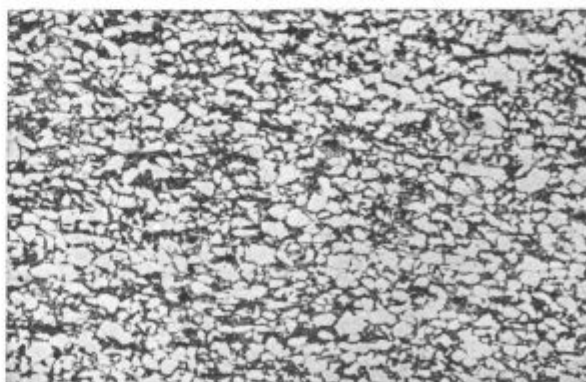
preizkusili tudi v valjanem in normaliziranem stanju. Rezultati mehanskih preiskav so v tabeli 4.

Podrobnejši komentar teh rezultatov ne bi bil primeren, ker je premalo rezultatov in preizkusov, ki so ustrezni za dualna jekla. Le na osnovi metalografskih posnetkov na slikah 5 in 6 lahko trdimo, da so pri medkritičnem žarjenju nastale pravilne dualne strukture ferita in martenzita. Struktura jekla z B (chg 12) ima nekoliko več martenzita in je drobnejša od strukture jekla z V.



Slika 5
Struktura medkritično žarjenega jekla (chg 11 z V)

Fig. 5
Structure of intercritically annealed steel (heat 11 with V)



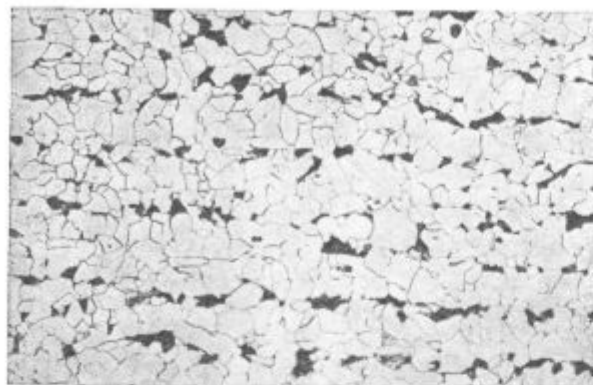
Slika 6
Struktura medkritično žarjenega jekla (chg 12 z B)

Fig. 6
Structure of intercritically annealed steel (heat 12 with B)

6. Strukture jekel

Kot primer so na slikah 7 do 16 prikazane strukture jekel 1 do 10 v valjanem stanju. Normalno feritno-perlitno in popolnoma ter enakomerno rekristalizirano strukturo ima le jeklo 1, ki je brez

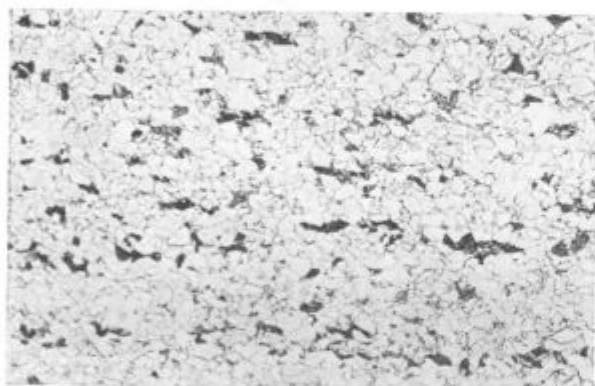
posebnih legirnih dodatkov (slika 7). Jeklo 2 z Nb (slika 8) je večinoma rekristalizirano, vendar v nepravilna in neenakomerno velika feritna zrna. Jeklo 3 z B (slika 9) je manj rekristalizirano, vidne so drsne črte v feritu. V jeklu 4 (Nb + B) (slika 10) že opazimo prehodne faze v drobnozrnatem ne-



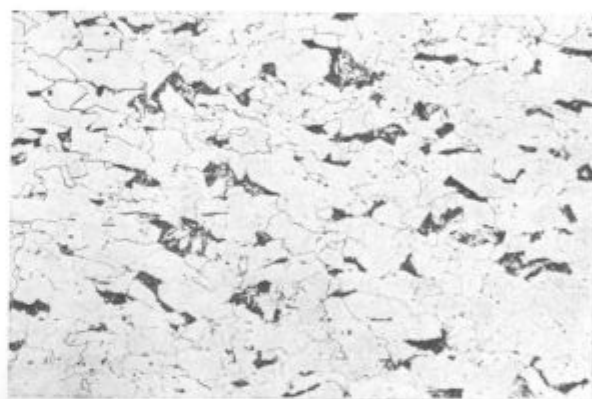
Slika 7
Jeklo 1
Fig. 7
Steel 1



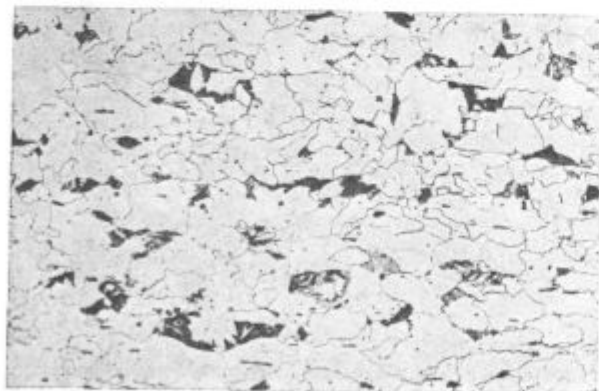
Slika 10
Jeklo 4
Fig. 10
Steel 4



Slika 8
Jeklo 2
Fig. 8
Steel 2



Slika 11
Jeklo 5
Fig. 11
Steel 5

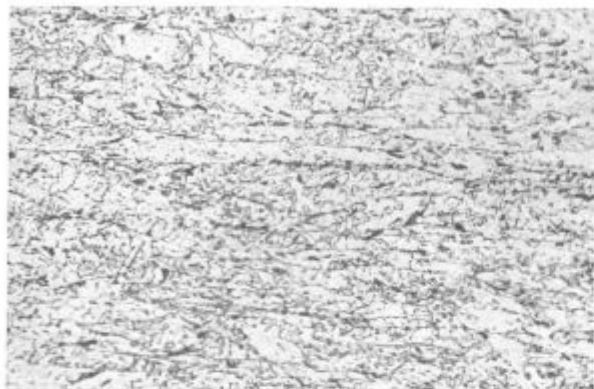


Slika 9
Jeklo 3
Fig. 9
Steel 3

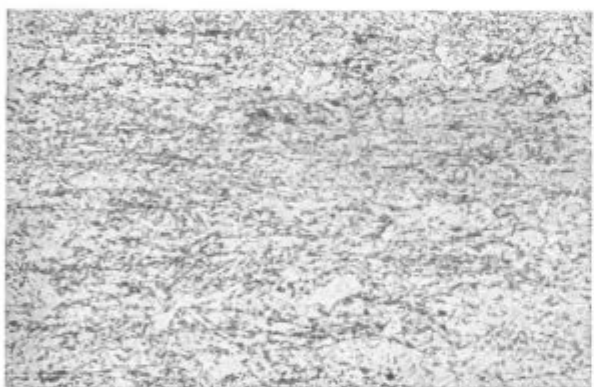


Slika 12
Jeklo 6
Fig. 12
Steel 6

rekristaliziranim feritu. V + B (jeklo 5, slika 11) vplivata manj, zato ima jeklo še večinoma rekristalizirano strukturo, jeklo z Nb + V + B (slika 12) pa ima ponovno večinoma nerekrystalizirano strukturo. Jekli 7 in 8 (sliki 13 in 14) imata popolnoma nerekrystalizirani prehodni strukturi z dobro opaznimi in močno deformiranimi avstenitnimi



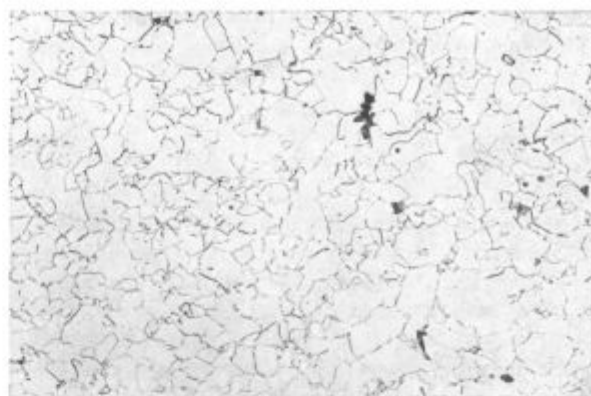
Slika 13
Jeklo 7
Fig. 13
Steel 7



Slika 14
Jeklo 8
Fig. 14
Steel 8



Slika 15
Jeklo 9
Fig. 15
Steel 9



Slika 16
Jeklo 10
Fig. 16
Steel 10

mejami. To pomeni, da ti dve jekli pri valjanju nista rekristalizirali že pri več zadnjih deformacijah. Jekli 9 in 10 (sliki 15 in 16) imata bolj ali manj normalni feritni strukturi, ki pa verjetno nista popolnoma rekristalizirani.

7. Analiza rezultatov

Iz mehanskih preiskav v valjanem stanju sledi, da bor kot edini mikrolegirni element ne povečuje meje plastičnosti in trdnosti, zelo pa poslabša žilavost jekla. Skupno z niobijem, katerega učinek je znan, pa mejo plastičnosti poveča še za določen delež (iz prejšnjih raziskav — lit. 8 in 9 — je razvidno, da je dodatni učinek B odvisen tudi od količine ogljika v jeklu). Vpliv bora skupno z vanadijem je manjši, močno pa se povišuje meja plastičnosti pri trojnih kombinacijah mikrolegirnih elementov (B, V, Mo, Mn).

Nasprotno kot velja za valjano stanje, se meja plastičnosti v jeklih z B po normalizaciji močno zniža, kar ne velja le za sestavo Nb-B, temveč tudi za druge. Sestava z Nb-Mo-B ima na primer celo manjšo mejo plastičnosti kot jeklo 1, ki je povsem brez mikrolegiranih elementov. Izjema je jeklo 8, pri katerem kalilnost zaradi velike količine Mn prevladuje nad izločevalnimi učinki. Iz omenjenega je očitno, da bor vpliva na disperzoidnost karbonitridnih delcev mikrolegiranih elementov pri visokih temperaturah normalizacije s tem, da docela popusti njihov utrjevalni učinek.

Optimalne lastnosti mikrolegiranih jekel daje žarjenje pri podkritični temperaturi, v našem primeru pri 650°C, 2 uri. Osnova tega učinka je v tem, da se zaostali deli mikroelementov izloči v drobni karbonitridni disperziji, ki dodatno preprečuje gibanje dislokacijskih tokov in s tem povečuje mejo plastičnosti. Bor sam tega vpliva nima (slika 1, jeklo 3), kaže pa, da v tem smislu povečuje učinkovitost drugih mikrolegirnih elementov. Zanimivo je, da se s tem dodatnim disperzijskim utrjevanjem ne poslabšajo razteznostne in žilavostne lastnosti jekla.

Medkritično žarjenje daje rezultate meje plastičnosti med rezultati v valjanem in normaliziranem stanju, pri enostavno legiranih jeklih (chg 1, 2 in 3) bližje normaliziranemu stanju, pri dvo- ali trokomponentnih talinah pa bližje valjanemu stanju. To pove, da ima pri prvih jeklih večji vpliv disperzoidnost delcev, pri drugih pa kalilnost.

Glede žilavosti je gotovo, da bor kot edini dodatni element ni ustrezen. Že prejšnja raziskava (lit. 8 in 9), kot tudi sedanja (jeklo 3) sta pokazali, da bor bistveno zmanjšuje žilavost jekla, vendar pa slika 4 in jeklo 4 (Nb-B) kažeta, da Nb nevtralizira slab vpliv bora, pri čemer ne gre zanemariti dejstva, da bor v sestavi z Nb izboljša mehanske lastnosti, predvsem mejo plastičnosti.

V nadaljnjem delu smo preizkusili dve jekli z zelo nizkima količinama ogljika (0,015 in 0,017 % C) z niobijem ali brez njega. Tudi v tem primeru se pokaže izreden efekt žarjenja pri 650°C/2 uri pri jeklu, ki vsebuje niobij. Meja plastičnosti je nad 400 N/mm², prav tako pa so pomembne izredne plasticitetne in žilavostne lastnosti, tako pri navadni kot pri nizkih temperaturah. Pri tem jeklu z NB (chg 12) je najbolj izrazito vidno, da podkritično žarjenje izboljša žilavost, še posebej pri nizkih temperaturah (tabela 3). Podobne mehanske, toda slabše nizkotemperaturne žilavostne rezultate daje tudi jeklo 12 (Nb) v valjanem stanju, vendar ne gre pozabiti, da je bila končna temperatura valjanja sorazmerno nizka (850°C) in da višja ali nižja končna temperatura valjanja lahko v veliki meri vpliva na lastnosti jekla.

C. SKLEPI

V 18-kilogramski SF indukcijski peči smo izdelali 12 talin konstrukcijskih jekel. Pri osmih od teh talin smo določali vpliv posameznih in kombiniranih mikroelementov (Nb, V, Mo, B), s posebnim poudarkom na vpliv bora. Primerjalna je bila talina brez mikrostrukturnih dodatkov, s sestavo 0,05 % C, 0,59 % Si in 1,6 % Mn. Dve talini (z Nb in brez njega) sta bili brezperlitni (~ 0,015 % C), ostali dve pa dualne vrste (V ali B). Rezultate lahko na kratko sklenemo takole:

1. Bor kot samostojen mikrolegirni element ni ustrezen, ker ne izboljša mehanskih lastnosti in poslabša žilavost.

2. V sestavi z Nb bor poveča mejo plastičnosti jekla, vendar le v valjanem stanju in še bolj v žarjenem stanju (650°C/2 uri). Tudi žilavost tega jekla je zadovoljiva. V normaliziranem stanju pa jeklo izgubi vse značilnosti mikrolegiranih jekel.

3. Sestav V-B je, razen po žarjenju na 650°C, neučinkovit in povzroči občutno zmanjšanje žilavosti.

4. Trolegirne variante med B ter V, Nb, Mo in Mn imajo sicer zelo visoke meje plastičnosti, vendar so taka jekla že pri sobni temperaturi popolnoma krhka.

5. Jeklo z zelo nizkim ogljikom (~ 0,016 % C) in dodatkom niobija lahko po podkritičnem žarjenju (650°C) pridobi zelo visoko mejo plastičnosti (okoli 400 N/mm²) in je pri tem zelo žilavo. Predvsem pa ima zelo nizko prehodno temperaturo v krhki prelom (okoli -100°C). Ta rezultat bi bilo vredno dodatno preveriti.

6. Vpliv bora, oziroma nadomestitev legirnih elementov v dualnih jeklih (V, Mo, Cr, Si, ...) z borom bi bilo potrebno posebej raziskati, če bi to bilo tudi ekonomsko opravičljivo.

Literatura

1. M. Gabrovšek: Mikrolegirana finožrnata jekla za varjene konstrukcije, *Železarski zbornik*, leto 6, št. 1, 1972, stran 11-24.
2. A. Kveder, J. Žvokelj: Bor v jeklih za poboljšanje, *Poročilo MI*, št. 594, maj 1968.
3. T. Lavrič: Določevanje B v jeklu, *Poročilo MI*, maj 1968.
4. J. Žvokelj, A. Razinger: Bor v jeklih za masivno preoblikovanje v hladnem, *Poročilo MI*, št. 367/442, december 1976.
5. A. Razinger: Tehnologija izdelave in predelave jekel, legiranih z borom, *Poročilo MI*, št. 569, september 1978.
6. S. R. Keown, F. B. Pickering: Some Aspects of the Occurrence of Boron in alloy Steels, *Metal Science*, julij 1977, str. 225-234.
7. F. Vodopivec, M. Gabrovšek: Istraživanje rastvaranja i precipitacije niobijevog karbonitrida u nizkougličnom Mn-C čeliku i njegovog uticaja na transformaciju i rekristalizaciju austenita, *Jugoslovenski simpozium o metalurgiji*, Zbornik radova, Beograd 1978, str. 9-22.
8. A. Kveder, M. Gabrovšek, F. Vodopivec, T. Lavrič, A. Osojnik: Bor v jeklih, II. del, *Poročilo MI*, št. 660, 1979.
9. A. Kveder, F. Vodopivec: Bor v mikrolegiranem konstrukcijskem jeklu, *Železarski zbornik*, leto 14, št. 1/2, 1980, str. 49 do 56.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Induktionsofen sind 12 Schmelzen kohlenstoffarmer Konstruktionsstähle, mikrolegiert mit Nb, V, Mo und B, erzeugt worden. Die Stähle sind im Walzzustand und anderen Wärmebehandlungszuständen untersucht worden. Die Ergebnisse mechanischer Untersuchungen zeigten folgendes:

Bor ist als selbstständiger Mikrolegierungselement nicht geeignet, weil er die mechanischen Eigenschaften nicht verbessert und verschlechtert die Zähigkeit. Im Zusammenhang mit V und Nb vergrößert Bor die Plastizitätsgrenze, jedoch nur im Walzzustand und noch mehr

im geglähten Zustand (650°, 2 Stunden). Auch die Zähigkeit solchen Stahles ist Zufriedenstellend. Im normalisierten Zustand verliert der Stahl alle Eigenheiten des mikrolegierten Stahles.

In der Zusammensetzung V-B ist Bor, ausgenommen nach dem Glühen bei 650°, unwirksam und verursacht eine erhebliche Verminderung der Zähigkeit.

Die dreikomponenten Varianten zwischen B und V, Nb, Mo und Mn haben zwar eine sehr hohe Plastizitätsgrenze, sind jedoch sehr Spröde.

SUMMARY

Twelve melts of low-carbon structural steel with added Nb, V, Mo, B microalloying elements were prepared in an induction furnace. The steel was tested as rolled and after various heat treatments. The results of material testing showed the following:

Boron as single microalloying element is not suitable since it does not improve mechanical properties but reduces the toughness. In combination with niobium it improves the yield point, but only in as rolled, and even

more in annealed (650° C, 2 hours) steel. Also toughness remains satisfactory. As normalized the steel loses all the characteristics of the microalloyed steel.

Combination vanadium-boron is ineffective, but after the annealing at 650° C, and it substantially reduces the toughness.

Ternary combinations of boron with vanadium, niobium, molybdenum and manganese give very high yield points but steel is very brittle.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В индукционной печи были изготовлены 12 расплавов малоуглеродистых конструкционных сталей с добавкой микросплавных элементов Nb, V, Mo и B. Стали были исследованы в прокатном состоянии и другими способами термической обработки.

Бор как самостоятельный микросплавный элемент непригоден, так как он не улучшает механические свойства и уменьшает вязкость стали. В соединении с Nb элемент бор увеличивает предел пластичности но только в катаном состоянии, а еще

больше при отжиге (650°, 2 часа). Также вязкость этой стали удовлетворительна.

Состав V-B с исключением свойств после отжига при 650° отрицательный, в результате следит чувствительное уменьшение вязкости.

Варианты расплавов с тремя элементами между B и V, Nb, Mo, и Mn хотя показывают очень высокий предел пластичности, но эти стали очень хрупки.