

Vpliv toplotne obdelave na žilavost bainita Cr-W-V jekel

UDK: 620.178.746.22:621.785.4

ASM/SLA: J 26 p, Q 6 n, N 8 g, N 8 m

Franč Uranc

Ugodnosti kaljenja v bainit so že dolgo znane, ni pa veliko podatkov o vplivu legirnih elementov na pogoje nastajanja najbolj žilavega bainita. Te pogoje smo preiskovali pri Cr-W-V jeklih.

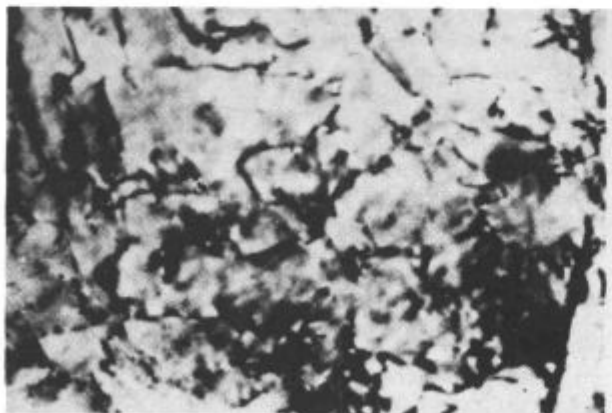
1. SPLOŠNO O NASTAJANJU IN LASTNOSTIH BAINITA

Jeklene izdelke, ki morajo biti obenem trdi in žilavi, moramo izdelati po kateri od posebnih tehnologij izdelave, predelave ali toplotne obdelave. Od toplotnih obdelav pride najbolj v poštev izotermno kaljenje v bainit.

Ta način kaljenja si bomo podrobno ogledali.

Glede na način tvorbe strukture razlikujemo izotermno nastali bainit od zvezno nastalega, ki nastaja med zveznim ohlajanjem. Glede na temperaturo nastajanja in glede na lastnosti pa razlikujemo zgornji bainit od spodnjega. Prvi je veliko manj žilav in manj trd kot drugi.¹

Vzrok različnim lastnostim je v različnem nastajanju: Zgornji bainit nastaja iz avstenita tako, da se paralelno izločajo plasti Fe_3C in ferita. Takoj po nastanku se struktura popusti. Lamelle Fe_3C so debele 0,1 μm in dolge 0,3 μm , lamelle ferita so dolge do 1,7 μm . Feritne meje so delno nekoherentne, orientacijski odnos med feritom in Fe_3C je delno podoben kot v popuščnem martenzitu. Število malokotnih mej med feritnimi zrni in gostota dislokacij sta manjša kot v tršem spodnjem bainitu (sl.1).



Slika 1

Struktura zgornjega bainita jekla z 0,1 % C. Premena pri 600 °C. 75000 $\times$. Mikrograf s tenko folijo¹.

Fig. 1

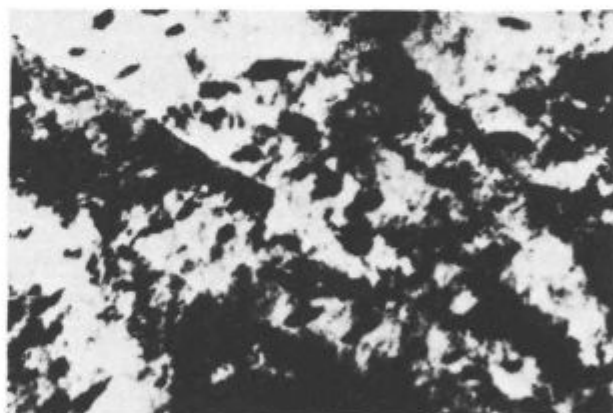
Structure of upper bainite in steel with 0.1 % C. Transformation at 600 °C. Micrograph with thin foil¹. 75,000 $\times$.

V visokolegiranih in visokoogljicnih jeklih zgornji bainit ne nastopi.

Spodnji bainit nastaja pri določeni temperaturi tako, da se iz avstenita tvori ferit, v katerem se nato izločajo karbidne paličke pod kotom 60° glede na os feritne igle². Feritne meje so koherentne, orientacijski odnos med feritom in Fe_3C je večinoma podoben kot pri popuščnem martenzitu:

Fe_3C		Ferit
(001)		(211)
[100]		[011]
[010]		[011]

Strukturo spodnjega bainita jekla z 0,4 % C po premeni pri 350 °C kaže slika 2.



Slika 2

Struktura spodnjega bainita jekla z 0,4 % C po premeni pri 350 °C. 45000 $\times$. Mikrograf s tenko folijo¹.

Fig. 2

Structure of lower bainite in steel with 0.4 % C after transformation at 350 °C. Micrograph with thin foil¹. 45,000 $\times$.

Habitusna ravnina ferita (122) ustreza ravnini (245) avstenita. Bainit je martenzitu podoben po orientacijskih značilnostih in po temperaturi nastajanja pod rekristalizacijsko temperaturo, perlitu pa po tem, da ni tragonalen in po tem, da se tvorijo legirani karbidi šele po tvorbi bainita³.

Obema vrstama bainita je skupna enaka energija za tvorbo kali. Avstenit se lahko popolno spremeni v bainit le pri določeni primerni temperaturi, t. j., izotermno. Drugače je med zveznim ohlajanjem, npr. po litju, valjanju, varjenju, toplotni obdelavi, ko je premena v bainit nepopolna — jeklo vsebuje po ohlaiditvi še druge strukturne sestavine.

Če je vsebnost ogljika nad 0,6 %, se izločajo karbidi že iz avstenita. Vsebnost ogljika določa mejo med zgornjim in spodnjim bainitom. Hitrost ohlajanja močno vpliva na lastnosti zvezno ohlajene strukture.

Na lego bainitnega območja v TTT diagramu vplivajo legirni elementi. Spreminjanje vsebnosti ogljika le ne bistveno vpliva na čas premene avstenita v bainit v jeklu, ki ne vsebuje znatnih deležev drugih legirnih elementov. Dodatek do 2 % W malo podaljša premenski čas. Dodajanje kroma do 3 % tudi odmika krivuljo bainitne premene na desno, vendar je vpliv volframa močnejši. Dodajanje volframa bolj odmika krivuljo perlitnega kot bainitnega začetka, kar lahko pričakujemo⁴.

2. PREIZKUSI

2.1. Primerjava TTT diagramov Cr-W-V jekel

Preizkuse za ugotavljanje lastnosti bainita Cr-W-V jekel smo omejili na jekla Č. 4830 — VCV 150, Č. 6444 — Osikro 4, Č. 4146 — OCR 4 ex. sp., Č. 4150 — OCR 12, Č. 4650 — OCR 12 special.

Razpredelnica 1 kaže smerne sestave teh jekel.

Razpredelnica 1: Smerne kemijske sestave preizkušanih jekel

JEKLO	Kemijska sestava %			
	C	Cr	W	V
Č. 4830-VCV150	0,5	1	—	0,15
Č. 6444-Osikro 4	0,6	1	2	0,2
Č. 4146-OCR4exsp	1	1,5	—	—
Č. 4150-OCR12	2	12	—	—
Č. 4650-OCR12sp	2	12	0,6	0,15

Jekli, podobni prvima dvema, so že izotermno kalili v bainitnem območju^{5,6}, druga tri jekla pa so v bainitnem stanju manj preiskana.

Za določanje vpliva legirnih elementov in pogojev toplotne obdelave na lastnosti bainita smo preiskali precej več jekel, kot smo jih preizkusili. Določenih jekel legirnega tipa Cr-W-V nismo preizkušali, ker so prejšnje preiskave pokazale bodisi težavnost bodisi nekoristnost obdelave v bainitu:

— Ogljično jeklo z 0,8 C se zelo dobro obnaša po izotermni premeni v bainitu, toda kaljenje terja posebno kopol z veliko hladilno zmoglostjo.

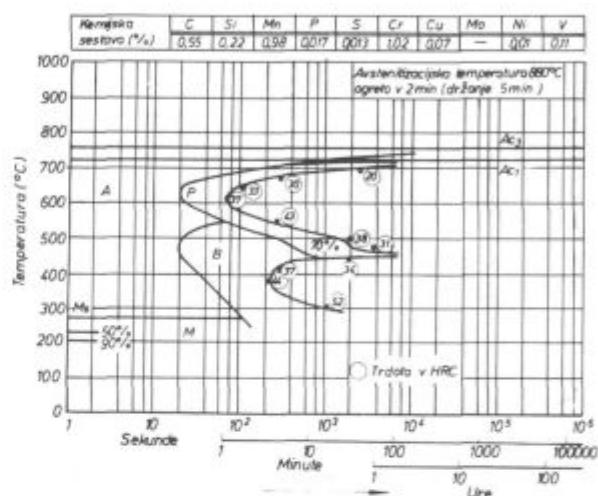
— Utopno jeklo z volframom so tudi kalili v bainitu, toda bainit ni pri temperaturi uporabe utopov nič bolj žilav kot enako trd martenzit.

— Hitrorežno jeklo, legirano s kromom, volframom in vanadijem, so že poskušali kaliti v bainitu, toda zadeli potrebo po dolgem zadrževanju pri temperaturi premene je takšno kaljenje negospodarno.

Koliko je katero jeklo primerno za premeno v bainit, je možno videti s TTT diagrama. Glavna spremenljivka, ki nas zanima, je čas. Jeklo moremo izotermno

kaliti v bainitu, če je začetek premene zadosti dolgo po začetku ohlajanja z avstenitizacijske temperature. Krivulja TTT naj bo odmaknjena od začetka diagrama vsaj za nekaj sekund. Premena naj ne traja predolgo, zavoljo gospodarnosti.

Od jekel, ki smo jih vzeli v preiskavo, imajo le prva tri takšne TTT diagrame, ki obljublajo ugodnosti izotermnega kaljenja v bainitu. Izotermni TTT diagrami za ta tri jekla so si precej podobni, zato je zadosti, če si ogledamo le enega (sl. 3).



Slika 3
Izotermni TTT diagram jekla Č. 4830 — VCV 150⁷.

Fig. 3
Isothermal TTT diagram of Č. 4830 — VCV 150 steel⁷

Izotermni TTT diagram jekla Č. 6444 — Osikro 4 kaže najhitrejšo premeno avstenita v bainitu pri nižji temperaturi (t. j. pri okoli 350°C) kot TTT diagram jekla Č. 4830 — VCV 150. Druga razlika med jekloma je v tem, da povišanje avstenitizacijske temperature loči v TTT diagramu jekla Č. 6444 — Osikro 4 perlitno območje od bainitnega, medtem ko se območji v TTT diagramu jekla Č. 4830 — VCV 150 ne ločita. Vzrok tega razlikama je navzočnost volframa v drugem jeklu.

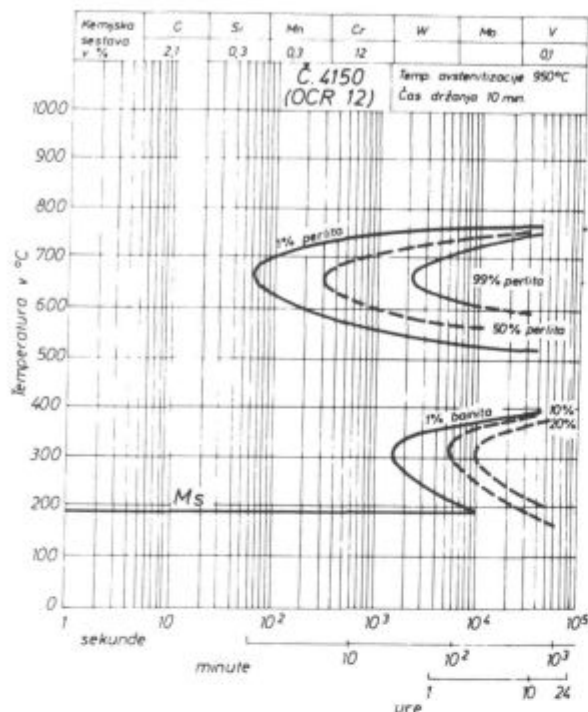
Sl. 4: TTT diagram jekla Č. 4150 — OCR 12 je povsem drugačen. Bainitno območje je zelo močno odmaknjeno na desno. Popolne premene v bainitu pri tem jeklu ne moremo pričakovati v nekaj urah. Poskuse smo opravili s tem jeklom zato, ker smo želeli zvedeti, ali more že majhen delež bainita znatno izboljšati žilavost orodjem iz visokokromovega jekla.

Med ohlajanjem jekla z livarske, kovaške ali kalilne temperature potekajo strukturne premene, ki jih prikazujejo kontinuirni diagrami TTT, t. j. diagrami premen med zveznim ohlajanjem. Za jeklo Č. 4830 — VCV 150 je prikazan tak diagram na sliki 5.

Najbolj izrazita razlika med diagramoma jekel Č. 4830 — VCV 150 in Č. 6444 — Osikro 4 je v časovnem območju nastopanja bainita. V jeklu Č. 4830 — VCV 150 se pojavlja bainit po hitrem ohlajanju (1—15°C/s) z avstenitizacijske temperature, v jeklu Č. 6444 — Osikro 4 pa po počasnejšem (0,2—5°C/s).

V jeklu Č. 4146 — OCR 4 ex. sp. se pojavlja bainit po zelo hitrem ohlajanju (3—20°C/s).

V jeklu Č. 4150 — OCR 12 se pojavi bainit šele med zelo počasnim ohlajanjem (0,2—0,5°C/s) z avstenitizacijske temperature.

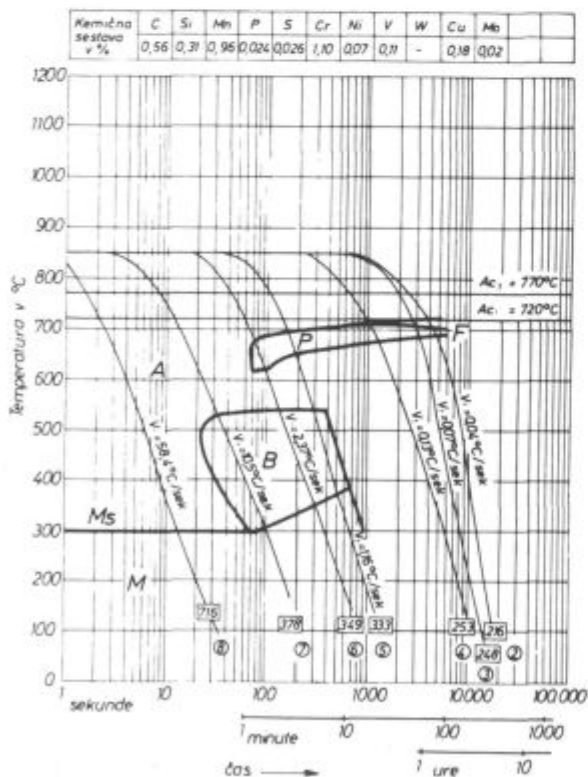


Slika 4

Izotermni TTT diagram jekla Č. 4150 — OCR 12.

Fig. 4

Isothermal TTT Diagram of Č. 4150 — OCR 12 steel



Slika 5

Diagram zveznega ohlajanja jekla Č. 4830 — VCV 150.

Fig. 5

Diagram of continuous cooling Č. 4830 — VCV 150 steel

Poleg TTT diagramov jekel, ki smo se jih namenili preizkusiti, smo si ogledali še izotermne TTT diagrame drugih Cr-W-V jekel. Ugotovili smo, da se z zviševanjem vsebnosti ogljika ali z zmanjševanjem vsebnosti kroma in volframa znižuje najvišja temperatura, pri kateri že začne izotermno nastajati bainit. Zviševanje vsebnosti ogljika in volframa ter zmanjševanje vsebnosti kroma znižujeta temperaturo najhitreje premene avstenita v bainit.

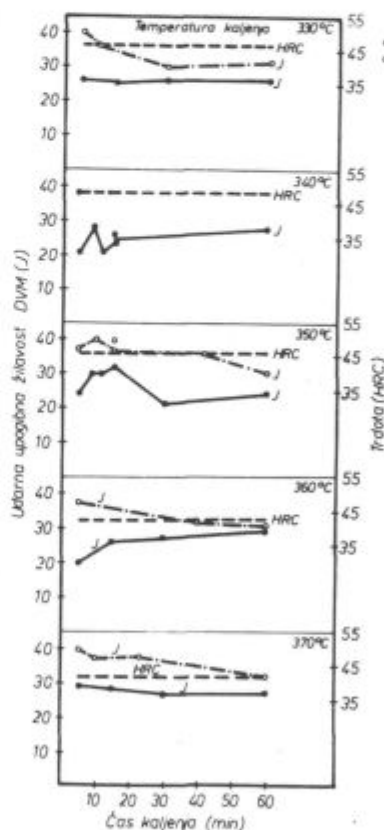
Povečanje vsebnosti teh elementov nekoliko podaljšuje čas do začetka tvorbe bainita, dodajanje vanadija pa ta čas močno podaljšuje.

Povečevanje vsebnosti kroma in volframa močno podaljša čas do popolne premene avstenita v bainit.

2.2. Vpliv temperature in časa za premeno na žilavost in trdoto bainita, ki nastaja izotermno

Ker moremo ustvariti čisto bainitno strukturo določene vrste le z izotermno premeno avstenita v bainit, smo začeli ugotavljati vpliv toplotne obdelave na lastnosti bainita ravno s poskusi izotermnega kaljenja.

Žilavost in trdoto jekla Č. 4830 — VCV 150 v odvisnosti od pogojev izotermnega zadrževanja kaže slika 6.



Č. 4830-VCV 150 (0,5 % C, 1 % Cr, 0,15 % V)

Avstenitizirano 850°/30 minut

Tri paralelke

Slika 6

Odvisnost žilavosti in trdote jekla Č. 4830 — VCV 150 od temperature premene avstenita v bainit in od časa zadrževanja jekla pri tej temperaturi.

Fig. 6

Relationship between the toughness and the hardness of Č. 4830 — VCV 150 steel, and the transformation temperature of austenite into bainite and the holding time of steel at this temperature

Preizkušance smo avstenitizirali pri 850°C/30 minut, nakar smo jih prestavili v solno kopel z določeno stalno temperaturo, pri kateri smo vsako trojko preizkušancev zadrževali določen čas. Ordinata diagrama na sliki 6 kaže žilavost in trdoto preizkušancev, ki so bili določen čas na temperaturi premene. Abscisa kaže čas zadrževanja pri temperaturi premene avstenita v bainit. V zgornjem desnem kotu vsakega diagrama je zapisana temperatura premene.

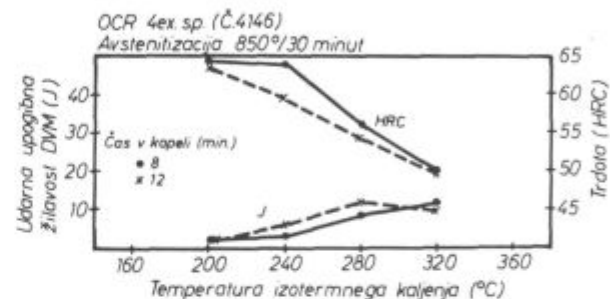
Trdota preizkušancev, zadrževanih pri temperaturi premene različno dolgo, se ne spreminja bistveno. Povsem drugače je z žilavostjo, ki pokaže po določenem času zadrževanja pri temperaturi nastajanja bainita maksimum. Kakor je videti, nastopa ta maksimum povsem različno pri preizkušancih, zadrževanih pri temperaturi premene 340 ali 350°C. Najbolj žilavi so preizkušanci, ki so bili zadrževani pri teh temperaturah 10, oz. 15 minut. Čas, potreben za popolno premeno avstenita v bainit, je pri teh temperaturah 5 minut.

Slika 7 kaže žilavost in trdoto jekla Č. 6444 — Osikro 4 po izotermni premeni avstenita v bainit. Te žilavostne krivulje kažejo maksimume za čas zadrževanja 12—15 minut (temperatura premene od 260 do 340°C). Trdota je skoraj neodvisna od časa zadrževanja preizkušanca pri temperaturi premene avstenita v bainit. Preizkušanci, ki so bili 5 minut pri temperaturi 260°C,

pokažejo trdoto 56—57 HRC; preizkušanci, ki so bili 15 minut pri tej temperaturi premene avstenita v bainit, imajo trdoto 57—57,5 HRC.

Enako trdoto imajo preizkušanci, ki so pri temperaturi premene 300°C bodisi 15 bodisi 60 minut. Podobno je s preizkušanci, ki so bili zadrževani pri 340°C: po 30 minutah zadrževanja je trdota 47,5—48 HRC, po 60 minutah pa 48 HRC.

Žilavost jekla Č. 4146 — OCR 4 ex. sp. po izotermni premeni avstenita v bainit je prikazana na sliki 8. Preiz-

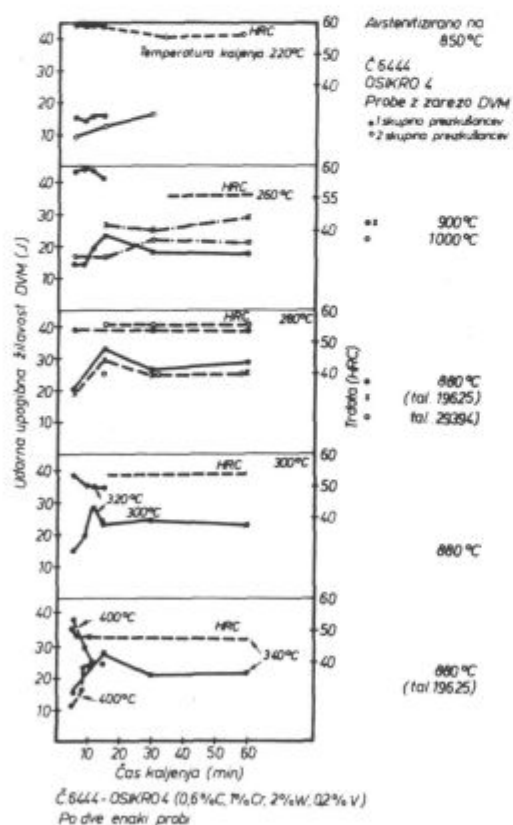


Slika 8

Ovisnost žilavosti in trdote jekla Č. 4146 — OCR 4 ex. sp. od temperature premene avstenita v bainit in od časa zadrževanja pri tej temperaturi.

Fig. 8

Relationship between the toughness and the hardness of the Č. 4146 — OCR 4 ex. sp. steel, and the transformation temperature of austenite into bainite and the holding time of steel at this temperature

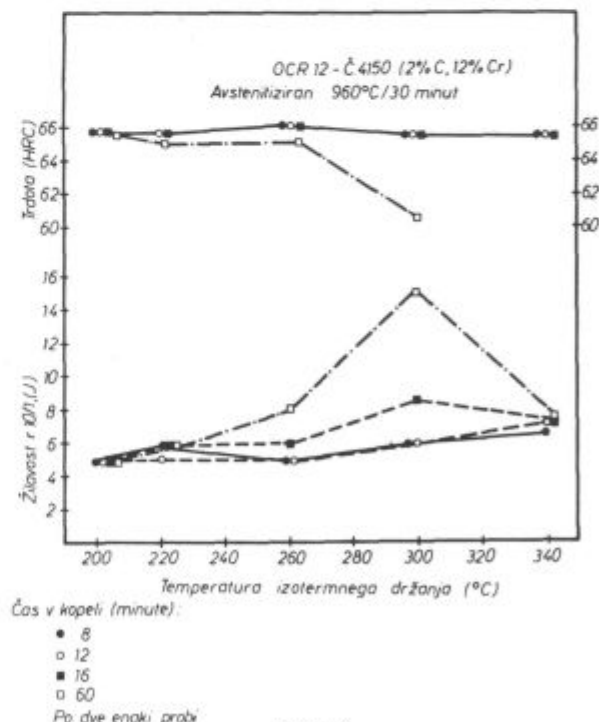


Slika 7

Ovisnost žilavosti in trdote jekla Č. 6444 — Osikro 4 od temperature premene avstenita v bainit in od časa zadrževanja pri tej temperaturi.

Fig. 7

Relationship between the toughness and the hardness of the Č. 6444 — Osikro 4 steel, and the transformation temperature of austenite into bainite and the holding time of steel at this temperature



Slika 9

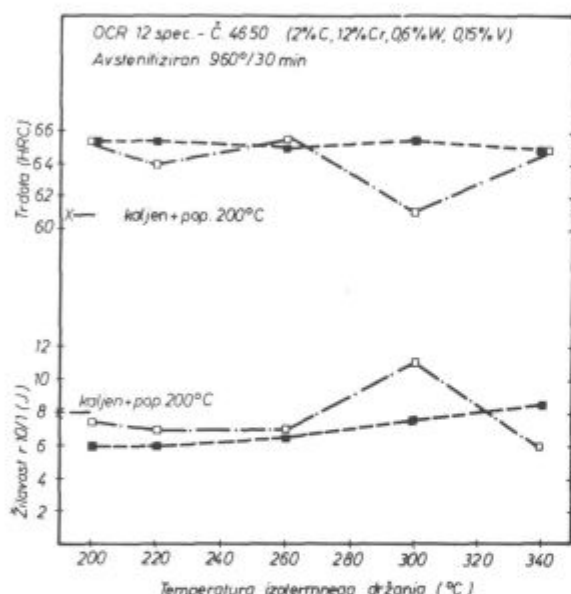
Ovisnost žilavosti in trdote jekla Č. 4150 — OCR 12 od pogojev izotermne premene avstenita v bainit.

Fig. 9

Relationship between the toughness and the hardness of the Č. 4150 — OCR 12 steel, and the conditions of the isothermal transformation of austenite into bainite

kušancev nismo pustili pri temperaturi premene zadosti dolgo, da bi dobili 100 %-no bainitno strukturo, saj nam ne koristi jeklo s premajhno trdoto. Ob trdoti 60 HRC je največja dosegljiva žilavost okoli 5 J (zareza DVM), kar je celo manj, kot je žilavost preizkušancev, ki so kaljeni v olju in popuščeni pri 200°C.

Diagrama žilavosti in trdot jekel Č. 4150 — OCR 12 in Č. 4650 — OCR 12 sp. (sl. 9 in sl. 10) sta si podobna. Največjo žilavost pokažejo preizkušanci, ki so bili zadrževani pri pretvorbeni temperaturi 300°C. Hkrati pa ti preizkušanci pokažejo tudi najmanjšo trdoto. Preizkušanec z najmanjšo trdoto je enako trd kot preizkušanec, ki je bil kaljen v olju in nato popuščen pri 200°C, vendar je bolj žilav od tega, v martenzit kaljenega, preizkušanca. Kakor kaže trdota, bi bilo daljše kot 60-minutno zadrževanje pri temperaturi premene avstenita v bainit nezaželeno zavoljo premajhne dosegljive trdote.



Čas izotermnega držanja (minute):

■ 16
□ 60

X — kaljen 960°C/olje + pop. 200°C, 8 J, 61 HRC

Slika 10

Odpisnost žilavosti in trdote jekla Č. 4650 — OCR 12 sp. od pogojev izotermne premene avstenita v bainit.

Fig. 10

Relationship between the toughness and the hardness of the Č. 4650 — OCR 12 sp. steel, and the conditions of the isothermal transformation of austenite into bainite

2.3. Posebni poskusi ob izotermnem kaljenju

Preizkušanci prvih dveh jekel lahko pri ugodnih pogojih premene preidejo v povsem bainitno strukturo. Za jeklo, podobno jeklu Č. 6444 — Osikro 4, so ugotovili⁸, da je po izotermni premeni v bainit bolj žilavo, če je bilo avstenizirano pri 1000°C namesto pri 900°C.

Žilavost preizkušancev jekel Č. 6444 — Osikro 4 in Č. 4830 — VCV 150, ki smo jih avstenizirali pri 1000°C in jih izotermno kalili pri 350°C, ni bila večja od žilavosti preizkušancev, ki so bili avstenizirani pri 900°C (oz. 850°C drugo jeklo) ter nato zadržani pri

350°C enako dolgo kot preizkušanci, ki so bili avstenizirani pri 1000°C.

Nekaj preizkušancev smo po izotermni premeni ohladili v vodi.

Nekaj preizkušancev od vsake vrste smo po ohladitvi na sobno temperaturo oz. temperaturo vode popuščali pri 200°C.

Ti poskusi niso izboljšali žilavosti preizkušancev, ki so bili kaljeni v bainit, temveč so žilavost kvečjemu poslabšali.

2.4. Vpliv legiranja z volframom na žilavost zvezno ohlajanih preizkušancev

Po zveznem ohlajanju z avstenitizacijske temperature nastopa v jeklih Č. 4830 — VCV 150 in Č. 6444 — Osikro 4 poleg ferita ali martenzita še bainit.

Razpredelnica 2 kaže za ti jekli strukturo, žilavost in trdoto po ohlajanju z največjo ali najmanjšo hitrostjo, ki še omogoča premeno avstenita v bainit.

Razpredelnica 2:

Vpliv hitrosti ohlajanja s temperature 880°C (prvo jeklo) ali 900°C (drugo jeklo) na strukturo, žilavost in trdoto jekel sestav 0,5 % C, 1 % Cr, 0,15 % V ali 0,6 % C, 1 % Cr, 2 % W, 0,2 % V.

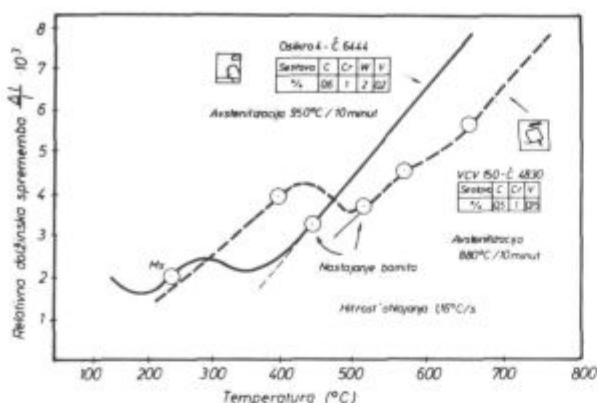
Kemjska sestava % C Cr W V				Hitrost ohlajanja °C/s	Hitrost vTTdiag	Struktura	Žilavost J(DVM)	Trdota HRC
0,5	1		0,15	0,5-1,5		F + B	16	33
				10		B + M	55	26
0,6	1	2	0,2	0,3-1		B + M	38	37
				1-3		B + M	14	59

Prvo jeklo (Č. 4830 — VCV 150) sestave 0,5 % C, 1 % Cr in 0,15 % V je bilo po ohlajanju s hitrostjo 10°C/s, ko ni nastopal ferit, veliko bolj žilavo in ni bilo znatno manj trdo kot po počasnejšem ohlajanju.

Drugo jeklo (Č. 6444 — Osikro 4) je bilo po počasnem ohlajanju (0,3—1°C/s) veliko bolj žilavo in trše kot prvo jeklo po podobnem ohlajanju. Drugo jeklo je po hitrejšem ohlajanju (1—3°C/s) sicer razmeroma krhko, toda je za 3 enote HRC trše kot enako žilav popuščeni martenzit brez bainita. Enako trd (59 HRC) martenzit po kaljenju v olju pokaže žilavost komaj 7 J (DVM).

Različnost žilavosti struktur, ki nastanejo med različno hitrim ohlajanjem, lahko razložimo s pomočjo dilatometrijskih krivulj.

Na sliki 11 sta narisani dilatometrijski krivulji za ti jekli, ohlajani z avstenitizacijske temperature z enako hitrostjo (1,16°C/s). Črtkana krivulja prikazuje dimenzijske spremembe prvega jekla. Zanimiva je ukrivljenost ohlajevalnih krivulj pod temperaturo, pri kateri se začne tvoriti bainit. Zaokrožitev krivulje jekla Č. 4830 — VCV 150 je veliko ostrejša kot zaokrožitev krivulje drugega jekla. Iz ukrivljenosti krivulj lahko sklepamo, da je pri tej ohlajevalni hitrosti veliko hitrejša tvorba bainita v prvem kot v drugem jeklu.



Slika 11

Relative dimensional changes of steel with 0,5 % C, 1 % Cr, 0,15 % V in 0,6 % C, 2 % W, 1 % Cr, 0,2 % V during cooling from the austenitising temperature.

Fig. 11

Relative dimensional changes in steel with 0,5 % C, 1 % Cr, 0,15 % V, and with 0,6 % C, 2 % W, 1 % Cr, 0,2 % V during cooling from the austenitising temperature

Ko avsteniziramo prvo jeklo in ga ohlajamo s hitrostjo 1,16 C/s, se začne pod temperaturo 500°C zelo hitro tvoriti bainit — krhki zgornji bainit.

Ko po avstenitizaciji ohlajamo z enako hitrostjo drugo jeklo (Č. 6444 — Osikro 4), nastaja bainit zelo zložno — krivulja le počasi spreminja smer proti povečanju dolžine. Zgornji bainit nastaja počasi.

Iz tega lahko sklepamo, da nastaja v jeklu Č. 4830 — VCV 150 sorazmerno več zgornjega bainita kot v enako hitro ohlajenem jeklu Č. 6444 — Osikro 4. V drugem jeklu je torej po takem ohlajanju z avstenitizacijske temperature veliko večji delež spodnjega bainita v skupni količini bainita, kot pa znaša ta delež v prvem jeklu.

Tako lahko razložimo, zakaj je drugo jeklo bolj žilavo od prvega, ki je ohlajano s podobno hitrostjo — okoli 1°C/s.

Podobna razlaga velja za veliko žilavost prvega jekla (Č. 4830 — VCV 150) po ohlajanju s hitrostjo 10°C/s. Taka sprememba v stopnji nastajanja zgornjega bainita je naravna posledica logaritemske zakonitosti nastajanja nove strukture.

Podoben učinek kot povečanje hitrosti ohlajanja pri prvem jeklu ima na žilavost jekla dodatek 2 % volframa, ki odmakne bainitno območje v TTT diagramu na desno.

Trdota 59 HRC in žilavost 14 J (DVM) sta dosegljivi pri jeklu Č. 6444 — Osikro 4 le z žilavostnimi preizkušanci. Le-ti se na zraku ohlajajo s takšno hitrostjo, da teče ohlajevalna krivulja skozi skrajni levi del bainitnega območja v TTT diagramu zveznega ohlajanja.

3. PRIMERJAVA ŽILAVOSTI BAINITA IN MARTENZITA

Koliko koristi prinaša kaljenje v bainit, nam more povedati primerjava lastnosti bainita in martenzita. Najbolj nas zanimata trdota in žilavost preizkušanih jekel.

Slika 12 prikazuje odnos med žilavostjo in trdoto zgornjega in spodnjega bainita in martenzita jekla Č. 4830 — VCV 150. Zgornji dve krivulji kažeta žilavost

spodnjega bainita določenih trdot. Pod njima je krivulja žilavosti popuščene martenzita in pod to sta v levem spodnjem kotu diagrama žilavosti in trdote zgornjega bainita.

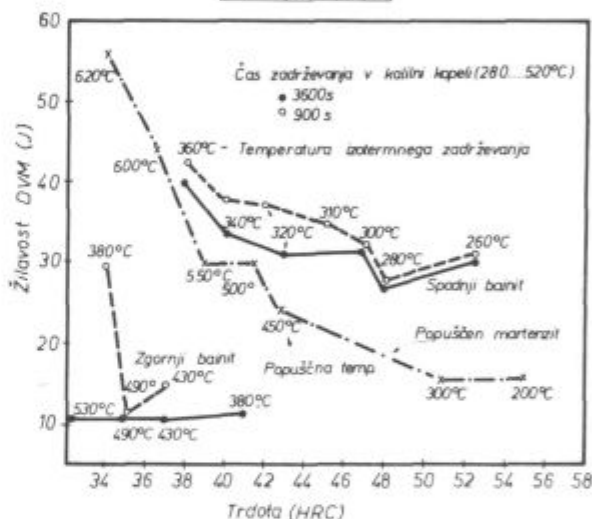
Ob točkah krivulj žilavosti bainita so napisane temperature nastajanja bainita, ob točkah krivulje žilavosti martenzita so napisane temperature popuščenja martenzita.

Preizkušanci z žilavostjo 30 J (DVM) imajo trdote 43 HRC (spodnji bainit), 39—42 HRC (martenzit), 35 HRC (zgornji bainit).

Iz lege krivulj je očitna prednost spodnjega bainita pred martenzitom in zgornjim bainitom. Žilavost spodnjega bainita, ki je nastal v 15 minutah, je večja od žilavosti bainita, ki je bil pri pretvorbeni temperaturi eno uro. Bainit, ki je nastal pri temperaturi M, točke (280°C), je manj žilav kot bainit, ki nastane pri višji ali nižji temperaturi.

Č. 4830-VCV150

Sestava	C	Cr	V	Mn
%	0,5	1	0,15	1



Slika 12

Vpliv temperature tvorbe abainita ali temperature popuščenja martenzita na trdoto in žilavost jekla Č. 4830 — VCV 150. Avstenitizacija: 850°C/30 minut.

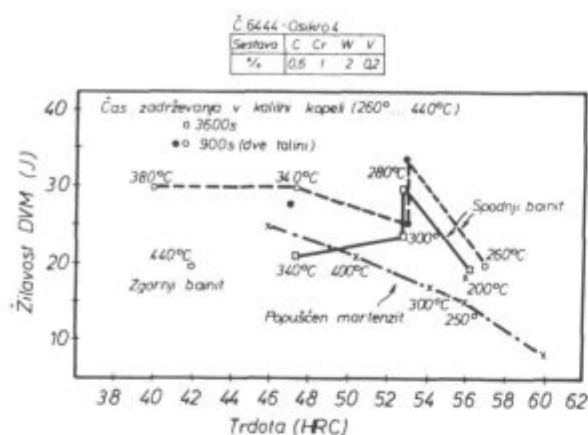
Fig. 12

Influence of the formation temperature of bainite or tempering temperature of martensite on the hardness and the toughness of the Č. 4830 — VCV 150 steel. Austenitising: 850°C/30 minutes

Na sliki 13 je prikazan odnos žilavosti in trdote obeh bainitov in martenzita jekla Č. 6444 — Osikro 4. Tudi pri tem jeklu je spodnji bainit veliko bolj žilav kot enako trd martenzit ali zgornji bainit. Izjema je spodnji bainit, ki je nastal v preizkušancih, ki so bili eno uro pri pretvorbeni temperaturi. Od preizkušancev, ki so bili 15 minut pri temperaturi premene, so pokazali tisti, ki so bili pri 300°C, manjšo žilavost kot tisti, katerih bainit je nastal pri 280 ali 340°C.

Preizkušanci z žilavostjo 20 J kažejo trdoto 57 HRC (spodnji bainit), 51 HRC (martenzit), 42 HRC (zgornji bainit).

Slika 14 omogoča primerjavo trdot in žilavosti martenzita in delno bainitne strukture jekla Č. 4150 — OCR 12. Temperature, zapisane ob točkah krivulj, so

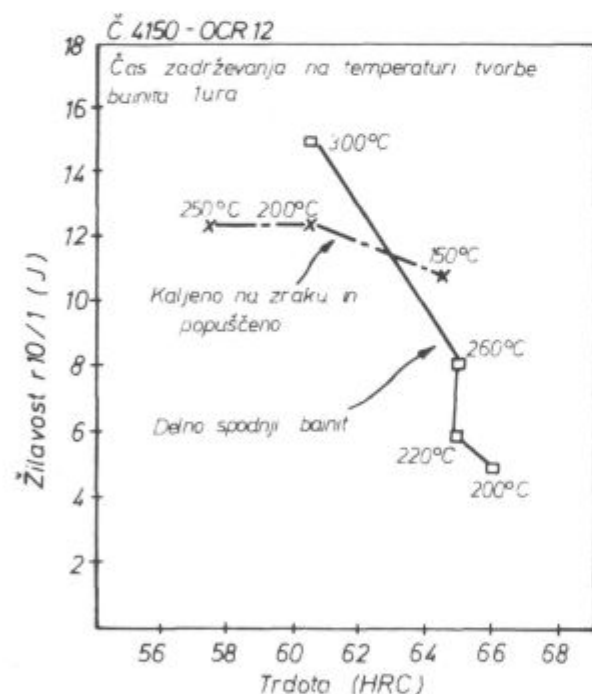


Slika 13

Vpliv temperature tvorbe bainita ali popuščenja martenzita na trdoto in žilavost jekla Č. 6444 — Osikro 4. Avstenitizacija: 880°C 30 minut.

Fig. 13

Influence of the formation temperature of bainite or tempering temperature of martensite on the hardness and the toughness of the Č. 6444 — Osikro 4 steel. Austenitising: 880°C/30 minutes.



Slika 14

Vpliv temperature tvorbe bainita ali popuščenja martenzita na trdoto in žilavost jekla Č. 4150 — OCR 12. Avstenitizacija: 1000°C 30 minut.

Fig. 14

Influence of the formation temperature of bainite or tempering temperature of martensite on the hardness and the toughness of the Č. 4150 — OCR 12 steel. Austenitising: 1000°C/30 minutes.

popuščne temperature martenzita ali temperature nastajanja bainita. Preizkušanci trdot pod 63 HRC so bolj žilavi, če je struktura martenzita bainitna kot martenzita. Preizkušanci s trdoto 61 HRC imajo žilavost 15 J (delno spodnji bainit) ali 12 J (martenzit).

4. SKLEPI

Iz TTT diagramov vidimo, da povečevanje vsebnosti ogljika znižuje najvišjo temperaturo nastajanja bainita, povečevanje odstotka kroma in volframa pa to temperaturo povišuje.

Temperaturo najhitreje premene avstenita v bainit poviševanje vsebnosti ogljika in volframa znižuje, poviševanje vsebnosti kroma pa jo zvišuje. Čas do začetka premene avstenita v bainit ti elementi malo podaljšujejo, konec premene znatno podaljšata le krom in volfram.

Vanadij podaljša predvsem čas do začetka nastajanja bainita, zato je v jeklih za premeno v bainit prav primeren.

Vpliv pogojev izotermnega nastajanja bainita na njegovo žilavost je najlažje razkrivati pri jeklih Č. 4830 — VCV 150 (0,5 % C, 1 % Cr, 0,15 % V) in Č. 6444 — Osikro 4 (0,6 % C, 1 % Cr, 2 % W, 0,2 % V). Najugodnejši temperaturni območji nastajanja bainita sta 340 do 360°C (Č. 4830 — VCV 150) in 260—340°C (Č. 6444 — Osikro 4).

Meja nastajanja zgornjega in spodnjega bainita je pri približno 370°C.

Spodnji bainit je za 100 % bolj žilav kot enako trda martenzit in za 100—300 % oz. 50 % (pri jeklu Č. 6444 — Osikro 4) bolj žilav kot zgornji bainit. Enako žilava zgornji in spodnji bainit se razlikujeta za 5—19 enot HRC.

Največjo žilavost doseže bainit, če je jeklo le toliko časa na temperaturi nastajanja bainita, da je možna popolna premena. Izjema je temperatura tik pod prehodom zgornjega v spodnji bainit: pri tej je treba zadrževati jeklo 300 sekund dlje, kot kaže krivulja konca premene.

Najmanjšo žilavost kaže spodnji bainit, nastal blizu M_s temperature.

Volfram ne vpliva na žilavost bainita: enako trda bainita jekel Č. 4830 — VCV 150 in Č. 6444 — Osikro 4 sta enako žilava, čeprav je martenzit volframovega jekla (Č. 6444) bolj žilav kot martenzit jekla brez volframa (Č. 4830 — VCV 150).

Ležajnemu jeklu (Č. 4146 — OCR 4 ex. sp.), ki vsebuje 1 % C in 1,5 % Cr, ne moremo bistveno izboljšati žilavosti s kaljenjem v bainit, ne da bi mu padla trdota pod dopustnih 61 HRC.

Jekli Č. 4150 — OCR 12 (2 % C, 12 % Cr) in OCR 12 sp. (Č. 4650) sta v delno bainitnem stanju (čas pri temperaturi premene eno uro) za 20 % bolj žilavi kot v martenzitem.

Z zveznim ohlajanjem jekla skozi skrajni levi del bainitnega območja TTT diagrama (zveznega ohlajanja) se pojavi bainit, ki je pretežno spodnji bainit in zato precej bolj žilav kot jeklo sestave 0,6 % C, 1 % Cr, 2 % W in 0,2 % V.

Viri

- Pickering F. B.: The Structure and Properties of Bainite in Steels. Transformation and Hardenability in Steels. Symposium 1967, Climax Molybdenum Company of Michigan, Amax, str. 109—129.
- Bolšakov V. N., L. I. Kotorova, I. A. Mongait: Vibor optimalnogo strukturnogo sostojanja konstrukcijskih stroitel'nikh stalej beinitnogo klassa, Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov, 1976, No 2, str. 28—30.
- Eckstein H-J: Wärmebehandlung von Stahl, Leipzig 1971, str. 200—214.

- 4 Thelning K-E: Steel and its Heat Treatment, Bofors Handbook, Butterworths, London and Boston, 1975, str. 95—103.
- 5 Birjukova V. N.: Izotermičeskaja zakalka instrumentalnih stalej, MITOM, 1965, No 9, str. 53—57.
- 6 Hengerer F.: Zwischenstufenumwandlung von Walzlagerstählen. Draht — Zeitschrift, 1976, No 3, str. 108—109.
- 7 Wever F., A. Rose, W. Peter, W. Strassburg, L. Rademacher: Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle. Herausg. Max — Planck Institut für Eisenforschung, Werkstoffausschuss des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, 1954/56/58, Verlag Stahleisen MBH, Düsseldorf, 1972.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Zähigkeit der niedriglegierten Cr-W-V Stähle wird durch das isothermische Härten in Bainit dem Martensit entgegen um 50 bis 300 % verbessert. Die gleich zähen, der obere und der untere Bainit unterscheiden sich in der Härte um 5 bis 19 HRC Einheiten.

Die Haltezeit der Proben auf der Umwandlungstemperatur soll gleich der Zeit der vollkommenen Umwandlung in Bainit sein. Die Zeit, die nötig ist für das Erreichen der grössten Zähigkeit in der Nähe der Bildung von oberem Bainit soll länger sein von der Zeit für die vollkommene Umwandlung von austenit in Bainit.

Der in der Nähe der M_s Temperatur bildende Bainit ist weniger zähe als der bei etwas höherer oder niedriger Temperatur bildende Bainit. Das Legieren mit Wolfram hat keinen Einfluss auf die Zähigkeit von Bainit.

Den Stählen mit 2 % C und 12 % Cr kann durch Teilweise Umwandlung in Bainit die Zähigkeit um 20 % gegenüber Martensitzustand verbessert werden.

Durch die kontinuierliche Abkühlung von Stahl durch den äusserst linken Teil des Bainitbereiches im TTT Diagramm bildet sich Bainit der die Zähigkeit erheblich verbessert.

SUMMARY

In low alloyed Cr-W-V steel, the isothermal hardening into bainite increases the toughness for 50 to 300 % compared with the martensite. Similarly tough upper and lower bainite differ in hardness for 5 to 19 HRC.

The holding time on the transformation temperature should be equal to the time of complete transformation into bainite. The time for achieving the highest toughness close to the temperature of formation of upper bainite should be longer than the time for complete transformation of austenite into bainite.

Bainite, formed close to M_s temperature, is less tough than that formed at slightly higher or lower temperature.

Alloying with tungsten does not influence the bainite toughness.

In steel with 2 % C and 12 % Cr the partial transformation into bainite improves the toughness for 20 % compared with the martensite structure.

By continuous cooling of steel through the extreme left bainite region in the TTT diagram, the bainite is formed which improves the steel toughness to a relative high extent.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При сравнении вязкости аустенита в бейнит с вязкостью аустенита в мартенсит по изотермической заалки малолегированных Cr-W-V сталей установлено, что вязкость в бейнит 50 до 300 % лучше. Что же касается твердости, то разница между верхним и нижним бейнитом составляет 5 до 19 единиц HRC.

Продолжительность задержки образцов при темп-ре преобразования должна длиться до полного преобразования аустенита в бейнит. Для получения максимальной вязкости при темп-ре близкой пределу образования верхнего бейнита должно время преобразования быть более длительное, чем время необходимое для полного преобразования аустенита в бейнит. Вязкость бейнита, который

образовался при темп-ре вблизи точки M_s менее удовлетворительная в сравнении с вязкостями, которые получают при несколько повышенных или же пониженных темп-ах.

Легирование с элементом W не оказывает влияние на вязкость бейнита.

Сталям с 2 % C и 12 % Cr можно частичным преобразованием аустенита в бейнит улучшить вязкость в отношении на мартенситное состояние на 20 %.

Комбинированным охлаждением стали через крайнюю левую часть бейнитной зоны в ТТТ диаграмме может образоваться бейнит, который существенно улучшить вязкость стали.