

O zadrževanju rekristalizacije avstenita pri vročem valjanju cementacijskih jekel v več vtikih pri padajoči temperaturi

UDK: 621.771:669.14.298.2
ASM/SLA: F 23, CN, M 5

F. Vodopivec, M. Kmetič in A. Rodič

1. UVOD

V normalnem procesu vročega valjanja jekla sledi deformaciji pred naslednjim vtikom rekristalizacija avstenita. Hitrost rekristalizacije jekla po vroči deformaciji je pri določeni temperaturi odvisna od velikosti avstenitnih zrn in od sestave jekla. Čim večja so avstenitna zrna (AZ), tem počasnejša je rekristalizacija^{1,2}. Od legirnih elementov najmočnejše zadržuje rekristalizacijo avstenita niobij^{3,4}, podoben, vendar bolj šibek vpliv ima tudi ogljik in mangan^{5,6,7}. Njun vpliv se pokaže pri nekoliko nižji temperaturi in raste počasneje kot vpliv niobija, ko se znižuje temperatura valjanja. Ko se ta temperatura znižuje, razpada tudi trdna raztopina disperzoidov v avstenitu in nastajajo drobni izločki, ki blokirajo migracijo mej avstenitnih zrn. Hitrost, mogoče pa tudi morfologija tvorbe izločkov, sta odvisni tudi od procesov izločanja deformacije energije. Ta kratek uvod pove, da prihaja pri vročem valjanju pri nižni temperaturi do spleta pojavov in dogajanj, ki so bolj zapleteni, kot med valjanjem s popolno rekristalizacijo avstenita med vtiki pri visoki temperaturi. V tem sestavku bomo razpravljali o dogajanjih med valjanjem pri temperaturah, ko med vtiki ni popolne rekristalizacije avstenita. Zanimal nas bo predvsem odgovor na vprašanje, zakaj posamična AZ, ki po prvem vtiku niso rekristalizirala, ne rekristalizirajo v nadaljevanju valjanja kljub temu, da raste njihova skupna deformacija, medtem ko po vsakem vtiku rekristalizira njihova okolica, ki je rekristalizirala po prvem vtiku.

2. EKSPERIMENTALNO DELO

V raziskavi smo uporabili več jekel s sestavo, kakršno vidimo v tabeli 1. Jekla za cementacijo smo izbrali zato, ker se v njih po ohladitvi na zraku s temperature konca valjanja dobro razloči mikrostruktura, ki je nastala iz avstenita, ki je med vtiki rekristaliziral, od mikrostrukture, ki je nastala iz avstenita, ki med vtiki ni rekristaliziral. Nekatera dognanja smo preverili tudi na

konstrukcijskih jeklih druge vrste⁷. Eno od jekel je bilo industrijsko zvaljano iz gredic 100 × 100 mm v palice z debelino 38 mm in nato v laboratoriju dalje v lamele z debelino 10 mm. Druga jekla smo zvaljali v 5 do 7 vtikih iz gredic 60 × 60 mm v lamele z debelino 14 mm. Deformacija na vtik je bila vedno nad 15 %, torej zadostna za rekristalizacijo avstenita, če je bilo med vtiki dovolj časa in je bila temperatura zadostna. Presledek med vtiki je bil 8 do 10 sekund. Temperatura valjanja je bila med 1250 in 750 °C. Začetno temperaturo valjanja smo dosegli tako, da smo gredico segreti na 1250 ali 1200 °C in jo nato zvaljali ali pa smo začeli valjati po ohladitvi na zraku na nižjo temperaturo. S tem smo dosegli, da je bila v istem jeklu vedno enaka začetna velikost AZ. Po valjanju smo jekla ohladili na zraku. Iz plošč smo pripravili bruske za optično mikroskopijo, preizkušance v smeri valjanja za preverjanje mehanskih lastnosti v valjanem in v normaliziranem stanju in ostružke za določitev količine AlN in NbC po mokri kemijski metodi⁸.

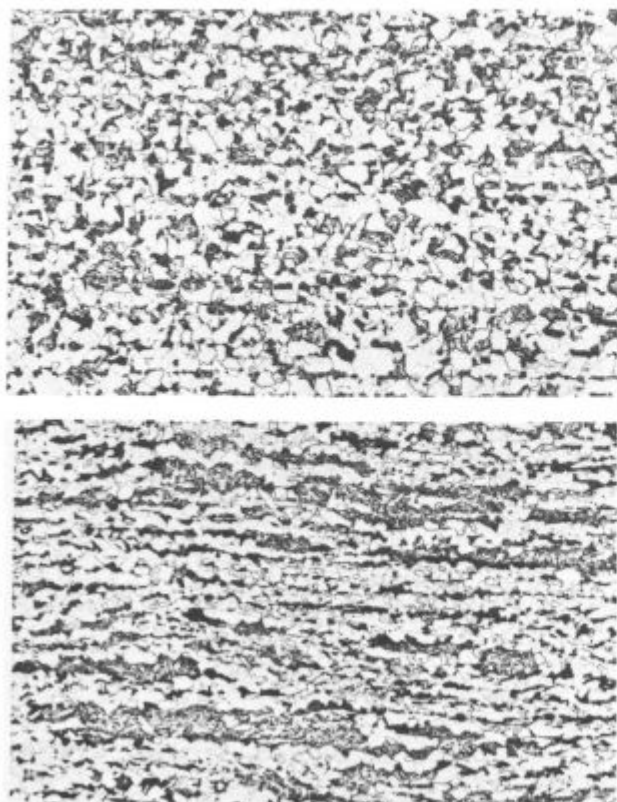
3. REZULTATI, OPIS IN RAZPRAVA

3.1. Mikrostruktura po valjanju

Na slikah 1 in 2 je prikazana mikrostruktura dveh jekel, zvaljanih pri različnih temperaturah. Evolucija mikrostrukture v odvisnosti od temperature valjanja je v obeh jeklih podobna, morfologija po ohladitvi na zraku pa je nekoliko drugačna zaradi različne kaljivosti. Pri visoki temperaturi valjanja je mikrostruktura iz enakomernih poligonalnih zrn ferita, perlita (in bainita). Ta mikrostruktura je nastala iz poligonalnih in enakomernih zrn avstenita, torej iz avstenita, ki je med valjanjem rekristaliziral. Pri nizki temperaturi valjanja je mikrostruktura iz matriksa manjših zrn istih komponent. V legiranem jeklu najdemo še podolgovata bajnitna zrna, ki so mnogo večja kot zrna v matriksu, v nelegiranem jeklu pa lečaste skupke zrn ferita in perlita, ki po obliki in velikosti odstopajo od zrn v matriksu. Lečasti

Tabela 1: Sestava jekel

Vrsta	Element v %										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	Al	N
Č. 4320 A	0,16	1,1	0,29	0,014	0,03	0,95	0,06	0,18	—	0,011	0,009
Č. 4320 B	0,17	1,22	0,36	0,014	0,04	0,96	0,07	0,15	—	0,019	0,0097
Č. 4320 C	0,16	1,23	0,26	0,01	0,01	1,01	0,04	0,15	—	0,037	0,01
Č. 4320 F	0,16	1,10	0,25	0,018	0,026	0,98	0,06	0,13	—	0,025	0,0095
Č. 1221 G	0,14	0,49	0,19	0,019	0,028	0,12	0,03	0,10	—	0,025	0,009
Č. 4320 H	0,14	1,0	0,26	0,015	0,019	0,85	nd	nd	0,02	0,002	0,0078



Slika 1

pov. 100 × Mikrostruktura jekla F, izvaljanega pri dveh temperaturah. Zgoraj: zač. 1180 °C — konec 997 °C, spodaj: zač. 820 °C — konec 753 °C. Jeklo je bilo pred začetkom valjanja segrevano pri 1200 °C.

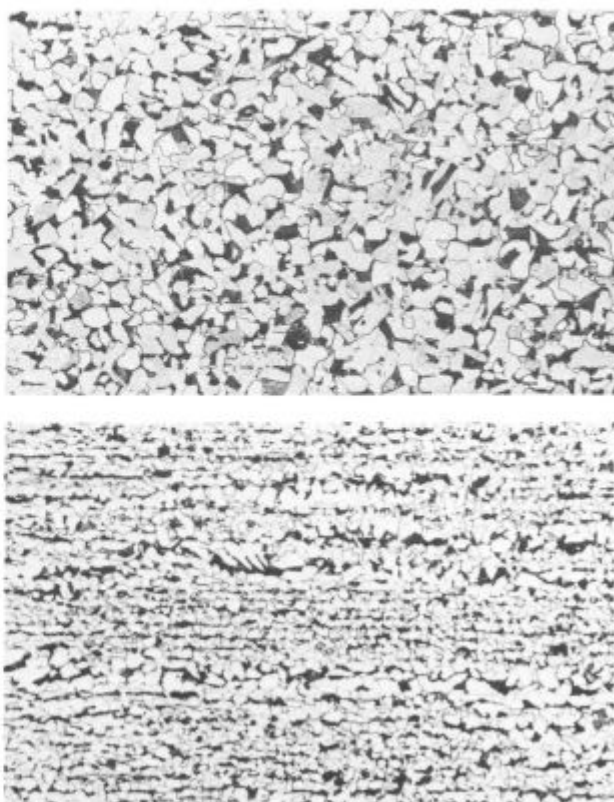
Fig. 1

Magn. 100 × Microstructure of steel F, rolled at two temperatures. Above: start 1180 °C — end 997 °C, below: start 820 °C — end 753 °C. Before rolling, steel was heated to 1200 °C.

skupki in podolgovata zrna bajnita so nastala iz avstenitnih zrn, ki med valjanjem niso rekristalizirala^{6,7,9,10,11}. Poligonalna in enakomerna zrna v matriksu pa so nastala iz med vtiki rekristaliziranega avstenita, enako kot pri visoki temperaturi valjanja.

V jeklu, ki je bilo po valjanju ohlajeno na zraku, enakomerno pada velikost zrn v mikrostrukturi, nastali iz rekristaliziranega avstenita, ko se znižuje temperatura valjanja (slika 3). Na podoben način se seveda zmanjšuje tudi velikost rekristaliziranih avstenitnih zrn, ko pada temperatura valjanja. V cementacijskem jeklu je intercepcijska dolžina za avstenitna zrna srednje velikosti približno dvakrat večja kot intercepcijska dolžina za mikrostrukturo iz ferita in perlita, ki iz njih nastane pri ohlajanju, torej so avstenitna zrna ca 4 krat večja kot zrna ferita in perlita. To potrjuje tudi slika 12.

Podobno mikrostrukturo dobimo tudi pri industrijskem valjanju pri nižji temperaturi. Na slikah 4 in 5 vidimo mikrostrukturo jekla H, ki je bilo industrijsko zvaljano iz gredice 100 × 100 mm, in mikrostrukturo istega jekla, ki je bilo zvaljano v laboratoriju. Pri visoki temperaturi valjanja je mikrostruktura v obeh primerih iz enakomernih zrn, pri nižji temperaturi valjanja pa se vidijo dokazi za nepopolno rekristalizacijo avstenita med vtiki. V prvem primeru so iz nerekrizaliziranih zrn avstenita nastali pri počasnem ohlajanju debelih palic po

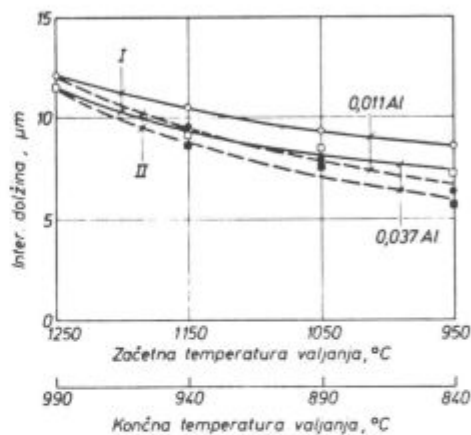


Slika 2

pov. 100 × Mikrostruktura jekla G, izvaljanega pri istih temperaturah kot na sliki 1.

Fig. 2

Magn. 100 ×. Microstructure of steel G, rolled at the same temperatures as in Fig. 1

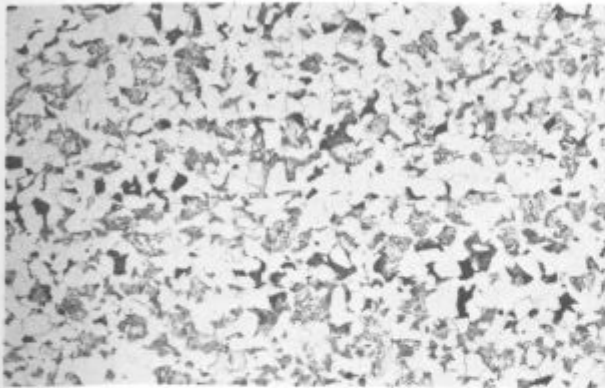


Slika 3

Vpliv temperature valjanja na velikost zrn v jeklih A in C. Polna črta velja za jekli, ki sta bili segreti na 1250 °C in izvaljani z začetkom pri tej temperaturi ali po ohlajitvi na nižje začetne temperature, prekinjena črta pa za jekli, ki sta bili segreti neposredno na temperaturo valjanja.

Fig. 3

Influence of the rolling temperature on the grain size in steel A and C. Full line is valid for steel heated to 1250 °C and rolled from that temperature or cooled to lower starting temperatures, dashed line for steel heated directly to the rolling temperature

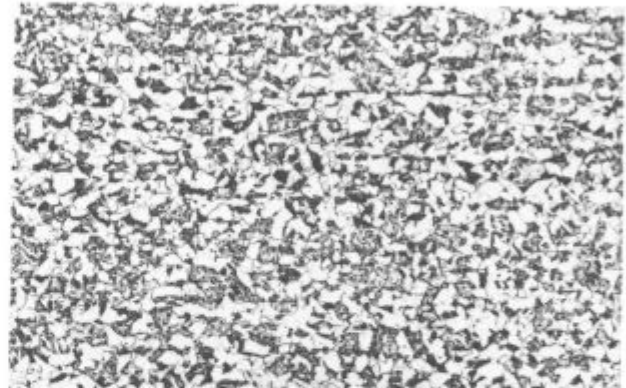


Slika 4

pov. 100 ×. Mikrostruktura v industrijsko izvaljanem jeklu H. Zgoraj: zač. 1150 °C — konec 980 °C, spodaj: zač. 800 °C — konec 800 °C.

Fig. 4

Magn. 100 ×. Microstructure in the industrially rolled steel H. Above: start 1150 °C — end 980 °C, below: start 800 °C — end 800 °C

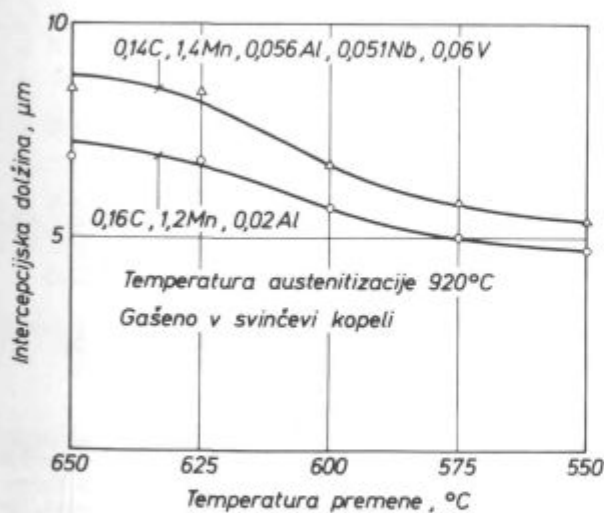


Slika 5

pov. 100 ×. Mikrostruktura jekla H, ki je bilo izvaljano v laboratoriju. Zgoraj: zač. 1144 °C — konec 946 °C, spodaj: zač. 954 °C — konec 823 °C.

Fig. 5

Magn. 100 ×. Microstructure of steel H, rolled in the laboratory. Above: start 1144 °C — end 946 °C, below: start 954 °C — end 823 °C



Slika 6

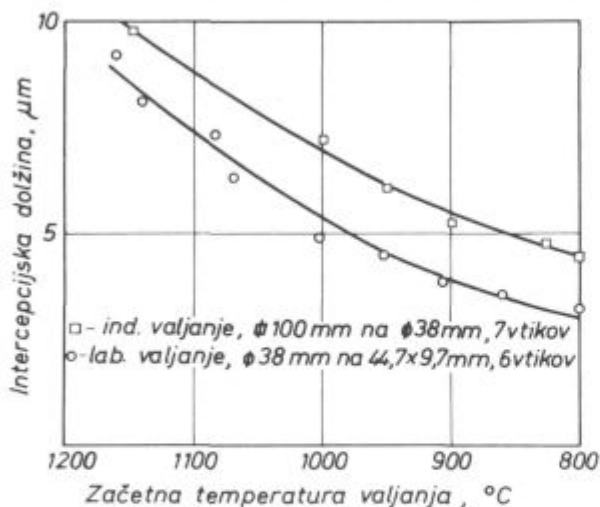
Vpliv temperature premene na velikost zrn ferita in perlita v dveh konstrukcijskih jeklih.

Fig. 6

Influence of the transformation temperature on the grain size of ferrite and pearlite in two structural steel

valjanju skupki zrn ferita in perlita, ki so večja kot v okolici, v drugem primeru pa je pri večji hitrosti ohlajanja po valjanju prišlo do premene nerekrystaliziranih zrn avstenita v velika podolgovata bainitna zrna. Nižja temperatura premene ustvari v istem jeklu manjša zrna ferita in perlita (slika 6). Pri hitrejšem ohlajanju po valjanju se premena izvrši pri nižji temperaturi. To je vzrok, da so zrna drobnejša, če je bilo isto jeklo zvaljano v laboratoriju, kot če je bilo industrijsko zvaljano (slika 7). Enkrat je bil namreč valjanec lamela z debelino 10 mm, drugič pa okrogla palica z debelino 38 mm. V obeh primerih se velikost na enak način zmanjšuje, ko se znižuje temperatura valjanja. S slike 7 lahko sklepamo, da veljajo za laboratorijsko in za industrijsko valjanje enake zakonitosti, zato je realna primerjava nastalih mikrostruktur.

Lahko torej ugotovimo, da valjanje pri nizki temperaturi ustvarja zaradi nepopolne rekristalizacije med vtiki dvojno mikrostrukturo avstenita. Ta mikrostruktura se v zvaljanem jeklu pokaže v dvojnosti v obliki in v velikosti zrn ferita, perlita in bainita. Na sliki 8 vidimo, da so lastnosti jekla neodvisne od temperature valjanja v normaliziranem in v valjanem stanju. Prelomna površina valjanega jekla je ovalna pri nizki in okrogla pri visoki končni temperaturi valjanja. Dolga os ovala je v ravnini valjanja. Prelomna površina postane ovalna, torej postane razmerje med kratko in dolgo osjo ovala manjše od 1 prav pri temperaturi, ko se v



Slika 7

Jeklo H. Vpliv začetne temperature valjanja na industrijski valjarni in v laboratoriju na velikost zrn. Jeklo je bilo ohlajeno na zraku po končanem valjanju.

Fig. 7

Steel H. Influence of the starting rolling temperature in an industrial mill and in the laboratory on the grain size. Steel was cooled in air after the completed rolling

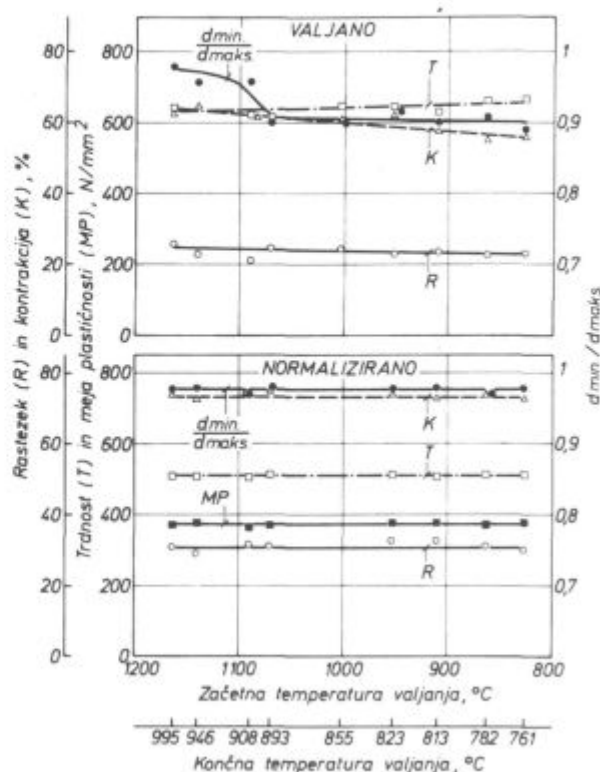
mikrostrukturi valjanega jekla pokažejo sploščena velika zrna bainita.

Deformacijska anizotropija se torej pojavi v jeklu, ohlajenem s temperature valjanja, tedaj, ko rekristalizacija avstenita med valjanjem ni popolna, podobno kot v konstrukcijskih jeklih⁷.

3.2. Nepopolna rekristalizacija avstenita med vtiki

Pri temperaturah vročega valjanja se močno zmanjšuje topnost AlN in NbC v avstenitu. Vzporedno z odpravo deformacijske energije se iz avstenita izločata zato tudi obe disperzoidni fazi. Velja, da sta hitrosti izločanja in rasti izločkov mnogo hitrejši med deformacijo in v nerekrystaliziranem avstenitu, kot v rekristaliziranem ali v nedeformiranem avstenitu^{13,14}. Na sliki 9 vidimo, da je razmerje debelina proti dolžini za velika podolgovata bainitna zrna v laboratorijsko zvaljanem jeklu neodvisno od temperature valjanja. V mejah natančne določitve v mikroskopu se ujema s celotnim podaljškom jekla pri valjanju. To pomeni, da so bainitna zrna nastala iz zrn avstenita, ki niso rekristalizirala že po prvem vtiku. Ni torej upravičena domneva, da ni rekristalizacije v nadaljevanju valjanja, ker so nerekrystalizirana zrna trša in zato sprejemajo manjšo deformacijo kot rekristalizirana okolica¹⁰, kljub temu da sprememba relativne plastičnosti sulfidnih vključkov med valjanjem kaže, da se zaradi nepopolne rekristalizacije poveča trdota avstenita med valjanjem⁶.

Velja torej, da avstenitna zrna, ki ne rekristalizirajo po prvem vtiku, ne rekristalizirajo tudi v nadaljevanju valjanja, kljub temu da sprejemajo več in več deformacijske energije. To se dogaja vsaj nekaj časa, medtem ko v njihovi okolici po vsakem vtiku ponovno rekristalizira avstenit, ki je že rekristaliziral po prvem vtiku. Vzrok, zakaj med prvim in drugim vtikom rekristalizira samo del avstenitnih zrn, je hitrejši proces rekristalizacije manjših zrn^{1,2}. Ker je med prvim in drugim vtikom na

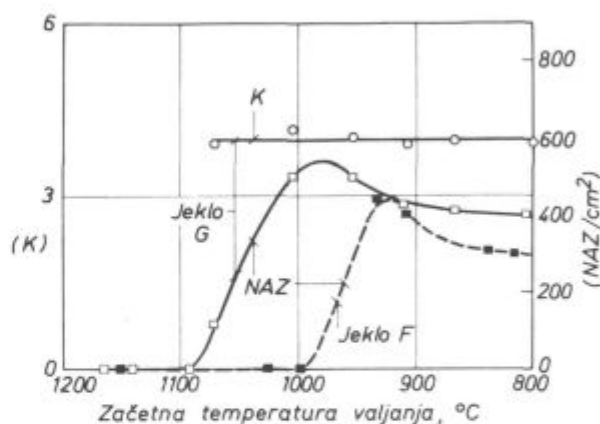


Slika 8

Jeklo H. Odvisnost med temperaturo valjanja v laboratoriju in lastnostmi jekla v valjanem in v normaliziranem stanju. T — raztržna trdnost, MP — meja plastičnosti, R — raztezek, K — kontrakcija, dmin./dmaks. — razmerje osi eliptičnega preloma.

Fig. 8

Steel H. Relationship between the rolling temperature in the laboratory and the properties of steel, as rolled and as normalized. T — tensile strength, MP — yield point, R — elongation, K — contraction, dmin./dmaks. — axis ratio of elliptical fracture



Slika 9

Jekli G in F. Odvisnosti med temperaturo valjanja in razmerjem med dolžino in debelino podolgovatih bainitnih zrn (K) in številom teh zrn na enoto površine vzdolžnega preseka valjanca. Podaljšek jekla F pri valjanju: K ≈ 4, podaljšek jekla G pa K ≈ 3,8.

Fig. 9

Steel G and F. Relationships between the rolling temperature and the length/thickness ratio of elongated bainite grains (K), and the number of those grains per unit area of the longitudinal rolling cross section. Elongation of steel F in rolling: K ≈ 4, elongation of steel G: K ≈ 3,8

voljo le omejen čas, ostaja nerekrystalizirano v nekem jeklu tem več avstenita, čim večja je začetna povprečna velikost zrn in čim nižja je temperatura. Hitrost rekrystalizacije namreč pada, ko se znižuje temperatura^{1,2,4}.

Na sliki 9 vidimo, da v dveh jeklih, eno ima kot disperzoid AlN, drugo pa NbC, število zrn avstenita, ki med valjanjem niso rekrystalizirala, hitro zraste pod neko začetno temperaturo do določene velikosti, nato pa celo rahlo pada, ko se dalje znižuje temperatura valjanja. Važna razlika med jekloma na sliki je v tem, da se v jeklu brez niobija nerekrystalizirana zrna avstenita pojavijo pri višji začetni temperaturi valjanja.

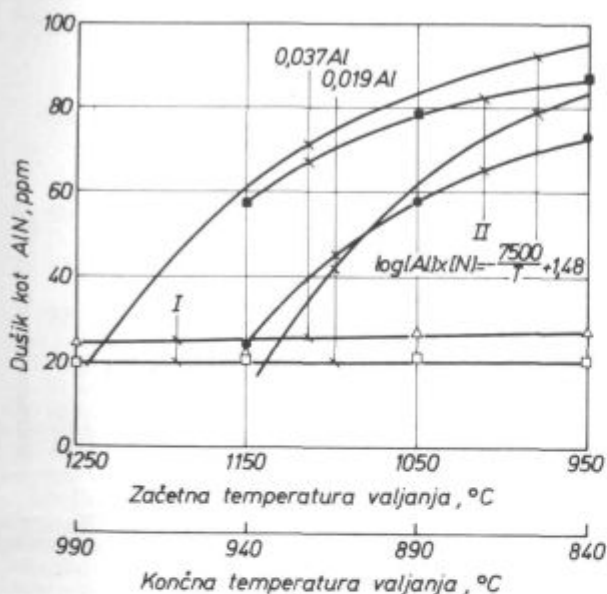
Če hočemo odvisnost na sliki 9 razumeti, si moramo biti najprej na jasnem o tem, kaj se med valjanjem dogaja z obema disperzoidoma, AlN in NbC. Kljub temu da zaradi deformacijsko inducirane precipitacije nastajata oba disperzoidea med valjanjem hitreje kot med ohlajanjem brez deformacije, nastane med valjanjem cementacijskega jekla razmeroma malo AlN. Odvisnost med temperaturo valjanja in količino AlN na sliki 10 je zelo podobna kot v konstrukcijskih jeklih brez niobija⁷. V področju temperature, ko se pojavijo nerekrystalizirana zrna avstenita med valjanjem, ni spremembe v količini AlN. Primerjava slik 9 in 10 pove, da izločki AlN, ki nastajajo med valjanjem, ne vplivajo zaznavno na rekrystalizacijo avstenita med valjanjem, pač pa ti izločki, sodeč po viru 16, zavirajo rast rekrystaliziranih zrn avstenita med valjanjem.

Odvisnosti med številom nerekrystaliziranih zrn avstenita med valjanjem in temperaturo pri jeklu F ne moremo razlagati, kot da se zaradi tvorbe AlN med valjanjem dogodi nekaj, kar najprej močno, nato pa šibkeje vpliva na rekrystalizacijo avstenita. Zaviranje rekrystalizacije

je najučinkovitejše, ko se temperatura začetka valjanja zniža v zelo ozkem intervalu, kjer ni, kot je že omenjeno, nobenega preloma odvisnosti med temperaturo valjanja in količino AlN. Drži torej, da ni povezave med pojavom nepopolne rekrystalizacije in tvorbo AlN. Razlaga nepopolne rekrystalizacije je torej v soodvisnosti med temperaturo in procesi odprave deformacijske energije iz kovine.

Pred rekrystalizacijo se vedno izvrši poprava, ki je podobno, kot velja za rekrystalizacijo, hitrejša, torej bolj učinkovita pri višji temperaturi. Pri nižji temperaturi je zato kopičenje deformacijske energije v deformiranih zrnih večje. To povzroči po več vtikih tolikšno povečanje gonilne sile za rekrystalizacijo, da se po enem od vmesnih vtikov rekrystalizirajo tudi nekatera zrna, ki po prvem vtiku niso rekrystalizirala. To razlaga, zakaj število nerekrystaliziranih zrn ne raste več, ko se zniža temperatura valjanja pod določeni nivo.

Dogajanja so podobna v jeklu H, ki je mikrolegirano z niobijem, vendar se rekrystalizacija zavre že pri višji temperaturi začetka valjanja. Vzrok za temperaturni zamik je zadrževalen vpliv niobija v trdni raztopini na rekrystalizacijo avstenita. V temperaturnem intervalu, ko se pojavlja med valjanjem nerekrystalizirani avstenit, je hitrejša tvorba NbC (slika 11). Niobij se izloča iz trdne raztopine, s tem se zmanjšuje učinkovitost zadrževanja rekrystalizacije in razmere za rekrystalizacijo se bližajo tistim, ki veljajo za jeklo z enako osnovno sestavo.

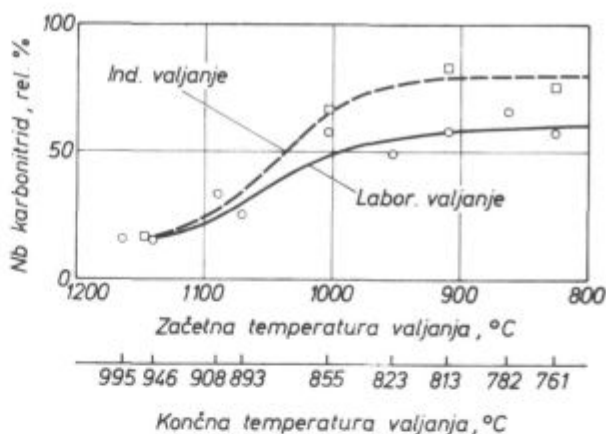


Slika 10

Vpliv temperature valjanja na količino AlN v jeklih B in C. I — jekla izvaljana po segrevanju na 1250 °C z začetkom pri tej temperaturi ali z po ohlaiditvi na nižje označene temperature, II — jekla izvaljana po segrevanju na označene začetne temperature.

Fig. 10

Influence of the rolling temperature on the amount of AlN in steel B and C. I — steel rolled after heating to 1250 °C with start at this temperature or at a lower marked temperature after cooling, II — steel rolled after heating to the marked starting temperature



Slika 11

Odvisnost med temperaturo valjanja in deležem niobija, ki se vezal v karbonitrid med valjanjem jekla. Spodnje merilo velja za končno temperaturo valjanja v laboratoriju.

Fig. 11

Relationship between the rolling temperature and the niobium fraction bound into carbonitride during rolling. Bottom scale is valid for the final rolling temperature in the laboratory

Lahko ugotovimo, da je v jeklu brez niobija odvisnost med temperaturo in številom nerekrystaliziranih zrn avstenita med vtiki funkcija odvisnosti temperature valjanja — procesi izločanja deformacijske energije iz avstenita, v jeklu z niobijem pa se temu pridružuje še vpliv siromašenja avstenita z niobijem v trdni raztopini na račun tvorbe NbC med valjanjem. Sodeč po slikah 9 in 11, se odpornost proti rekrystalizaciji avstenita približuje tisti, ki je značilna za osnovno sestavo jekla, ko se količina niobija v trdni raztopini zmanjša na okoli 0,005 %.

3.3. Mehanizem stabilizacije zrn nerekrystaliziranega avstenita med valjanjem

Pri premeni deformiranih zrn avstenita nastajajo drobnejša zrna ferita in perlita, kot pri premeni enako velikih rekristaliziranih ali nedeformiranih zrn avstenita¹⁷. Hitrejšo premeno dobimo zaradi hitrejše nukleacije, ki jo pospeši deformacijska energija v kovini¹⁹. V preiskanih jeklih se to ni pokazalo, ker je bila začetna velikostna razlika prevelika, da bi se lahko kompenzirala s hitrejšim kaljenjem ferita. Na osnovi razprave je mogoče oceniti, da je bila razlika v velikosti po končanem valjanju med rekristaliziranimi in nerekrystaliziranimi zrn avstenita okoli 5 razredov, po premeni pa je razlika le pribl. 1 razred po ASTM. Zaradi hitrejše premene se je razlika torej zmanjšala za okoli 4 razrede ASTM. To sklepanje je seveda čisto kvalitativno, saj je vprašljivo, ali se lahko pripiše določen velikostni razred zrn, ki so zaradi deformacije močno sploščena. Opažovanje v TE mikroskopu je na ekstrakcijskih replikah pokazalo, da so izločki neenakomerno porazdeljeni; ponekod jih je v feritu več, drugod pa manj. Ker je proces izločanja hitrejši v deformiranem avstenitu, sklepamo, da najdemo izločke predvsem tam, kjer avstenit med valjanjem ni rekristaliziral, zato odvisnost na sliki 10 kaže le neko povprečno sliko procesa izločanja. Prisotnost izločkov ni znak zaviranja rekristalizacije, nastali so prav zato, ker rekristalizacije ni bilo, so torej posledica, ne pa vzrok.

Viri^{10,11} navajajo dve razlagi za obstojnost nerekrystaliziranega avstenita med valjanjem. Ena je, da rekristalizacije ni zato, ker je že deformirani avstenit trši od rekristalizirane okolice in zato sprejema manjšo deformacijsko energijo kot okolica, ko se valjanje nadaljuje. To razlago smo že ovrgli. Druga razlaga je, da rekristalizacijo zavirajo izločki disperzoidov. Dva razloga kaže, da tudi ta razlaga ne drži. Omenili smo že, da so izločki posledica, zato ne morejo biti vzrok zadrževanja rekristalizacije. Primerjava slik 9, 10 in 11 pa pokaže, da je nerekrystaliziranih zrn avstenita manj pri nižji temperaturi, ko je v jeklu več izločkov AlN in NbC.

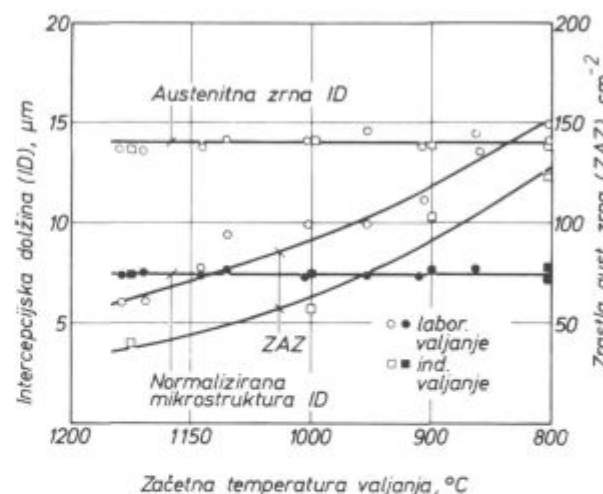
Zaključke te raziskave in literaturne podatke lahko vskladimo z naslednjo razlago stabilizacije nerekrystaliziranega avstenita med valjanjem jekla. Med prvim in drugim vtikom največja zrna ne rekristalizirajo zato, ker je med obema vtikoma prekratek presledek, in zato, ker je rekristalizacija takih zrn počasnejša. Temperatura, pri kateri je rekristalizacija med prvim in drugim vtikom nepopolna, je odvisna od sestave jekla. Manjša zrna avstenita rekristalizirajo med vtikoma v nova zrna, katerih velikost se zmanjšuje, ko se niža temperatura valjanja. Po drugem vtiku avstenit, ki je rekristaliziral po prvem vtiku, znova rekristalizira. Rekristalizacija je lahko zelo hitra, če pospeševalen vpliv zmanjšanje velikosti zrn prevlada nad zadrževalnim vplivom temperature. V zrnih, kjer po prvem vtiku ni bilo rekristalizacije, te ni tudi po drugem vtiku, kljub povečani skupni deformaciji. Logična je predpostavka, da poprava zniža nivo notranje energije kovine pod nivo, ki je potreben, da bi se rekristalizacija lahko izvršila v presledku časa med vtikoma. Popravo spremlja nastanek poligonizirane strukture s številnimi podmejami znotraj enega zrna avstenita. Mrežne napake, ki jih je ustvarila deformacija, se hitro potopijo v teh podmejah, saj so difuzijske poti kratke znotraj istega sploščene zrna avstenita. Ta proces se ponavlja toliko časa, dokler poprava v deformiranih zrnih avstenita drži nivo notranje energije pod nivojem, ki je potreben za rekristalizacijo. Ko pa je pri še nižji temperaturi počasnejša tudi poprava, se po vsa-

kem vtiku v sploščenih zrnih deformacijska energija kopiči do meje, da med valjanjem v posamičnih zrnih preseže nivo gonilne sile za rekristalizacijo in taka zrna rekristalizirajo. Proces se ponavlja po vsakem vtiku. Temperatura nepopolne rekristalizacije je odvisna od sestave jekla, ker legirni elementi zavirajo proces izločanja deformacijske energije iz avstenita.

Kljub temu, da se proces poprave ponavlja po vsakem vtiku in je zato poligonizacijska substruktura v deformiranih zrnih vse bolj urejena, ostajajo sploščena avstenitna zrna individualne celote. Zato se lahko pri primerni hitrosti ohlajanja spremenijo kot celota v bainitna zrna.

3.4. Mikrostruktura po normalizaciji

Ohranjanje deformacijske energije v jeklu zaradi nepopolne rekristalizacije avstenita med valjanjem v več vtikih ustvari neenakomerne pogoje za nastajanje in rast izločkov disperzoidov. Ti so večji v avstenitnih zrnih, ki med valjanjem niso rekristalizirala. To je vzrok, da je v jeklu po avstenitizaciji tem več anormalno zrastleh avstenitnih zrn, čim nižja je temperatura valjanja (slika 12). Pri tem pa je povprečna velikost zrn v enakomernem matriksu neodvisna od temperature valjanja. Pri ohlajanju s temperature avstenitizacije lahko velika avstenitna zrna premenijo v bainit ali skupine večjih zrn ferita in perlita, zato je mikrostruktura normaliziranega jekla tem bolj neenakomerna, čim nižja je temperatura valjanja. Neenakomernost te vrste pa se pojavlja le v jeklih z malo disperzoidne faze, v preiskovanih jeklih za cementacijo še pri 0,02 % Al, ni pa je več pri 0,04 % Al¹⁹. V jeklih, ki so bolj odporna proti rasti avstenitnih zrn kot krom-manganovo jeklo za cementacijo, nenormalne rasti zrn avstenita zaradi nizke temperature valjanja ni tudi pri okoli 0,02 % Al¹⁸.



Slika 12

Odvisnost med začetno temperaturo valjanja jekla H na industrijski valjarni in v laboratoriju in velikostjo avstenitnih zrn pri ponovni avstenitizaciji pri 920 °C, velikostjo zrn po normalizaciji in deležem abnormally zrastleh avstenitnih zrn na enoto površine (ZAZ).

Fig. 12

Relationship between the starting rolling temperature for steel H in an industrial mill and in the laboratory, and the austenite grain size after the repeated austenitising at 920 °C, grain size after normalizing, and the fraction of abnormally grown austenite grains per unit area (ZAZ)

4. POVZETEK IN SKLEPI

Krom-manganovo in ogljikovo jeklo za cementacijo smo v več vtikih izvaljali pri temperaturah med 1250 in 750°C, raziskali nastale mikrostrukture ter opredelili tvorbo AlN in NbC med valjanjem.

Pri visoki temperaturi valjanja popolna rekristalizacija avstenita med vtiki ustvari enakomerno poligonalno mikrostrukturo jekla v valjanem in v normaliziranem stanju. Od neke temperature valjanja navzdol hitro zraste število zrn avstenita, ki med vtiki ne rekristalizirajo, doseže neko največjo vrednost, nato pa se počasi zmanjšuje, ko se dalje znižuje temperatura valjanja jekla.

Nepopolna rekristalizacija avstenita med valjanjem ustvari v valjanem jeklu heterogeno mikrostrukturo, deformacijsko anizotropijo in je vzrok za neenakomernost v procesu tvorbe izločkov AlN in NbC med valjanjem.

Avstenitna zrna, ki po prvem vtiku ne rekristalizirajo, ne rekristalizirajo tudi v nadaljevanju valjanja, razen če temperatura valjanja ne pade tako nizko, da je proces izločanja deformacijske energije s popravo prepočasen, da bi lahko od več vtikov nakopičeno notranjo energijo deformiranih zrn znižal pod prag, ki sproži rekristalizacijo v presledku časa med dvema vtikom. Po vsakem vtiku rekristalizirajo avstenitna zrna, ki so rekristalizirala po prvem vtiku. Vzrok za različnost v rekristalizaciji po prvem vtiku je različna začetna velikost avstenitnih zrn. Poprava namreč ustvarja v deformiranih zrnih avstenita poligonizacijsko substrukturo, ki hitro resorbira mrežne napake, nastale pri preoblikovanju jekla.

Viri

1 I. Kozasu, C. Ouchi, T. Sampei in T. Okita: *Micro Alloying* 75, UCC, New York, 1975, 120.

- 2 T. Tanaka, N. Tabata, T. Hatomura in C. Chiga: *Ibidem*, 107.
- 3 A. le Bon, J. Rofes-Vernis in C. Rossard: *Metal Science* 9, 1975, 36.
- 4 F. Vodopivec, F. Vizjak, S. Senčič, G. Manojlovič in D. Gnidovec: *Železarski Zbornik* 15, 1981, 203.
- 5 R. A. Petković, M. J. Luton in J. J. Jonas: *Canadian Metallurgical Quarterly* 14, 1975, 137.
- 6 F. Vodopivec in M. Gabrovšek: *Metals Technology* 7, 1980, 186.
- 7 F. Vodopivec, M. Gabrovšek in J. Žvokelj: *Železarski Zbornik* 17, 1983, 17.
- 8 A. Osojnik, T. Lavrič in F. Vodopivec: *Železarski Zbornik* 14, 1980, 87.
- 9 F. Vodopivec, A. Rodič in J. Rodič: *Železarski Zbornik* 16, 1982, 111.
- 10 J. D. Jones in A. B. Rothwell: *ISI Publication* 108, The Iron and Steel Institute, London, 1968, 78.
- 11 F. Vodopivec, F. Vizjak, S. Senčič, G. Manojlovič in D. Gnidovec: *Železarski Zbornik* 15, 1981, 237.
- 12 T. Gladman, D. Dulieu in J. McIvor: *Micro Alloying* 75, UCC, New York, 1977, 32.
- 13 I. Weiss in J. J. Jonas: *Metallurgical Transactions* 11 A, 1980, 403.
- 14 J. J. Jonas in I. Weiss: *metal Science* 3, 1979, 238.
- 15 T. Gladman in F. B. Pickering: *Journal of ISI* 205, 1967, 653.
- 16 W. B. Morrison: *Scandinavian Journal of Metallurgy* 9, 1980, 83.
- 17 W. Roberts: *Ibidem* 9, 1980, 13.
- 18 F. Vodopivec, J. Žvokelj, A. Rodič in J. Rodič: *Posvet »Valcovanje na črni i cvetni metalurgiji«, Sofija* 1983, bo objavljeno.
- 19 M. Kmetič, F. Vodopivec in M. Gabrovšek: *Železarski Zbornik* 14, 1980, 39.

ZUSAMMENFASSUNG

Chrom Mangan legierte und Kohlenstoffeinsatzstähle sind bei der Temperatur zwischen 1250 und 750°C in mehreren Stichen ausgewalzt worden. Das dabei entstehende Mikrogefüge ist bestimmt worden und die während des Walzvorganges entstehenden Mengen von AlN und NbC sind nach dem nasschemischen Verfahren analysiert worden.

Durch die vollkommene Rekristallisation von Austenit zwischen den Stichen bei hoher Walztemperatur entsteht ein gleichmässiges polygonales Mikrogefüge im gewalzten und im normalisierten Zustand. Von einer gewissen Temperatur abwärts wächst die Menge von Austenit die während des Walzvorganges nicht rekristallisiert sehr schnell, erreicht einen höchsten Wert, fällt dann allmählich langsam so wie die Walztemperatur weiter fällt.

Die Austenitkörner die nach dem ersten Stich nicht rekristallisieren, rekristallisieren auch nicht beim weiteren Walzvorgang trotz dem, dass die gesamte Verformung wächst. Dieser Vorgang verläuft so lange bis die Walztemperatur nicht so weit abfällt, dass die Ausscheidung der Deformationsenergie mit der Erhöhung zu langsam ist um die von mehreren Stichen angehäufte Verformungsenergie unter das Niveau zu senken, wo die Rekristallisation zwischen zwei Stichen ausgelöst wird.

Die Stabilität wird dem Verformten Austenit während des Walzvorganges durch den schnellen Erholungsvorgang gege-

ben, welcher vor der Rekristallisation in verformten Körnern eine polygonisationssche Substruktur bildet in welcher schnell die durch die Verformung verursachten Fehler des Kristallnetzes versenken.

Nach jedem Stich rekristallisieren diese Austenitkörner, die nach dem ersten Stich rekristallisiert haben, da die Rekristallisation um so schneller ist je kleiner die Körner sind.

Im Temperaturbereich in welchem die Rekristallisation von Austenit unvoll kommen wird, wird die Bildung von AlN nicht grösser, die Bildung von NbC wird aber schneller. Die Ermittlungen zeigen aber nicht, dass AlN oder NbC die primären Ursachen für die Stabilisierung des nichtrekristallisierten Austenites wären.

Die unvollkommene Rekristallisation von Austenit ist die Ursache für das heterogene Mikrogefüge des Stahles im gewalzten und normalisierten Zustand, den die Zahl der bei der Austenitisation nichtnormalgewachsenen Austenitkörner wird um so grösser je niedriger die Walztemperatur war. Im gewalzten Zustand ist die Heterogenität die eine Folge der unvollkommenen Rekristallisation von Austenit während des Walzvorganges ist, die Ursache für die Vervormungsanisotropie, derentwegen der Stahl in der Walzebene schweren verformt wird als senkrecht an diese.

SUMMARY

Chromium-manganese and carbon case-hardening steel was rolled in few passes between 1250 and 750°C. The formed microstructures were determined, and the amounts of AlN and NbC formed in rolling were analyzed by the wet chemical analysis.

At high rolling temperatures the complete recrystallisation of austenite between passes forms an uniform polygonal microstructure in the rolled and in the normalized samples. Below some temperature the amount of austenite not recrystallized during rolling increases fast, it reaches some maximum, then it is slowly reduced with the further decreasing rolling temperature.

The austenite grains, not recrystallized after the first pass, do not recrystallize in further rolling though the total deformation increases. This takes place till the rolling temperature is not reduced to such an extent that the liberation of strain energy by the recovery is to slow that in several passes piled strain energy could be reduced under the threshold for triggering the recrystallisation between the passes. The stability of the strained austenite in rolling is achieved by the rapid recovery which still before the recrystallisation forms a polygonal sub-

structure in deformed grains, and in that substructure the lattice defects, formed during the deformation are quickly dissolved.

After each pass, the austenite grains, recrystallized after the first pass, recrystallize again since the recrystallisation is the faster the smaller are the grains.

In the temperature region where the recrystallisation of austenite is not complete, no increased formation of AlN was observed, but formation of NbC was faster.

But the findings do not show that AlN or NbC could be the primary reasons for the stabilisation of the nonrecrystallized austenite.

The incomplete recrystallisation of austenite during rolling causes the heterogeneous microstructure of steel, as rolled and as normalized. In austenitising the number of unnormally grown austenite grains was the greater the lower was the rolling temperature. In the rolled state the heterogeneity as the consequence of incomplete recrystallisation of austenite during rolling causes the strain anisotropy, and thus the steel can be less easily deformed in the plane of rolling than perpendicularly to that plane.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устойчивость деформационного австенита во время прокатки получается вследствие быстроты в той фазе процесса, в которой до рекристаллизации деформированных зерен образуется полигонометрическая субструктура, в которой быстро исчезают погрешности кристаллической сети, образовавшиеся в течении деформации.

Рекристаллизация австенитных зерен происходит тем быстрее, чем меньше величина зерен. В области температуры где рекристаллизация австенита становится неполная не замечено увеличение образования AlN, но увеличивается быстрота образования NbC. Результаты исследований не показывают, что AlN или NbC могли бы быть главными реактивами для стабилизации нерекристаллизованного австенита.

Неполная рекристаллизация австенита во время прокатки вызывает образование гетерогенной микроструктуры в катаном и в нормализованном состоянии. Известно, что во время австенитизации количество неправильно выросших австенитных зерен тем больше, чем ниже была температура прокатки.

Гетерогенность в катаном состоянии, как последствие недостаточной рекристаллизации австенита во время прокатки вызывает деформационную анизотропность, вследствие чего деформация стали по плоскости прокатки более затруднительна, чем прямоугольно на плоскость.

В статье рассмотрено выполнение прокатки Cr-Mn и углеродистых цементуемых сталей при темп-рах между 1250 и 750°C при нескольких пропусках. Определены полученные микроструктуры и, при помощи мокрого химического анализа установлено количество AlN и NbC, которые образовались во время прокатки.

Во время прокатки при высокой темп-ре полная рекристаллизация австенита между пропусками вызывает образование равномерную полигональную микроструктуру в катаном и нормализованном состоянии. Ниже некоторой определенной темп-ры быстро образуется готовое количество австенита, которое во время прокатки не рекристаллизуется, достигает некоторое максимальное значение после чего медленно уменьшается во время понижения темп-ры прокатки.

Австенитные зерна, которых рекристаллизация на наступила после первого пропуска не рекристаллизируются также и при продолжении прокатки несмотря на увеличение общей деформации. Это происходит до того промежутка времени когда температура прокатки достигнет тот низкий предел, при котором выделение деформационной энергии, несмотря на корректуру будет происходить слишком медленно, так что и собранная деформационная энергия от нескольких пропусков не в состоянии выполнить срабатывание рекристаллизации между пропусками.