

Mikrolegirana finožrnata jekla za varjenje konstrukcije*

V članku so podane teoretske osnove vplivov posameznih elementov na višino meje plastičnosti in opisano laboratorijsko in industrijsko raziskovalno delo v zvezi z osvajanjem finožrnatih mikrolegiranih jekel s povišano mejo plastičnosti v Železarni Jesenice.

Mikrolegirana finožrnata jekla za varjene konstrukcije.

Pod imenom mikrolegirana finožrnata jekla razumemo jekla, katerim dodamo posamezne legurne elemente v minimalnih količinah, stotinkah ali tisočinkah procenta, ki ob dodatku drugih spremljajočih elementov bistveno vplivajo na fizikalne lastnosti jekla, bodisi na mejo plastičnosti, bodisi na krhki lom itd. Meja plastičnosti je povezana z velikostjo primarnega, oziroma sekundarnega zrna. Z ozirom na to, da mikrolegirani elementi vplivajo tudi na kristalizacijo jekla, imenujemo ta jekla tudi finožrnata jekla.

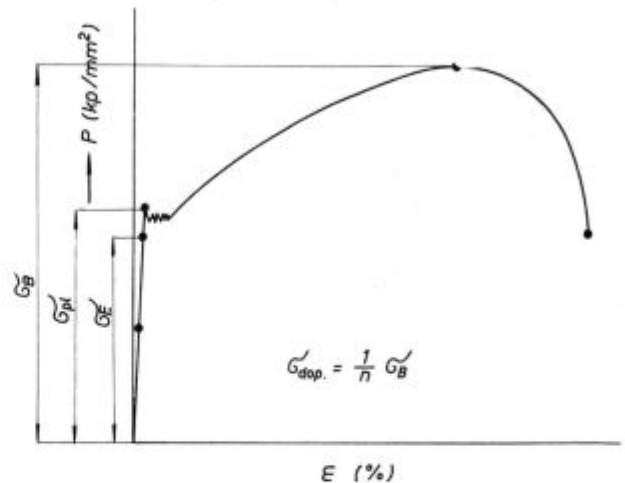
Bistvo mikrolegiranih finožrnatih jekel je torej, da imajo zaradi finega zrna povišano mejo plastičnosti in nizko temperaturo prehoda iz žilavega v krhki lom.

Napredek v tehniki gradenj jeklenih konstrukcij je pa tesno povezan z razvojem ustreznih jekel v obliki pločevine ali profilov, ki imajo čim višjo mejo plastičnosti. To je konstruktorju eden izmed osnovnih elementov pri projektiranju konstrukcije.

Razumljivo je, da je tudi Železarna Jesenice spremljala razvoj teh jekel v svetu in pričela z osvajanjem finožrnatih jekel s povišano mejo plastičnosti do 50 kp/mm².

Kakšen je razvoj teh jekel v Železarni in kaj smo na tem področju dosegli?

Preden se dotaknem konkretnega raziskovalnega dela, povezanega z osvajanjem jekel, se bom povrnil na pojem meje plastičnosti in na elemente, ki vplivajo na njeno izoblikovanje. Naredimo raztržni preizkus čistega železa. V trdnostnem diagramu ne zasledimo nobenih abnormalnosti. Pojav ostane nespremenjen, če dodamo tudi elemente substitucijskega tipa (Mn, Si itd.). Če pa dodamo čistemu železu le 0,005 % C, pa ta že bistveno vpliva na izoblikovanje raztržnega diagrama, pojavi se izrazita meja plastičnosti. (sl. 1).



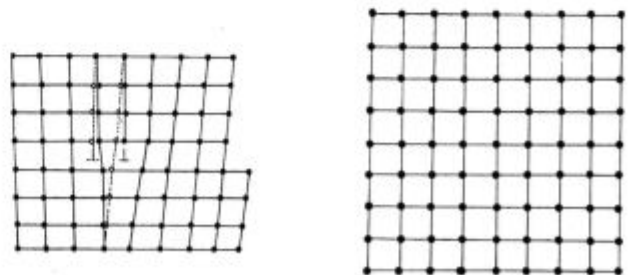
Slika 1
Diagram trgalnega preskusa

Fizika kovin nam daje za ta primer naslednjo razlago:

Kristalna mreža železa ni idealna, je polna nepravilnosti — dislokacij.

Že enostavni pregled kotne dislokacije kaže (sl. 2), da je pojav dislokacij povezan z deformacijo mreže. Zgornji del kristala je torej obremenjen na tlak, spodnji na nateg. Prisotnost teh napetosti vpliva tudi na difuzijo in razporeditev intersticijskih atomov in se s pravilno porazdelitvijo prisotnih atomov različnih premerov te napetosti do neke mere tudi izenačijo.

V primeru, ko dodamo čistemu železu intersticijske atome ogljika, bodo le-ti difundirali v bližino dislokacij, kjer je njihova razporeditev v energetskem pogledu najbolj ugodna. V fiziki kovin rečemo, da se nam je stvaril Cotrellov dislokacijski oblak, ki zavira nadaljnje gibanje



Slika 2
Prikaz kotne dislokacije v kristalni mreži

* Predavanje na strokovnem posvetovanju metalurгов v Mariboru oktobra 1971

dislokacij tudi pod vplivom zunanjih napetosti. Rečemo torej lahko, da tvorba Cotrellovega dislokacijskega oblaka pomeni zasidranje dislokacij, ki se lahko osvobodijo šele pod vplivom večjih zunanjih obremenitev.

Pri raztržnem preizkusu se osvoboditev dislokacije pokaže kot zgornja meja plastičnosti. Pri nadaljevanju raztržnega preizkusa lahko pride do ponovnega enkratnega ali večkratnega pojava tvorbe urejenega dislokacijskega oblaka, kar se odraža v izraziti zgornji in spodnji meji plastičnosti. Ko pa atomi ne morejo več slediti gibanju dislokacij, se le-te popolnoma iztrgajo iz dislokacijskega oblaka in do popolne porušitve poskusnega vzorca — probe ne zasledimo v raztržnem diagramu nobenih abnormalnosti.

Iz navedenega sledi, da je višina meje plastičnosti odvisna od sile, ki je potrebna, da se dislokacija iztrga iz dislokacijskega oblaka, in od splošnega pojava drsenja kristala, kar je odvisno od velikosti zrna. Oba elementa je povezal Petch v obrazec za višino meje plastičnosti

$$\sigma_s = \sigma_b + k \times d^{-\frac{1}{2}}$$

pri tem pomeni

- sigma 0 odpor kristalne meje za gibanje dislokacij
- d povprečna velikost kristalnega zrna
- k konstanta

Razumevanje pojava gibanja dislokacij in difuzijskih sposobnosti posameznih elementov v jeklu pa dajejo odgovor, kako lahko metalurg vpliva na mejo plastičnosti jekla, ali z drugimi besedami, kako lahko vpliva na gibanje dislokacij, da bi dosegli čim višje meje plastičnosti.

Na mejo plastičnosti vplivamo lahko:

- z dodatnimi elementi
- s strukturnimi vplivi

Z elementi vplivamo lahko direktno ali indirektno.

Direktno vplivajo elementi intersticijskega tipa C in N, ki vplivajo direktno na tvorbo Cotrellovega dislokacijskega oblaka.

Indirektno pa vplivamo na mejo plastičnosti z dodatki:

- Mn, Si, Cr, Mo, Nb, V, ki imajo vpliv na difuzijsko sposobnost ogljika in dušika
- določeni elementi vplivajo na utrjenje ferita, kot na primer Si, ali utrjujejo ferit s fino dispergiranimi izločki, kot na primer Nb in V
- z elementi lahko vplivamo tudi na neposredno tvorbo fine primarne sekundarne strukture.

Če sem govoril o vplivu elementov, naj omenim še vplive strukture na višino meje plastičnosti, in sicer:

- velikost avstenitnega in feritnega zrna, kar je povezano s Petchovo enačbo

— dodani elementi vplivajo na volumsko razmerje ferita in perlita v strukturi. Povečanje deleža perlita v strukturi povzroči povečanje trdnosti, vendar spremlja to povečanje tudi zvišanje temperature prehoda iz žilavega v krhki lom. Prav ta lastnost se pa pri finožrnatih jeklih največ zahteva;

— velikost perlitnih lamel in njih oddaljenost. Čim finejše so lamele, čim krajše so, višja je meja plastičnosti, oziroma trdnost. Ta strukturni efekt je povezan s kemično sestavo, v glavnem pa s hitrostjo ohlajevanja jekla po toplotni obdelavi.

To je bilo torej nekaj teoretskih vplivov posameznih elementov in strukture na višino meje plastičnosti in trdnosti jekla.

Kakšne zahteve se postavljajo za finožrnata mikrolegirana jekla?

- meja plastičnosti min. 40 kp/mm²,
- raztezek 5 d min. 20 % ali

$$\frac{1200}{\text{trdnost}}$$

— nizka temperatura prehoda iz žilavega v krhki lom,

— žilavost na probi z ostro zarezo min. 3,5 mkp/cm² pri temperaturi — 20°,

— garantirana varljivost in deformacijska sposobnost z uvijanjem v hladnem.

Od vseh teh zahtev, ki so dovolj jasno formulirane, se moram dotakniti le varjenja. Poleg različnih metod določevanja varivosti jekla, mora biti izpolnjena tudi zahteva, da C_{ekv} ne preseže vrednosti 0,40 za konstrukcije, katere varimo brez predgrevanja, oziroma 0,45 za konstrukcije, pri katerih je predgrevanje več ali manj obvezno.

Za določevanje C_{ekv} je najbolj razširjen obrazec

$$C_{ekv} = \% C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

C_{ekv} je torej pokazatelj, ki združuje nagnjenost jekla k tvorbi martenzita in ki določa tehnologijo varjenja, t. j. kdaj material predgrevamo, kdaj ne.

Iz enačbe za C_{ekv} vidimo, da ogljik v jeklu ni zaželen, da njegov vpliv izredno hitro narašča in da moramo pri razvoju jekel s povišano mejo plastičnosti uporabiti različne elemente, ki vplivajo ne le na tvorbo in gibanje Cotrellovega dislokacijskega oblaka, ampak tudi na izoblikovanje strukturnih komponent.

Z ozirom na to, da sem o vplivu intersticijskih elementov C in N že govoril, se bom v kratkem dotaknil vpliva substitucijskih elementov na fizikalne lastnosti mikro legiranih finožrnatih jekel, in to Mn, Si, Ni, Mo, Nb in V.

Mangan

Mangan znižuje točko A_{c_3} in dosežemo pri 2 % Mn čisti evtektoid že pri 0,65 % C. Mangan torej vpliva na

- utrjevanje ferita
- povečuje delež perlitne komponente v strukturi.

Silicij

Vpliv Si je omejen v glavnem na utrjenje ferita. Ko se začne transformacija avstenita in se začne pojavljati pri prekristalizaciji v strukturi že perlit, narašča delež silicija v avstenitu zaradi netopnosti v cementitu. Ta koncentracija narašča predvsem v okolici cementitnih kali, torej lahko silicij zavira tudi izločevanje ogljika v obliki cementita. Vpliv silicija je torej omejen le na utrjevanje ferita. Ima pa v splošnem slabo lastnost, da povzroča grobozrnatost kristalizacijo, zato je njegova koncentracija omejena na 0,50 %.

Lastne raziskave pa kažejo, da vpliv Si na grobozrnatost strukture pri mikrolegiranih jeklih ni tako velik, lahko rečem, da tega vpliva pri raziskavah nismo zasledili. Zato ne izključujem možnosti, da bo silicij v bodoče pri osvajanju fino zrnatih jekel tudi v večjih koncentracijah normalen dodatek za povišanje meje plastičnosti.

Vpliv silicija na osnovne mehanske lastnosti jekla je razviden iz tabele 1.

Tabela 1 — Vpliv Si na mehanske lastnosti

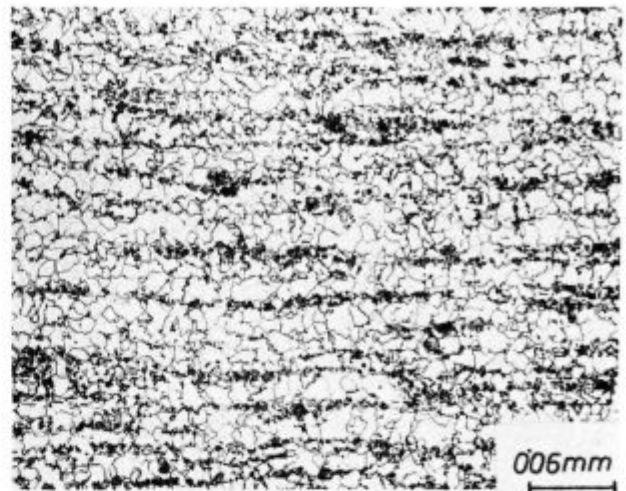
0,17 % C 1,40 % Mn 0,045 % Al	σ_s	σ_n	δ_5 %	ψ %	Žilavost (V notch)		
					normaliz.	starano	
					— 2°	+ 2°	
0,45 % Si	43	59	23	67	21	20	18
0,58 % Si	45	55	25	60	24	19	
0,81 % Si	47	56	25	67	20	19	16
1,15 % Si	50	65	23	62	18	18	12
1,50 % Si	53	73	27	65	12	11	

Upogib: $d = 2a = 180^\circ$

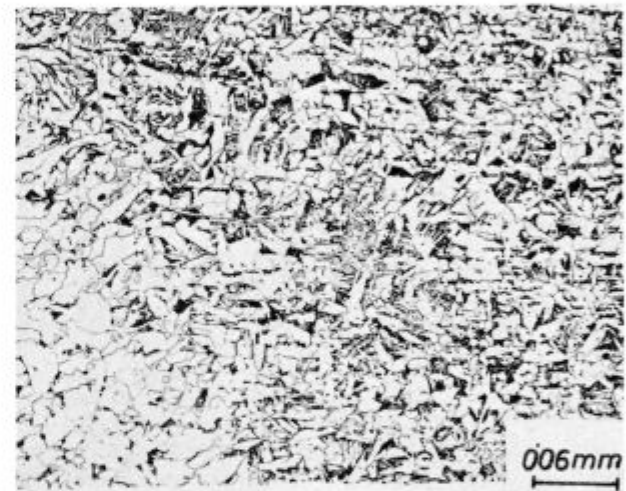
HV — prehodna cona zvara max. 230 HV

Z rastočo koncentracijo Si v jeklu narašča meja plastičnosti, ne da bi bilo opaziti bistven padec žilavosti jekla.

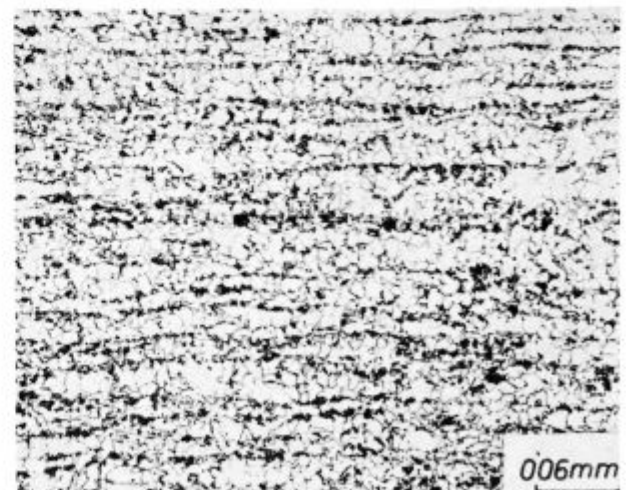
Varilno tehnični preizkusi jekla z nizkim in visokim Si niso pokazali nobenih abnormalnosti. Nasprotno, prehodne cone jekla z dodatkom Si niso pokazali nobenih abnormalnosti. Nasprotno, prehodne cone jekla z dodatkom Si dajo enakomernejši strukturni prehod zvara v osnovni material.



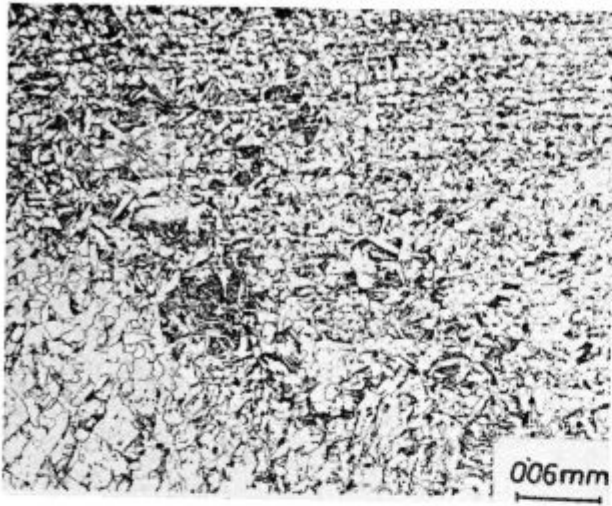
Slika 3
Struktura jekla z 0,45 % Si, 200 ×



Slika 4
Struktura prehoda zvar — osnovni material pri jeklu z 0,45 % Si, 200 ×



Slika 5
Struktura jekla z 0,81 % Si, 200 ×



Slika 6
Struktura prehoda zvar — osnovni material pri jeklu z 0,81 % Si, 200 ×

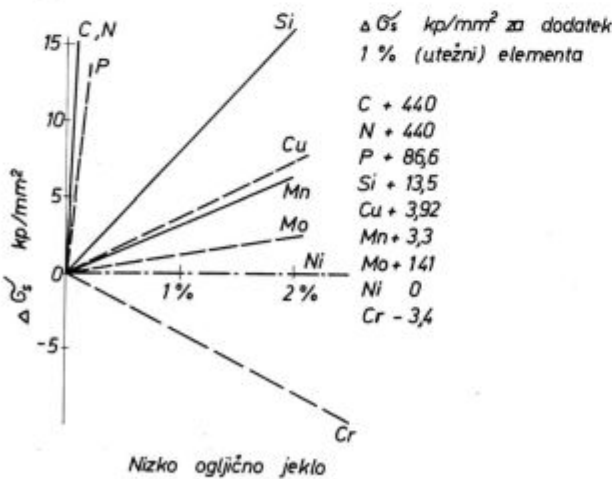
Nikelj

Nikelj ne vpliva bistveno na razporeditev ferita in perlita in je njegov vpliv omejen na višino točke transformacije jekla in s tem utrčenje ferita.

Molibden

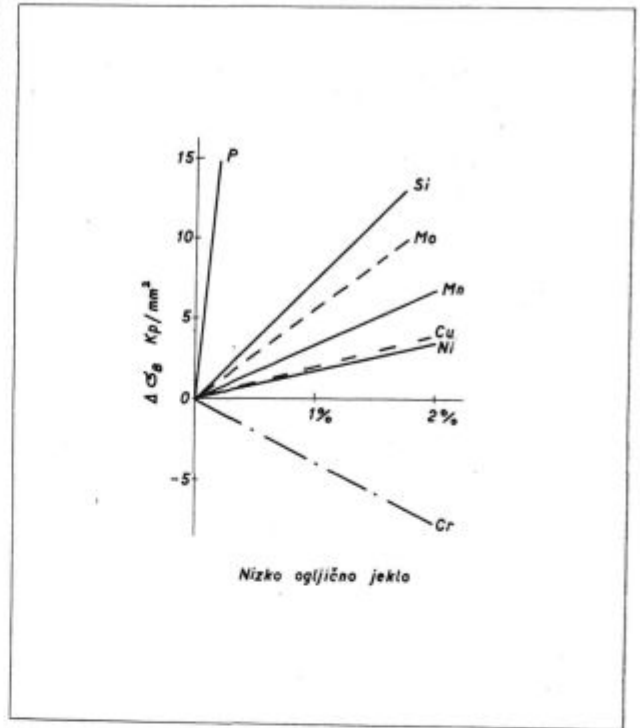
V jeklu povzroča tvorbo kombiniranega FeMo karbida. Vpliv Mo na mejo plastičnosti in trdnosti je pomemben v glavnem za jekla, namenjena uporabi pri visoki temperaturi.

Navedel sem torej v kratkem, kako vplivajo dodatni elementi individualno na fizikalne lastnosti jekla. Seveda so ti vplivi pri različnih koncentracijah zelo različni, kar dokazujejo naslednji diagrami:



Slika 7
Vpliv elementov substitucijskega tipa na mejo plastičnosti (Picherling — Gladman)

Iz diagramov vidimo, da posamezni elementi vplivajo močneje na mejo plastičnosti (sl. 7),



Slika 8
Vpliv elementov substitucijskega tipa na trdnost (Picherling — Gladman)

drugi imajo bistveni vpliv na trdnost (sl. 8). S tem je pa podana možnost kombinacije elementov z ozirom na zahteve.

Povrnili bi se k osvajanju jekel s povišano mejo plastičnosti nad 40 kp/mm² v Železarni Jesenice. Vse raziskave smo izvršili najprej v laboratorijskem obsegu. Šarže v teži 6 kg so bile izdelane v visoko frekvenčni peči, prekovane v palice ustreznih dimenzij, toplotno obdelane in izdelane izdelane trgalne probe mikro, za določevanje trdnosti na stroju S. A. D. A. M. E. L.; žilavostne probe so bile normalnih standardnih dimenzij. Poudariti moram, da smo vse žilavosti določevali vedno na probah z ostro zarezo.

Ko smo na osnovi eksperimentalnega dela preiskav VF šarže prišli do določenih rezultatov, smo prešli na naslednjo fazo polindustrijskih preiskav. Odlili in izvaljali smo v pločevino 8-tonske šarže posameznih optimalnih sestav jekla in v zadnji fazi smo preizkusili še industrijsko osvajanje. V tej fazi so bile izdelane šarže v 60-tonske elektro peči in predstavlja pravzaprav že redno proizvodnjo jekla teh kvalitiet.

Za kontinuiteto dela odnosno lastnosti izhajamo iz čistega železa ARMCO:

- 0,001 % C
- 0 % Si
- 0,20—0,30 % Mn

Fizikalne lastnosti takega železa so:
meja plastičnosti 12—15 kp/mm²
trdnost 20—25 kp/mm²
raztezek min. 30 %

Dodajmo Armcu nekaj ogljika in silicija za pomirjenje jekla pri sestavi

0,07—0,10 % C
0,15—0,30 % Si
0,20—0,35 % Mn
maks. 0,050 % P
maks. 0,050 % S
0,020—0,040 % Al

dosežemo fizikalne lastnosti in sicer:

meja plastičnosti min. 18 kp/mm²
trdnost 37—45 kp/mm²
raztezek min. 20 %

Se vedno je nizka meja plastičnosti. Povišamo jo lahko z dodatkom ogljika. Z ozirom na C_{ekv} , na drugi strani pa zaradi deleža lamelnega perlita v strukturi je pri konstrukcijskih jeklih višina ogljika omejena z maks. 0,20 %. Dodamo torej prej omenjenemu jeklu 0,20 % C.

Pri sestavi

0,20 % C
0,15—0,35 % Si
0,20—0,35 % Mn
maks. 0,050 % P
maks. 0,050 % S
0,020—0,040 % Al

dosežemo lastnosti:

— meja plastičnosti min. 24 kp/mm²
— trdnost 41—50 kp/mm²
— raztezek min. 20 %

Omenil sem že, da predstavlja meja 0,20 % zgornjo mejo za ogljik, ker sicer zaradi naraščanja deleža lamelnega perlita v strukturi zvišuje temperaturo prehoda iz žilavega v krhki lom.

Zgornji podatki povedo, da smo do kraja izkoristili vpliv tistega elementa v jeklu, ki vpliva direktno na izoblikovanje Cottrellovega dislokacijskega oblaka in s tem na višino meje plastičnosti.

Za dosego višjih vrednosti meje plastičnosti moramo torej poseči po elementih substitucijskega tipa Mn, Si, Ni, V, Nb, Mo.

Dodatek mangana:

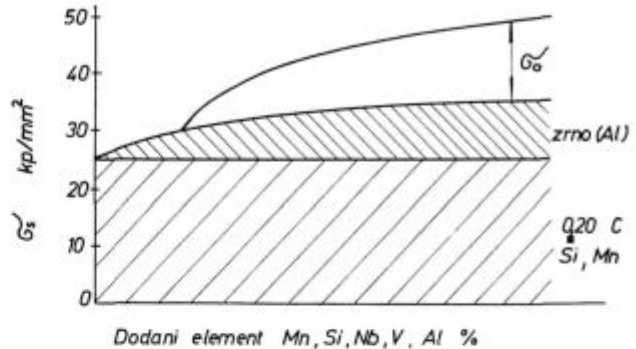
0,15—0,18 % C
0,25—0,50 % Si
1,30—1,50 % Mn
maks. 0,045 % P
maks. 0,045 % S
0,020—0,040 % Al

S tem dosežemo fizikalne lastnosti:

meja plastičnosti min. 36 kp/mm²
trdnost 52—62 kp/mm²
raztezek 5 d min. 20 %

To je tako imenovano jeklo St 52, oziroma Č 0562 po JUS, ki je osnova za nadaljnje raziskovalno delo na področju osvajanja jekla s povišano mejo plastičnosti, oziroma mikrolegiranih jekel.

Ker je torej meja plastičnosti 36 kp/mm² nekak start za nadaljnje delo, bom poizkušal vpliv posameznih elementov do te vrednosti meje plastičnosti prikazati tudi grafično. Glej sliko 9!



Slika 9

Vpliv nekaterih elementov na mejo plastičnosti

Zaključimo torej lahko, da z dodatkom ogljika do 0,20 % dosežemo maksimalno mejo plastičnosti, odgovarjajoče dodanemu elementu. Vsako nadaljnje povišanje meje plastičnosti je pa povezano na dodatek elementov, ki vplivajo indirektno na gibanje dislokacijskega oblaka, to je na »sigma 0«.

Pomemben vpliv na »sigma 0« in vlogo pri osvajanju fino zrnatih mikrolegiranih jekel imata elementa Nb in V. Zato bom vpliv teh elementov obdelal bolj podrobno:

NIOB

V jeklu tvori ob prisotnosti ogljika in dušika kubični Nb(C) odnosno kubični NbN. Z ozirom na to, da imamo v jeklu vedno oba elementa, je razumljivo, da se bo z ozirom na koncentracijo ogljika in N delež kombiniranega Nb(CN) spreminjal.

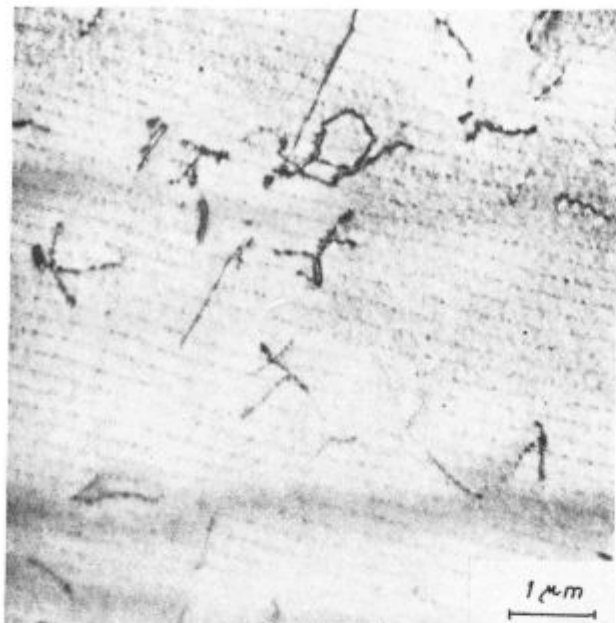
Vpliv Nb je naslednji:

— v trdni raztopini avstenita zavira difuzijo ogljika

— lahko se izloči v avstenitu, pogosto tvori inkoherentne izločke, ki zavirajo rast avstenitnih kristalnih mej, predvsem v normaliziranem stanju

— izloči se v feritu v koherentni obliki, vedno takrat, kadar jeklo relativno hitro ohladimo iz temperature topnosti Nb v avstenitu v feritno področje. Posledica tega je močno utrjenje ferita.

Izločki, ki se pojavljajo ob progresivni transformaciji gama-alfa, imajo karakteristično obliko; izločeni so v regularni obliki, kot to kaže slika 10.



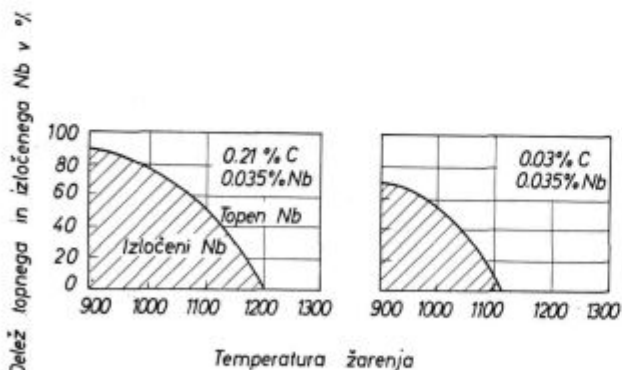
Slika 10

Izločki Nb (C, N) — normalizirano pri 1200° C (Economopoulos — Greday)

Vpliv Nb je torej povezan z njegovo topnostjo, oziroma obliko izločkov karbonitridov, oziroma karbidov. Topnost Nb v odvisnosti od ogljika prikazuje naslednji diagram na sliki 11.

Ta diagram velja za stabilno stanje, žarjenje jekla pri določenih temperaturah 100 min. Izločki Nb C v inkoherentni obliki dosežejo velikost 100—500 Å, če se tvorijo pri nizki temperaturi, oziroma 2000 Å, če se tvorijo pri visokih temperaturah. Vpliv Nb na višino meje plastičnosti pa kaže diagram na sliki 12.

Ta diagram velja za popolno stabilno stanje, to žarjenje jekla 60 min. pri določeni temperaturi, ohlajevanje na zraku in žarjenje 1 uro pri 600° C.

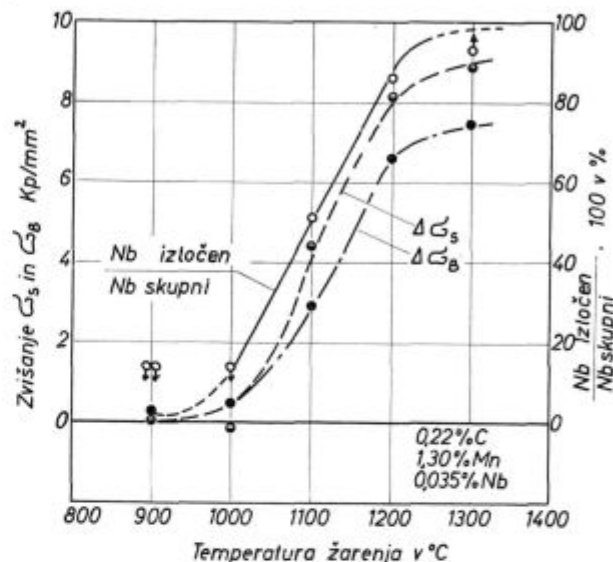


Slika 11

Topnost Nb (C, N) v avstenitu v odvisnosti od ogljika

Poleg karbida je pomemben Nb tudi kot nitridotvorec. Afiniteta Nb do dušika je izredno visoka, podobno kot pri Al. Niobov nitrid, oziroma karbonitrid je zelo stabilen in vpliva na fino primarno in sekundarno kristalizacijo, kakor tudi

utrjenje ferita. Do danes še ni precizirano, kakšen delež dušika je ob prisotnosti Nb in Al vezan na en ali drugi element. V praksi izkoriščamo Nb kot karbidotvorni element, zato pri izdelavi jekla pazimo posebno na to, da dodamo Al za dezoksidacijo v peč in kot prvi dodatek v ponovcu. Praksa nam ni dokazala, da bi Nb reduciral že stvorjeni Al.

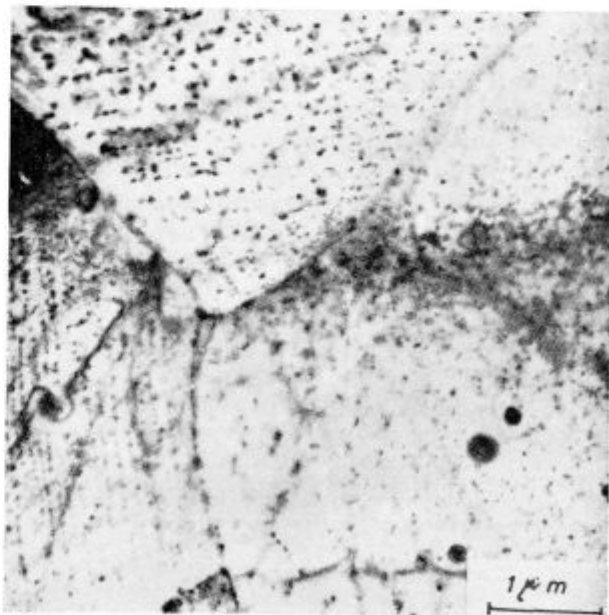


Slika 12

Vpliv izločenega Nb (C, N) na mejo plastičnosti

Vanadij

Vanadij se ponaša v jeklu v manjših koncentracijah pod 0,25 % podobno kot Nb. Ob prisotnosti ogljika in dušika tvori vanadijev karbid ali vanadijev nitrid.



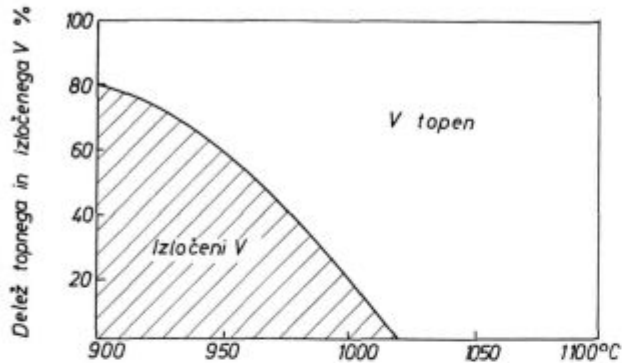
Slika 13

Izločki V₄C₃ — normalizirano pri 950° C (Economopoulos — Greday)

Vanadijev karbid (sl.13) je pri finoizrnatih nizkoogljivičnih jeklih dokaj nestabilen.

Krivulja topnosti vanadijevega karbida pri jeklu z 0,20 % C je podana z naslednjim diagramom na sliki 14.

Vanadijev karbid torej nad temperaturo 1000°C preide v trdno raztopino, kar je za toplotno obdelavo jekla vedno zaželeno.

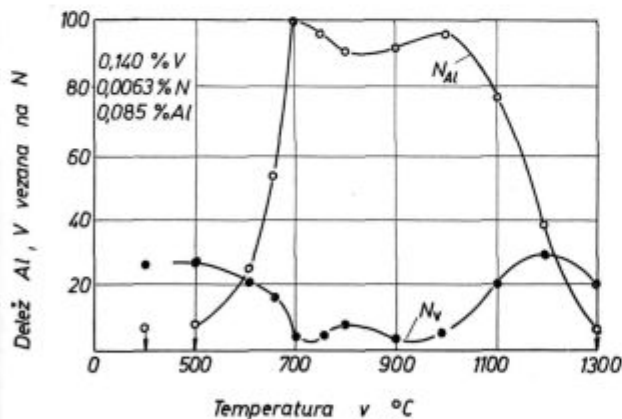


Slika 14
Topnost V₄C₃ v avstenitu (Mayer — Schanwinhold)

Poleg karbidov tvori vanadij tudi nitrid. Vanadijev nitrid je pri osvajanju finoizrnatih jekel manjšega pomena z ozirom na nestabilnost ob prisotnosti ostalih elementov Nb in Al.

Ponašanje dušika ob prisotnosti Al in V prikazuje slika 15

Kako opisano ponašanje Nb in V izkoristimo v praksi pri osvajanju finoizrnatih jekel pa kažejo naslednji praktični rezultati:



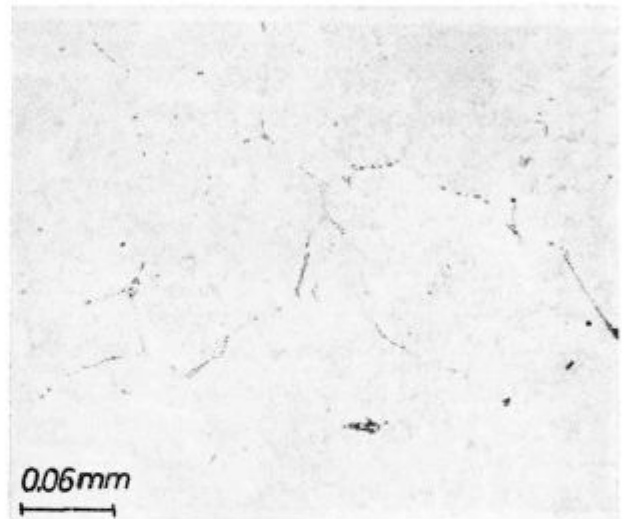
Slika 15
Ponašanje dušika ob prisotnosti Al in V

KOMBINACIJA Mn-Nb

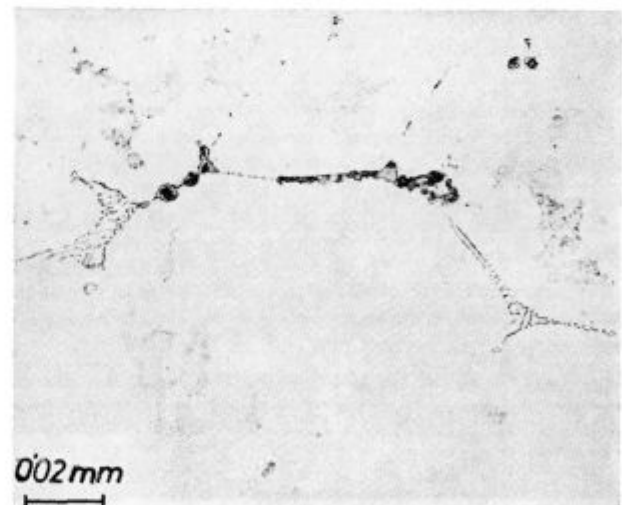
Previsoka koncentracija Nb v jeklu ni zaželeno; zgornjo mejo predstavlja dodatek 0,10 %. Pri višjih koncentracijah Nb se pri nepravilnem postopku valjanja jekla lahko izloči NbC na kristalnih mejah, kar seveda vpliva negativno na fizikalne lastnosti jekla. (Slika 16, 17.)

Tabela 2 — Mehanske lastnosti jekla pri kombinaciji Mn—Nb

Sarža	% C	% Si	% Mn	% Al	% Nb
VF 190	0,16	0,30	1,40	0,038	0,09
Meja plastičnosti			44,2 kp/mm ²		
Trdnost			56,3 kp/mm ²		
Raztezek δ_5			36 %		
Kontrakcija			72 %		
Žilavost — V Notch			18,4 mkp/cm ² (+ 20°)		



Slika 16
Izločanje Nb C po kristalnih mejah, 200 ×



Slika 17
Izločanje Nb C po kristalnih mejah, 500 ×

KOMBINACIJA Mn-Nb-N

Pri šarži VF 511 dosežemo torej pri nižji koncentraciji ogljika višjo mejo plastičnosti. Dušik je nadomestil ogljik.

Tabela 3 — Mehanske lastnosti jekla pri kombinaciji Mn — Nb — N

Šarža	% C	% Si	% Mn	% Nb	% Al	% N
VF 508	0,15	0,74	1,56	0,06	0,042	0,0079
VF 511	0,12	0,74	1,54	0,05	0,022	0,0234

Sarža	σ_s kp/mm ²	σ_B kp/mm ²	δ_s	ψ %
VF 508	45,9	59,6	27	72
VF 511	47,8	57,6	25	73,4

Sarža	Zilavost mkp/cm ² — zarez V Notch			
	Normalizirano		Starano	
	+ 20° C	0° C	20° C	
VF 508	22,0	22,1	18,7	19,8
VF 511	25,3	22,5	21,0	22,5

VPLIV ALUMINIJA

Praksa kaže, da ima tudi Al svoj vpliv na mejo plastičnosti. Kako si lahko razlagamo ta vpliv? Dejstvo je, da pri šaržah 515 in 516 ni zaslediti staranja, torej je dušik vezan na NbN. Ni izključeno, da je povišanje meje plastičnosti pri šaržah z Al vezano na utrjenje ferita in ne na finožrnato primarno in sekundarno kristalizacijo, ki je posledica Al v jeklu. (Tabela 4.)

Tabela 4 — Vpliv Nb in Al na staranje jekla

Sarža	% C	% Si	% Mn	% Nb	% Al
VF 513	0,15	0,76	1,39	0,08	0,042
VF 514	0,14	0,72	1,18	0,07	0,053
VF 515	0,15	0,64	1,39	0,06	0,00
VF 516	0,14	0,71	1,38	0,06	0,002

Sarža	σ_s kp/mm ²	σ_B kp/mm ²	δ_s %	ψ %
VF 513	47,2	59,0	28,3	69,8
VF 514	48,7	58,8	26,7	72,3
VF 515	45,8	58,3	28,3	69,0
VF 516	47,3	58,8	27,5	68,7

Sarža	Zilavost mkp/cm ² — zarez V Notch					
	Normalizirano			Starano		
	+ 20° C	— 20° C	— 40° C	+ 20° C	— 20° C	— 40° C
VF 513	21,7	18,9	23,1	20,1	18,2	18,0
VF 514	20,4	20,9	21,8	20,4	20,1	20,5
VF 515	23,3	22,0	21,9	20,1	19,3	19,7
VF 516	22,0	21,1	16,8	14,1	16,4	11,3

KOMBINACIJA Mn-V

Tabela 5 — Mehanske lastnosti jekla pri kombinaciji Mn — V

Sarža	% C	% Si	% Mn	% V	% Al
VF 223	0,16	0,58	1,33	0,09	0,019
VF 225	0,15	0,63	1,26	0,16	0,038

Sarža	σ_s kp/mm ²	σ_B kp/mm ²	δ_s %	ψ %
VF 223	46,8	62,5	23,3	66,5
VF 225	49,5	64,0	23,6	63,4

Sarža	Zilavost mkp/cm ² — zarez V Notch		
	+ 20° C	0° C	— 20° C
VF 223	15,0	18,1	15,7
VF 225	14,8	15,6	15,0

KOMBINACIJA Mn-Nb-V

Tabela 6 — Mehanske lastnosti jekla pri kombinaciji Mn — Nb — V

Sarža	% C	% Si	% Mn	% V	% Nb	% Al	% N
VF 518	0,14	0,65	1,44	0,07	0,035	0,020	0,0041
VF 519	0,14	0,66	1,45	0,08	0,023	0,030	0,0042

Sarža	σ_s kp/mm ²	σ_B kp/mm ²	δ_s %	ψ %
VF 518	48,6	60,4	26,7	71,2
VF 519	47,1	61,2	26,2	70,1

Sarža	Zilavost mkp/cm ²			
	Normalizirano		Starano	
	+ 20° C	0° C	+ 20° C	0° C
VF 518	20,4	20,3	19,6	18,6
VF 519	21,4	21,0	18,5	18,6

Podobne rezultate meje plastičnosti smo dosegli pri saržah z Nb. Zakaj torej še dodatek V?

Jekla z Nb so občutljiva na pogoje valjanja in zahtevajo posebne pogoje predelave. Z ozirom na to, da v praksi teh pogojev ni mogoče vedno zagotoviti, poleg tega pa jekla z vanadijem niso tako občutljiva na valjanje, dosežemo s to kombinacijo mikrolegiranja v praksi bolj stabilne rezultate.

Kako vpliva ogrevanje Nb-V jekla pri predelavi na mejo plastičnosti

Finozrnata jekla s povišano mejo plastičnosti se mnogokrat predelujejo s predgrevanjem. Potrošniki (se) sprašujejo do katere temperature lahko jeklo segrejejo za lažje preoblikovanje, ne da bi pri tem poslabšali mehanske lastnosti. Vpliv predgrevanja pri oblikovanju na fizikalne lastnosti je pa razviden iz naslednjih tabel, in sicer:

Tabele 7 za Mn-Nb jeklo

Tabele 8 za Nb-V jeklo

V obeh primerih torej zasledimo v dvofaznem območju padeč mejo plastičnosti in narastek trdnosti. Predpostavljam, da je to povezano s koagulacijo izločkov, povišana trdnost pa je posledica razmešanja trdne raztopine.

Predpostavljam, da je ponoven dvig meje plastičnosti pri višjih temperaturah povezan s homogenizacijo avstenitne strukture in dodatno difuzijo Nb.

Te preiskave pa dokazujejo, da se morajo preoblikovalci jekla ogibati predgrevanja jekla v dvofaznem območju, to je 720—800°.

Nagnjenost jekla Nb-V k napuščni krhkosti

Določene konstrukcije moramo napetostno odžariti. Z ozirom na to se postavlja vprašanje nagnjenosti NbV jekel k napuščni krhkosti. Rezultati tozadevnih preiskav so razvidni iz tabele 9

O vplivu Nb in V na mejo plastičnosti je postavljenih več teorij. Na osnovi teoretskega razglabljanja in praktičnega raziskovalnega dela lahko definiramo vplive obeh elementov na mejo plastičnosti, kakor sledi:

Vpliv Nb je dvojen: v obliki nekoherentnih izločkov vpliva na finozrnato primarno kristaliza-

Tabela 7 — Vpliv temperature žarenja na fizikalne lastnosti Nb jekla

Sarža	% C	% Si	% Mn	% Nb	% Al
E 3829	0,18	0,30	1,58	0,12	0,05

Temperatura °C	σ_s kp/mm ²	σ_B kp/mm ²	δ_5 %	ψ %
20	45,9	62,8	25	61
550	47,8	60,5	32,5	63,4
600	47,4	60,1	30,8	61,0
650	46,2	58,0	28,3	64,0
700	45,4	57,3	27,5	62,7
750	45,0	80,9	16,7	17,6
800	43,4	65,3	26,5	58,0
850	48,6	62,0	28,5	64,4
900	47,5	60,8	29,0	61,8

Čas žarenja 60 minut

Tabela 8 — Vpliv temperature žarenja na fizikalne lastnosti Nb—V jekel

Sarža	% C	% Si	% Mn	% Nb	% V	% Al
E 3833	0,17	0,35	1,50	0,048	0,11	0,006

Temperatura °C	σ_s kp/mm ²	σ_B kp/mm ²	δ_5 %	ψ %
20	48,4	62,5	29,5	60,2
550	48,6	62,9	29,2	60,2
600	48,4	62,6	28,3	63,8
650	48,2	61,5	26,6	60,8
700	47,4	58,5	28,3	63,8
750	42,8	70,0	23,3	49,4
800	44,7	64,0	27,6	61,0
850	48,0	63,4	28,0	63,3
900	49,4	63,0	28,0	63,5

Tabela 9 — Napuščna krhkost Nb—V jekla

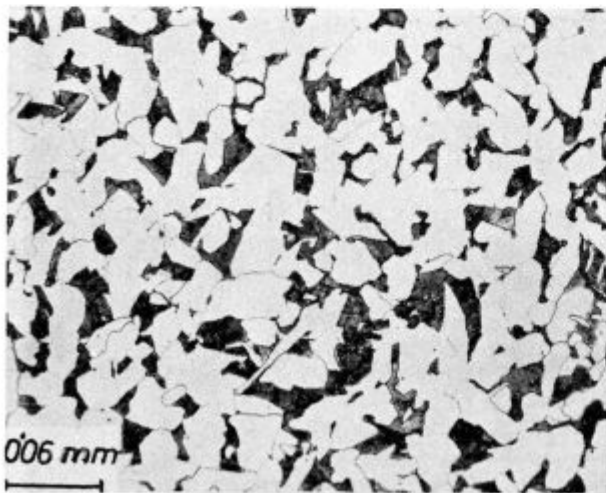
Sarža	% C	% Si	% Mn	% V	% Nb	% Al
EL 1426	0,18	0,35	1,38	0,05	0,046	0,036

Temperatura obdelave °C	Žilavost mkp/cm ² — zarez V Notch			
	Norma- lizirano	Starano	Norma- lizirano	Starano
	30 minut na temperaturi		60 minut na temperaturi	
20	13,5	8,0	13,8	5,8
450	13,1	7,0	14,6	5,9
500	15,0	5,75	14,4	6,4
550	13,8	5,6	13,8	6,7
600	14,4	6,35	13,8	5,1
650	14,1	5,60	15,5	6,0
700	15,3	5,60	14,9	5,6

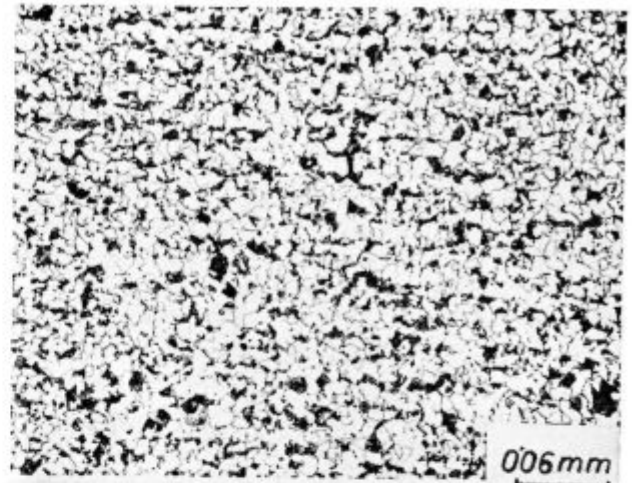
cijo jekla. Drugi del Nb pa skupaj z V vpliva v obliki koherentnih izločkov na utrjenje ferita.

Velikost teh izločkov je 200—400 Å. Ti izločki vplivajo na mejo plastičnosti z blokiranjem dislokacij in omejujejo sposobnost za drsenje kristalov. Čim manjši so ti izločki, večji je vpliv na mejo plastičnosti. Zato dobimo optimalno velikost in razporeditev izločkov s posebnim načinom valjanja in deformacijo jekla neposredno nad točko Ac₃.

Vpliv strukture na fizikalne lastnosti je razviden tudi iz primerjave metalografskih struktur. Medtem ko ugotovimo pri navadnem jeklu kvalitete Č 0445 grobožrnato strukturo ferita in perlita (sl. 18 × 200), pa kaže finožrnato jeklo na bazi mangana značilno trakasto strukturo z izredno gostimi perlitnimi lamelami (sl. 19 × 200)



Slika 18
Struktura jekla z 0,18 % C in 0,55 % Mn — 200 ×



Slika 19
Struktura jekla Nioval, 200 ×

Na osnovi laboratorijskih in polindustrijskih preizkusov smo osvojili dve vrsti finožrnatih jekel, in sicer:

— Niobal 43, na bazi Nb z mejo plastičnosti min. 43 kp/mm²

— Nioval 47, na bazi Nb-V z mejo plastičnosti min. 47 kp/mm²

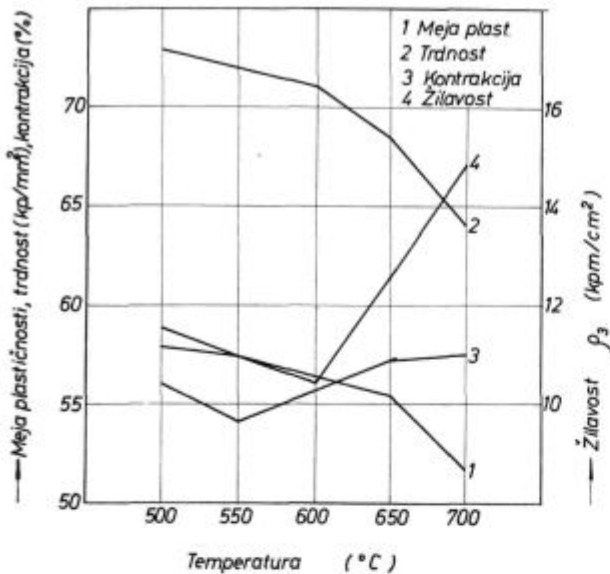
Poleg omenjenih jekel z mejo plastičnosti 43, oziroma 47 kp/mm² pa uvajamo v železarni tudi že industrijsko proizvodnjo jekla Nioval 50 z mejo plastičnosti min. 50 kp/mm² na bazi Ni in V. Fizikalne lastnosti so razvidne iz tabele 10.

Tabela 10 — Fizikalne lastnosti jekla Nioval 50 na bazi Ni in V

C 0,16 %	δ _s min. 50 kp/mm ²
Si 0,40 %	δ _B 60—85 kp/mm ²
Mn 1,40 %	δ ₅ min. = 1200
P maks. 0,020 %	trdnost
S maks. 0,020 %	
Ni 0,50 %	Žilavost DVM mkp/cm ²
V 0,15 %	+ 20° 0° —40° —60°
Al 0,40 %	9 5,5 5 4

Jeklo je izredno občutljivo na toplotno obdelavo in je poleg normalizacije potrebno občasno vpeljati dodatno operacijo — napuščanje jekla. Vpliv toplotne obdelave na fizikalne lastnosti je razviden iz diagrama na sliki 20.

Istočasno smo pa preiskave usmerili tudi v osvajanje jekla s povišano mejo plastičnosti in povečano obstojnostjo proti atmosferski koroziji z drugimi dodatki.



Slika 20

Mehanske lastnosti normaliziranih in na različnih temperaturah popuščenih vzorcev

KOMBINACIJA Mn-Nb-Cu

Tabela 11 — Mehanske lastnosti jekla pri kombinaciji Mn — Nb — Cu

Sarža	% C	% Si	% Mn	% Nb	% Cu	% Al
VF 917	0,14	0,38	1,21	0,053	0,14	0,038
VF 935	0,16	0,47	1,40	0,065	0,37	0,060
VE 936	0,16	0,46	1,38	0,060	0,56	0,057

Normalizirano 910° C

Sarža	σ_s kp/mm ²	σ_n kp/mm ²	δ_5 %	ψ %
VF 917	42,0	52,5	32	72
VF 935	45,0	57,5	30	72,4
VF 936	44,5	55,0	26	61

Sarža	Žilavost m kp/cm ²		
	+ 20° C	0° C	- 20° C
VF 917	18,2	19,2	18,1
VF 935	22,0	15,8	17,5
VF 936	17,8	16,9	18,8

Ob konstantni toplotni obdelavi, to je normalizaciji z narastkom Cu, narašča meja plastičnosti ob zadovoljivi žilavosti

KOMBINACIJA Mn-Cr-Cu-Ni-Nb

Tabela 12 — Mehanske lastnosti jekla pri kombinaciji Mn — Cr — Cu — Ni — Nb

Sarža	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Cu	% Nb	% Al
VF 1633	0,15	0,29	1,00	0,63	0,50	0,34	0,06	0,045

Meja plastičnosti 47,9 kp/mm²

Trdnost 62,0 kp/mm²

Raztezek 28 %

Kontrakcija 76 %

Žilavost m kp/cm²

+ 20° C	0° C	- 20° C	- 40° C	- 60° C
20,0	21,1	19,3	19,7	18,75

Žilavost — starano
18,0 — deformacija 5 %
17,0 — deformacija 10 %

Vidimo lahko, da ob dodatku Cu in ostalih elementov dosežemo relativno visoko mejo plastičnosti ob istočasno močno povečani obstojnosti jekla proti atmosferski koroziji. Na teh osnovah je osvojena proizvodnja jekla s povišano mejo plastičnosti in povečano obstojnostjo proti atmosferski koroziji v kvalitetah:

— Nionicral 40 z mejo plastičnosti min. 40 kp/mm²

— Nionicral 45 z mejo plastičnosti min. 45 kp/mm²

Jekla so dobro varljiva.

ZAKLJUČEK

V referatu sem se dotaknil teoretskih osnov in vplivov posameznih elementov na višino meje plastičnosti. V drugem delu sem poizkušal povezati teoretske vplive s praktičnim delom osvajanja mikrolegiranih fino zrnatih jekel v Železarni Jesenice. Rezultat tega dela je sedem vrst konstrukcijskih jekel s povišano mejo plastičnosti in garantirano varljivostjo. Določena jekla pa imajo tudi povišano odpornost proti atmosferski koroziji.

Pregled tega kvalitetnega asortimenta in fizikalnih lastnosti je razviden iz naslednjih tabel. (13, 14, 15)

Ob vsem tem se postavlja vprašanje, ali predstavljajo omenjene kombinacije elementov pri določenih kvalitetah jekel optimalno rešitev glede lastnosti in ekonomike proizvodnje. S tem v zvezi moram dati naslednje pojasnilo:

Tabela 13 — Kemične sestave finožrnatih jekel

	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Cu	% Mo	% P	Nb	V	Al
Niobal 43	max. 0,20	0,40	1,50	—	—	—	—	—	0,05	—	+
Nioval 47	max. 0,20	0,40	1,50	—	—	—	—	—	0,04	0,06	+
Nioval 50	max. 0,20	0,40	1,50	—	0,50	—	—	—	—	0,15	+
Nionicral 40	max. 0,18	0,40	0,70	0,50	0,50	0,35	—	—	+	—	+
Nionicral 45	max. 0,19	0,40	0,50	0,50	0,65	0,35	—	—	+	—	+
Nionicral 60	max. 0,15	0,30	0,40	1,50	2,50	—	0,40	—	—	—	+
Je-Kor 35	max. 0,14	0,50	0,40	0,50	0,50	0,40	—	0,09	—	—	+

Tabela 14 — Mehanske lastnosti finožrnatih jekel

Kvaliteta	Meja raztezanja v kp/mm ² za pločevino debeline v mm				Trdnost v kp/mm ²	Raztezek Sd %	Upogib. kot 180°
	do 10	10—15	15—25	nad 25 kp/mm ²			
Niobal 43	44	43	43	42	55—70	min. 19	2,5a
Nioval 47	48	47	46	45	57—75	min. 18	3a
Nioval 50	50	50	49	48	62—75	min. 17	3a
Nionicral 40	41	40	40	39	50—65	min. 20	2a
Nionicral 45	46	45	45	44	55—70	min. 20	3a
Nionicral 60	60	60	60	60	70—85	min. 18	3a
Je-Kor 35	35	35	—	—	50—65	min. 20	2a

Tabela 15 — Žilavostne vrednosti finožrnatih jekel mkp/cm² (Proba V—Notch) v smeri valjanja

Kvaliteta	Nestarano stanje					Starano stanje		
	+20°C	0°C	-20°C	-40°C	-60°C	+20°C	0°C	-20°C
	mkp/cm ²					mkp/cm ²		
Niobal 43	8	7	6	4,0		6	5	
Nioval 47	6,5	6	5	4,5		6	5	
Nioval 50	7	6	5	4		6	5	
Nionicral 40	6	6	5	3,5		6	4	
Nionicral 45	6	6	5	3,5		6	4	
Nionicral 60	15	15	15	15	15	7	7	6
Je-Kor 35	6	6				3,5		

Dosedanje raziskovalno delo je bilo usmerjeno v osvajanje proizvodnje jekel v normaliziranem stanju, brez druge dodatne obdelave, ki bi pospešila utrjevanje ferita. Brez dvoma bi lahko pri jeklih, legiranih z Cu pa tudi z Nb in V dosegli z napuščanjem dodatne efekte. Vprašanje pa je, če je to ekonomsko upravičeno. Vsekakor je naslednja faza raziskovalnega dela na tem področju usmerjena na to, da na osnovi množice podatkov iz redne proizvodnje s pomočjo matematičnega modela in elektronskega računalnika postavimo optimalne meje v pogledu kemične sestave, fizikalnih lastnosti in seveda tudi ekonomike proizvodnje.

Literatura:

1. L. Meyer — F. Schmidt — C. Strassburger: Einfluss von Niob und Vanadin auf das Gefüge und Eigenschaften perlitärmer aluminiumberuhigter Stähle. Stahl u. Eisen No 22-1969.
2. W. Dahl — H. Hengstenberg — H. Adrian: Einfluss von Legierungszusätzen auf die Festigkeitseigenschaften von höchsten schweißbaren Baustählen im normalgeglühten und luftvergüteten Zustand. Stahl u. Eisen No 12 1970.
3. J. M. Gary — W. Webster — J. H. Woodhead: Precipitation in mild steels containing small additions of ni-

- bium. Journal of The Iron and Steel Institute, avgust 1965.
4. W. E. Duckworth: New Steels and their Applications. Steel times annual review & Centenary Number 1966.
 5. H. Vogel — P. König — K. Heinz: Einfluss der Abbindung von Stickstoff durch Aluminium und Vanadin auf die mechanischen Eigenschaften von hochfesten Baustählen. Archiv für das Eisenhüttenwesen 1964 No 4.
 6. P. Mandry — R. Namdar — C. Wache: Precipitation de

- carbonitrides de niobium dans les aciers de construction soudables. Revue de Metallurgie No 7—8 1969.
7. M. Economopoulos — T. Greday: Recherches sur les aciers de construction soudables à haute résistance. C. N. R. M. No 1 1964.
 8. B. Morrison — H. Woodhead: The influence of small niobium additions on the mechanical properties of commercial mild steels. Journal of the Iron and Steel Institute No 1. 1963.

ZUSAMMENFASSUNG

Für die Stahlkonstruktionen werden in immer größerem Masse Feinkornbaustähle mit einer höheren Plastizitätsgrenze und garantierter Schweißbarkeit angewendet. Auch im Hüttenwerk Jesenice ist eine umfangreiche Entwicklungsarbeit über die mikrolegierten Feinkornbaustähle durchgeführt worden.

Die theoretischen Grundlagen der Plastizitätsgrenze und die Einflussgrößen der mikrolegierten Elemente auf die physikalischen und Gefügeeigenschaften der schweißbaren Konstruktionsstähle werden beschrieben.

Die Versuchsschmelzen für die einzelnen Zusammenstellungen sind in einem Hochfrequenzofen gemacht worden. Einige der charakteristischen chemischen Zusammenstellungen mit den physikalischen Eigenschaften sind angegeben.

Auf Grund der laboratorischen Untersuchungen und der vorhandenen Anlagen für die Erzeugung und vor allem für die Verformung des Stahles ist die Produktion der mikrolegierten Feinkornbaustähle mit einer Plastizitätsgrenze von mindestens 43 kp/mm², 47 kp/mm² und 50 kp/mm² auf folgender Basis entwickelt worden:

— Feinkornstähle mit Niob Zusatz, wobei die Konzentration dieses Elementes den Verformungsbedingungen, das heisst, dem möglichen Deformationsgrad des Stahles beim Walzen angepasst ist.

— Feinkornstähle mit Niob und Vanadium mikrolegiert, wobei die Vanadiumlegierten Stähle auf die Walzbedingungen weniger empfindlich sind.

— Weiter sind Untersuchungen über den Einfluss des Cr, Cu und Ni auf die Plastizitätsgrenze und auf die Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit durchgeführt worden. Die Folge dieser Untersuchungen ist die Produktion der Wetterfesten Stähle, des Types »Nionical« mit einer höheren Plastizitätsgrenze von mindestens 40 bzw. 45 kp/mm² und höherer Beständigkeit gegen die Atmosphärische Korrosion. Diese Stähle sind für höherbeanspruchte Konstruktionen bei welchen auch höhere Korrosionsbeständigkeit verlangt wird bestimmt.

Der Wetterfestestahl Nionical 60 ist eine Spezialqualität mit hohen physikalischen Eigenschaften und eignet sich besonders für diejenige Konstruktionen, wo eine höhere Sprödbrochbarkeit auch bei sehr niedrigen Temperaturen verlangt wird.

SUMMARY

Steels with increased yield and guaranteed weldability are increasingly used for metallic structures. Also great corrosion resistance is demanded from these steels. In Jesenice Ironworks investigation was made to produce high quality steels with addition of microalloying elements.

Theoretical basis of the yield point is given and basic influences of added elements on physical and structural properties of weldable structural steels are described.

Test melts of various steel compositions were made in high frequency electrofurnace. In the paper some characteristic chemical compositions of steel and its physical properties are presented.

Based on experiments, available set-ups for production and especially for working of steel, the production of the following microalloyed fine grained steels with increased yield of over 43, 47 and 50 kp/mm² started under the conditions:

— in steels with added niobium, concentration of this element was adjusted to working conditions i. e. to the possible deformation step in hot rolling,

— steels with combination of added elements niobium-vanadium were made under supposition that steels with added vanadium are less sensitive for the rolling conditions.

Experimentally mainly the influence of added elements Cr, Cu and Ni on the yield point was studied beside their influence on the increased corrosion resistance. Result of these investigations was the production of Nionical steel type with yield points over 40 or 45 kp/mm² and increased corrosion resistance. These steels are intended for more exacting structures where the mentioned technological properties are demanded.

Nionical 60 steel is a special steel with high physical properties and intended for structures with high resistance to fragile fracturing even at very low temperatures.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для металлоконструкций всё чаще применяются стали с повышенным пределом пластичности и гарантированной свариваемости. Кроме этого от стали требуется повышенное сопротивление воздействию атмосферной коррозии. Чтобы удовлетворить требованию в металлургическом заводе Есенице (Zelezarna Jesenice) велось исследование о освоении сортов стали высокого качества при добавке микролегующих элементов.

Приведены теоретические основания предела пластичности и дано описание основных влияний добавочных элементов на физические и структурные качества сваривающихся конструктивных сталей. Опытные расплавы переменного химического состава

плавил в высокочастотной печи. В статье поданы некоторые из этих сталей, их химическое содержание и физические свойства. На основании опытов, взявши во внимание агрегаты которые были в распоряжении для изготовления а в особенности для переработки стали, в заводе Есенице освоили производство микролегированной мелко-зернистой стали предела пластичности свыше 43 кл/мм², 47 кл/мм² и 50 кл/мм² взяв во внимание следующие основания:

— сталь с добавкой Nb, с тем что концентрация этого элемента соответствует условиям переработки, т. е. возможной степени деформации стали при горячей прокатки,

— сталь на основании комбинации элементов Nb — V, взявши во внимание, что добавка уменьшает чувствительность стали на условия прокатки.

Опытное исследование обхватило также добавок элементов Cr, Cu и Ni т. э. их влияние на предел пластичности а также и на повышенное сопротивление действию атмосферной коррозии.

Результаты этих исследований производство стали марок Nioisgal с повышенным пределом пластичности свыше 40 кп/мм²

и 45 кп/мм² и повышенным сопротивлением на в действие атмосферной коррозии. Этот сорт стали предназначен для более обременённых конструкции от которых требуется чтобы они удовлетворяли упомянутым технологическим свойствам. Сталь марки Nioisgal-60 представляет собой специальный сорт стали с высокими физическими свойствами; эта сталь предназначена для сооружений от которых требуется высокое сопротивление на хрупкость также при пониженных температурах.