

Raziskave vpliva temperature valjanja na mikrostrukturo krom manganovega jekla za cementacijo

UDK: 669.14.018.292; 621.771.01
ASM/SLA: F23, 1—66, CN, 3—71

F. Vodopivec, A. Rodič in J. Rodič

Jeklo z 0.16 C, 1.2 Mn, 1 Cr in 0.011 do 0.037 Al, temperatura valjanja med 1250 in 840° C. Med valjanjem se izloča le malo AlN. Pri nizki temperaturi valjanja je mikrostruktura bolj fino zrnata, vendar je manj enakomerna, večje pa je tudi število austenitnih zrn, ki nadpovprečno zrastejo pri ponovni austenitizaciji. Vpliv temperature valjanja se pokaže v jeklu z malo aluminija pri austenitizaciji pri normalni temperaturi cementacije, v jeklu z mnogo Al pa šele pri višjih temperaturah cementacije.

1. UVOD

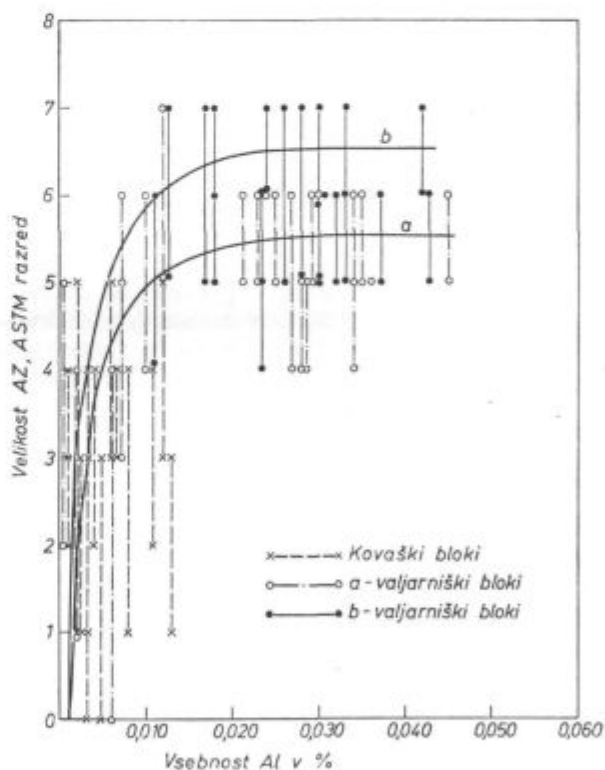
Aluminij se splošno uporablja kot afinator za avstenitna zrna (AZ) v konstrukcijskih jeklih in v jeklih za cementacijo. Praksa kaže, naj bi se količina aluminija (mišljen je tako imenovani topni aluminij, torej tisti aluminij, ki se lahko veže v aluminijev nitrid) v jeklu držala nad 0,01 %, da bi dobili velikost AZ najmanj razred 5 po ASTM, vendar ne nad 0,025 %, da bi jeklu zagotovili enakomerno kaljivost in strjevalno strukturo, ki je čim manj občutljiva za pokanje v začetku vročega valjanja ali kovanja.

Na voljo je veliko podatkov o topnosti aluminijevega nitrída (AlN) v avstenitu v konstrukcijskih jeklih (1, 2, 3) in poznan je mehanizem kontrole velikosti AZ z izločki AlN (3). Mnogo manj vemo o tem, kako proces deformacije med vročim valjanjem jekla vpliva na tvorbo izločkov AlN. Že prej je bilo dokazano, da valjanje jekla v eni redukciji pospeši izločanje AlN (4) in da je količina AlN, ki nastane med vročo torzijo jekla, sorazmerna številu vrtljajev, torej celokupni deformaciji jekla (5), oz. pravilneje povedano, času, ko je jeklo v deformiranem stanju. V razpoložljivih virih pa ni podatkov o vplivu deformacije na velikost izločkov in njihovo rast v deformiranem avstenitu.

Bogatejši so empirični podatki o izločanju niobijevega karbonitrída med vročo deformacijo konstrukcijskih jekel, ki so mikrolegirana z niobijem. V glavnem dobro razumemo vpliv deforma-

cije na tvorbo in rast karbonitridnih izločkov (6, 7, 8, 9, 10). Razložili ga bomo kasneje, ko bomo razpravljali o izsledkih našega dela.

Iz prakse vemo, da često pokažejo jekla pri enakih količinah aluminija in dušika različno povprečno velikost zrn in še posebej različno enakomernost zrn avstenita. Pri 0,02 % topnega Al lahko zagotovimo v jeklu vrste Č 4320 z 0,009 % N povprečno velikost AZ 5 do 6 po ASTM (sl. 1), vendar ni mogoče zagotoviti, da v teh jeklih ne bo posamičnih zrn avstenita z velikostjo 1 do 3 po



Slika 1

Razmerje med količino topnega Al v jeklu in velikostjo avstenitnih zrn v kovaških in v valjarniških blokih. Po Erženu (11)

Fig. 1

Relation between the amount of acid soluble Al in steel and the size of austenite grains in forge and rolling ingots. By Eržen (11)

Tabela 1: Sestava preizkusnih jekel v %

Jeklo	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P	Al*	N	Al/N
A	0,16	1,1	0,29	0,95	0,18	0,06	0,24	0,03	0,014	0,011	0,009	1,2
B	0,17	1,22	0,36	0,96	0,15	0,07	0,29	0,04	0,014	0,019	0,0097	2
C	0,16	1,23	0,26	1,01	0,15	0,04	0,26	0,01	0,01	0,037	0,01	3,7

* — topni aluminij

lestvici ASTM. Odvisnost na sliki 1 se dobro ujema s starejšimi podatki o jeklih za poboljšanje (17), se pa razlikuje od podatkov v viru 18.

Mehanizem rasti AZ pri ogrevanju jekla nad Ac 3 temperaturo določa, da je velikost zrn odvisna od temperature, od količine AlN v jeklu in od velikosti izločkov AlN, ali pravilneje povedano, od njihove medsebojne oddaljenosti. Izločki AlN zaustavljajo migracijo avstenitnih mej in s tem zavirajo ali blokirajo rast AZ. Vendar je težko razumeti, zakaj ima določeno jeklo v povprečju manjša AZ kot drugo jeklo iste vrste z več AlN. Eden od vplivnih dejavnikov bi lahko bil proces vročega valjanja jekla. Zato je bilo odločeno, da se opredeli, kako temperaturni interval valjanja jekla v več vtikih vpliva na deformacijsko inducirano tvorbo AlN (strain induced precipitation) in preko nje na velikost in enakomernost AZ v jeklu z določeno vsebnostjo Al in N. Naravno je, da tako raziskavo najprej opravimo na jeklu za cementacijo, saj so zahteve glede velikosti zrn najstrožje prav pri jeklih te vrste.

2. EKSPERIMENTALNO DELO

Za raziskavo smo izbrali tri industrijska elektrokajla s podobno vsebnostjo dušika in razmerjem Al/N približno 1, 2 in 4. Sestava jekel je prikazana v tabeli 1. Ingoti so bili v železarni izvaljeni v gredice s presekom približno 60×60 mm, nato pa smo gredice v 6 vtikih zvaljali na platine z debelino 15 mm. Del gredic smo pred valjanjem segreti na temperaturo 1250°C, kar je zagotovilo, da se je v vseh jeklih raztopil v avstenitu ves AlN, nato smo z valjanjem začeli pri tej temperaturi, ali pa po ohladitvi na nižjo začetno temperaturo 1150, 1050 ali 950°C. Drugi del odrezkov smo segreti neposredno na temperaturo 950, 1050 ali 1150°C in izvaljali na enak način kot prej. Temperaturo valjanja smo kontrolirali z infrardečim digitalnim pirometrom.

Skupna redukcija pri valjanju je dosegla 75 %, parcialne redukcije pri vtikih so bile med 14 % v prvem vtiku in 25 % v zadnjem vtiku. To je dovolj za statično rekristalizacijo avstenita med posamičnimi vtiki (19), če je seveda temperatura zadosti visoka.

Proces laboratorijskega valjanja smo pred tem uspešno preverili pri raziskavi relativne plastičnosti

inkluzij manganovega sulfida pri valjanju konstrukcijskih jekel (10).

Valjance smo po končanem valjanju ohladili na zraku na posteljici iz šamotnih opek ali kalili v vodi. Mikrostrukturalne preiskave niso pokazale na kaljenih valjancih nobenih značilnosti, katerih nismo razbrali že na valjancih, ohlajenih na zraku, zato obravnavamo v tem poročilu v glavnem le izsledke pri teh valjancih.

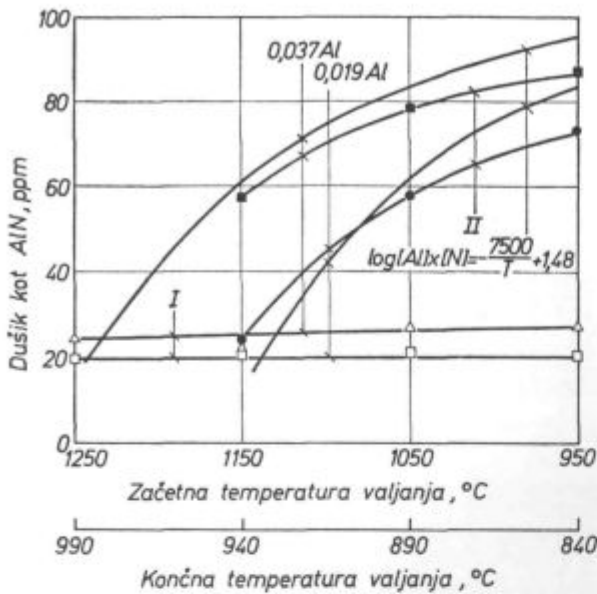
Iz srednjega dela valjancev smo izrezali preizkušance za mikrostrukturalne preiskave, za preizkuse toplotne obdelave in za analizo AlN. Ta je bila izvršena po Beeghlyjevi metodi (12) s halogen estersko ekstrakcijo in s ponovljivostjo in občutljivostjo 0,0005 % N kot AlN (13). Z opazovanjem v raster elektronskem mikroskopu smo preverili prisotnost izločkov AlN v jeklih, vendar ni bilo mogoče zanesljivo opredeliti njihove velikosti in porazdelitve, zato podatkov o izločkih v tem poročilu ne obravnavamo.

3. TVORBA AlN MED VALJANJEM

Slika 2 prikazuje vpliv temperature valjanja na količino AlN v dveh jeklih, vanjo pa smo vrisali tudi količino AlN, izračunano na osnovi topnostnega produkta v viru 3. Teoretična vrednost je nad analizirano do temperature 1150°C. To lahko razlagamo na dva načina: topnost AlN v avstenitu v CrMn jeklu za cementacijo je manjša kot v konstrukcijskih jeklih s podobno količino mangana in ogljika ali pa se izloči med valjanjem samo del AlN, ki se pri ogrevanju raztopi v avstenitu. Za naš predmet odgovor na to vprašanje ni potreben, zato ga bomo zanemarili. Pač pa lahko vzamemo relativno majhno odstopanje med analizirano količino AlN in teoretično topnostjo ter podobno temperaturno odvisnost kot indirektno potrdilo za zanesljivost analitske metode, ki je bila uporabljena za analizo AlN.

V jeklih, ki so bila valjana po ogrevanju pri 1250°C, najdemo v izločkih le majhen delež skupne količine AlN v jeklu. Izločkov je več v jeklu z 0,037 Al kot v jeklu z 0,019 Al, razlika je v sorazmerju s teoretično količino AlN.

Temperatura valjanja komajda vpliva na količino AlN, ki je nastal med valjanjem in ni v nobenem sorazmerju s topnostjo nitrida v avstenitu pri povprečnih ali pri končnih temperaturah va-



Slika 2

Vpliv temperature valjanja jekel z 0,019 Al in 0,037 Al na količino AlN, ki je nastal med valjanjem. Na tej sliki in na naslednjih označujejo prazne točke jekla, ki so bila segrevana na 1250°C in nato ohlajena na temperaturo začetka valjanja, polne točke pa jekla, ki so bila segreta na začetno temperaturo valjanja. Krivulji brez točk sta izračunani s pomočjo topnostnega produkta za AlN v avstenitu po viru 3.

Fig. 2

Influence of the rolling temperature of steel with 0.019 Al and 0.037 Al on the amount of AlN precipitated during rolling. In this and following figures circles represent steel heated to 1250°C and cooled to the initial rolling temperature, dots represent steel heated to the initial rolling temperature. Curves without markings were calculated from the solubility product of AlN in austenite according to reference 3.

ljanja obeh jekel. To potrjuje starejše izsledke na konstrukcijskem jeklu, ki smo ga deformirali z vrtenjem (5). Enake količine AlN je pokazala kontrolna analiza v nekaterih valjancih, ki so bili kaljeni s temperature valjanja. To seveda pove, da AlN, ki ga najdemo v valjancih, ki so bili po valjanju ohlajeni na zraku, ni nastal zaradi interfaznega izločanja ob premeni avstenit-ferit, temveč resnično med valjanjem jekel.

Velja, da je izločanje AlN med valjanjem precej omejeno, tudi tedaj, ko valjanje poteka pri sorazmerno nizki temperaturi. To je nekoliko presenetljivo, saj se je valjanje izvršilo precej pod temperaturo topnosti. Po topnostnem produktu, pa tudi po analizah, katere najdemo na sliki 2, vidimo, da je pri 950°C v raztopini v avstenitu le okoli 10% AlN, po valjanju pri povprečni temperaturi 900°C pa ga najdemo v raztopini še več od 70%.

Podobni preizkusi valjanja so v teku na nekaterih konstrukcijskih jeklih. Prvi rezultati kažejo nekoliko hitrejše izločanje AlN le med valjanjem mikrolegiranega jekla z niobijem, kjer je rekristalizacija avstenita med vtiki močno zavirana, če ne popolnoma preprečena zaradi prisotnega niobija (sl. 3). V jeklu s podobno osnovno sestavo,

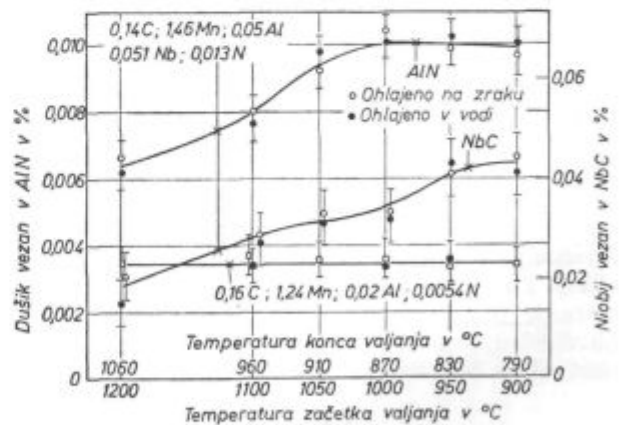
vendar brez niobija, ki je bilo izvaljano v istem temperaturnem intervalu, je tvorba AlN mnogo počasnejša. Pomembno je še, da je v mikrolegiranem jeklu intenzivna tvorba niobijevega karbonitrida potekala v istem temperaturnem intervalu kot hitro izločanje AlN. To potrjuje, da je tvorba AlN med valjanjem hitra le, če je deformacijsko inducirana, torej poteka v avstenitu, ki po vtiku ni rekristaliziral.

4. MIKROSTRUKTURA VALJANIH JEKEL

Slika 4 prikazuje vpliv temperature valjanja na linearno intercepcijsko dolžino za mikrostrukturo v jeklih, ki so bila po koncu valjanja ohlajena na zraku. Ta mikrostruktura je bila pretežno iz ferita in perlita. Jekla B ni bilo mogoče ovrednotiti na tak način kot jekla A in C. Bilo je bolj kaljivo, zato je pri ohlajanju na zraku nastala mikrostruktura pretežno iz bajnita, kjer intercepcijske dolžine ni mogoče objektivno opredeliti.

Kot splošno velja, postaja feritno-perlitna mikrostruktura vse bolj drobnozrnata, ko se znižuje temperatura valjanja. Mikrostruktura je bolj drobna v jeklu, ki je bogatejše z aluminijem in, za isti interval temperature, nekoliko bolj groba v jeklih, ki so bila pred valjanjem ogrevana pri 1250°C. To pove, da ima AlN, kljub temu da ga nastane med valjanjem relativno malo, pomemben vpliv na mikrostrukturo po valjanju. Vendar kaže, da je njegov vpliv manjši od vpliva temperature valjanja.

Po valjanju pri visoki temperaturi je mikrostruktura iz enakomernih poligonalnih zrn. Po valjanju pri nižji temperaturi opažamo, da so majhna zrna nekoliko podolgovata, bolj je poudarjena trakavost, še posebej v jeklu, ki je bilo ogreto na začetno temperaturo valjanja 950°C. V jeklih, ki

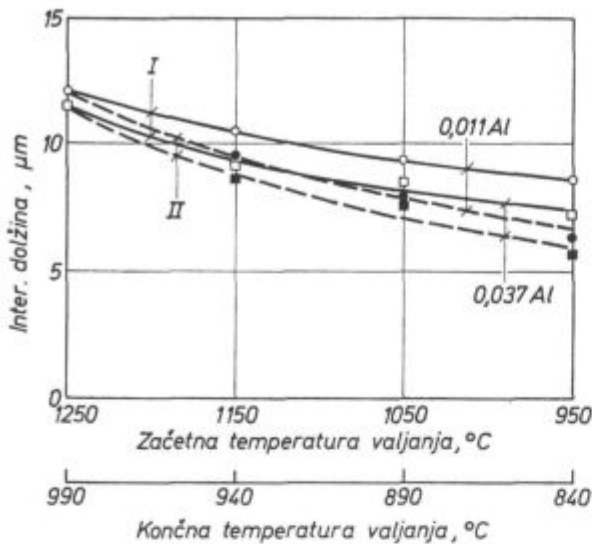


Slika 3

Vpliv temperature valjanja na tvorbo aluminijevega nitrida in niobijevega karbonitrida. Konstrukcijski jekli sta bili izvaljani na podoben način kot jekla na sl. 2 (po viru 13).

Fig. 3

Influence of rolling temperature on formation of aluminum nitride and niobium carbonitride. Structural steel was rolled in a similar way as steels in Fig. 2 (Reference 13).



Slika 4

Vpliv temperature valjanja na linearno intercepcijsko dolžino mikrostrukture, ki je nastala v jeklih pri ohladitvi na zraku s končne temperature valjanja.

Fig. 4

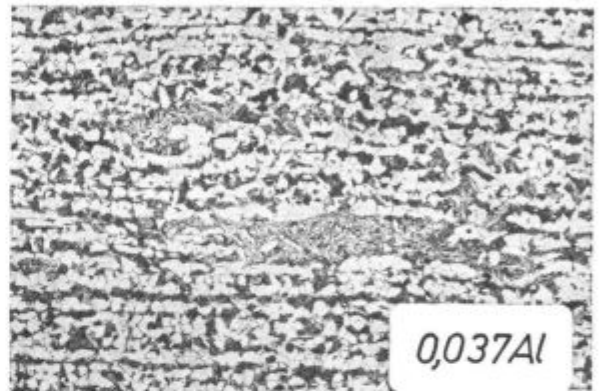
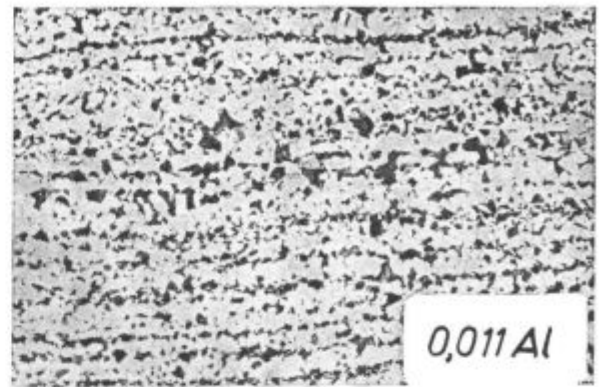
Influence of rolling temperature on the linear intercepting length of microstructure formed in steel at cooling in air from the final rolling temperature.

so bila po ogrevanju pri 1250°C zvaljana z začetkom pri 1050, in še bolj pri 950°C, često opazimo v agregatu drobnih enakomernih zrn posamična večja podolgovata bajnitna zrna in lečaste skupke zrn ferita in perlita, ki po obliki in velikosti jasno odstopajo od okolice (sl. 5). Ti skupki in velika bajnitna zrna so nastali iz avstenitnih zrn, ki po zadnjem vtiku niso rekristalizirala in so zato v deformiranem stanju dosegla temperaturo transformacije avstenita pri ohlajanju (10). Znano je, da deformirani avstenit transformira pri višji temperaturi kot nedeformirani ali rekristalizirani avstenit in nastajajo pri premeni večja feritna in perlitna zrna (15).

Če predpostavimo, da je vsa tvorba AlN posledica vroče deformacije, bi prišli na osnovi dejstva, da je količina AlN praktično neodvisna od temperature valjanja, lahko do sklepa, da temperatura valjanja ne vpliva pomembno na rekristalizacijo avstenita med vtiki. Tak zaključek je brez osnove; izločanje AlN je, čeprav ga sproža deformacija, odvisno od temperature. Kar vidimo na slikah 2 in 3, je rezultat vpliva dveh dejavnikov, znižanje temperature namreč istočasno povečuje hitrost kaljenja izločkov AlN in zmanjšuje difuzivnost Al in N, zato je rast izločkov bolj počasna.

5. VELIKOST IN ENAKOMERNOST AVSTENITNIH ZRN PRI TEMPERATURI 920°C

Jekla smo segrevali 1 uro pri 920°C in jih kalili v vodi. Na obruskih smo velikost in obliko AZ odkrili z jedkanjem v nasičeni alkoholni raztopini



Slika 5

Pov. 200 ×: Jeklo segreto na 1250°C, ohlajeno na 950°C in izvaljano. Lečasta skupina večjih zrn ferita in perlita v jeklu z 0,011 Al in podolgovato bajnitno zrno v jeklu z 0,037 Al.

Fig. 5

Magn. 200 ×: Steel heated to 1250°C, cooled to 950°C, and rolled. Lenticular group of coarser ferrite and pearlite grains in steel with 0.011 Al, and elongated bainite grain in steel with 0.037 Al.

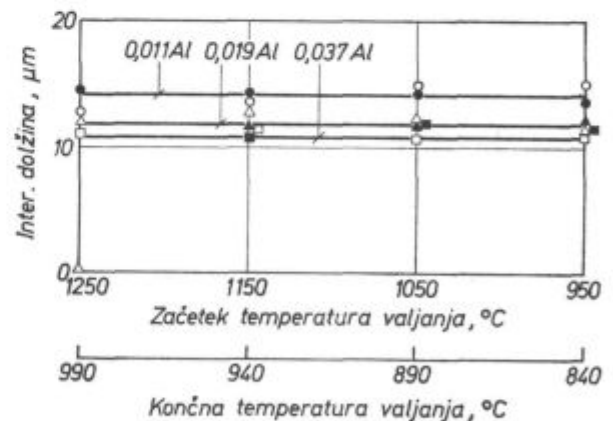
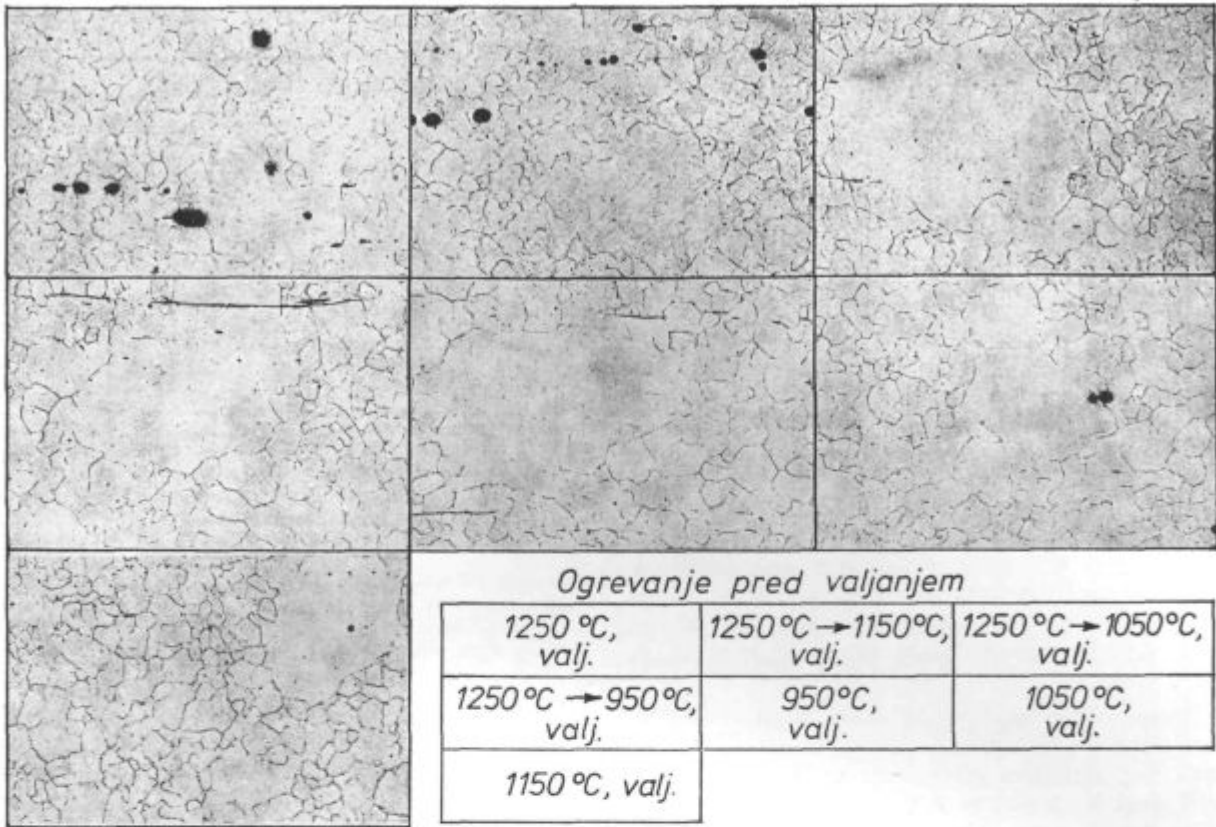


Fig. 6

Vpliv temperature valjanja na linearno intercepcijsko dolžino za nezrastla AZ. Valjana jekla so bila segrevana 1 uro pri 920°C in kaljena v vodi.

Fig. 6

Influence of rolling temperature on the linear intercepting length for uncoalesced austenite grains in steels. Rolled steel were annealed 1 hour at 920°C and quenched in water.



Slika 7

Pov. 200 ×. Avstenitna zrna v jeklu z 0,019 Al, ki je bilo valjano pri različnih temperaturah. Enaka toplotna obdelava kot na sl. 6.

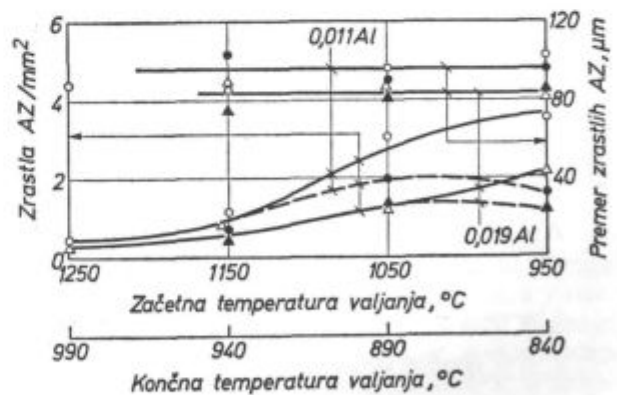
Fig. 7

Magn. 200 ×: Austenite grains in steel with 0.019 Al, rolled at various temperatures. The same heat treatment as in Fig. 6.

pikrinske kisline z dodatkom sredstva za omočenje. Na sliki 6 vidimo, da je temperatura valjanja brez opaznega vpliva na povprečno velikost enakomernih AZ in da so zrna nekoliko večja v jeklu, ki je siromašnejše z aluminijem. Pazljivejše opazovanje pa odkrije med jekli pomembnejšo razliko, kot je tista med povprečnimi velikostmi AZ. Avstenitna zrna so drobna in enakomerna v jeklu z 0,037 Al v celotnem intervalu temperature valjanja. Nasprotno pa v jeklih, ki sta siromašnejši z aluminijem, rastejo v osnovi drobnih posamična večja AZ (sl. 7). Pri istem jeklu A ali B je povprečna velikost zrastleh zrn avstenita v območju napake določanja neodvisna od temperature valjanja, njihova povprečna velikost in število pa sta večja v jeklu A kot v jeklu B, ki je bogatejše z aluminijem. V obeh jeklih raste število zrastleh zrn AlN, ko pada temperatura valjanja jekel, ki sta bili pred valjanjem segreti na 1250° C (sl. 8).

V povprečju so zrastle zrna večja in številnejša v jeklu A z manj aluminija, kot v jeklu B. Povprečna velikost AZ pa je v obeh jeklih praktično neodvisna od temperature valjanja. Kaže, da je

V jeklu z 0,037 Al, ki je bilo valjano po neposrednem ogrevanju na začetno temperaturo valjanja 950, 1050 ali 1150° C, so AZ drobna in enakomerna v vsem intervalu temperature valjanja. Nasprotno pa se v jeklih A in B poveča število zrastleh zrn, ko se temperatura valjanja poviša od 950 na 1050° C in se nato ponovno zmanjša, ko zraste temperatura valjanja še više, na 1150° C.



Slika 8

Vpliv temperature valjanja na število zrastleh zrn avstenita in njihov poprečni premer v jeklih z 0,011 Al in 0,019 Al. Enaka toplotna obdelava kot na sl. 6.

Fig. 8

Influence of rolling temperature on the number of coalesced austenite grains and their average size in steels with 0.011 and 0.019 Al. The same heat treatment as in Fig. 6.

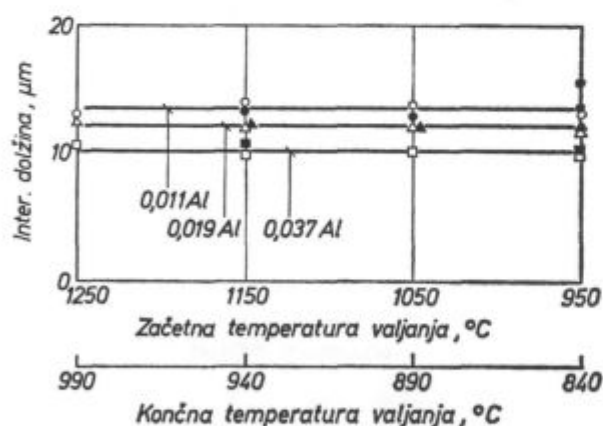
število AZ tem večje, čim bolj se začetna temperatura valjanja približuje neki temperaturi pod topnostjo AlN v avstenitu. Ne vemo, ali naj to razlagamo z vplivom neraztopljenega AlN, ki zmanjšuje količino izločkov, ki zaustavljajo rast AZ pri žarjenju za odkrivanje AZ (3), ali pa z vplivom neraztopljenih izločkov na proces tvorbe AlN med valjanjem.

Razpravo lahko na tem mestu zaključimo z ugotovitvijo, da v jeklih z majhno količino aluminija deformaicjsko inducirana tvorba AlN zaradi vročega valjanja jekla v temperaturnem intervalu nestabilnosti trdne raztopine AlN v avstenitu napravi jeklo nagnjeno k anormalni rasti posamičnih zrn avstenita pri segrevanju pri 920°C. Podobna nagnjenost k rasti zrn se razvije tudi, če jeklo pred valjanjem segrejemo na temperaturo delne topnosti AlN v avstenitu.

Logično se postavlja vprašanje, ali se nagnjenost k rasti AZ lahko zmanjša z normalizacijo, s katero dosežemo, da se izloči ves AlN, ki po temperaturi normalizacije ni topen, to pa po topnostnih produktih znaša najmanj 90 % vsega AlN v jeklu.

Primerjava slik 9 in 10 pove, da žarjenje za normalizacijo (1 uro pri 920°C in ohladitev na zraku) ne spremeni povprečne velikosti AZ in le malo zmanjša nagnjenost posamičnih zrn k anormalni rasti. Torej je predhodna normalizacija le malo učinkovit ukrep za doseg večje homogenosti AZ.

V neki starejši raziskavi (16) smo dognali, da nastanejo manjša AZ, če je bilo konstrukcijsko jeklo z mnogo disperzoidov najprej izločilno žarjeno pri 600°C in nato normalizirano, kot če je bilo jeklo samo normalizirano, čeprav je razlika

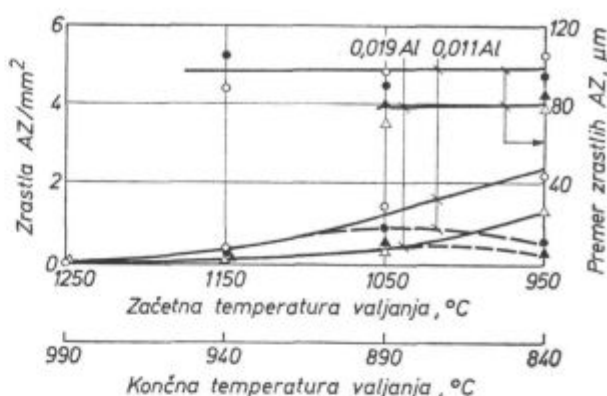


Slika 9

Vpliv temperature valjanja na velikost avstenitnih zrn. Valjani jekli z 0,011 Al in 0,019 Al sta bili najprej normalizirani (1 uro 920°C, ohlajanje na zraku) nato pa enako toplotno obdelani kot na sl. 6.

Fig. 9

Influence of rolling temperature on the size of austenite grains. Rolled steels with 0.011 and 0.019 Al were first normalized (1 hour 920°C, cooled in air), afterwards heat treated as in Fig. 6.



Slika 10

Vpliv temperature valjanja na število zrastlih zrn avstenita in njihov poprečni premer. Isti preizkušanci kot na sl. 9. Jeklo z 0,037 Al ni vrisano, ker se odvisnost pokriva z absciso diagrama.

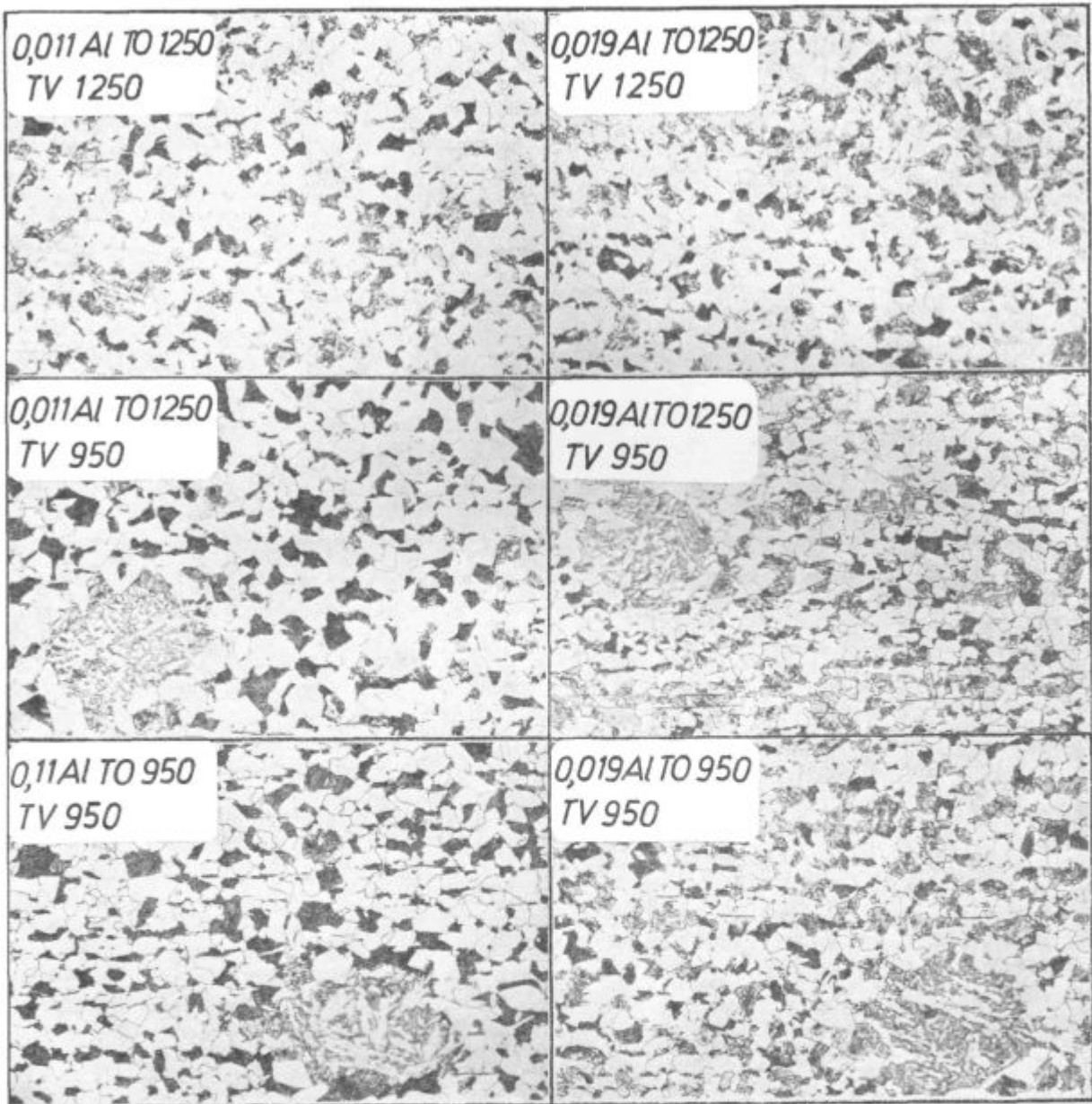
Fig. 10

Influence of rolling temperature on the number of coalesced austenite grains and their average diameter. The same test pieces as in Fig. 9. Steel with 0.037 Al is not plotted, since the relationship overlaps with the abscissa.

v velikosti izločkov po normalizaciji v obeh primerih v mejah določitve. Dognali smo tudi, da ohlajanje po vroči deformaciji (gašenje v vodi ali ohlajanje na zraku) in temperatura vroče deformacije nimata zaznavnega vpliva na velikost AZ. Zaključek je bil, da zrastejo AZ pri enakih drugih pogojih do manjše povprečne velikosti, če jeklo doseže temperaturo normalizacije z afinacijsko komponento v obliki izločkov, ki so manjši od tistih, ki nastanejo pri temperaturi normalizacije, kot če isto jeklo doseže temperaturo normalizacije z veliko afinacijske komponente v trdni raztopini v avstenitu. To implicira sklep, da je hitrost izločanja počasnejša od hitrosti premene. To je logično, izločanje namreč poteka z difuzijskim prenosom na določeno razdaljo, premena pa samo s prenosom preko reakcijske površine.

6. MIKROSTRUKTURA NORMALIZIRANIH JEKEL

Jekla smo segrevali 1 uro pri 920°C in nato kontrolirano ohladili, da bi se izvršila transformacija drobnih enakomernih zrn v poligonalni ferit in perlit ter ev. malo finega bajnita, premena zrastlih zrn avstenita pa v groba banjnitna zrna. Rezultati kažejo, kot je bilo pričakovati, drobnozrnato poligonalno mikrostrukturo, praktično neodvisno od temperature valjanja, v jeklu C, bogatem z aluminijem in mešano mikrostrukturo, drobnozrnato zmes ferita in perlita in velika bajnitna zrna, v jeklih A in B (sl. 11). Število velikih zrn bajnita je večje v jeklu A kot v jeklu B in v obeh jeklih raste, ko se znižuje temperatura valjanja po segrevanju jekel pri 1250°C pred valjanjem. Po direktnem ogrevanju na temperaturo



Slika 11

Pov. 200 \times : Mikrostruktura normaliziranih jekel z 0,011 in 0,019 % Al. TO-temperatura segrevanja pred valjanjem, TV-začetna temperatura valjanja, vse v $^{\circ}$ C.

Fig. 11

Magn. 200 \times : Microstructure of normalized steel with 0.011 and 0.019 Al. TO-temperature of heating before rolling. TV-initial rolling temperature, all in $^{\circ}$ C.

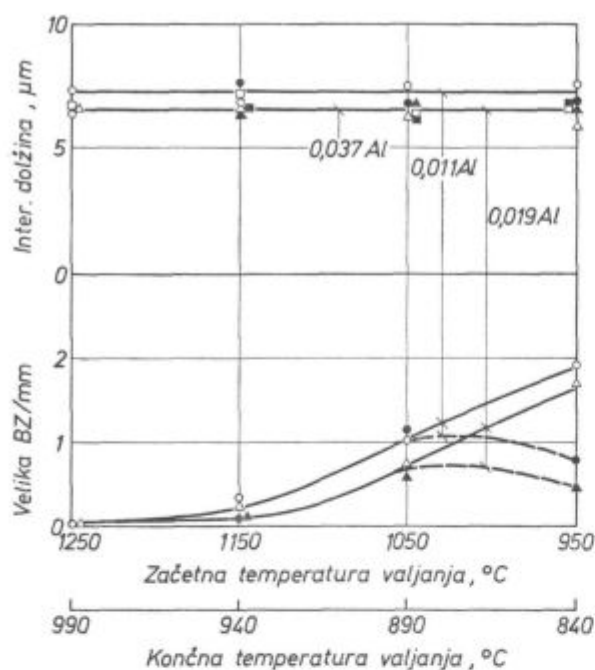
začetka valjanja se največ grobih bajnitnih zrn pojavlja pri temperaturi 1050 $^{\circ}$ C (sl. 12), podobno kot velja za zrastle avstenitna zrna.

7. VELIKOST IN ENAKOMERNOST AVSTENITNIH ZRN V JEKLU Z 0,037 % Al

Da bi preverili, ali je nagnjenost k rasti avstenitnih zrn značilnost jekla z nizkim aluminijem ali pa je splošna posledica deformacijsko inducirane tvorbe izločkov AlN, smo raziskavo dopolnili s preizkusi žarjenja jekla z 0,037 % Al. To jeklo je po 1-urni avstenitizaciji pri 920 $^{\circ}$ C imelo samo

drobna in enakomerna avstenitna zrna in seveda tudi drobno in enakomerno mikrostrukturo v normaliziranem stanju. Pri teh poizkusih smo trajanje žarjenja pri 920 $^{\circ}$ C podaljšali na 8 ur, temperaturo 1-urnega segrevanja pa dvignili do 1020 $^{\circ}$ C. Enakomernost avstenitnih zrn smo opredelili po enostavnejši metodi, tako da smo preverjali število grobih bajnitnih zrn v jeklu, ki je bilo kontrolirano ohlajeno s temperature avstenitizacije.

Po 1 uri segrevanja pri 920 $^{\circ}$ C ima jeklo C zelo drobna in enakomerna zrna iz ferita in perlita (sl. 13). Po 8-urnem ogrevanju pri isti temperaturi opazamo tem več velikih bajnitnih zrn, čim nižja



Slika 12

Vpliv temperature valjanja na poprečno intercepeljsko dolžino in na število grobih bajnitnih zrn (BG) v normaliziranih jeklih z 0,011 Al in 0,019 Al.

Fig. 12

Influence of rolling temperature on the average intercepting length and the number of coarse bainite grains (BG) in normalized steel with 0.011 and 0.019 Al.

je bila temperatura valjanja po segrevanju pred valjanjem na 1250°C in pri temperaturi začetka valjanja 1050°C, ki je bila dosežena z direktnim segrevanjem. Podobne rezultate smo dosegli po segrevanju na temperaturi 950 (sl. 14) in 980°C, po segrevanju pri 1020°C pa so bila vsa zrna velika.

Odvisnost med temperaturo valjanja in številom velikih zrn bajnita na sl. 15, na kateri so zbrane vse meritve na jeklu z 0,037 Al, je zelo podobna tistim, ki jih prikazujejo slike 8, 10 in 12. To pomeni, da je nagnjenost k rasti velikih zrn avstenita, ki je posledica valjanja jekel v temperaturnem intervalu deformacijsko inducirane tvorbe AlN, značilnost jekla neodvisna od količine aluminija v jeklu. V jeklih z malo aluminija pride do rasti AZ pri nižji temperaturi zato, ker je v teh jeklih manj izločkov AlN, ki zavirajo premikanje mej avstenitnih zrn.

8. POIZKUS RAZLAGE VPLIVA TEMPERATURE VALJANJA NA RAST AVSTENITNIH ZRN

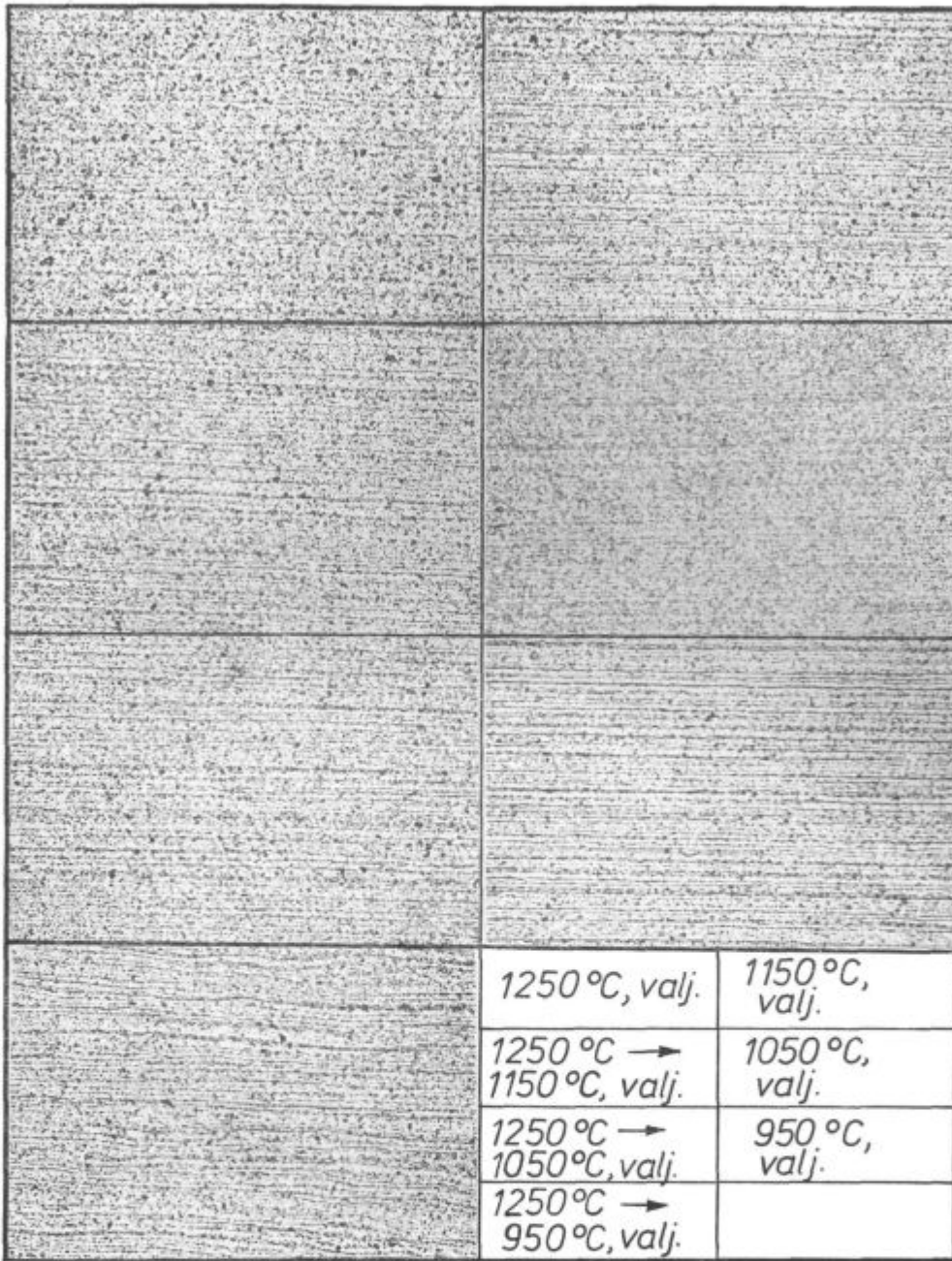
Omenili smo že, da v raziskavi nismo opazovali izločkov. V dosegljivih virih nismo našli nobenih podaktov o vplivu deformacije na velikost izločkov AlN in njihovo medsebojno oddaljenost. Sorazmerno dobro je poznan proces deformacijsko inducirane tvorbe AlN, ki zavirajo premikanje mej avstenitnih zrn.

V deformiranem jeklu je tvorba niobijevega karbonitrida najmanj za red velikosti hitrejša kot v nedeformiranem (ali rekristaliziranim) jeklu. Izločanje med deformacijo pa je hitrejšo spet najmanj za red velikosti (6). V več virih je potrjeno, da so izločki niobijevega karbonitrida, ki nastajajo v deformiranem avstenitu, manjši kot izločki, ki nastajajo pri enaki temperaturi v nedeformiranem avstenitu (6, 7, 8, 9, 10). Ugotovljeno je tudi, da je hitrost rasti izločkov v deformiranem avstenitu lahko do tri ređe velikosti večja kot v nedeformiranem avstenitu (8, 10). To je verjetno razloga, zakaj med valjanjem z več vtiki velikost izločkov niobijevega karbonitrida zraste v petem vtiku, če je temperatura dovolj visoka in če je zadostna tudi prenasičenost avstenita z niobijevim karbonitridom (7). To tudi lahko razlaga dvojno velikostno porazdelitev izločkov v nekaterih jeklih (10).

Iz tega zgoščenega pregleda lahko sklepamo, da nastajajo sicer v deformiranem avstenitu manjši izločki niobijevega karbonitrida, kot v nedeformiranem jeklu, vendar lahko izločki zrastejo zelo hitro, če jeklo med vtiki ne rekristalizira. Pri tem ostaja niobijev karbonitrid v raztopini v avstenitu ali pa nastanejo le majhni izločki v avstenitu, ki hitro rekristalizira med vtiki. Vemo, da različna zrna avstenita rekristalizirajo različno dolgo po vtiku, zato v jeklu nastajajo izločki z neenakomerno velikostjo.

Deformacijsko inducirana tvorba AlN poteka v istem temperaturnem intervalu kot izločanje niobijevega karbonitrida, poteka v avstenitu podobne sestave in pri tem nastajajo izločki s podobno velikostjo. Zato lahko predpostavljamo, da so zakonitosti podobne. To potrjujejo razpoložljivi izsledki o izločanju AlN v jeklu, ki je bilo valjano z enim vtikom ali deformirano z vrtenjem. V poslednjem delu ugotavljamo, kot smo že omenili, da je količina AlN, ki nastane zaradi deformacijsko inducirane tvorbe AlN, sorazmerna s številom vrtiljav, torej s časom, ko je jeklo v deformiranem stanju in da AlN nastaja v časovnem presledku, ko v nedeformiranem jeklu ni zaznani nobenega izločanja. Nadalje kaže slika 3, da se izloča med valjanjem mnogo več AlN v jeklu, kjer se med valjanjem hitreje tvori tudi niobijev karbonitrid. To je očitno dokaz, da zaviranje ali zaustavitev rekristalizacije avstenita med vtiki močno poveča hitrost izločanja obeh disperzoidnih faz.

Pri segrevanju, s katerim želimo po valjanju odkriti avstenitna zrna, se hitro izloči večina aluminijevega nitrida, ki je ostal v trdni raztopini po valjanju. Topnost AlN v avstenitu pri 920°C v jeklu z 0,02 % Al je le 0,0024 %, kar je manj od 10 % teoretične količine nitrida v jeklih. Kali izločkov nastanejo pri ohlajanju jekla po valjanju in pri ogrevanju na temperaturo normalizacije, zato je precipitacija hitra in nastajajo drobni in enakomerno porazdeljeni izločki. Pri temperaturi segrevanja končno dobimo neenakomerno porazdelitev izločkov AlN, pri čemer so izločki večji na



Slika 13

Pov. 40 ×: Jeklo z 0,037 Al valjano pri različnih temperaturah po segrevanju 1 uro pri 920° C in kontroliranem ohlajanju.

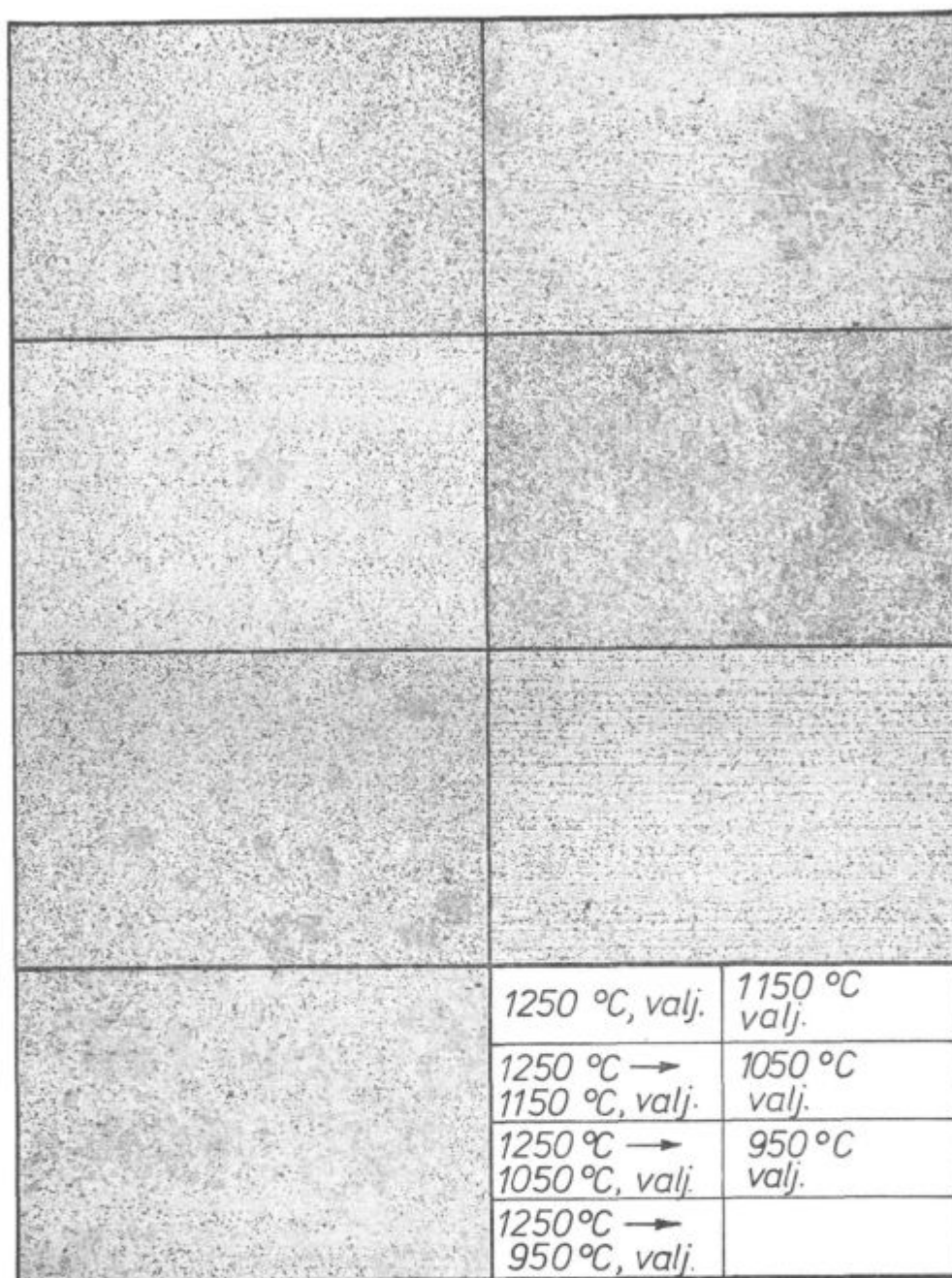
Fig. 13

Magn. 40 ×: Steel with 0.037 Al rolled at various temperatures after annealing 1 hour at 920° C and controlled cooling.

mestih, kjer je avstenit počasneje rekristaliziral pri vročem valjanju, in manjši tam, kjer je jeklo po valjanju ohranilo v raztopini pretežni del AlN.

Pri isti vsebnosti AlN v jeklu je temperatura hitre rasti AZ odvisna od velikosti in medsebojne oddaljenosti precipitativ (3). Velja, da večji precipitativi ustrezajo večjim AZ in nižji temperaturi začetka hitre rasti posamičnih AZ. Zato lahko pričakujemo v področjih, kjer so večji izločki AlN, v povprečju večja AZ, ki lahko dalje rastejo pri nižji temperaturi, kot predvidena teorija (3).

Vpliv temperature valjanja na enakomernost AZ zato lahko razlagamo s prisotnostjo mest z različno velikimi izločki AlN v jeklu, ki je segreto na temperaturo avstenitizacije. Razlog za to nenakomernost precipitativ, to smo že omenili, je deformacijsko inducirana tvorba AlN med valjanjem jekla pri temperaturi nestabilnosti trdne raztopine AlN v avstenitu. Število AZ, ki pri avstenitizaciji zrastejo, je večje pri nižji temperaturi valjanja zato, ker je pri valjanju tedaj večje število zrn avstenita, ki med vtiki ne rekristalizirajo.



Slika 14

Pov. 40 ×: Jeklo z 0,037 Al valjano pri različnih temperaturah po segrevanju 1 uro pri 950° C in kontrolirani ohladitvi.

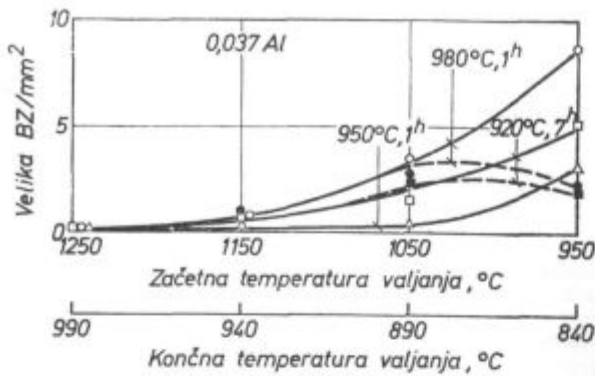
Fig. 14

Magn. 40 ×: Steel with 0.037 Al rolled at various temperatures after annealing 1 hour at 950° C and controlled cooling.

Mehanizem rasti AZ predpisuje, da je število zrastleh zrn pri določeni temperaturi in enaki velikosti izločkov tem večje, čim manj je AlN v jeklu. Zadrževanje avstenitnih mej je namreč tem bolj trdno, čim večje je število izločkov, oz. čim manjši sta njihova velikost in medsebojna oddaljenost. Ko podaljšamo segrevanje pri določeni temperaturi, rastejo AZ zato, ker zrastejo precipitanti in razdalja med njimi. Enako se dogaja, ko temperaturo dvignemo. To je razlaga, zakaj rasti zrn v jeklu, bogatem z aluminijem ni bilo pri 1-urnem

segrevanju do 920° C, ampak šele pri podaljšanju segrevanja na 8 ur ali pa pri višji temperaturi.

Predlagana razlaga vpliva temperature valjanja na velikost AZ se dobro ujema z empirijskimi dognanji v tem delu, pa tudi s podatki, ki jih lahko razberemo iz dosegljivih virov, če upoštevamo jeklo, ki je bilo pred valjanjem segreto nad temperaturo 1250° C, torej nad temperaturo popolne topnosti AlN v avstenitu. Na prvi pogled razlaga ne drži za primer jekla, ki je bilo pred valjanjem



Slika 15

Jeklo z 0,037 Al. Vpliv temperature valjanja na število velikih zrn bajnita (BZ) po žarjenju pri različnih temperaturah in kontrolirani ohladitvi.

Fig. 15

Steel with 0.037 Al. Influence of rolling temperature on the number of coarse bainite grains (BZ) after annealing at various temperatures and controlled cooling.

segreto na nižje temperature, do 1050° C. V tem primeru namreč velikost zrn raste, ko se temperatura segrevanja pred valjanjem dvigne od 950 na 1050° C in se znova zmanjša, ko se temperatura dvigne na 1150° C. Protislovje pa je le navidezno. Upoštevati moramo namreč dva dejavnika: količino AlN, ki se pri segrevanju raztopi v avstenitu, kot merilo količine AlN, ki se pri valjanju nato izloči, in vpliv neraztopljenih izločkov AlN na deformacijsko inducirano tvorbo AlN med valjanjem ter na tvorbo izločkov pri segrevanju, s katerim želimo določiti velikost avstenitnih zrn.

Neraztopljeni izločki AlN znižujejo temperaturo rasti AZ v primerjavi z izločki, ki nastanejo pri temperaturi, pri kateri želimo določiti velikost AZ (3). To je kvalitativno potrdilo za predlagano razlago vpliva temperature valjanja na velikost AZ. V celoti velja, da kombiniran učinek več dejavnikov ustvari izločevalno strukturo valjanega jekla, ki je nagnjena k rasti posamičnih zrn avstenita, če se valjanje jekla začne pod temperaturo popolne topnosti AlN v avstenitu ali če je valjanje sprožila deformacijska tvorba AlN.

SKLEP

Valjanje jekla v temperaturnem intervalu nestabilnosti trdne raztopine AlN v avstenitu je vzrok za deformacijsko inducirano izločanje AlN. To ustvarja v jeklu nagnjenost k rasti avstenitnih zrn pri segrevanju, s katerim želimo odkriti avstenitna zrna. Če je pred valjanjem jeklo segreto na temperaturo, pri kateri se ves AlN raztopi v avste-

nitru, se poveča število avstenitnih zrn tem bolj, čim nižja je temperatura valjanja. Vpliv temperature valjanja na rast avstenitnih zrn smo opazili v jeklih, bogatih in siromašnih z aluminijem, vendar je temperatura začetka rasti posameznih AZ nižja v jeklih z manj aluminija zaradi tega, ker je manjši zadrževalen vpliv izločkov na premikanje avstenitnih mej v teh jeklih.

Predlagamo razlago vpliva temperature valjanja na rast avstenitnih zrn, ki sloni na predpostavki, da valjanje in naslednje ogrevanje za odkrivanje avstenitnih zrn ustvarita v jeklu disperzijo izločkov AlN z različno velikostjo. Večji izločki so tam, kjer so avstenitna zrna med zaporednimi valjalniškimi vtiki počasneje rekristalizirala ali celo niso rekristalizirala, in manjši tam, kjer je avstenit po deformaciji hitro rekristaliziral. Na mestih, kjer so izločki aluminijevega nitrda večji, avstenitna zrna pri ponovnem segrevanju zrastejo na večjo velikost, zato ker je zadrževalni vpliv izločkov na avstenitne meje nasprotno sorazmeren njihovi velikosti.

Izsledki iz tega dela kažejo, da je temperatura valjanja jekla nezanemarljiv tehnološki dejavnik, če sta velikost in enakomernost zrn avstenita med kriteriji za oceno kvalitete jekla.

Viri

1. P. König, W. Scholz in H. Ulmer: AE 1961, 32, 541.
2. K. J. Irvine, F. Pickering in T. Gladmann: JISI 1967, 205, 161.
3. T. Gladmann in F. Pickering: JISI 1967, 205, 653.
4. F. Vodopivec: JISI 1972, 210, 664.
5. F. Vodopivec: Met. Tech. 1974, 1, 151.
6. J. J. Jonas in I. Weiss: Met. Sci. 1979, 13, 238.
7. J. Irvine in T. N. Baker: Met. Sci. 1979, 13, 228.
8. I. Weiss in J. J. Jonas: Metal. Trans. A 1980, 11 A, 403.
9. M. J. Luton, R. Dorvel in R. A. Petković: Metall. Trans. A, 1980, 11 A, 411.
10. S. S. Hansen, J. B. Vander Sande in M. Cohen: Metall. Trans. A, 1980, 11 A, 387.
11. P. Eržen: Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, 1980.
12. H. F. Beeghly: Anal. Chem. 1949, 21, 1513.
13. A. Osojnik, T. Lavrič in F. Vodopivec: Železarski Zbornik, 1980, 14, 87.
14. F. Vodopivec, bo objavljeno.
15. M. Kmetič, F. Vodopivec in M. Gabrovšek: Železarski Zbornik, 1980, 14, 39.
16. F. Vodopivec in M. Gabrovšek: Härt. Techn. Mitt 1977, 32, 284.
17. F. Vodopivec in J. Megušar: Rudarsko Metalurški Zbornik, 1964, št. 3, 297.
18. V. Prešern in V. Macur: Žel. Zbornik 12, 1978, 17.
19. T. Tanaka in sodelavci: Microalloying 75, Union Carbide Corporation, 1977, 399.

ZUSAMMENFASSUNG

Stähle mit 0,16 % C, 1,2 % Mn, 1 % Cr und 0,011 bis 0,037 % Al sind in einem Temperaturintervall zwischen 1250 und 840° C in sechs Stichen ausgewalzt worden. Während dem Walzen ist nur wenig AlN ausgeschieden worden. Bei niedrigeren Temperaturen rekristallisieren während dem Walzen die einzelnen Austenitkörner nicht. Das ist die Ursache für ein heterogenes, Mikrogefüge des Stahles welcher nach dem Walzen an der Luft abkühlt. Bei niedriger Walztemperatur wird die Korngrösse kleiner, jedoch etwas mehr in Stählen mit höherem Aluminiumgehalt. Bei der Erniedrigung der Walztemperatur wird die Zahl der Austenitkörner, die bei der wiederholten Austenitbildung

nicht normal wachsen um so grösser, je weniger Aluminium enthält der Stahl. Im Stahl mit 0,011 und 0,017 % Al zeigt sich der Einfluss der Walztemperatur auf die Häufigkeit der überdurchschnittlich gewachsenen Austenitkörner schon bei kurzzeitiger Erwärmung bei normalen Einsatzhärtungstemperaturen und im Stahl mit höherem Aluminiumgehalt erst nach längerer Erwärmung, oder bei höheren Temperaturen. Die grössere Neigung zum abnormalen Austenitkornwachstum wegen der Walztemperatur wird durch die Ungleichmässigkeit im Prozess der Verformungsinduzierten Bildung von AlN während dem Walzen erklärt.

SUMMARY

Steel with 0.16 C, 1.2 Mn, 1 Cr and 0.011 to 0.037 Al was rolled in 6 passes in the interval 1250 to 840° C. Small amount of AlN precipitated during the rolling. At lower temperatures single austenite grains do not recrystallize during the rolling. It causes the heterogeneity of the microstructure of steel cooled in air after the rolling. Reduced rolling temperature reduces the grain size, the phenomenon is more pronounced in steel richer in aluminium. The reduced temperature increases the number of austenite grains which grow unnormally in re-austenitisation the more,

the lower is aluminium. In steel with 0.011 and 0.017 Al the influence of the rolling temperature on the frequency of coarsened austenite grains appears already after a short annealing at the normal carburising temperature, while it appears in steel with high aluminium only after a longer annealing and at higher temperatures. The increased propensity to unnormal growth of austenite grains due to the rolling temperature can be explained by the non-uniformity of AlN formation induced by the deformation during the rolling.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В темп-ом интервале между 1250 и 840° C была выполнена прокатка сталей, легированных с 0,16 C, 1,2 Mn, 1 Cr и 0,011 до 0,037 Al при применении 6-ти пропусков. Во время прокатки выделялась только незначительное количество AlN. При прокатки при более низких темп-ах рекристаллизация отдельных аустенитных зерен не происходит. Причина этого гетерогенность микроструктуры стали в случае, если охлаждение стали после прокатки происходило на воздухе.

При понижении темп-ры прокатки величина зерен уменьшается. При понижении темп-ры увеличивается число аустенитных зерен причем зёрна чрезмерно возрастают при последующей аусте-

нитизации тем более, если в стали меньше алюминия. В стали с содержанием 0,011 и 0,017 % алюминия выражается влияние темп-ры прокатки на учащение чрезмерно выращенных зерен аустенита уже при непродолжительном согревании при нормальных темп-ах цементации. В стали же с большим содержанием алюминия — лишь после продолжительного согревания или при более высоких темп-ах.

Повышение склонности к аномальному увеличению аустенитных зерен в связи с темп-ой прокатки можно объяснить как последствие неоднородности в процессе индуцированного образования AlN во время прокатки.