

Bor v mikrolegiranem konstrukcijskem jeklu

UDK: 669.14.018.2: 539, 3/4: 669, 781
ASM/SLA: AY-n, Q 27a, Q 23b, Eg-J40



A. Kveder, F. Vodopivec

Vpliv bora na mehanske lastnosti standardnega mikrolegiranega jekla Niobal 43. Za primerjavo je bil raziskan tudi vpliv bora na lastnosti jekla Č. 0460, ki ni mikrolegirano. V valjanem stanju bor močno poveča mejo plastičnosti in natezno trdnost, posebno pri nizkih vsebnostih ogljika. Meja plastičnosti se še bolj poveča po žarjenju na 650° C. Nasprotno pa se po normalizaciji meja plastičnosti in natezna trdnost močno znižata, precej bolj kot pri jeklih, ki ne vsebujejo bora. Slaba stran jekel z borom pa je nizka žilavost.

A. UVOD

Značilnosti mikrolegiranih jekel¹, ki jih uporabljamo za gradbene konstrukcije, so visoka meja plastičnosti, natezna trdnost, žilavost in dobra varivost. Dobre mehanske lastnosti dosežemo z dodajanjem majhnih količin elementov, ki s tvorjenjem karbonitridov povzročajo dva utrjevalna procesa, afinacijo feritnih kristalnih zrn in izločevalno utrditev. Drobni karbonitridni izločki v feritu povečujejo napetost, ki je potrebna za premik dislokacij. Drobna kristalna zrna povzročijo tudi boljše žilavost. Ker zaradi omenjenih utrditev lahko zmanjšamo količino ogljika v jeklu — celo mnogo pod 0,1 % — se izboljša tudi varivost jekel. Ta maloperlitna ali brezperlitna jekla so ena od najvažnejših modernih zvrsti teh visokotrdnih jekel.

Najpomembnejši mikrolegirni elementi so Nb, V in Ti, možne pa so še kombinacije s Cu, Cr, Ni in Mo, pri katerih dosežemo še boljše mehanske lastnosti.

Bor se kot dodatek jeklom za poboljšanje uporablja že zelo dolgo. Njegov vpliv na kalilnost jekel je znan, čeprav v novejšem času še razpravljajo o bistvu in načinu tega vpliva. Dodajanje bora se je razširilo tudi na druga jekla, npr. jekla za hladno preoblikovanje in na razne specialne zlitine.

Nekaj raziskav o vplivu bora na lastnosti jekel lahko najdemo tudi pri nas^{2,3,4,5}. Osvojeni in v proizvodnji sta tudi dve jekli za vijake MBA 20 in KVB 30 (Železarna Jesenice).

O vplivu bora na lastnosti mikrolegiranih visokotrdnih gradbenih jekel v literaturi ni dosegljivih podatkov. Nekaj podatkov o prijavljenih patentih v SZ in na Japonskem pa pove, da se z dodajanjem bora tem jeklom ukvarjajo tudi drugje.

B. EKSPERIMENTALNI DEL

1. Zasnova raziskav

Namen raziskave je bil, ugotoviti vpliv bora na lastnosti visokotrdnega jekla Niobal 43, mikrolegiranega z niobijem. Za primerjavo smo preiskali tudi navadno konstrukcijsko jeklo Č. 0460. Pri teh jeklih je razen mehanskih lastnosti najpomembnejša še dobra varivost, ta pa je najbolj odvisna od ogljikovega ekvivalenta. Tega smo računali po enačbi:

$$C_{\text{ekv}} = \% C + \frac{\% Mn}{6}$$

(Drugi elementi nismo upoštevali, ker jih nismo dodajali, v vložku za taljenje pa jih je bilo zelo malo). Naslednji namen raziskave je bil torej ugotoviti, če lahko z dodatkom bora zmanjšamo ogljikov ekvivalent in s tem izboljšamo varivost.

2. Izdelava talin in kemične sestave

Jekla smo talili v SF indukcijski peči in jih ulivali v približno 18-kilogramske bloke. Osnovne sestave naj bi bile:

Č. 0460	0,3 % Si 0,45 % Mn
Č. 0460 B	isto, z dodatkom B
Niobal 43	0,4 % Si 1,5 % Mn 0,03 % Nb
Niobal 43 B	isto, z dodatkom B

Različne taline istega jekla pa naj bi imele različne količine ogljika. Bor smo dodajali z zlitino ferobor, ki vsebuje 19 % B. Ker se pri industrijskem legiranju dodaja zlitina BATS 2, ki razen 2 % B vsebuje še 30 % Ti in se pri tem dobi v jeklu okoli 0,04 % Ti, smo dodajali še toliko FeTi, da smo dobili približno enako količino Ti v jeklu. Titan je potreben zaradi vezave dušika, ki sicer

Dr. A. Kveder, dipl. ing. metalurgije, samostojni raziskovalec na Metalurškem inštitutu

Dr. F. Vodopivec, dipl. ing. metalurgije, samostojni raziskovalec na Metalurškem inštitutu

Tabela 1: Kemične sestave

Oznaka	Jeklo	C	C _{ekv}	Si	Mn	Nb	B ₁	B _{net}	Ti	Al ₁
1		0,08	0,142	0,31	0,37					0,002
2	Č. 0460	0,12	0,177	0,40	0,34					0,028
3		0,16	0,243	0,33	0,50					0,067
4	Č. 0460 B	0,07	0,140	0,34	0,42		0,006	0,0008	0,047	0,045
5		0,11	0,168	0,28	0,35		0,0026	0,0005	0,053	0,027
6		0,14	0,202	0,25	0,37		0,006	0,0010	0,043	0,027
7		0,16	0,242	0,36	0,49		0,003	0,0020	0,036	0,075
8	Niobal 43	0,11	0,377	0,47	1,60	0,042				0,11
9		0,13	0,392	0,47	1,57	0,050				0,049
10		0,14	0,395	0,44	1,53	0,028				0,059
11		0,18	0,442	0,46	1,57	0,061				0,063
12	Niobal 43 B	0,042	0,249	0,37	1,24	0,053	0,0096	0,0025	0,036	0,024
13		0,07	0,288	0,37	1,31	0,016	0,0035	0,0030	0,023	0,002
14		0,08	0,342	0,44	1,57	0,058	0,0017	0,0014	0,036	0,079
15		0,11	0,368	0,47	1,55	0,063	0,0031	0,0043	0,045	0,11
16		0,115	0,382	0,48	1,60	0,062	0,0014	0,0014	0,039	0,066
17		0,15	0,420	0,46	1,62	0,062	0,006	0,0002	0,054	0,085
18		0,19	0,420	0,45	1,38	0,033	0,0036	0,0008	0,058	0,086

zmanjšuje učinkovitost bora. Kemične sestave talin in ogljikovi ekvivalenti so v tabeli 1. Fosforja je v vseh talinah okoli 0,008 %, žvepla pa 0,024 %.

3. Predelava in toplotna obdelava

Bloke, katerih teža je bila 18 kg, smo predkovali na ploščate slabe z debelino 50 mm in jih razpolovili na dva dela. En del smo po valjanju preizkušali v valjanem stanju, drugi del pa v normaliziranem. Valjali smo na eksperimentalnem ogrodju na trak s končno debelino 14 mm in širino 110 mm. Začetna temperatura je bila 1240° C, končna pa 940° C.

Razen enakemu deformacijskemu režimu pri vseh slabih smo posebno pozornost posvetili začetni in končni temperaturi valjanja. Razlike so bile tako majhne, da ne morejo vplivati na rezultate preiskav.

Eno polovico trakov vsake taline smo preizkušali v valjanem stanju, drugo smo normalizirali, in sicer

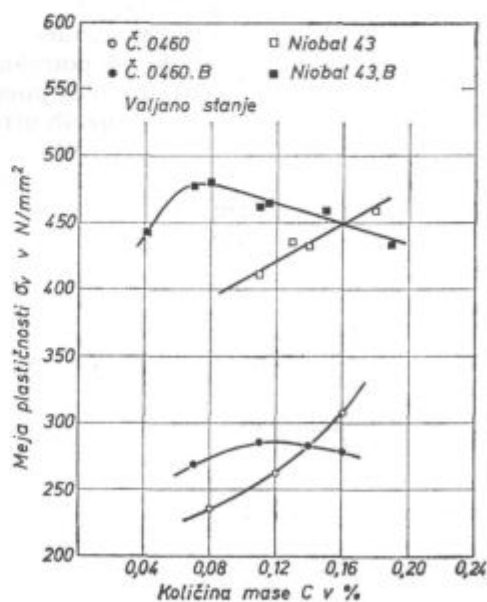
taline z do 0,11 % C 920°/zrak
 taline z nad 0,11 % C 900°/zrak

4. Mehanski preizkusi

Preizkušance za natezni preizkus smo izdelali v vzdolžni smeri. Zaradi dokaj slabe površine smo debelino stanjšali od 14 na 12 mm. Mere so ustrezale predpisom za kratke proporcionalne preizkušance. Žilavostni preizkušanci so bili odvzeti prečno na smer valjanja. Zareza je bila ISO-V.

Rezultati, ki bodo prikazani v odvisnosti od količine ogljika, so razvidni iz diagramov, katerih opis sledi.

a) **Valjana stanja:** Lastnosti v teh stanjih so v odvisnosti od % C prikazani v diagramih na slikah 1 do 4.



Slika 1
 Meje plastičnosti jekel v valjanem stanju v odvisnosti od količine ogljika

Fig. 1
 Yields points of the as rolled steel depending on the carbon content.

Slika 1: Jeklo Č. 0460 B ima do okoli 0,14 % C višjo mejo plastičnosti kot isto jeklo brez bora. Nad to količino C pa je vpliv obraten; meja plastičnosti se znižuje. Podoben, vendar bolj izrazit, je ta vpliv B pri jeklu Niobal 43 B v primerjavi z istim jeklom brez B (Niobal 43). Najvišja meja plastičnosti je pri okoli 0,08 % C, z manj ali več ogljika pa se znižuje. To jeklo z B doseže mejo plastičnosti 475 N/mm² pri 0,08 % C, jeklo brez B pa enako vrednost pri 0,20 % C, ali, za mejo plastičnosti 440 N/mm² pri jeklu z B, ki vsebuje 0,042 % C, je pri jeklu brez B potrebno 0,15 % C. Če to izrazimo z ogljikovim ekvivalentom, je stanje tako:

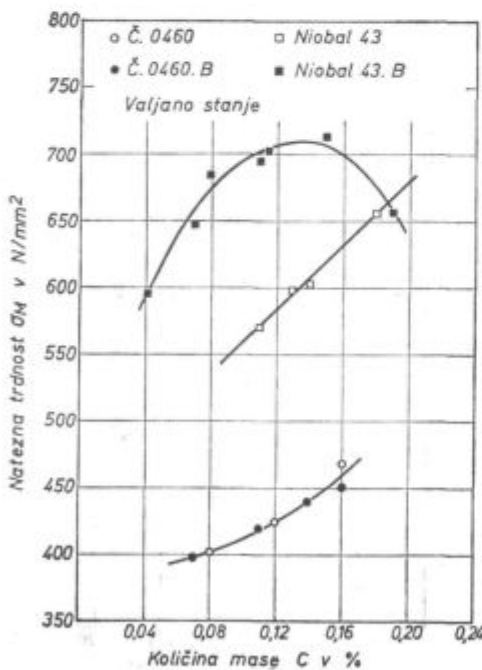
— mejo plastičnosti 475 N/mm² doseže jeklo z B pri $C_{ekv} = 0,342\%$, jeklo brez B pa pri $C_{ekv} = 0,46\%$, ali

— mejo plastičnosti 440 N/mm² doseže jeklo z B pri $C_{ekv} = 0,25\%$, jeklo brez B pa pri $C_{ekv} = 0,41\%$.

Močan vpliv bora pa se kaže le do določene količine ogljika, in sicer do okoli $C = 0,08\%$, nato pa se njegova učinkovitost zmanjšuje. Vendar pa se zniža meja plastičnosti borovega jekla na enako vrednost kot pri jeklu brez bora šele pri 0,16 % C.

Podobne razmere kot pri jeklu Niobal 43 je opaziti tudi pri jeklu Č. 0460 in Č. 0460 B, vendar je pri tem jeklu bor mnogo manj učinkovit.

Slika 2: Na natezno trdnost jekla Č. 0460 bor nima vpliva. Pri jeklu Niobal 43 B pa je ta vpliv

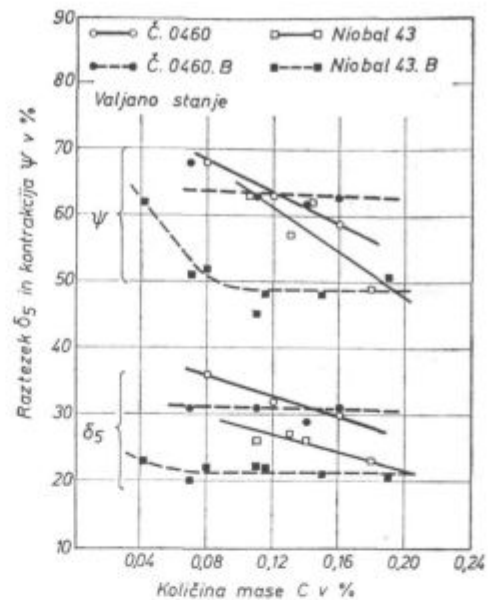


Slika 2

Natezne trdnosti jekel v valjanem stanju v odvisnosti od količine ogljika

Fig. 2

Tensile strengths of the as rolled steel depending on the carbon content.



Slika 3

Raztezki in kontrakcije jekel v valjanem stanju v odvisnosti od količine ogljika

Fig. 3

Elongations and contractions of the as rolled steel depending on the carbon content.

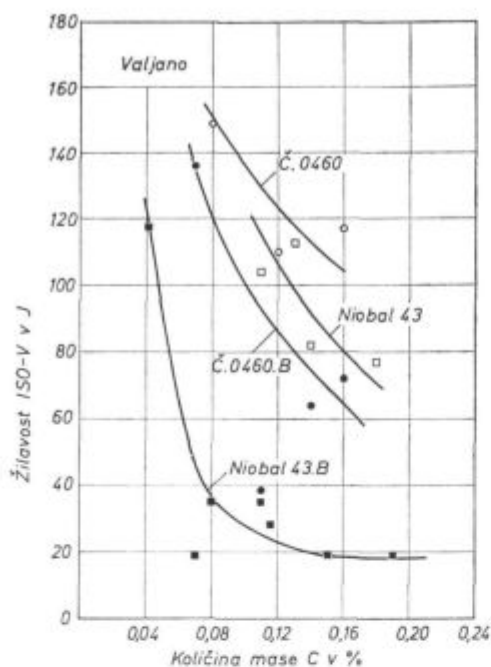
zelo močan, trdnost poveča za okoli 125 N/mm². Največji vpliv doseže pri okoli 0,14 % C, pri višjem C pa se trdnost znižuje do vrednosti, ki jih ima jeklo brez bora Niobal 43.

Slika 3: Raztezek in kontrakcija pri jeklih brez bora (Č. 0460 in Niobal 43) imata v odvisnosti od C normalen potek — z več ogljika se obe lastnosti slabšata. Pri obeh jeklih z borom pa sta tako raztezek kot kontrakcija od 0,07 do 0,20 % C konstantna. Le talina jekla Niobal 43 B z 0,042 % C ima obe lastnosti precej boljši.

Slika 4 kaže, da bor v obeh vrstah jekel poslabša žilavost, kar je posebno očitno pri jeklu Niobal 43 B. Le talina 12, ki vsebuje zelo malo ogljika (0,042 % C), ima zelo dobro žilavost, kljub temu da vsebuje sorazmerno veliko bora. Vprašanje, ali gre za neposreden vpliv bora, npr. zaradi izločanja po kristalnih mejah, ali za njegov vpliv na strukturo, bomo obravnavali v naslednjih poglavjih. Videz preloma je pri večini talin delno ali povsem kristaliničen; pri talinah brez bora Č. 0460 in Niobal 43 do 70 %, pri talinah Č. 0460 B od 70 do 90 %, pri talinah Niobal 43 B pa so vsi prelomi, razen pri talini 12 (35 %), popolnoma kristalinični.

b) **Normalizirana stanja:** V naslednjih diagramih so prikazane iste odvisnosti kot prej v valjanem stanju.

Slika 5: Pri jeklih Č. 0460 B je meja plastičnosti po normalizaciji nižja kot pri jeklih Č. 0460. Se jasnejši je vpliv pri jeklih Niobal 43 in Niobal 43 B. Pri jeklu brez bora se po normalizaciji zniža meja plastičnosti za povprečno 25 N/mm², kar je iz

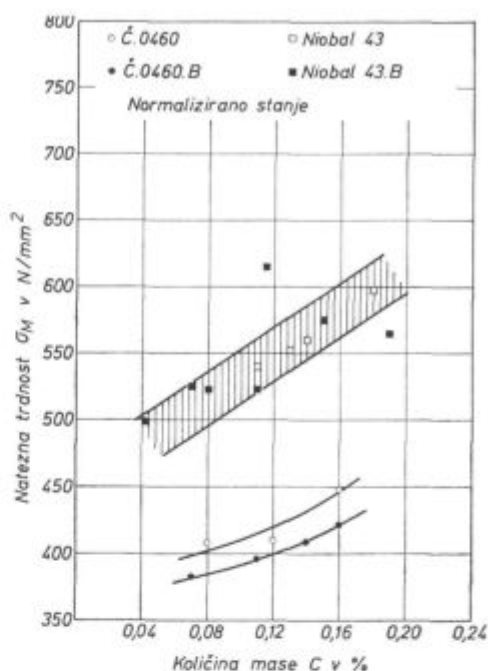


Slika 4

Žilavost jekel v valjanem stanju v odvisnosti od količine ogljika

Fig. 4

Toughness of the as rolled steel depending on the carbon content.



Slika 6

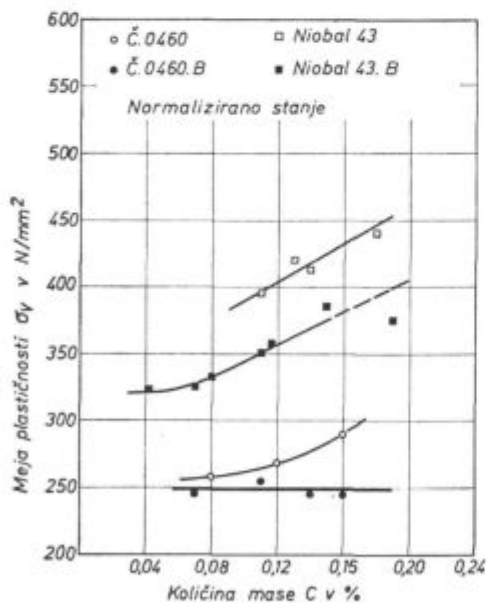
Natezne trdnosti jekel v normaliziranem stanju v odvisnosti od količine ogljika

Fig. 6

Tensile strengths of the as normalized steel depending on the carbon content.

strokovne literature znan pojav. Pri tem jeklu z borom pa je sprememba proti valjanemu stanju zelo velika. Meja plastičnosti se z normalizacijo zniža za 50 do 150 N/mm², manj pri višjem ogljiku, več pri nižjem. V tem primeru bor celo izniči ves

vpliv niobija, saj se meje plastičnosti znižajo do vrednosti, ki so bile normalne za staro vrsto visokotrdnega jekla St 52 (Č 52).

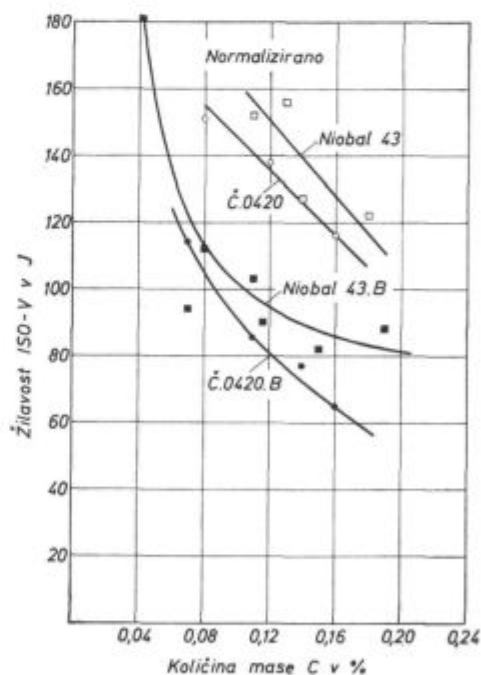


Slika 5

Meje plastičnosti jekel v normaliziranem stanju v odvisnosti od količine ogljika

Fig. 5

Yield points of the as normalized steel depending on the carbon content.



Slika 7

Žilavost jekel v normaliziranem stanju v odvisnosti od količine ogljika

Fig. 7

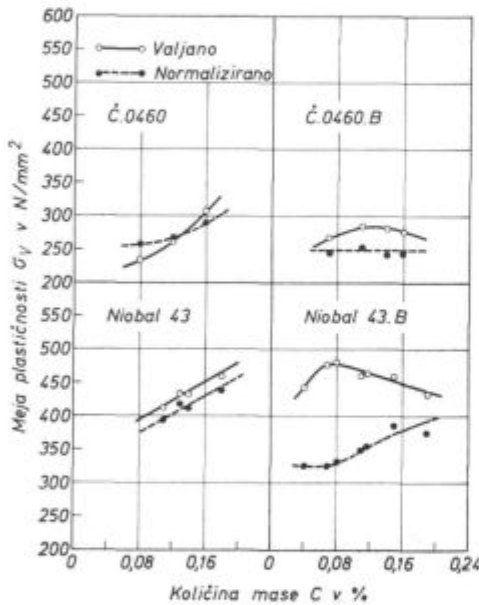
Toughness of the as normalized steel depending on the carbon content.

Slika 6: Pri natezni trdnosti je stanje podobno — učinek bora se ne kaže več, trdnosti se znižajo do enakih vrednosti, kot jih ima jeklo brez B (Niobal 43) ali celo nižje (jeklo Č.0460).

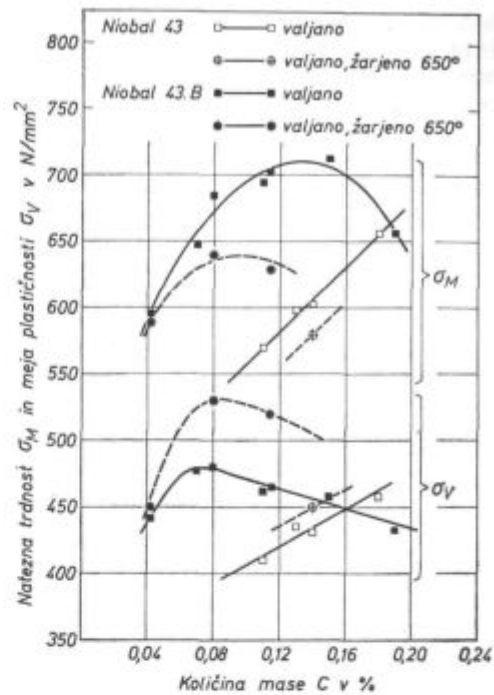
Slika 7: Žilavost obeh jekel z borom se v normaliziranem stanju bistveno izboljša, vendar je še vedno nižja kot pri variantah brez bora. Kristaliničnost prelomov ni bistveno manjša kot v valjanem stanju, razen pri jeklih Niobal 43, ki so se lomila žilavo, z izjemno taline 8, ki ima 25 % kristaliničnega preloma.

Na sliki 8 je prikazana primerjava mej plastičnosti med valjanim in normaliziranim stanjem.

c) **Žarjena stanja:** Iz doslej opisanega sledi, da bor, posebno v mikrolegiranem jeklu Niobal 43 B, zelo poveča trdnostne lastnosti v valjanem stanju, normalizacija pa te prednosti popolnoma izniči. Problematično pri jeklih z borom pa je močno poslabšanje žilavosti. Zato smo preizkusili tudi žarjenje pod A_c1 točko, to je na $650^{\circ}C$. Rezultate za meje plastičnosti in natezne trdnosti prikazuje



Slika 8
Primerjave mej plastičnosti za valjano in normalizirano stanje
Fig. 8
Comparison of yield points for the rolled and normalized steel.



Slika 9
Meje plastičnosti in natezne trdnosti jekel v valjanem stanju in po žarjenju na $650^{\circ}C$
Fig. 9
Yield points and tensile strengths of the as rolled steel after $650^{\circ}C$ annealing.

slika 9, in sicer s primerjavo obeh stanj, valjano in valjano/žarjeno na $650^{\circ}C$.

Žarjenje zmanjša natezno trdnost pri Niobalu 43 za $25 N/mm^2$, pri Niobalih 43 B pa različno — pri jeklu z $0,042\% C$ le minimalno, pri jeklu z $0,115\% C$ pa za $75 N/mm^2$. Nasprotno je z mejo plastičnosti, pri Niobalu 43 se poveča za okoli $15 N/mm^2$, pri Niobalih 43 B pa zopet različno — pri tistem z $0,042\% C$ za $10 N/mm^2$, pri drugih dveh talinah z $0,08$ in $0,115\% C$ pa za celih $50 N/mm^2$.

Raztezki, kontrakcije in žilavosti za preizkuse v valjanem stanju in po žarjenju na $650^{\circ}C$ so navedene v tabeli 2. Kot je razvidno, so se raztezki in kontrakcije dovolj očitno izboljšali v primerjavi z valjanim stanjem. Žilavost Niobala 43 (talina 10) se je v primerjavi z valjanim stanjem močno izboljšala. Pri talini 12 (Niobal 43 B z najnižjim

Tabela 2: Lastnosti plastičnosti v valjanem stanju (V) in po žarjenju na $650^{\circ}C$ (Z)

Talina	Jeklo	% C	Raztezek %		Kontrakcija %		Žilavost %	
			V	Z	V	Z	V	Z
10	Niobal 43	0,14	26	30	62	71	82	150, 128
12	Niobal 43 B	0,042	23	26	62	66	118	82, 68
14	Niobal 43 B	0,08	22	24	52	71	35	82, 57
16	Niobal 43 B	0,115	22	26	48	66	28	93, 50

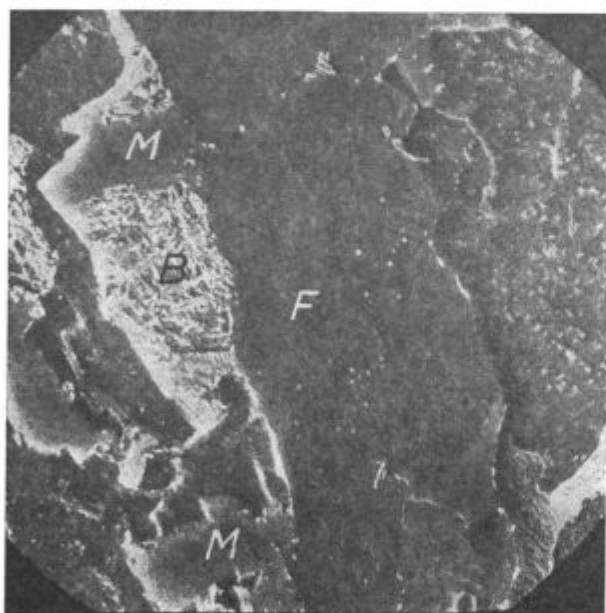
ogljikom) se je žilavost nekoliko poslabšala. Pri naslednjih dveh talinah Niobala 43 B z več ogljika, ki sta imeli v valjanem stanju zelo slabo žilavost, pa se je ta občutno izboljšala. Kljub dokaj dobri žilavosti pri vseh treh talinah Niobala 43 B pa je opazna nenormalno velika razlika med paralelkama in zanimivo je še, da so vsi videzi lomov 95 do 100-odstotno kristalinični. Pri talini 10 Niobal 43 pa ima vzorec s 150 J popolnoma žilav prelom, vzorec z 128 J pa delno žilav (75 %) in delno krhek kristaliničen (25 %) prelom.

6. Metalografija

Strukture jekel Č. 0460 in Č. 0460 B so feritno-perlitne, v normaliziranem stanju so zrna nekoliko drobnejša kot v valjanem stanju. Jekla z borom imajo nepoligonalno izoblikovana zrna.

Jekla Niobal 43 imajo v valjanem stanju mešano strukturo ferita, perlita, prehodne strukture (bainita) in s sledmi martenzita. V normaliziranem stanju pa postanejo strukture zelo drobnozrnate. Toda, kot smo ugotovili pri mehanskih preiskavah, se meja plastičnosti in natezna trdnost po normalizaciji kljub temu nekoliko znižata.

Za strukture jekel Niobal 43 B v valjanem stanju so značilne prehodne strukture z več ali manj martenzita (verjetno okoli 5 do 10 %). REM posnetek take strukture je prikazan na sliki 10 (talina 15). V talinah z več ogljika se začeta poleg prehodne strukture vedno bolj izrazito pojavljati tudi ferit in perlit. To je v skladu z mehanskimi



Slika 10

REM posnetek strukture jekla Niobal 43 B, talina 15. F = ferit, B = bainit, M = martenzit. Povečanje 5000 ×.

Fig. 10

SEM picture of Niobal 43. B steel structure, Melt 15. F — ferrite, B — bainite, M — martensite. Magnification 5000 ×.

preiskavami, pri katerih smo ugotovili, da meja plastičnosti narašča do okoli 0,08 %, pri večjih količinah ogljika pa se znižuje (slika 1).

V normaliziranem stanju so strukture tega jekla nepoligonalnih oblik zelo drobnozrnate in imajo več ali manj perlita.

V jeklih z borom Č. 0460 B in Niobal 43 B smo opazili verige vključkov, ki dovolj jasno označujejo deformirana avstenitna zrna (sliki 11 in 12). Z mikroanalizatorjem smo v teh vključkih registrirali bor, zato menimo, da so to boridni izločki. Po podatkih iz literature se začno pod 1000° C izločati iz avstenita, če ohlajevanje ni dovolj naglo.

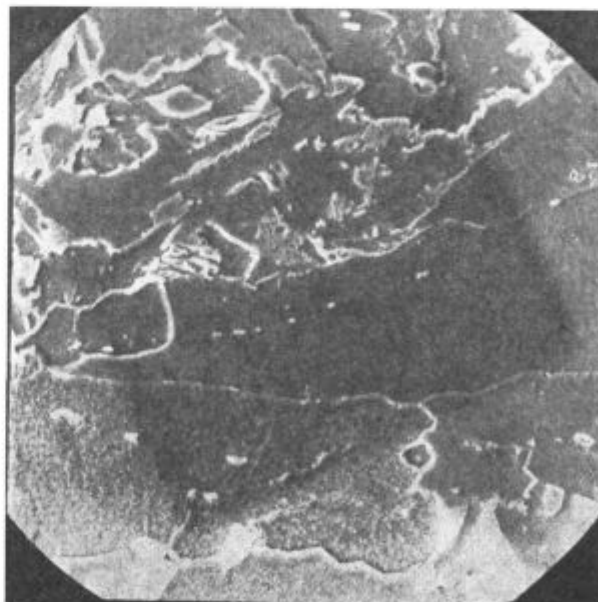


Slika 11

Verige izločkov borovih spojin po mejah avstenitnih kristalnih zrn. Povečanje 500 ×.

Fig. 11

Chains of boron compound precipitates on the boundaries of austenite grains. Magnification 500 ×.



Slika 12

REM posnetek izločkov borovih spojin po mejah avstenitnih kristalnih zrn. Povečanje 2000 ×.

Fig. 12

SEM picture of boron compound precipitates on the boundaries of austenite grains. Magnification 2000 ×.

Oblika tako zaznamovanih avstenitnih zrn tudi dokazuje, da jekla z borom po zadnjih deformacijah niso rekristalizirala. Iz drugih raziskav⁷ je znano, da se pri vročem valjanju rekristalizacija ne pojavlja več pod 950°C pri jeklih, mikrolegiranih z Nb, in pod 840°C pri jeklu Č.0460. Ker smo pri tej raziskavi vsa valjanja končali pri 940°C, lahko sklepamo, da bor zavira rekristalizacijo po vročem deformiranju.

8. Razprava o rezultatih

Vrsta rezultatov preiskav kaže na dokaj velik vpliv bora na lastnosti nizkoogljirnega mikrolegiranega jekla Niobal 43. (Vpliv B na lastnosti jekla Č.0460 ni velik, zato to jeklo izpuščamo iz obravnave.)

Bor zelo poviša mejo plastičnosti in trdnost jekla v valjanem stanju. Gotovo je, da pri tem ne gre za efekt afinacije kristalnih zrn, temveč za kalilno in izločevalno utrditev. Dokaz za to je pretežni delež prehodnih struktur in martenzita, posebno v jeklih, ki imajo zelo malo ogljika. Pri jeklih z več kot 0,11 % C se v strukturi začne pojavljati tudi perlit in povišanje meje plastičnosti in trdnosti postaja vedno manj izrazito. Vendar je zelo verjetno, da gre tudi za določen interakcijski izločevalni učinek bora in niobija. Zarjenje na 650°C popusti kalilne strukture, vendar pa se zaradi istočasnega dodatnega izločevanja meja plastičnosti še poveča, manj pri jeklih brez bora, bolj pri jeklih z borom. Nejasno pa ostaja, zakaj normalizacija uniči ne le učinek bora, temveč tudi niobija in dobimo lastnosti, kot jih ima jeklo brez mikrolegiranja. Gotovo gre spet za poseben učinek bora, kajti pri jeklih brez bora se po normalizaciji zniža meja plastičnosti sorazmerno malo. To bi lahko pomenilo, da bor vpliva na koagulacijo izločkov, da ti nimajo več nobenega vpliva.

Problematičen pa je vpliv bora na žilavost jekla. Ta se močno zniža, prelomi postanejo popolnoma krhki. To znižanje žilavosti lahko le delno pripišemo kalilnim strukturam, kajti tudi po normalizaciji je žilavost še vedno precej nižja od žilavosti jekel brez bora. Vpliv borovih izločkov po kristalnih mejah tudi ne more biti odločilen, ker nismo opazili niti enega interkristalnega preloma. Bolj verjetno je, da slabo žilavost povzročajo drobni izločki v notranjosti kristalnih zrn, ki pa jih z našimi metodami metalografije nismo zaznali. Kljub vsemu pa žilavost borovih jekel, žarjenih po valjanju na 650°C, le ni tako slaba z ozirom na mejo plastičnosti, ki segajo tudi do 525 N/mm². Žilavost je v mejah 50 do 90 J (približno 60 do 110 J/cm²). Za raztezke in kontrakcije pa lahko celo rečemo, da so zelo dobre.

Menimo, da so rezultati dovolj interesantni in da opravičujejo nadaljne raziskave borovih jekel. Pojavlja se še vrsta zanimivih vprašanj: kako vpliva količina bora, dodatek vanadija (znano je,

da se bor lahko veže v V-karbonitrid) in drugih elementov, dodatek cirkonija ali cera za izboljšanje žilavosti, kakšen je vpliv končne temperature valjanja, vpliv načina ohlajevanja in podobno.

C. SKLEPI

Naloga raziskave je bila ugotoviti vpliv bora na lastnosti nizkoogljirnih jekel. Za osnovo smo vzeli dve jekli: Č.0460 in Niobal 43, vsako od teh v dveh variantah: z borom in brez njega. Skupno smo izdelali 18 talin, ker smo vsako vrsto jekla naredili z več različnimi količinami ogljika. Sklepi raziskave so naslednji:

1. Bor v jeklih, ki so v valjanem stanju, močno poveča mejo plastičnosti in trdnost, bolj pri jeklu Niobal 43 kot pri jeklu Č.0460 in bolj pri nizkih kot visokih ogljikih v jeklu.

2. Raztezek in kontrakcija se pri borovih jeklih nekoliko znižata, vendar ne pod kritično mejo. Žilavost se v valjanem stanju močno poslabša, razen pri jeklu z zelo malo ogljika (0,042 %).

3. V normaliziranem stanju se pri jeklih z borom meja plastičnosti in trdnost močno znižata, celo mnogo pod vrednosti, ki jih imajo istovrstna jekla brez bora.

4. Zarjenje jekel Niobal 43 in Niobal 43 B na 650°C poveča mejo plastičnosti, pri jeklu Niobal 43 za okoli 15 N/mm², pri jeklih Niobal 43 B pa od 10 N/mm² (0,042 % C) do 50 N/mm² (0,08 % in več C). Obenem se občutno izboljša žilavost borovih jekel, je pa še vedno nižja kot pri jeklih brez bora.

5. V strukturah jekel z borom smo opazili izločke po mejah deformiranih avstenitnih zrn. Jekla z borom pri zadnjih deformacijah niso rekristalizirala. Z elektronskim analizatorjem smo nesporno ugotovili, da so izločki borove spojine.

Literatura

1. M. Gabrovšek: Mikrolegirana finoizrnatna jekla za varjene konstrukcije, *Železarski zbornik*, leto 6, št.1, 1972, str. 11–24.
2. A. Kveder, J. Zvokelj: Bor v jeklih za poboljšanje, *Poročilo Metalurškega inštituta Ljubljana*, št. 594, maj 1968.
3. T. Lavrič: Določevanje B v jeklu, *Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani*, maj 1968.
4. J. Zvokelj, A. Razinger: Bor v jeklih za masivno preoblikovanje v hladnem, *Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani*, št. 367/442, december 1976.
5. A. Razinger: Tehnologija izdelave in predelave jekel, legiranih z borom, *Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani*, 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 nizkoogljirnom Mn-C čeliku i njegovog uticaja na transformaciju i rekristalizaciju austenita, *Jugoslovenski simpozium o metalurgiji*, *Zbornik radova*, Beograd 1978, str. 9–22.

ZUSAMMENFASSUNG

Zweck der Untersuchung war den Einfluss von Bor auf die Eigenschaften eines hochfesten mit Niobium mikrolegierten Stahles, Niobal 43, festzustellen. Zum Vergleich ist auch ein gewöhnlicher Konstruktionsstahl, C 0460, untersucht worden.

Der Stahl ist in Hochfrequenzöfen erzeugt und in 18 kg Blöcke vergossen worden. Die untersuchende Stahlsorten waren:

C. 0460, C. 0460 B (borlegiert), Niobal 43, Niobal 43 (borlegiert). Von jeder Stahlsorte sind mehrere Varianten mit verschiedenem Kohlenstoffgehalt erzeugt worden.

Die Blöcke sind bis zu 50 mm Dicke geschmiedet worden, in der Querrichtung zerteilt, und in Bänder von 14 mm Dicke warmgewalzt worden. Die Walzanfangstemperatur war 1240°C und die Walzendtemperatur war 940°C. Das Band aus der ersten Hälfte eines jeden Blockes ist in warmgewalzten Zustand, und aus der zweiten Blockhälfte, im normalisierten Zustand untersucht worden.

Die Untersuchungen der mechanischen und anderer Eigenschaften ergaben folgende Ergebnisse:

— Bor in warmgewalzten Stählen vergrößert stark die Festigkeit und die Streckgrenze, und das mehr beim Stahl Niobal 43 wie beim Stahl C. 0460, und mehr bei kleinerem als grösserem Kohlenstoffgehalt im Stahl.

— Die Dehnung und die Einschnürung werden bei borlegierten Stählen etwas kleiner, fallen jedoch nicht unter die kritische Grenze. Die Kerbschlagzähigkeit wird im warmgewalzten Zustand stark vermindert, mit der Ausnahme des sehr niedriggekohlten Stahles (0.042 % C).

— Im normalisierten Zustand wird die Streckgrenze und die Festigkeit bei den borlegierten Stählen stark vermindert, sogar stark unter die Werte, welche für die gleichartigen Stähle ohne Bor charakteristisch sind.

— Nach dem Glühen der Stähle Niobal 43 und Niobal 43 B wird die Streckgrenze noch grösser als im warmgewalzten Zustand. Beim Stahl mit 0.042 % C erreicht sie 450 N/mm², und beim Stahl mit 0.08 % C, 530 N/mm². Zugleich wird die Kerbschlagzähigkeit erheblich verbessert, ist aber immer noch niedriger, als beim Stahl ohne Borgehalt.

— Im Gefüge der Borlegierten Stähle können an den Grenzen der deformierten Austenitkörner Ausscheidungen beobachtet werden. Die Rekristallisation ist bei borlegierten Stählen nach der letzten Verformung nicht eingetreten. Mit dem Elektronenanalysator ist eindeutig festgestellt worden, dass die Ausscheidungen Borverbindungen sind.

SUMMARY

The investigation has intention to determine the influence of boron on the properties of high-strength Niobal 43 steel, microalloyed with niobium. For comparison the ordinary C. 0460 structural steel was investigated.

Steel was manufactured in the induction furnace and cast into 18 kg ingots. The investigated steels were: C. 0460, C. 0460.B (boron alloyed), Niobal 43, and Niobal 43.B (boron alloyed). Each steel was prepared in several variants with various carbon contents.

Ingots were forged to 50 mm, halved transversally, and hot rolled into 14 mm thick strips. The initial rolling temperature was 1240°C, and the final one 940°C. The strips of the first half of each ingot were tested as rolled, the strips of the second half as normalized. Investigations of mechanical and other properties gave the following results:

— boron in the as rolled steel highly increases the yield point and the tensile strength, more in Niobal 43 steel than in C. 0460 steel, and more at low carbon contents than at high ones.

— elongation and contraction are slightly reduced in boron steel but not below the critical point. Toughness in the as rolled steel is much lower but in a very low carbon steel (0.042 % C).

— in normalized state yield point and tensile strength in boron steel are highly reduced even below the value for the same steel without boron.

— after annealing the Niobal 43 and Niobal 43.B steel, the yield point is even higher than in the rolled state. It is 450 N/mm² in steel with 0.042 % C, and 530 N/mm² in steel with 0.08 % C.

Simultaneously the toughness is perceptibly improved but it is still below the value for steel without boron.

— structure of boron steel reveals precipitates on the boundaries of deformed austenitic grains. Boron steel at the final deformation is not recrystallized. Electron micro-analyzer undoubtedly proved that precipitates are the boron compounds.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель исследования состояла в определении влияния бора на свойства высокопрочной стали марки Niobal 43, микросплавной с ниобием, причем для сравнения испытаны также обыкновенную конструкционную сталь марки.

Сталь приготовили в индукционной печи и отливали в слитки веса 18 кг. Слитки следующие марки: C. 0460, C. 0460.B (с бором), Niobal 43, Niobal 43.B (с бором). От каждой марки упомянутых сталей изготовили несколько разновидностей с различным содержанием углерода.

Слитки, кованные на толщину 50 мм и разрезанные пополам в поперечном направлении, развальцовали в горячем состоянии на полосы толщиной 14 мм. Начальная т-ра прокатки составляла 1240°, а конечная — 940°. Полосы из первой половины каждого слитка испытаны в катаном состоянии, а из второй половины — в нормализованном.

При исследовании механических и прочих свойств, приведенных сталей получили следующие результаты:

— легирующий элемент бор в катаных сталях резко увеличивает предел пластичности и сопротивление разрыву, выра-

также сильнее при незначительном в сравнении с большим содержанием углерода в стали.

— Удлинение и сужение сталей, легированных с бором слегка уменьшено но не ниже критической точки. В катаных сталях, с исключенным сортов с очень низким содержанием углерода (0.042 % C) вязкость резко уменьшается.

— При сталях, легированных с бором в нормализованном состоянии резко уменьшено сопротивление разрыву и предел пластичности даже глубоко под значением, которое имеют эти стали без содержания бора.

— После отжига сталей марок Niobal 43 и Niobal 43.B их предел пластичности имеет более положительные результаты чем в катаном состоянии, нпр. при стали с 0.042 % C доходит до 450^н/мм², а при стали с 0.08 % C даже до 530^н/мм². Одновременно заметно улучшается вязкость, хотя, полученные значения все еще ниже чем при сталях без содержания бора.

— При структурном анализе сталей микросплавных с бором обнаружены на границах деформированных аустенитных зерен выделения, которые представляют собой соединения бора; это подтверждено также с анализом при помощи электронного анализатора.