

Afinacija kontinuirno vlitega cementacijskega jekla Č. 4320 z niobijem in vanadijem

I. del: Preiskave laboratorijskih jekel

UDK: 621.746.047:669.14.018.298
ASM/SLA: D9-q, Ay-b, V, Nb

F. Vodopivec, F. Vizjak, S. Senčič
G. Manojlovič in D. Gnidovec

Izdelana so bila laboratorijska cementacijska jekla z različnimi dodatki niobija in vanadija in industrijsko jeklo z 0,02 % Nb vrste Č 4320. Preiskave so pokazale, da dodatek 0,02 % Nb učinkovito afinira in stabilizira austenitna zrna, ne da bi pomembno vplival na druge lastnosti jekel v normaliziranem stanju. Dodatek niobija ne vpliva na proces konti ulivanja in kristalizacije gredic s presekom 100×100 mm, zato se niobij lahko uporablja kot afinator za kontinuirno ulita cementacijska jekla, kot uspešno nadomestilo za aluminij.

1. UVOD IN CILJ DELA

Aluminij je splošno uporabljeni legirni element za afinacijo avstenitnih zrn v cementacijskih jeklih. Pri kontinuirnem vlitvanju v gredice z majhnim presekom, na primer 100×100 mm, nastajajo težave, ker usedline vključkov aluminijevega oksida mašijo kanal izlivnika in zmanjšujejo hitrost litja. Tej neprijetnosti se je mogoče izogniti tako, da aluminij dodajamo v curek ali v kokilo (1). To je precej občutljiv poseg, ker je nevarnost, da aluminij ne bo enakomerno porazdeljen v jeklu.

Vprašanje je, ali se ne bi dalo v konti litem jeklu aluminija kot afinatorja nadomestiti z drugimi elementi. Za preiskuse sta bila izbrana niobij in vanadij, ki se kot afinatorja uporabljata v številnih konstrukcijskih jeklih za varjenje s podobno osnovno sestavo kot cementacijsko jeklo Č 4320. Druga prednost teh dveh elementov pred drugimi, ki imajo tudi afinacijski učinek, na primer titan, je, da se ne vežeta s kisikom in žveplom, ker jeklo vsebuje silicij in mangan.

Kljub temu, da smo pričakovali pozitiven vpliv z legiranjem niobija in vanadija, smo menili, da je njun afinacijski učinek potrebno preveriti, ker bo jeklo brez aluminija, in je potrebno določiti najmanjši učinkoviti dodatek ter preveriti vpliv legiranja na vlitvanje in lastnosti jekla. Rezultati

raziskave so detaljno obdelani v dveh poročilih (2), v katerih je tudi pregled literature. V tem sestavku bomo poročali le o najvažnejših izledkih.

2. IZDELAVA IN SESTAVA LABORATORIJSKIH JEKEL IN METODIKA DELA

Iz tekoče proizvodnje železarne Štore je bila izbrana po ena šarža jekel Č 1221 in Č 4320, ki je bila po programu izvaljana na debelino 25 do 30 mm. Iz tega vložka smo pripravili s taljenjem v 20 kg indukcijski peči osnovno primerjalno šaržo brez dodatkov in šarže z dodatki niobija in vanadija v treh stopnjah. Pri izbiri dodatka smo upoštevali, da je v maloogljičnih jeklih učinek niobija močnejši. Upoštevali smo tudi, da je niobij učinkovit že pri majhnih dodatkih (3), medtem ko je pričakovati učinek vanadija šele od 0,05 % naprej (4). Dodatek niobija smo planirali na 0,02; 0,05 in 0,08 % ter dodatek vanadija na 0,05; 0,1 in 0,15 %. Močnejše legiranje smo uporabili predvsem zato, da lažje in zanesljiveje preverimo vpliv obeh elementov na lastnosti, ki so predpisane za obe vrsti jekla.

V tabeli 1 je pregled in sestava vseh jekel, ki so bila pripravljena s taljenjem v indukcijski peči, pa tudi sestava vložka.

Sestava laboratorijskih jekel nekoliko variira od šarže do šarže po količini mangana in kroma, ki najmočnejše odgorevata pri taljenju v indukcijski peči. Vendar razlike, tudi razlike od vložka, niso tolikšne, da bi ne bila mogoča realna ocena vpliva legiranja.

Vse ingote smo nato izvaljali v palice z debelino 28 mm v valjarni na Jesenicah. Ker je valjanje lahkih ingotov s temperaturnega stališča lahko zelo neenakomerno, predvsem pa je nekontrolirano ohlajanje valjanca, smo se omejili na preiskave po ustrezni toplotni obdelavi.

Tabela 1: Vrste in kemične sestave jekel

Vrsta jekla	Oznaka	Element v %									
		C	Mn	Si	Cr	V	Nb	N	S	P	Cu
Č 4320	1	0,18	0,86	0,23	0,91	—	0,031	0,009	—	—	—
	8	0,18	0,94	0,29	1,05	—	0,024	—	—	—	—
	29	0,17	0,84	0,26	0,96	—	0,057	—	—	—	—
	2	0,18	1,07	0,27	1,02	—	0,091	—	—	—	—
	4	0,20	0,88	0,27	1,01	0,056	—	0,0098	—	—	—
	5	0,18	0,99	0,29	0,99	0,11	—	—	—	—	—
	6	0,18	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	7	0,18	1,01	0,30	1,00	0,16	—	—	—	—	—
	3 ¹	0,18	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	13 ²	0,19	1,10	0,27	1,00	—	—	—	0,013	0,014	0,30
Č 1221	16	0,14	0,28	0,26	—	0,05	—	0,0087	—	—	—
	17	0,13	0,27	0,24	—	0,11	—	—	—	—	—
	18	0,14	0,30	0,25	—	0,15	—	—	—	—	—
	19	0,13	0,25	0,22	—	—	0,025	0,010	—	—	—
	20	0,14	0,30	0,27	—	—	0,012	—	—	—	—
	21	0,13	0,30	0,25	—	—	0,10	—	—	—	—
	15 ¹	0,15	0,33	0,30	—	—	—	—	0,027	0,026	0,32
	31 ²	0,15	0,35	0,27	—	—	—	—	—	—	—

Opombe:

2 — šarža industrijsko izdelana in izvaljana v železarni Store

1 — šarža izdelana s pretaljevanjem vložka pod — 2

Preiskave so obsegale naslednje:

— velikost zrn feritno perlitne mikrostrukture po normalizaciji,

— velikost enakih zrn po 8-urnem ogrevanju pri temperaturi normalizacije,

— velikost avstenitnih zrn po polurni avstenitizaciji pri normalni temperaturi kaljenja,

— velikost avstenitnih zrn po 8-urni avstenitizaciji pri normalni temperaturi kaljenja,

— Jominy preizkus (jeklo Č 4320),

— mehanske lastnosti v normaliziranem in popoljšanem stanju,

— ocena rekristalizacije jekla po deformaciji pri 1000° C.

Velikost zrn smo določili po metodi linearne intercepcije, s tem da smo v mikroskopu prešteli število kristalnih mej, ki so sekale daljico določene dolžine pri enotni povečavi. Iz intercepcijske dolžine smo nato izračunali tudi velikost po ASTM. Avstenitizacija vseh jekel je bila izvršena pri zgornji temperaturi normalizacije, ki jo priporočajo za obe vrsti jekla, torej 920° C.

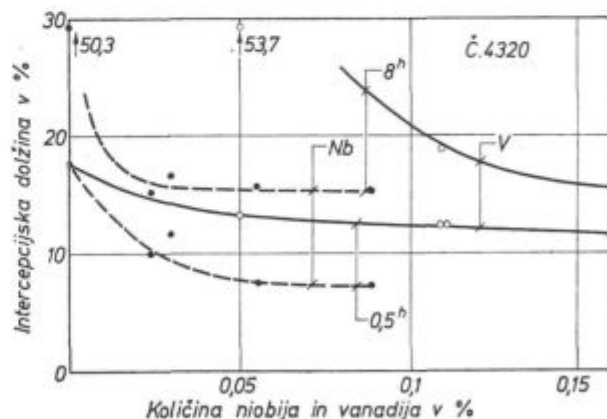
3. REZULTATI

3.1. Velikost avstenitnih zrn

Na slikah 1 in 2 je prikazan vpliv naraščanja količine vanadija in niobija v jeklih na velikost avstenitnih zrn po avstenitizaciji, ki traja 0,5 in 8 ur. Po kratkotrajnem ogrevanju ima primerjalna šarža zelo drobna avstenitna zrna. Dodatek vana-

dija in niobija zrna še nekoliko zmanjša, vendar zmanjšanje ne presega 1 razreda po ASTM v obeh jeklih. Podaljšanje avstenitizacije na 8 ur je pokazalo, da dodatek najmanj 0,03 % niobija zavre rast zrn v jeklu Č 4320. Približno enak učinek ima še dodatek 0,15 % vanadija.

V jeklu Č 1221 legiranje vanadija pri 8-urni avstenitizaciji skoraj ne vpliva na velikost zrn, saj zrna zrastejo v vsem intervalu legiranja za približno 1 razred ASTM, podobno kot v obeh primerjalnih jeklih.

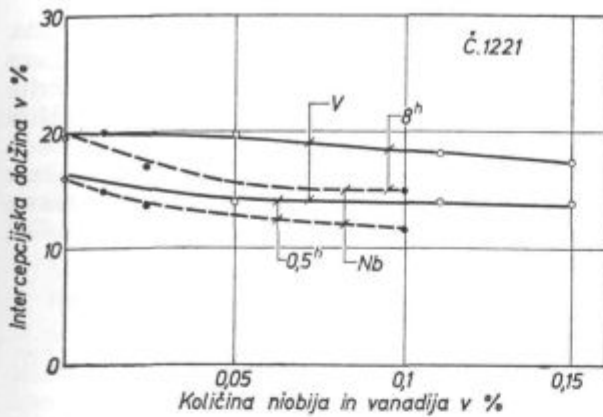


Slika 1

Odvisnost med količino niobija oz. vanadija in velikostjo avstenitnih zrn po avstenitizaciji jekla Č 4320 pri 920° C v trajanju 0,5 ure in 8 ur

Fig. 1

Relationship between the amount of niobium or vanadium and the size of austenite grains after austenitization of Č 4320 steel half and 8 hours at 920° C



Slika 2

Odvisnost med količino niobija oz. vanadija in velikostjo avstenitnih zrn po avstenitizaciji jekla Č 1221 pri 920°C v trajanju 0,5 ure in 8 ur

Fig. 2

Relationship between the amount of niobium or vanadium and the size of austenite grains after austenitization of Č 1221 steel half and 8 hours at 920° C

Iz izraza za topnostni produkt za niobijev karbonitrid v avstenitu: $\log(CxNb) = 3,11 - \frac{7520}{T}$ (5)

lahko izračunamo, da je raztopljeno v avstenitu pri temperaturi 1150° C 0,03 % Nb. Karbonitrid, ki nastane iz 0,03 % raztopljenega niobija, je zadosten za afinacijo avstenitnih zrn, ne glede na količino ogljika.

Tudi na posnetkih je mogoče lepo razločiti stabilizacijski učinek niobija na rast avstenitnih zrn. Vse šarže jekla Č 4320 imajo po polurni avstenitizaciji drobna in enakomerna kristalna zrna (sl. 5). Po 8-urni avstenitizaciji pa so v jeklu brez dodatka niobija in vanadija zrna neenakomerna in enako kot v jeklu z dodatkom 0,05 % V je mikrostruktura agregat velikih in drobnih kristalnih zrn.

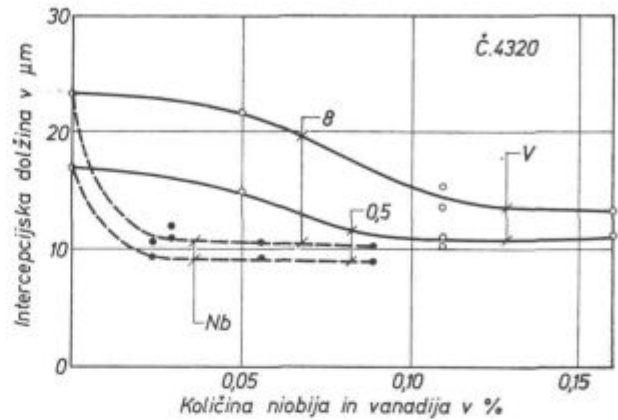
Konkavna oblika kristalnih mej velikih zrn pove, da ta zrna rastejo na račun sosednjih, manjših. V jeklu z 0,11 % V je mikrostruktura podobna, vendar so zrna, ki rastejo, manjša in redkejša, zato je tudi manjša povprečna velikost. V jeklu z 0,16 % V so vsa zrna enakomerna in drobna, podobno kot v jeklu z 0,024 % Nb. To je znak, da med avstenitizacijo ni pomembne rasti zrn.

3.2. Velikost sekundarnih zrn

Na slikah 3 in 4 je prikazan vpliv naraščajoče količine vanadija in niobija v jeklu na velikost zrn feritno perlitne mikrostrukture po avstenitizaciji v trajanju 0,5 ure in 8 ur. V grafikonih vidimo, da dodatek 0,10 % vanadija zmanjša kristalna zrna v jeklu Č 4320 za približno en razred ASTM skale. Z naraščajočo količino vanadija narašča stabilnost kristalnih zrn pri podaljšanju avstenitizacije na 8 ur. Mnogo bolj je učinkovito legiranje jekla z niobijem, saj je že pri 0,03 % Nb dosežena podobna velikost zrn kot pri 0,16 % V, poleg tega pa so zrna mnogo bolj stabilna pri podaljšanju avstenitizaci-

je in je zanemarljiva razlika v velikosti med avstenitizacijo 0,5 ure in 8 ur.

Pri jeklu Č 1221 je dodatek vanadija in niobija manj učinkovit, ker ima jeklo boljše inherentno odpornost proti rasti avstenitnih zrn. Vendar je tudi v tem jeklu dodatek niobija bolj učinkovit kot dodatek vanadija, saj dosežemo enako velika zrna pri ca. 0,03 % Nb kot pri 0,15 % V.

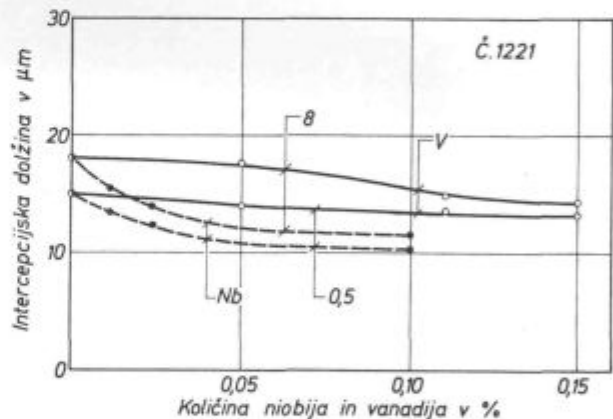


Slika 3

Odvisnost med količino niobija oz. vanadija in velikostjo feritnih zrn v jeklu Č 4320 po avstenitizaciji 0,5 ure in 8 ur pri 920° C in ohladitvi na zraku

Fig. 3

Relationship between the amount of niobium or vanadium and the size of ferrite grains in Č 4320 steel after austenitization half and 8 hours at 920° C and cooling in air



Slika 4

Odvisnost med količino niobija oz. vanadija in velikostjo feritnih zrn v jeklu Č 1221 po avstenitizaciji 0,5 ure in 8 ur pri 920° C in ohladitvi na zraku

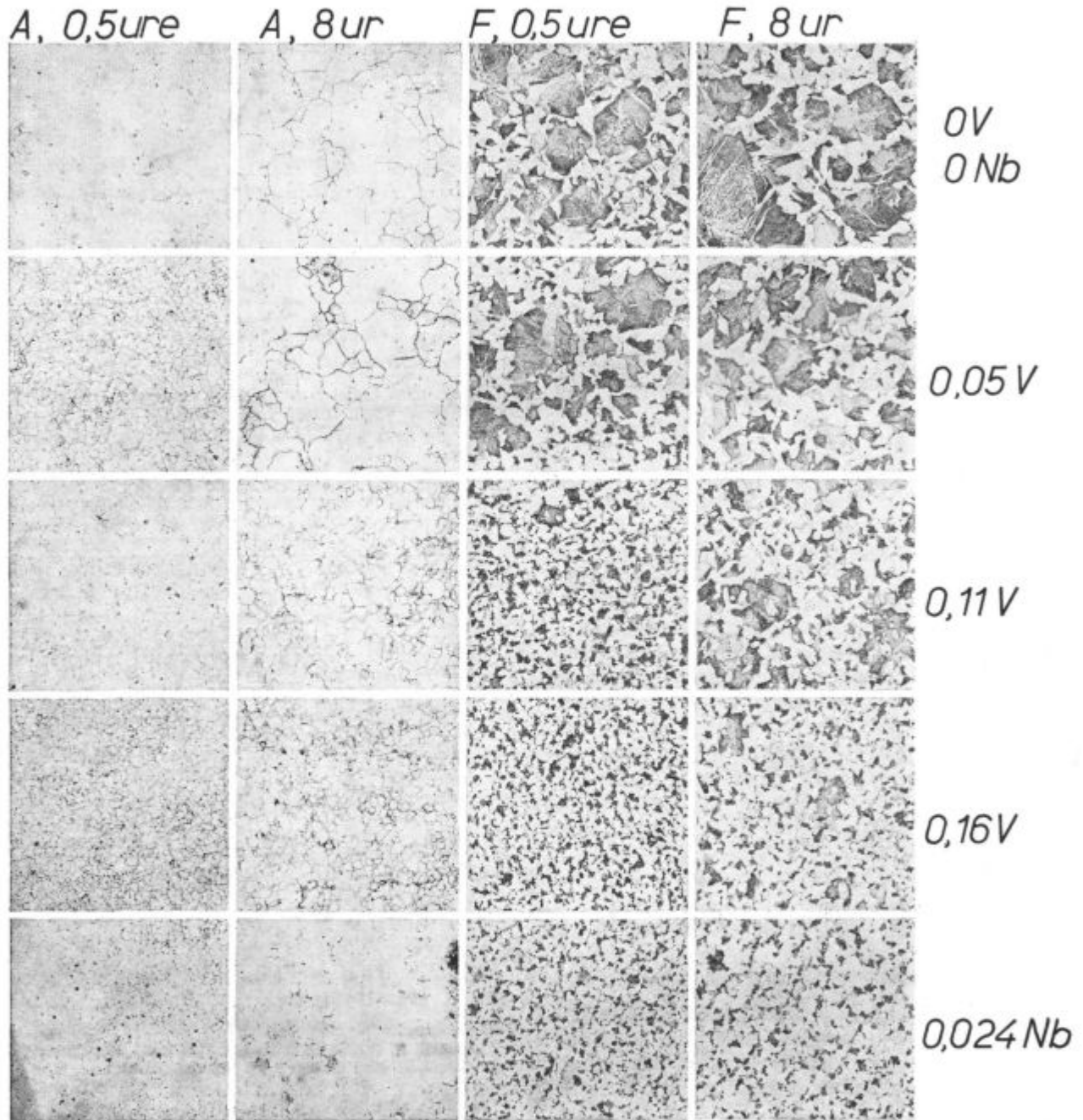
Fig. 4

Relationship between the amount of niobium or vanadium and the size of ferrite grains in Č 1221 steel after austenitization half and 8 hours at 920° C and cooling in air

Dodatek niobija in vanadija vpliva tudi na obliko feritno perlitne mikrostrukture. Na sliki 5 je prikazana mikrostruktura nekaterih jekel po avstenitizaciji v trajanju 0,5 ure in 8 ur ter enaki ohladitvi. Jeklo brez dodatkov ima po polurni avstenitizaciji mikrostrukturo iz poligonalnega ferita in iz perlita ter večjih bainitnih zrn z igličastim feritom. Po dodatku 0,05 % V je mikrostruk-

tura podobna, le da so bainitne tvorbe redkejše. Jeklo z 0,11 % V ima strukturo iz poligonalnega ferita in perlita, enako mikrostrukturo imata jekli z 0,16 % V in 0,024 % Nb. Po avstenitizaciji, dolgi 8 ur, je mikrostruktura nekoliko drugačna, ker je nastala iz večjih avstenitnih zrn. Jeklo brez dodatka niobija in vanadija ima mikrostrukturo iz poligonalnega ferita in perlita. Številna perlitna

zrna so velika in v njih so često bainitni vložki. Dodatek 0,05 % vanadija spremeni mikrostrukturo le toliko, da ni bainitnih vložkov v velikih perlitnih zrnih. Povečanje količine vanadija na 0,11 % ohrani enake komponente kot v jeklu z 0,05 % V, vendar so velika perlitna zrna manj številna in v povprečju manjša. V jeklu z 0,16 % V je mikrostruktura podobna, vendar so le posamična velika



Slika 5

Pov. 100 ×, jeklo C 4320 z različnimi dodatki niobija in vanadija
 A — austenitna zrna po avstenitizaciji 0,5 ure in 8 ur pri 920° C
 F — feritna zrna po avstenitizaciji 0,5 ure in 8 ur pri 920° C in ohladitvi na zraku

Fig. 5

Magnification 100 ×, C 4320 steel with various additions of niobium and vanadium
 A — austenite grains after austenitization half and 8 hours at 920° C
 F — ferrite grains after austenitization half and 8 hours at 920° C and cooling in air

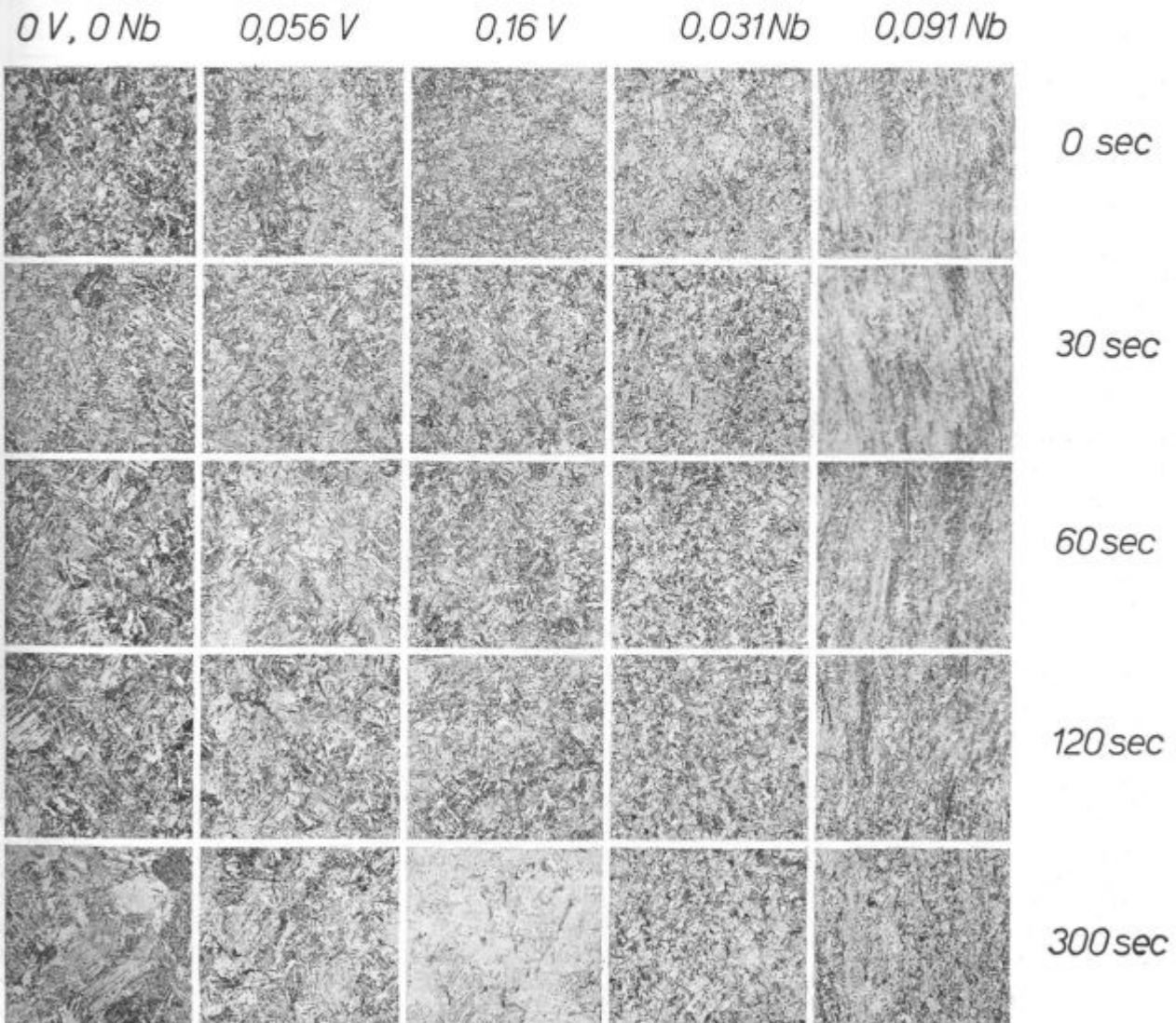
perlitna zrna. V jeklu z 0,024 % Nb imamo tudi po 8-urni avstenitizaciji mikrostrukturo iz enakomernih poligonalnih zrn ferita in perlita. Torej tudi mikrostruktura iz ferita in perlita potrjuje, da dodatek 0,03 % Nb v jeklu ohrani po daljšem ogrevanju enakomerno in fino zrnato mikrostrukturo, ki zagotavlja jeklu dobre mehanske lastnosti.

3.3. Rekristalizacija jekla in rast avstenitnih zrn po vroči deformaciji

Preizkuse vroče deformacije in statične rekristalizacije smo napravili pri 1000° C. Preizkušance smo ogrevali 1 uro pri 1250° C, nato ohladili na 1000° C z zadrževanjem 5 minut v peči, ogreti na to temperaturo; deformirali z enim udarcem pod padalnim kladivom; nato enega takoj kalili v vodi,

druge pa kalili v vodi po izotermnem zadržanju pri 1000° C v trajanju 30 sek, 1 min, 2 min in 5 min. To metodo zasledovanja statične rekristalizacije jekla po vroči deformaciji smo uporabili že v preteklosti (6). Ogrevanje pri 1250° C je potrebno, da se niobijev in vanadijev karbonitrid raztopi v avstenitu, to je, da imamo pri vroči deformaciji enako stanje jekla kot v gredicah pred začetkom valjanja.

Na kaljenih vzorcih je težko opredeliti realno velikost avstenitnih zrn v trenutku gašenja vzorcev. Posebno je to težko v primerih, ko avstenit ni rekristaliziral, ampak so zrna ostala stlačena od deformacije, in v primerih, ko se je izvršila le rekristalizacija jekla in so zato avstenitna zrna zelo drobna.



Slika 6

Pov. 100 ×, mikrostruktura jekla Č 4320 z različnimi dodatki niobija in vanadija, ki je bilo po deformaciji pri 1000° C in različno dolgem zadržanju pri tej temperaturi kaljeno v vodi

Fig. 6

Magnification 100 ×. Microstructure of Č 4320 steel with various additions of niobium and vanadium which was after deformation at 1000° C and various times of holding at this temperature quenched in water

Zato rezultate teh preizkusov prikazujemo na sliki 6 v obliki posnetkov kaljene mikrostrukture. Temperaturo deformacije 1000^o C smo izbrali zato, ker je blizu dejanske temperature konca valjanja jeklenih palic. Stopnja deformacije 34 % je bila enaka pri vseh vzorcih.

Med deformacijo in kaljenjem vzorcev so pretekle največ 3 sek, zato pokaže vzorec, ki je bil kaljen takoj po deformaciji, pravo velikost zrn rekristaliziranega avstenita. Preizkušanci, ki so bili zadržani po deformaciji različno dolgo pri 1000^o C, pa pokažejo, kolikšna je hitrost rasti zrn rekristaliziranega avstenita.

Pazljiv ogled posnetkov na sl. 6 pokaže naslednje:

— Zrna rekristaliziranega avstenita imajo v vseh jeklih podobno velikost. Torej legiranje jekla z vanadijem in niobijem ne povzroči razlike v velikosti zrn, ki nastanejo s statično rekristalizacijo avstenita, ki je bil deformiran v vročem.

— Legiranje jekla z vanadijem ne vpliva na začetek statične rekristalizacije. V primerjalnem jeklu in v jeklih z 0,05 do 0,16 % V je avstenit rekristaliziran že v preizkušancu, ki je bil kaljen takoj po deformaciji.

— V jeklu z 0,031 % Nb je avstenit nepopolno rekristaliziran takoj po deformaciji. Rekristalizacija je končana šele po 1-minutnem zadržanju pri 1000^o C. Po istem zadržanju se šele začne rekristalizacija avstenita v jeklu z 0,091 % Nb in še ni končana tudi po 5-minutnem zadržanju jekla pri 1000^o C. Torej niobij zadržuje statično rekristalizacijo avstenita tem bolj, čim več ga je v jeklu. Že 0,031 % Nb v raztopini toliko zadrži rekristalizacijo avstenita, da pri valjanju ne bi prišlo do rekristalizacije v času, ki je na voljo med deformacijo jekla v dveh zaporednih kalibrih v primeru, da je temperatura valjanja 1000^o C ali nižja.

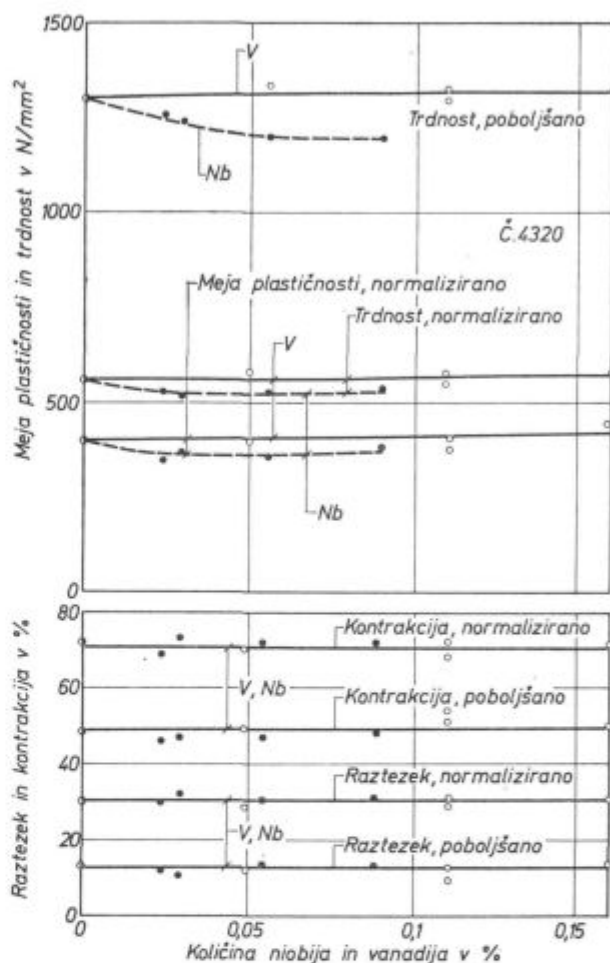
— Rast zrn rekristaliziranega avstenita je približno enako hitra v primerjalnem jeklu in v jeklih, legiranih z vanadijem. Torej legiranje jekla z vanadijem ne vpliva na hitrost, s katero rastejo zrna avstenita po vroči deformaciji.

— Rast zrn rekristaliziranega avstenita je počasnejša v jeklu 0,031 % Nb kot v primerjalnem jeklu in v jeklih, legiranih z vanadijem. Še počasnejša je rast zrn rekristaliziranega avstenita v jeklu z 0,091 % Nb. To pove, da zavira niobij tudi rast zrn rekristaliziranega avstenita in to tem bolj, čim več ga je v jeklu. Že dodatek 0,03 % Nb pa zmanjša rast zrn na stopnjo, ki je zanemarljiva v tehnoloških pogojih predelave v primerjavi z jekli brez niobija. Zato lahko pričakujemo, da bo imelo jeklo, ki je legirano že z 0,03 % Nb, v valjanem stanju zelo fino zrnato mikrostrukturo, če le končna temperatura valjanja ne bo previsoka.

3.4. Mehanske lastnosti

Mehanske lastnosti so prikazane na slikah 7 in 8, v odvisnosti od naraščajoče količine niobija in

vanadija. Iz grafikonov lahko razberemo, da dodatek vanadija skoraj ne vpliva na mehanske lastnosti jekla Č 4320, pač pa dodatek niobija nekoliko zmanjša mejo plastičnosti in trdnost v normaliziranem in v poboljšanem stanju. To tolmačimo z zmanjšanjem kaljivosti jekla zaradi bolj drobnih avstenitnih zrn.



Slika 7

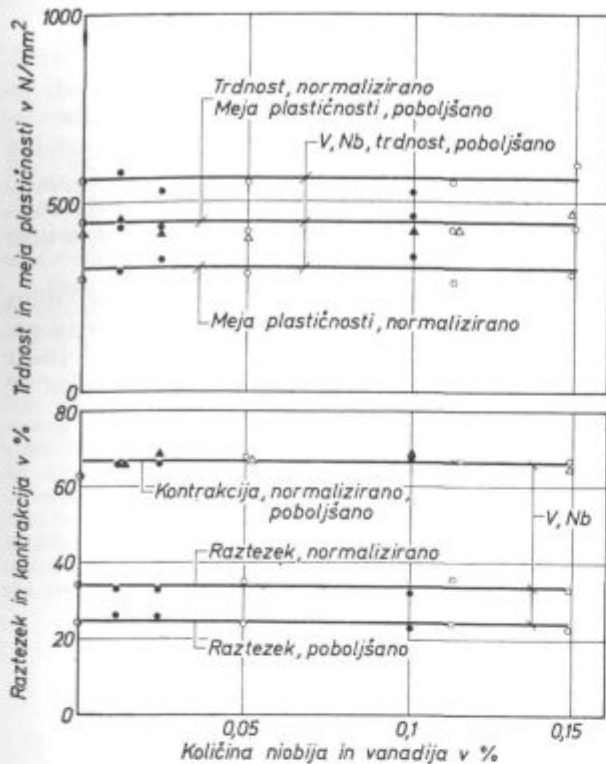
Odvisnost med količino niobija oz. vanadija in mehanskimi lastnostmi (meja plastičnosti, trdnost, raztezek in kontrakcija) jekla Č 4320 v poboljšane in normaliziranem stanju

Fig. 7

Relationship between the amount of niobium or vanadium and the mechanical properties (yield point, strength, elongation, contraction) of C 4320 steel as quenched and tempered, and normalized

Legiranje jekla Č 1221 z vanadijem in niobijem ne vpliva na mehanske lastnosti v normaliziranem in poboljšanem stanju, če izvzamemo majhno povečanje meje plastičnosti v normaliziranem stanju.

Sprememba mehanskih lastnosti v normaliziranem in poboljšanem stanju dosega največ 15 % pri legiranju jekel z 0,15 % V, zmanjšanje pa ne dosega 10 % pri legiranju z do 0,1 % Nb. Zato sklepamo, da se lahko vpliv obeh elementov zanemari



Slika 8

Odvisnost med količino niobija oz. vanadija v jeklu ter mehanskimi lastnostmi (meja plastičnosti, trdnost, raztezek in kontrakcija) jekla Č 1221 v poboljšanim in normaliziranem stanju

Fig. 8

Relationship between the amount of niobium or vanadium and the mechanical properties (yield point, strength, elongation, contraction) of Č 1221 steel as quenched and tempered, and normalized

ali pa se nadoknadi s spremembo količine drugih legiranih elementov in pri tem ostane sestava jekla v predpisanem intervalu.

Pri avstentizaciji pred valjanjem in normalizaciji se ves niobij veže v karbonitridne izločke. Ti neposredno vplivajo na kaljivost jekla, jo pa indirektno zmanjšujejo s tem, da zmanjšujejo avstenitna zrna. Pri ogrevanju pred valjanjem se niobij raztopi v avstenitu, pri valjanju pri padajoči temperaturi se ne veže ves v karbonitridne izločke. Niobij, ki je v trdni raztopini v avstenitu, znižuje temperaturo perlitne premene in povzroča sekundarno utrditvev zaradi diskontinuirne precipitacije med nastajanjem ferita, ali celo izločilno utrditvev ferita (7), če pogoji ohlajanja niso omogočili izločanja pred premeno in med njo. V odvisnosti od pogojev pri ohlajanju valjanega jekla, oz. izločanja Nb karbonitrida zato lahko pričakujemo v valjanem stanju povečanje trdnostnih lastnosti jekel, legiranih z niobijem.

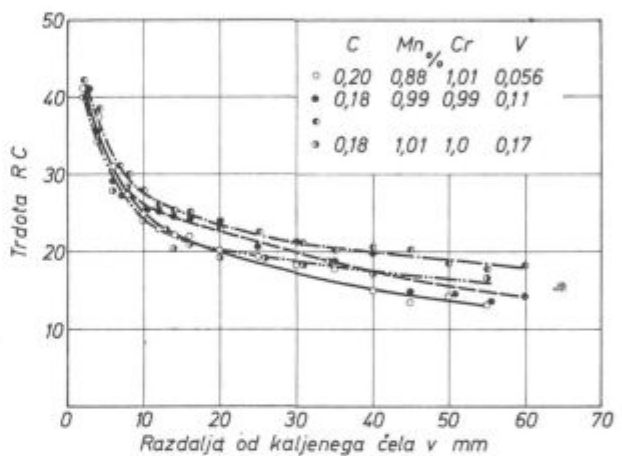
Vanadijev karbonitrid se raztopi v avstenitu pri ogrevanju za normalizacijo v količini, ki je odvisna od temperature in količine ogljika v jeklu (8). Med valjanjem jekla se vanadij ne veže v kar-

bonitrid, ker so previsoke temperature predelave, tudi temperatura konca valjanja. Zato bo večja kaljivost jekla po valjanju in temu ustrezno večje trdnostne lastnosti. Po analogiji s sliko 8 pa sklepamo, da bo razlika zanemarljiva v primerjavi z jeklom brez vanadija.

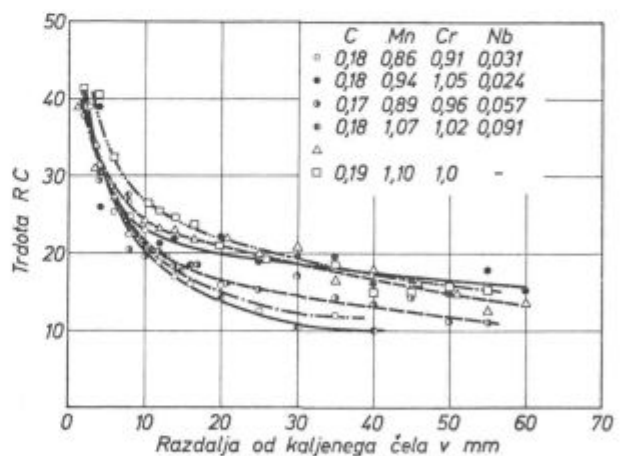
3.5. Jominy preizkusi kaljivosti

Na sliki 9 so prikazane krivulje čelne kaljivosti za posamične šarže jekla Č 4320.

Legiranje jekla z niobijem zmanjšuje kaljivost jekla Č 4320. To potrjuje rezultate mehanskih preizkusov, kar si razlagamo z zmanjšano kaljivostjo zaradi drobnejših avstenitnih zrn. Legiranje vanadija povečuje kaljivost tega jekla. Tako jekla z vanadijem kot jekla z niobijem ležijo v intervalu kaljivosti, ki je predpisana za to jeklo, pri čemer ležijo jekla z niobijem ob spodnji meji.



Slika 9a



Slika 9b

Slika 9

Jominy krivulje čelne kaljivosti za jeklo Č 4320 z različnimi dodatki niobija in vanadija

Fig. 9

Jominy curves of the face hardenability of Č 4320 steel with various additions of niobium and vanadium

4. SKLEPI

Iz jekel 2 različnih vrst, ki sta bili izdelani, uliti in izvaljani v palice z debelino 28 do 33 mm v železarni Store, smo izdelali v 20 kg indukcijski peči jekla z različnimi dodatki niobija in vanadija z namenom, da ugotovimo naslednje:

— koliko niobija in vanadija zmanjša avstenitna zrna in zrna feritno perlitne mikrostrukturo v jeklu in kolikšen je optimalen dodatek obeh elementov za učinkovito afincijo;

— kako dodatek niobija in vanadija v količini, ki zmanjša zrna, vpliva na predpisane lastnosti jekel, predvsem mehanske lastnosti in kaljivost.

Rezultati raziskave so pokazali naslednje:

— legiranje niobija v količini 0,03 % učinkovito zmanjša avstenitna in feritna zrna v obeh jeklih, podoben učinek ima še 0,15 % vanadija;

— legiranje jekla z 0,03 % Nb zavre začetek statične rekristalizacije avstenita po deformaciji pri 1000°C in zavre rast kristalnih zrn rekristaliziranega avstenita, dodatek 0,15 % vanadija je brez vidnega učinka;

— legiranje niobija v količini 0,03 % ne vpliva toliko na lastnosti jekla v normaliziranem in poboljšanem stanju, da bi te lastnosti jekel padle zunaj intervala, ki je predpisan za posamične vrste jekel.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Laboratorium sind Schmelzen der Einsatzstahlsorten C.4320 und C.1221 mit Zusatz bis zu 0.09 % Niobium und bis 0.16 % Vanadium hergestellt worden. Die Stähle sind zu Stäben ausgewalzt worden und Untersuchungen der Grösse und Stabilität der Austenitkörner beim Erwärmen auf 920°C und der Rekristallisation des Stahles C.4320 nach der Verformung bei 1000°C sind durchgeführt worden. An dem Stahl ist noch die Härtebarkeit mittels der Stirnabschreckprobe nach Jominy bestimmt worden.

Die experimentellen Schmelzen zeigten, dass die mechanischen Eigenschaften der Stähle nach dem Zusatz bis zu 0.09 % Nb und bis zu 0.16 % V im vorgeschriebenen Intervall bleiben. Der Zusatz von Niobium verkleinert die Korngrösse und vergrössert deren Stabilität bei verlängerter Erwärmung, Vanadium ist dagegen viel weniger wirksam. Deshalb ist nach 8-stündigem Erwärmungsvorgang bei 920°C die Korngrösse im Stahl C.4320 mit 0.024 % Nb ungefähr gleich wie im gleichen Stahl mit 0.16 % V. Beim einstuündigen Erwärmungsvorgang ist der Unterschied in der Einflussintensität der beiden Elemente kleiner. Ein Zusatz von 0.024 % Nb verzögert stark die statische Rekristallisation von Austenit nach der Warmverformung bei 1000°C, indem der Zusatz von 0.16 % V die Rekristallisation nicht bemerkenswert beeinflusst.

Die Härtebarkeit des Stahles wird beim Legieren mit Niobium schlechter und mit Vanadium besser, jedoch bleibt die Härtebarkeit des Stahles im vorgeschriebenen Intervall.

Auf Grund der laboratorischen Untersuchungen ist im Lichtbogenofen eine Stahlschmelze mit 0.02 % Nb erzeugt und in Knüppel 100 mm 4 kt Strangvergossen worden. Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass das Mikrogefüge, die Ferritkorngrösse und die mechanischen Eigenschaften im gewalzten Zustand von dem Temperaturintervall beim Walzen abhängig sind. Nach kurzzeitiger Erwärmung bei 920°C sind die Austenitkörner ähnlich wie in zwei Vergleichsschmelzen der gleichen Sorte mit etwa 0.03 % Al, nach 8-stündiger Erwärmung sind diese jedoch kleiner und gleichmässiger.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen dass im Einsatzstahl C.4320 der Zusatz von Niobium bis zu 0.03 % erfolgreich für die Kontrolle der Austenitkorngrösse angewendet werden kann, dass dieser dem Aluminiumzusatz gleichwertig ist, ohne dass dabei Schwierigkeiten beim Vergiessen dieser Stähle entstehen.

SUMMARY

Industrial C 4320 and C 1221 steel were chosen to prepare laboratory melts with additions up to 0.09 % niobium and up to 0.16 % vanadium. Steel was rolled into rods and basic metallurgical tests were made to determine the size and the stability of austenitic grains in annealing at 920 °C, and to investigate the recrystallization of C 4320 steel being deformed at 1000 °C. The Jominy end hardenability tests was made with the last mentioned steel.

Experimental melts show that the previously mentioned additions of niobium and vanadium do not change mechanical properties of steel out of the prescribed range. Addition of niobium reduces the grain size and increases their stability in long annealing while vanadium is much less effective. After 8-hour annealing at 920 °C approximately the same size of grains was obtained in C 4320 steel with 0.024 % Nb as in the same steel with 0.16 % V. In one-hour annealing the difference in the intensity of influence of both alloying elements is much smaller. Addition of 0.024 % Nb highly retards the static recrystallization of austenite after hot deformation at 1000 °C while addition of 0.16 % V does not influence remarkably the recrystallization. Alloying steel with niobium reduces

the hardenability, alloying with vanadium improves it but the hardenability of steel remains in the prescribed intervals.

Based on laboratory investigations an industrial melt of C 4320 steel with 0.02 % Nb was manufactured in electric arc furnace and continuously cast into 100 × 100 mm billets. Investigations of this melt showed that the microstructure, size of ferrite grains, and mechanical properties in the rolled state depend on the temperature interval of rolling. After normalising at 920 °C all these properties become independent of the temperature interval of rolling. After short annealing at 920 °C the austenite grains are similar to those in two reference steels of the same type with about 0.03 % Al, after 8-hour annealing they are smaller and more uniform.

The results of investigations show that addition of 0.03 % Nb can be a successful addition for the control of the size of austenitic grains in the case-hardenable C 4320 steel, equivalent to the additions of aluminium but not causing problems during manufacturing and casting the steel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сталей C 4320 и C 1221, произведенные промышленным способом были изготовлены лабораторные расплавы с добавкой ниобия до 0,09 % и ванадия до 0,16 %.

Прокатка этих сталей заключалась в изготовлении сортовой стали с выполнением всех основных металлургических исследований, с определением величины и стабильности аустенитных зерен при нагреве на 920 °C и исследования рекристаллизации стали C 4320 по деформации при 1000 °C. При этой стали определена также торцевая закалка по Жомини.

Экспериментальные образцы показали, что механические свойства стали с добавкой ниобия до 0,09 % и ванадия до 0,16 % остаются в предписанном диапазоне. Добавка ниобия уменьшает величину зерен и при продолжении нагрева увеличивает их стабильность, влияние же ванадия гораздо слабее.

Поэтому, после 8-ми часового нагрева при 920 °C получена прибл. та же самая величина зерен в стали C 4320 с 0,024 % Nb как и при стали того же сорта с 0,16 % V.

При одно-часовом нагреве разница интенсивности влияния обоих элементов значительно меньше. Добавка ниобия в количестве 0,024 % резко снижает статическую рекристаллизацию аустенита после горячей деформации при 1000 °C; между тем

добавка ванадия до 0,16 % существенно не влияет на рекристаллизацию. Легирование стали с ниобием снижает закалку, а с ванадием увеличивает, но свойства закаленной стали остаются в предписанных пределах.

На основании лабораторных исследований изготовлена в электропечи сталь промышленного производства C 4320 с 0,02 % Nb, и из нее заготовки 100 × 100 мм из расплава непрерывного литья.

Исследование этого расплава показали, что микроструктура, величина ферритных зерен и механические свойства в катаном состоянии зависят от температурных пределах прокатки. По нормализации при 920 °C все эти свойства больше не зависят от температурного предела прокатки.

После непродолжительного нагрева при 920 °C аустенитные зерна подобны двум сталям из сорта прибл. с 0,03 % алюминия, которые послужили для сравнения, а после 8-ми часового нагрева эти зерна уже меньшей величины и более равномерной структуры. Результаты исследований показали, что для цементуемой стали C 4320 можно употребить как добавку до 0,03 % Nb, которой послужит для контроля величины аустенитных зерен и может являться как заместитель добавки алюминия. При этом не наступают при разливке и изготовлении никакие затруднения.