

VROČE PREOBLIKOVANJE AVSTENITNIH NERJAVNIH JEKEL, LEGIRANIH Z ŽVEPLOM

THE HOT DUCTILITY OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL ALLOYED WITH SULPHUR

Stanislav Jakelj¹, Franc Tehovnik², Alenka Kosmač¹, Boris Arzenšek²

¹SŽ ACRONI, d. o. o., Kidričeva 44, 4270 Jesenice, Slovenija

²Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija
sjakelj@acroni.si

Prejem rokopisa – received: 2003-10-01; sprejem za objavo – accepted for publication: 2004-02-09

Zaradi slabe razteznosti v vročem so avstenitna nerjavna jekla, legirana z žveplom, nagnjena k tvorbi površinskih razpok med vročim valjanjem. V zvezi s to problematiko je bila analizirana vrsta jekla SS2343, legiranega z žveplom, ki ga izdelujemo v Acroniju.

Površinske razpoke, ki nastajajo med vročim valjanjem, povzročajo napake na končni površini debele pločevine. Razpoke so podobne drobnim pikam, zato je kakovost površine plošč neustrezna.

V okviru naloge je bilo pregledano in analizirano več različnih virov literature, ki obravnavajo vroče preoblikovanje avstenitnih nerjavnih jekel. Predstavljena je tudi statistika internih prekalifikacij v Acroniju zaradi napak na površini končno valjanih plošč.

V sodelovanju z IMT v Ljubljani smo izvedli natezne preizkuse v vročem in preizkuse vročega valjanja klinastih preizkušancev za vrsti jekla 316L (W. Nr. 1.4404) in SS2343 (W. Nr. 1.4436).

Izvedena je bila analiza primerjav glede na dejansko proizvodnjo v Acroniju. Na osnovi teh analiz smo se seznanili s pomanjkljivostmi in omejitvami, s katerimi se srečujemo med našim rednim proizvodnim procesom vročega valjanja avstenitnih nerjavnih plošč debele pločevine v SŽ Acroni.

Ključne besede: vroče preoblikovanje, avstenitna nerjavna jekla, žveplo

Austenitic stainless steels alloyed with sulphur are prone to surface cracking during hot rolling because of their relatively poor hot ductility under hot-working conditions.

In this research we analysed the steel grade SS2343 alloyed with sulphur, which is a SŽ Acroni product.

Surface cracking during hot rolling cause defects on the final quarto plates' surface, e. g. sliver, which reduce the surface quality of the product.

Many different studies of the hot ductility of austenitic stainless steels were analysed in this research. A statistical analysis of the quarto plates with surface defects is also presented.

In cooperation with IMT Ljubljana, we performed hot tensile tests and hot rolling test of key samples from steel grades 316L and SS2343 alloyed with sulphur. A comparison of these tests results and the rolling conditions in SŽ Acroni was made. On the basis of this analysis, several improvements to the process were made and the limitations of the process were detected.

Key words: hot ductility, austenitic stainless steel, sulphur

1 UVOD

Jeklo SS2343 (W. Nr. 1.4436), legirano z žveplom in jeklo 316L (W.Nr. 4404) spadata v skupino avstenitnih nerjavnih jekel, legiranih z molibdenom. Njuna kemična sestava je podana v **tabeli 1**.

Težave, s katerimi se srečujemo pri vroči predelavi teh dveh vrst jekla, zlasti pri jeklu SS2343 (W. Nr. 1.4436), so razpoke, ki nastajajo na površini končno valjanih plošč. Napake so drobne vzdolžne jamice, zato je kvaliteta površine plošč neustrezna. Na **sliki 1** so prikazane napake na površini plošče debele pločevine vrste jekla SS2343, legiranega z žveplom. Razpoke najverjetneje nastajajo zaradi slabe visokotemperaturne razteznosti materiala pri navadnih razmerah vročega valjanja. Pojav razpok je v veliki meri povezan z avstenitno-feritno mikrostrukturo jekla.



Slika 1: Napake na površini debele pločevine (jeklo SS2343, legirano z žveplom)

Figure 1: Cracking on the quarto plate surface (steel grade SS2343 alloyed with sulphur)

2 TEORETIČNE OSNOVE

Jekla, ki se strjujejo v avstenitno-feritnem področju, obdržijo osnovno avstenitno mikrostrukturo. Delta ferit (δ -ferit) se izloči na mejah dendritnih zrn. Med kristalnimi mejami se δ -ferit ovije vzdolž meddendritnih področij avstenita.

V primeru, ko se zlitina strjuje po feritno-avstenitnem načinu, je ferit primarno strjena faza. Avstenit se formira med zrni ferita in z njimi enakomerno raste. Rezultat tega je izrazito majhen volumenski delež ferita. Zaradi transformacije $\delta \rightarrow \gamma$ se pri strjevanju podstruktura ne identificira z osnovno lito mikrostrukturo, tako kot je to pri primarnem avstenitnem strjevanju, kjer je nehomogenost dokaj velika^{1,2}.

Kristalne meje so v liti strukturi, ki je strjena po avstenitno-feritnem modelu, v meddendritnih predelih, zato je pri takem jeklu verjetnost pojava in širjenja razpok med vročim preoblikovanjem večja. V liti strukturi, ki je strjena po feritno-avstenitnem modelu, pa kristalne meje ležijo v dendritnih jedrih, kar je za vroče preoblikovanje jekla bolj ugodno.

Ponovno segrevanje materiala pred plastično deformacijo vpliva na porast δ -ferita v jeklu. S segretjem materiala na temperaturo 1200 °C lahko delež ferita v jeklu naraste za 90 %. Med ponovnim segrevanjem materiala poraste delež ferita zaradi transformacije faze σ ali χ v δ -ferit.

2.1 Rekristalizacija materiala

Ne glede na druge spremenljivke (kemična sestava, feritno število) ima na vročo preoblikovalnost in rekristalizacijo materiala zelo velik vpliv delež molibdena v jeklu (slika 2)³.

Na sliki 2a ni mogoče najti jasne povezave med vročo razteznostjo materiala in vsebnostjo molibdena. Toda s povečanjem deleža molibdena v jeklu zelo naraste sila za preoblikovanje (slika 2b). Slika 2c prikazuje zaostajanje rekristalizacije z znižanjem temperature in s porastom vsebnosti molibdena. Rekristalizacija pri jeklih z nizko vsebnostjo Mo z znižanjem

temperature iz 1200 °C na 1100 °C močno pade, medtem ko pri drugih jeklih rekristalizacija pri temperaturi 1100 °C sploh še ne poteče.

Kinetika dinamične rekristalizacije⁴ je predstavljena z uporabo Zener–Hollomonovega parametra:

$$Z = \varepsilon \exp(Q/RT) \quad (1)$$

Z – dinamična rekristalizacija

ε – deformacijska hitrost

Q – aktivacijska energija za dinamično rekristalizacijo

R – plinska konstanta

T – absolutna končna temperatura

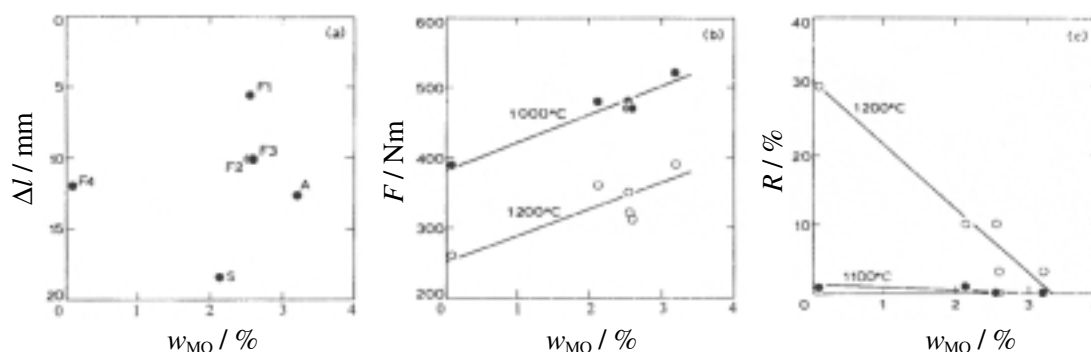
V jeklih, ki so legirana z molibdenom, poteka dinamična rekristalizacija počasneje. Pojavljati se je začela ob deformaciji šele pri temperaturi 1100 °C in popolnoma poteče pri 1200 °C. Povečana vsebnost molibdena močno poslabša preoblikovalne sposobnosti materiala v vročem stanju. Sile za preoblikovanje jekla v vročem narastejo, stopnja rekristalizacije pa močno pade. Poleg vsebnosti molibdena imata na vročo preoblikovalnost materiala velik vpliv tudi vsebnost ferita in način strjevanja materiala. Jekla z večjim deležem ferita imajo slabšo preoblikovalno sposobnost v vročem.

2.2 Vpliv zlitinskih elementov

Povečan delež molibdena v jeklu poslabša preoblikovalnost v vročem. Vzrok poslabšanja preoblikovalnosti je v porastu vsebnosti ferita v materialu in zakasnitvi dinamične rekristalizacije.

Nikelj je v jeklu močan avstenitotvorni element in lahko izboljša vročo preoblikovalnost materiala zaradi direktne redukcije ferita. Sam nikelj nima vpliva na potek strjevanja v avstenitu, toda v povezavi z drugimi elementi lahko ugodno vpliva na vročo preoblikovalnost materiala in zmanjšuje škodljiv vpliv drugih elementov.

V nasprotju z nikljem pa molibden zelo poveča vsebnost ferita v jeklu (močan feritotvorni element). S porastom vsebnosti molibdena pride v jeklu do manjše mobilnosti dislokacij med vročo predelavo in s tem na zadržanje rekristalizacije. Glavni vzrok je torej povezan



Slika 2: Vpliv molibdena (w_{Mo}) na vroče preoblikovanje avstenitnih nerjavnih jekel: a) razteznost materiala v vročem (Δl), b) sila preoblikovanja v vročem (F), c) stopnja rekristalizacije (R)

Figure 2: Effect of Mo content w_{Mo} on the properties of austenitic steel: a) hot ductility (Δl), b) hot strength (F), c) recrystallization (R)

z zadržanjem procesov sproščanja deformacijske energije – mehčanja med vročo predelavo.

Če primerjamo med seboj jeklo, ki ima visoko feritno število (FN) in nizko vsebnost Mo, ter jeklo z nizkim feritnim številom in visoko vsebnostjo Mo (**slika 3 a in b**)³, ugotovimo, da imajo jekla z nizko vsebnostjo ferita, kljub večjemu deležu molibdena in slabši dinamični rekristalizaciji, boljše preoblikovalne sposobnosti v vročem.

Iz tega lahko sklepamo, da je vsebnost ferita bistvenega pomena za vroče preoblikovanje pri materialih, ki se strjujejo po feritno-avstenitnem modelu.

Večji vpliv molibdena je viden v jeklih, ki se strjujejo po avstenitno-feritnem modelu. Tu je možen razlog iskati v drugačnem načinu strjevanja. Visoka vsebnost molibdena v jeklu ima negativen vpliv na preoblikovalnost v vročem. Pri jeklu se poveča preoblikovalno trdnost ter zmanjša delež rekristalizirane mikrostrukture. Na **sliki 3** je prikazan vpliv zlitinskih elementov na vročo preoblikovalnost jekla v odvisnosti od deleža ferita in razmerja Cr_{eq}/Ni_{eq} za različne sestave avstenitnih nerjavnih jeklih.

Povezava med **sliko 3a** in **sliko 3b** je očitna. Vroča preoblikovalnost je bistveno boljše pri jeklih, ki imajo razmerje $Cr_{eq}/Ni_{eq} \geq 1,5$, ta se strjujejo primarno feritno. Jekla, ki imajo razmerje $Cr_{eq}/Ni_{eq} < 1,5$, pa se strjujejo primarno avstenitno.

Maksimalno vroče preoblikovanje se lahko doseže pri jeklih, ki imajo vsebnost ferita v razmerju med **2** in **4**. Jekla, ki imajo vsebnost ferita pod 2 se strjujejo primarno avstenitno in imajo slabše preoblikovalne lastnosti v vročem. Prav tako imajo slabe preoblikovalne lastnosti v vročem jekla z visoko vsebnostjo ferita.

Velik vpliv na pojav robnih razpok med vročim valjanjem ima tudi kontrakcija oz. redukcija materiala. Če kontrakcija preseže vrednost 30-odstotkov, se

material v vročem dobro valja in obenem se močno zmanjša verjetnost pojava razpok na robovih plošč. Pri 30-odstotni kontrakciji se med vročim valjanjem začne dinamična rekristalizacija materiala. Ta ugodno vpliva na proces vročega valjanja.

2.3 Vpliv žvepla

Zlitine, legirane z žveplom, imajo zmanjšano sposobnost raztezanja med vročim preoblikovanjem. Nastale razpoke na površini jekla se zelo hitro širijo in razmnožujejo vzdolž kristalnih meja zrn. Vzrok nastanka razpok je v izrazitih segregacijah žvepla na mejah kristalnih zrn. Za jekla, ki so legirana z žveplom, je zelo pomembno, da je vsebnost mangana dovolj nizka oz. na spodnji predpisani meji. Zato je v jeklu količina žvepla, vezanega v MnS, nizka. Vključki MnS, izločeni na kristalnih mejah zrn, zelo znižujejo vročo preoblikovalno sposobnost jekla ter so kali za tvorbo razpok. Če je vsebnost mangana v jeklu dovolj nizka in vsebnost žvepla ne presega 0,016 % (tako ni možnosti tvorbe velikega deleža MnS), je vroča preoblikovalnost takega jekla dobra, lahko celo boljše kot pri jeklu, ki ima vsebnost žvepla samo 0,002 %⁵.

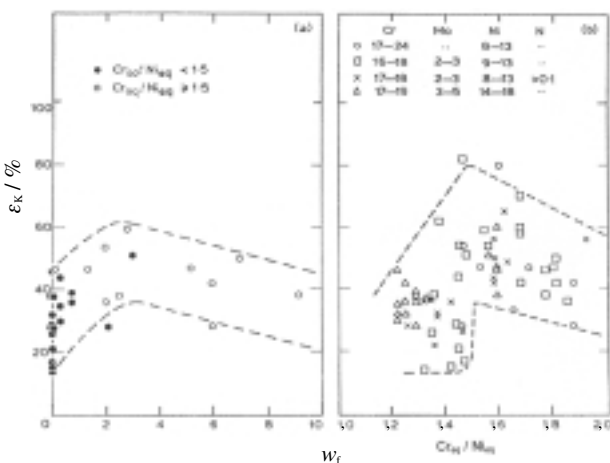
Pojav razpok med vročim valjanjem pri jeklih, ki so legirana z žveplom, je izrazit v temperaturnem območju 1000 °C–1150 °C. Za tvorbo razpok v materialu je vedno potrebno jedro, kjer razpoka nastane in se nato širi vzdolž meja avstenitnih zrn oz. po kristalnih mejah avstenitno-feritne faze.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

Jekla SS2343, legirana z žveplom, smo direktno vroče valjali v plošče debele pločevine do aprila 2001. Zaradi zelo neugodnih vročih preoblikovalnih sposobnosti avstenitnega nerjavnega jekla, legiranega z žveplom, smo se na podlagi študij in analiz odločili, da se slabi v vroči valjarni prevladajo. Tako smo neposredno zvišali končne temperature valjanja materiala s področja med 850 °C in 900 °C na ugodno temperaturno področje med 1100 °C in 1250 °C. Zaradi razpok na površini je bilo tako do konca leta 2001 prekvalificirano samo še 8-odstotkov materiala.

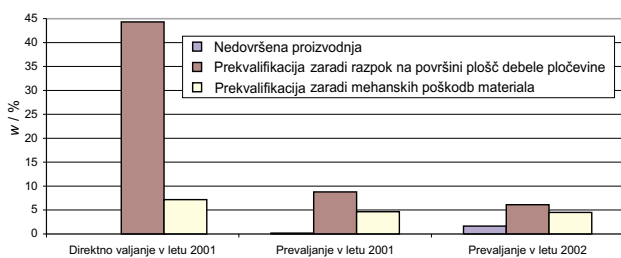
S prevalljanjem slabov v vročem je bil dosežen velik napredek pri zmanjševanju deleža razpok na površini končno valjane debele pločevine. Zmanjševanje razpok je bilo še bolj očitno v letu 2002 (**slika 4**). Zaradi razpok na površini debele pločevine je bilo ob enaki letni proizvodnji prekvalificirano le še 6-odstotkov materiala.

Ključnega pomena za pojav razumevanja nastanka razpok med vročim preoblikovanjem je bilo vrednotenje vsebnosti ferita v jeklu oz. feritno število. Od leta 2001 do 2002 se je feritno število v jeklih znižalo. Na račun tega pa se je znižal tudi delež napak zaradi površinskih razpok. Povprečno feritno število za jekla v letu 2001 je bilo FN = 6,1. Z uvedenimi ukrepi je bila povprečna



Slika 3: Vroča preoblikovalnost ϵ_K (kontrakcija debeline) za lita avstenitna nerjavna jekla pri temperaturi 1050 °C: a) vpliv vsebnosti ferita (w_f), b) vpliv razmerja Cr_{eq}/Ni_{eq}

Figure 3: Hot ductility ϵ_K (contraction) of as-cast austenitic stainless steels at 1050 °C: a) effect of ferrite content (w_f), b) effect of Cr_{eq}/Ni_{eq} ratio



Slika 4: Delež napak (w) debele pločevine, vrste jekla SS2343, legirane z žveplom, za leti 2001/02

Figure 4: Scraped (w) quarto plates for steel grade SS2343 alloyed with sulphur from 2001/02

vrednost FN v letu 2002 5,7 in se je spustila pod predpisano maksimalno dovoljeno vrednost FN = 5,9 za te vrste jekla.

3.1 Izvedba preizkusov

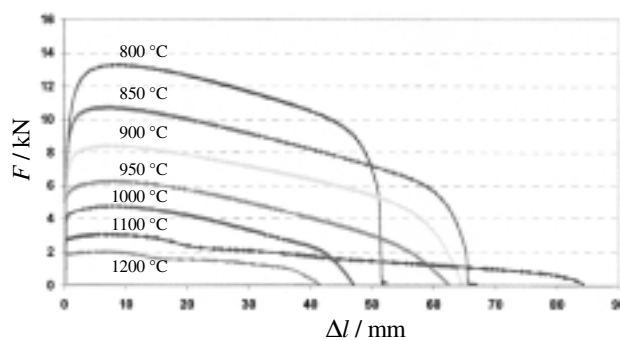
V sodelovanju z IMT v Ljubljani smo izvedli preskuse plastičnega preoblikovanja v območju temperatur vroče predelave za jekla: SS2342, legirano z žveplom in jeklo 316L.

Preoblikovalno sposobnost za ti dve vrsti jekla smo ugotavljali na osnovi preizkusov plastičnosti v vročem za temperaturno območje od 800 °C do 1200 °C.

Pri vročem nateznem preizkusu smo preizkušance ogreli na različne temperature in jih obremenjevali do pretrga. Vzorce so bili vzeti iz nerjavne debele pločevine. Sestava jekla je opisana v **tabeli 1**. Za posamezne temperature preizkušanja so bili izdelani diagrami: sila v odvisnosti od raztezka.

S **slike 5** je razvidno, da je raztezek materiala pri temperaturi 1100 °C veliko večji kot pri drugih temperaturah preizkušanja. Pri temperaturi 1200 °C raztezek zopet pade. Rekrystalizirana kristalna zrna narastejo in pri materialu se preoblikovalne lastnosti poslabšajo.

V diagramih, kjer je predstavljena deformacijska trdnost (K_f) v odvisnosti od logaritemske deformacije (ϵ) za temperaturno območje med 950 °C in 1200 °C, se pri temperaturi 1100 °C pojavi izrazit padec deformacijske trdnosti materiala (**slika 6**). Krivulja deformacijska trdnost – logaritemska deformacija je popačena v temperaturnem območju nad 1000 °C in 1200 °C. Na primer pri določeni vrednosti logaritemske deformacije oz. deformacijske trdnosti (pri temperaturi 1100 °C → $K_f = 42$ MPa in $\epsilon = 0,19$)⁶ se doseže vrh, nato pa zaradi

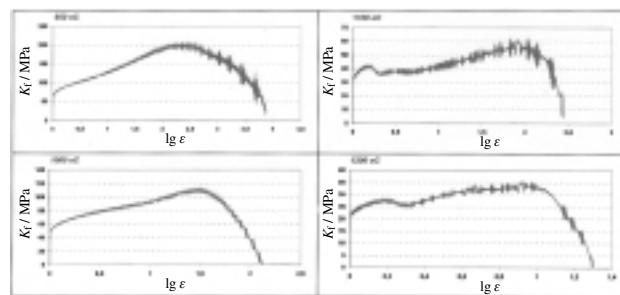


Slika 5: Sila (F) v odvisnosti od raztezka (Δl) pri različnih temperaturah (SS 2343, šarže 239390)

Figure 5: Strength (F) versus ductility (Δl) for different temperatures (SS2343, heat 239390)

pojava dinamične rekrystalizacije pride do padca deformacijske trdnosti (pri temperaturi 1100 °C → $K_f = 37$ MPa in $\epsilon = 0,33$)⁶. Zaradi upoštevanja dejanskega prereza epruvete na kontrakcijskem delu deformacijska trdnost z deformacijo zopet narašča in doseže maksimalno vrednost. Sledi padec deformacijske trdnosti, ki pa je posledica koagulacije vrzeli v pore in pretrga. Z višjo temperaturo preskusa nad 1100 °C se zaradi rekrystalizacije vrh premakne k nižjim vrednostim deformacijske trdnosti oz. manjšim vrednostim logaritemske deformacije.

Drugi preizkus, vroče valjanje klinastih vzorcev, je potekal na laboratorijskem valjavskem ogrodju. Vzorce smo v peči ogreli na temperaturo 1200 °C in jih ohladili na temperaturo preizkušanja. Posamezni preizkušanci so bili valjani v temperaturnih intervalih od temperature



Slika 6: Deformacijska trdnost (K_f) v odvisnosti od logaritemske deformacije (ϵ) pri različnih temperaturah preizkušanja (SS2343)

Figure 6: Deformation strength (K_f) versus logarithmic deformation (ϵ) for different test temperatures (SS2343)

Tabela 1: Kemična sestava

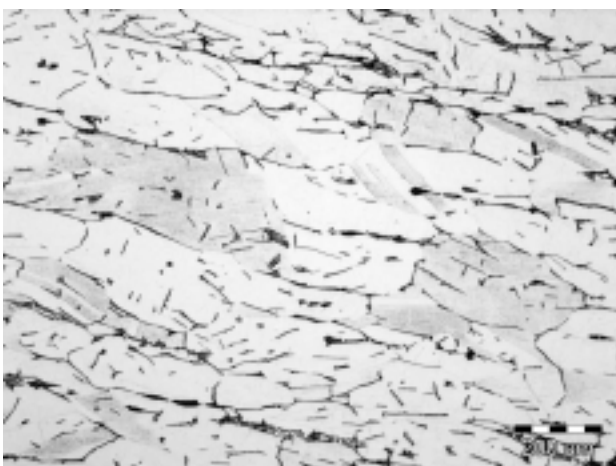
Table 1: Chemical composition

Šarža	W. Nr.	Oznaka ACRONI	EN	AISI	SS	% C	% Mn	% S	% Cr	% Ni	% Mo	Cr _{eq}	Ni _{eq}	Cr _{eq} /Ni _{eq}	FN
240325	1.4436	SS2343	X3CrNiMo 17-13-3	–	SS2343	0,019	1,53	0,02	16,72	10,60	2,53	19,82	13,20	1,502	5,14
240395	1.4404	ACROM 12 LC	X2CrNiMo 17-12-2	316L	–	0,029	1,38	0,001	16,50	10,35	2,04	19,03	13,19	1,442	2,45



Slika 7: Vzorec, hlajen na zraku (1100 °C, 24-odstotna redukcija – vrsta jekla SS2343)

Figure 7: Sample cooled in air (1100 °C, 24 percent reduction – steel grade SS2343)



Slika 8: Vzorec, hlajen na zraku (850 °C, 26-odstotna redukcija – vrsta jekla SS2343)

Figure 8: Sample cooled in air (850 °C, 26 percent reduction – steel grade SS2343)

850 °C do vključno 1200 °C in hlajeni na zraku ter v vodi. Na podlagi meritev (razlik v debelini) so bile izračunane redukcije posameznega dela preizkušanca, in material je bil na teh delih metalografsko pregledan.

Bistvenih razlik med vrstama jekla SS2343 in 316L pri višjih temperaturah valjanja (1000 °C–1200 °C) in različnemu hlajenju ni bilo opaziti.

Dinamična rekristalizacija se začne pojavljati pri temperaturi preoblikovanja 1050 °C in 43-odstotni stopnji redukcije, pod to temperaturo je ni opaziti. Pri temperaturi 1100 °C se dinamična rekristalizacija začne pojavljati pri 25-odstotni redukciji (**slika 7**), toda še vedno so vmes nerekristalizirana zrna. Pri temperaturi 1200 °C so zametki rekristalizacije že pri 10-odstotni redukciji, toda kristalna zrna so zelo velika.

Veliko razliko med obema vrstama jekel pa je opaziti v temperaturnem področju med 850 °C in 900 °C. Tu se

pri jeklu SS2343, legiranem z žveplom, na mejah kristalnih zrn pojavlja izločena sigma-faza (**slika 8**), ki je nezaželena. Z izločanjem faze sigma se pri materialu povečuje krhkost, trdota in trdnost, obenem pa se zmanjšujeta raztezek in kontrakcija.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

Za dobro vroče preoblikovanje avstenitnih nerjavnih jekel je zelo pomemben nizek delež δ -ferita. Priporočljivo področje vsebnosti ferita v avstenitnih nerjavnih jeklih je $FN = 2-4$.

Na potek vročega preoblikovanja vpliva tudi model strjevanja jekla. Način strjevanja jekla določata Cr_{eq} in Ni_{eq} (Cr_{eq}/Ni_{eq}). Optimalno razmerje med obema ekvivalentoma je $Cr_{eq}/Ni_{eq}=1,5$. Ob povečanju ekvivalenta poraste tudi delež δ -ferita v jeklu, tako se pri materialu zniža preoblikovalna sposobnost v vročem.

Na slabo vroče preoblikovalnost jekla ima zelo velik vpliv povečan delež Mo, ki povzroča, da dinamična rekristalizacija pri teh jeklih poteka počasneje.

S preizkusi v vročem smo ugotovili, da najboljša preoblikovanja za obe vrsti jekla dosegamo v temperaturnem področju 1100 °C. Pri tej temperaturi se začne pojavljati dinamična rekristalizacija med 20- in 30-odstotno redukcijo.

Če primerjamo dobljene rezultate z dejanskim procesom vročega valjanja nerjavne debele pločevine na valjavskem ogrodju bluming v vroči valjarni SŽ Acroni, ugotovimo, da so odmiki veliki. Zaradi same tehnologije valjanja debele nerjavne pločevine in omejenih tehničnih zmoglosti valjavskega ogrodja bluming je težko zagotoviti optimalne razmere pri vročem valjanju. Zato je bila uvedba prevaljanja slabov dobra, saj smo se tako približali najugodnejši temperaturi vročega preoblikovanja.

Toda preoblikovalne redukcije valjanca so nizke. V povprečju so le 11,1-odstotne in nikakor ne dosegajo 30-odstotne redukcije, ki je za to vrsto jekla priporočena v literaturi in dokazana kot najbolj ugodna z vročimi nateznimi preizkusi in preizkusi vročega valjanja. Težave nastanejo pri tanjših ploščah od 10 mm do 20 mm. Tu je poleg majhne redukcije tudi nizka temperatura valjanja (med 850 °C in 900 °C), kar je neugodno za nerjavna avstenitna jekla, ki so legirana z molibdenom in žveplom. V tem temperaturnem področju se na mejah kristalnih zrn izloča krhka sigma-faza.

5 SKLEPI

Eden od poglobitnih vzrok za slabše preoblikovanje avstenitnih nerjavnih jekel, legiranih z molibdenom in žveplom, je v nizki temperaturi vročega valjanja. Zato ukrep s prevallanjem slabov ostaja v veljavi in se za te vrste jekla predpiše kot ustaljena tehnološka pot.

Zelo pomembna je tudi kemična sestava teh vrst jekel, ki določa način strjevanja in delež δ -ferita v jeklu.

Izveden je bil ukrep, da se ta jekla izdeluje z predpisano vrednostjo feritnega števila med 2 in 5,9.

Ker se s pojavom razpok še vedno srečujemo, bomo izvedli še dodatne preoblikovane analize na različnih avstenitnih nerjavnih jeklih, legiranih z Mo.

6 LITERATURA

- ¹ B. Ahlblom and R. Sandstrom: Hot workability of stainless steel: influence of deformation parameters, microstructural components, and restoration processes – *International Metals Reviews*, (1982), 1
- ² J. Komi: Hot ductility of austenitic and duplex stainless steel under hot rolling conditions – University of Oulu, 2001
- ³ L. Myllykoski; N. Suutala: Effect of solidification mode on hot ductility of austenitic stainless steels – The Metals Society, 1983
- ⁴ T. Maki; K. Akasa; K. Okuno; I. Tamura: *Trans Iron Steel Inst. Jpn.* (1982) 22, 253–261
- ⁵ S. Malm: Inverkan av lag Mn-halt pa austeniska rostfria stals varnbearbetbarhet, Report D 282, Jernkontorets Forskning, Stockholm, 1979
- ⁶ F. Tehovnik, B. Arh, B. Arzenšek, D. Kmetič, B. Breskvar, S. Jakelj, A. Kosmač, A. Lagoja: Preoblikovalne sposobnosti avstenitnih nestabiliziranih nerjavnih jekel, Poročilo Inštituta za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, 2003