

Raziskave relativne plastičnosti vključkov manganovega sulfida pri vročem valjanju nekaterih konstrukcijskih jekel

UDK: 621.177.014.2:669.14.018.2:539.3
 ASM/SLA: F 23, 1—66, 174-n, Q 236, Q-69
 F. Vodopivec in M. Gabrovšek



Količina sulfidnih vključkov, od katere je odvisna anizotropnost jeklenih plošč in trakov, ni odvisna samo od količine žvepla v jeklu, temveč tudi od načina vročega valjanja jekla. Kovina in manganov sulfid imata pri enaki temperaturi različno plastičnost, zato imata različen podaljšek pri enakem zmanjšanju debeline pri vročem valjanju. Relativno plastičnost manganovega sulfida povečuje utrditev avstenita s trdno raztopino in še bolj nepopolna rekristalizacija jekla med posamičnimi redukcijami debeline, zmanjšuje pa jo parcialna transformacija avstenita v ferit med valjanjem.

1. Kratek povzetek literature in cilj dela

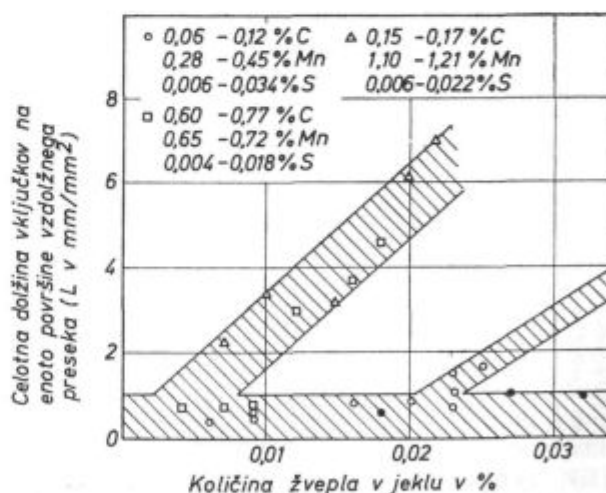
Indeks relativne plastičnosti sulfidnih vključkov je definiran kot razmerje med logaritemsko deformacijo vključkov in jekla (1). Vrednost tega indeksa je pod enoto za vse tri vrste sulfidnih vključkov in v različnih jeklih (2, 3, 4). Relativna plastičnost sulfidnih vključkov raste, ko pada temperatura deformacije, verjetno kot funkcija trdote vključkov in jekla (5, 6). Kaže, da je v procesu deformacije vključkov udeležena tudi torna sila na mejni površini med vključkom in kovino ter napetost, ki nastane zaradi te sile (3). Deformabilnost vključkov, katerih premer v litem jeklu je večji od ca. 0,005 mm, je neodvisna od velikosti (7). Kaže, da se vključki, ki imajo v litem jeklu premer pod 0,001 mm, ne deformirajo (8). Torej je deformabilnost vključkov, katerih premer je v litem jeklu med obema mejama, odvisna od njihove velikosti. Pričakovati je majhno zmanjšanje v indeksu relativne plastičnosti, ko se jeklo deformira rahlo pod temperaturo transformacije avstenit-ferit (3, 5), ker je pri isti temperaturi trdota ferita manjša od trdote avstenita (9).

V jeklenih trakovih, ki so bili valjani s približno enako končno temperaturo, je količina sulfidnih vključkov, ki je definirana kot dolžina vključkov na enoto površine vzdolžnega preseka (v nadalje-

vaju teksta bomo zanjo uporabljali izraz količina vključkov), različna v jeklih z različno sestavo, ki so imela enako količino žvepla (10, 11), kar se lepo vidi na sliki 1. Anizotropija v deformabilnosti trakov v hladnem, izražena kot razmerje med razteznostjo in kontrakcijo v prečni in vzdolžni smeri, je proporcionalna količini vključkov (sl. 2). Je torej različna v različnih jeklih z različno sestavo, ki imajo enako količino žvepla.

Raziskave so pokazale (12), da je tudi v debelih pločevinah iz jekel Č. 1204, Č. 0562 in Nioval 47 količina sulfidnih vključkov na vzdolžnem preseku različna pri enaki količini žvepla v jeklu. Povprečna dolžina vključkov je v jeklih Č. 0562 in Nioval 47 neodvisna od debeline plošč, v jeklu Č. 1204 pa se zmanjšuje, ko raste debelina plošč; v jeklenih trakovih pa povprečna dolžina vključkov raste, ko raste količina mangana v jeklih (sl. 3).

Razumevanje vseh teh empirijskih dognanj je mogoče na osnovi predpostavke, da sta v procesu

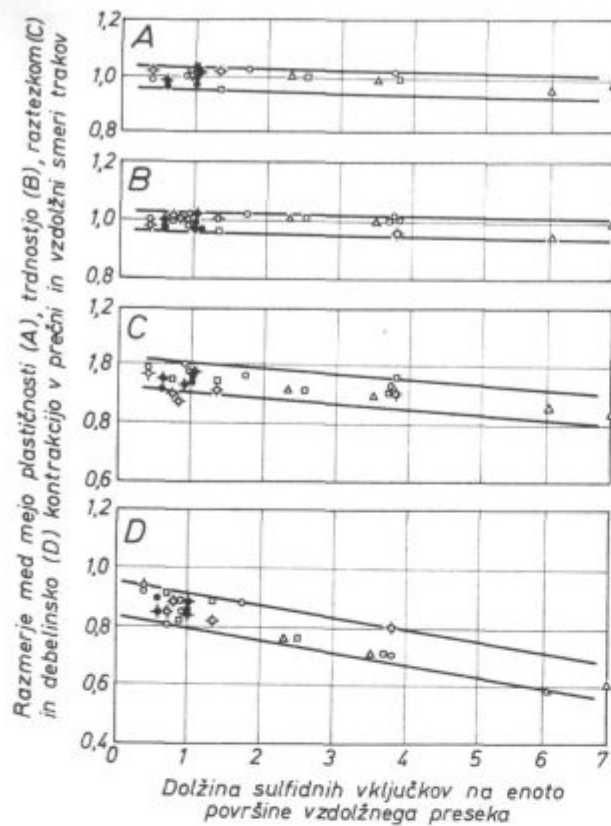


Slika 1
 Odnos med količino žvepla v jeklu in dolžino sulfidnih vključkov na enoto površine vzdolžnega preseka jeklenih trakov (količina vključkov)

Fig. 1
 Relationship between the sulphur content in steel and the length of sulphide inclusions per unit area of longitudinal section of steel strips (amount of inclusions).

Dr. F. Vodopivec, dipl. ing. metalurgije, samostojni raziskovalec na Metalurškem inštitutu

Dr. M. Gabrovšek, dipl. ing. metalurgije, direktor TKR v Železarni Jesenice

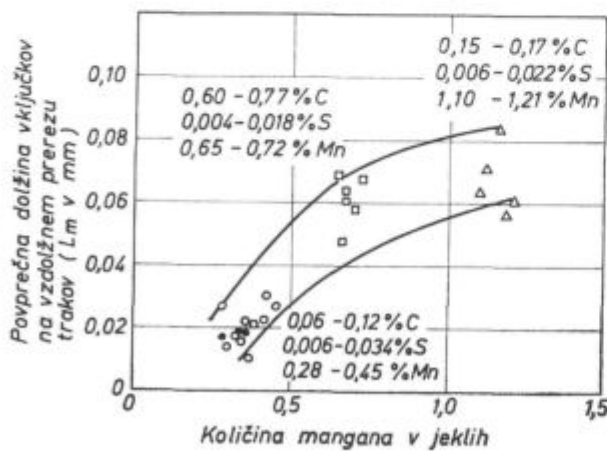


Slika 2

Vpliv količine vključkov na razmerje med lastnostmi trakov v prečni in vzdolžni smeri. Enake oznake kot na sl. 1. A — raztržna trdnost, B — meja plastičnosti, C — raztezek in D — kontrakcija debeline traka. S križcem so označeni normalizirani trakovi.

Fig. 2

Influence of the amount of inclusions on the ratio of properties in transversal and longitudinal direction. The same markings as in Fig. 1. A — ultimate strength, B — yield point, C — elongation, and D — contraction of strip thickness. Normalized strips are marked with crosses.



Slika 3

Vpliv količine mangana v jeklih na povprečno dolžino sulfidnih vključkov v valjanih trakovih

Fig. 3

Influence of manganese content in steel on the mean length of sulphide inclusions in rolled strips.

izoblikovanja vključkov, podaljšanja vključkov manganovega sulfida med vročim valjanjem jekla, udeležena dva dejavnika: sestava jekla in deformacijsko rekristalizacijske razmere med vročim valjanjem. Oba ta dejavnika seveda nista neodvisna, deformacijsko rekristalizacijske značilnosti jekla so namreč odvisne od temperature valjanja in od sestave jekla.

Na osnovi literaturnih rezultatov, ki smo jih povzeli v začetku našega sestavka, ni mogoče razumeti, kako sta oba dejavnika udeležena v procesu oblikovanja vključkov, zato je bilo določeno, da se to empirijsko preveri.

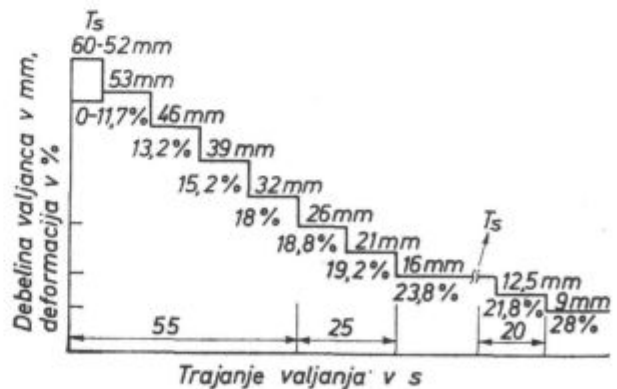
2. Metodika dela

Preizkuse smo napravili na 4 industrijskih jeklih, katerih sestava je podana v tabeli 1. Jekla so bila dobavljena v obliki slabov. Iz njih so bili pripravljani keksi z merami približno $200 \times 100 \times 52$ do 60 mm. Keksi so bili ogrevani 30 minut pri 1200°C in nato zvaljani na debelino okoli 16 mm z začetkom pri 1200°C ali pa z začetkom po ohladitvi na temperature $1100, 1050, 1000, 950$ in 900°C . Končne temperature valjanja so bile 1050 in 790°C , in razumljivo, odvisne od začetnih. Po valjanju so bile nekatere platine ohlajene na zraku, druge pa gašene v vodi zato, da bi ohranili mikrostrukturo jekla ob koncu valjanja. Za primerjavo so bile iz jekla Č. 0562 izvaljane tudi platine z debelino 27 mm. Del platin z debelino 16 mm je bil ponovno ogret na temperaturo valjanja in izvaljan na debelino pribl. 9 mm.

Vse temperature valjanja smo merili med valjanjem z digitalnim infrardečim pirometrom, preverili pa smo jih tudi s simulacijskimi preizkusi.

Na sliki 4 je shematično prikazan potek valjanja s parcialnimi redukcijami.

Vsa jekla so bila pomirjena z aluminijem, torej v sulfidni fazi ni bilo kisika. Tudi količina železa je bila v vseh primerih zelo podobna in pod tisto za katero bi pričakovali, da bi lahko vpli-



Slika 4

Načrt valjanja plošč. T, — začetna temperatura valjanja.

Fig. 4

Flowsheet of rolling plates. T, — initial rolling temperature.

vala na deformabilnost manganovega sulfida. Na sliki 5 so prikazani posnetki vključkov iz slabov. Jekli A in B sta razmeroma bogati z žveplom, zato je bila določitev količine vključkov s povprečnim trošenjem 10 % razmeroma hitra, medtem ko sta jekli C in D siromašni z žveplom, zato je bilo mogoče v razumnem času s sprejemljivo natančnostjo določiti samo povprečno dolžino vključkov.

Število in dolžino vključkov smo določili z individualnim štetjem in merjenjem vključkov v optičnem mikroskopu pri povečavi 500-krat. Upoštevali smo samo vključke z dolžino nad 0,005 mm, zato da bi se skrajšal čas merjenja. Določili smo pravo dolžino vseh vključkov, katere smo opazili v vidnem polju mikroskopa pri prehodu čez pločevino v smeri debeline. V nekaterih vzorcih je dolžina vključkov variirala med spodnjo upoštevano dolžino 0,005 mm in 0,7 mm. Da bi izmerili pravo dolžino takih vključkov, smo morali premakniti mikroskopsko polje.

Ročno štetje in merjenje dolžine vključkov smo izbrali namesto avtomatične analize iz naslednjih razlogov:

— vključki so bili v nekaterih primerih drobni in neravni. Zato projekcijska dolžina, ki jo določi avtomatični analizator velikosti (13), ne ustreza zagotovo pravi dolžini,

— dolžina posamičnih vključkov je bila večja kot premer opazovalnega polja v mikroskopu. Zato razpoložljiva avtomatična naprava ni mogla določiti prave dolžine takih vključkov. Če bi pa analizo izvršili pri manjši povečavi, bi lahko ostali neupoštevani drobni vključki.

Deformabilnost vključkov manganovega sulfida je, kot smo omenili v pregledu virov, odvisna od njihove velikosti. Da bi se izognili napakam zaradi razlike v začetni dolžini vključkov, smo izračunali deformacijo vključkov tako, da smo upoštevali le eno tretjino izmerjenih vključkov, ki so imeli največjo dolžino. Količino vključkov na vzdolžnem preseku jekla smo izračunali seveda z upoštevanjem vseh vključkov.

Pravo deformacijo vključkov bi bilo potrebno določiti iz debeline in dolžine. Ker pa smo merili samo dolžino, smo deformacijo vključkov (e_v) izračunali le iz povprečne dolžine vključkov v valjancu (l_v) in v slabu (l), torej $e_v = \ln(l_v/l)$. Deformacija jekla je razmerje med debelino slaba (t_v) in valjanca (t), torej $e_j = \ln(t_v/t)$. Indeks relativne plastičnosti vključkov manganovega sulfida je torej $v = e_v/e_j$.

Deformacije jekla nismo izvršili v izotermnih pogojih, zato indeks relativne plastičnosti ni opredeljen strogo znanstveno. Kljub temu smatramo, da je lahko koristna osnova za razumevanje ponašanja vključkov manganovega sulfida med vročim valjanjem jekla, ko si sledijo zaporedne parcialne redukcije debeline pri stalno padajoči

temperaturi in prihaja do interakcije deformacijske utrditve, poprave, rekristalizacije in transformacije jekla.

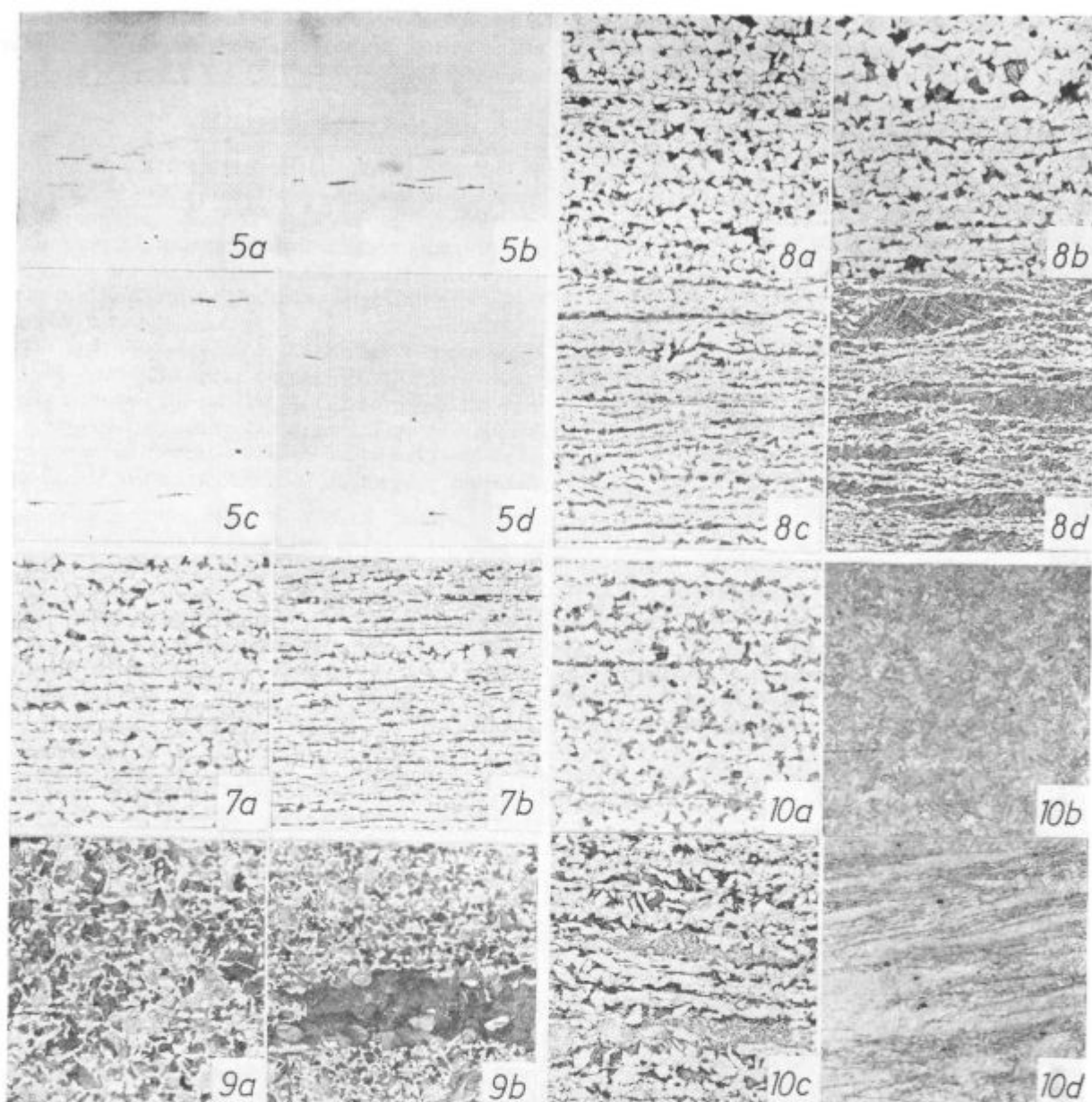
3. Rezultati, opis in razprava

Splošno obliko odvisnosti med temperaturnim področjem valjanja plošč in indeksom relativne plastičnosti za sulfidne vključke prikazuje sl. 6. Pri ponovnem ogrevanju 16 mm plošč pred nadaljevanjem valjanja do debeline 9 mm se je izvršila delna sferoidizacija sulfidnih vključkov. Zato plošč z debelino 9 mm, ki so bile izvaljane z začetno temperaturo 1200°C, v grafikonu na sl. 6 nismo upoštevali. Opazili smo podobno obnašanje vključkov pri deformaciji, neodvisno od debeline plošč. Vendar bo naša razprava osnovana predvsem na značilnostih plošč z debelino 16 mm, zato ker smo detajlno pregledali le mikrostrukturo teh plošč.

Relativna plastičnost sulfidnih vključkov je najmanjša v jeklu A, ki ima najmanj legirnih elementov v vsem intervalu temperature valjanja. Indeks relativne plastičnosti raste, ko se znižuje temperatura valjanja, vendar opazimo zmanjšanje relativne plastičnosti pri končni temperaturi valjanja 830°C, ki je pod temperaturo transformacije avstenita v jeklu. Znova se indeks relativne plastičnosti poveča, ko se temperatura konca valjanja še zniža na 790°C, ko se del deformacije izvrši v jeklu, v katerem prevladuje ferit nad avstenitom.

Na obruskih smo lahko potrdili prisotnost ferita v jeklu med valjanjem pod 830°C. Pri večjih temperaturah valjanja je jeklo dobilo mikrostrukturo iz rahlo trakasto razporejenih poligonalnih zrn ferita in perlita (sl. 7 a). Po zračnem ohlajanju s temperature konca valjanja 790°C opazimo v trakasti mikrostrukturi često zvezne ali polzvezne sloje perlita, ki so ločeni s slojem feritnih zrn stebraste oblike (sl. 7 b). Taka mikrostruktura se razvije, ker se med valjanjem premeni del avstenita, nastali ferit je močno plastičen in se deformira v tanke sloje, iz teh pa pri ohlajanju lateralno rastejo feritna zrna v preostali avstenit. Z ogljikom nasičeni preostali avstenit se transformira v perlit pri ustrezni temperaturi (13).

V jeklu B, ki ima povečano količino mangana, se pojavi hitro povečanje indeksa relativne plastičnosti pri končni temperaturi valjanja 910°C in hitro zmanjšanje indeksa pri končni temperaturi valjanja 790°C. Po koncu valjanja pri 910°C je mikrostruktura iz rahlo trakasto razporejenih poligonalnih zrn ferita in perlita (sl. 8 a). Nižja temperatura valjanja ustvari podobno, vendar bolj trakasto mikrostrukturo, v kateri se pojavijo lečaste kolonije večjih feritnih in perlitnih zrn (sl. 8 b). Pri najnižji temperaturi je bilo teh kolonij največ, obdane so bile z drobnozrnato feritno-perlitno matico. Trakasto razporeditev je zelo izrazita in perlit najdemo često v neprekinje-



5a, 5b,	8a, 8b,
5c, 5d	8c, 8d
7a, 7b	10a, 10b,
9a, 9b	10c, 10d

Slika 5
Sulfidni vključki v slabih jekel A, B, C in D. Povečava 100 ×.
Fig. 5
Sulphide inclusions in A, B, C, and D steel slabs. Magnification 100 ×.

Slika 7 a in b
Mikrostruktura v ploščah iz jekla A po končnih temperaturah valjanja 870 in 790° C in ohladiitvi na zraku.
Povečava 100 ×.

Fig. 7
a and b Microstructure of plates of A steel after the final rolling temperatures 870 and 790° C and air cooling.
Magnification 100 ×.

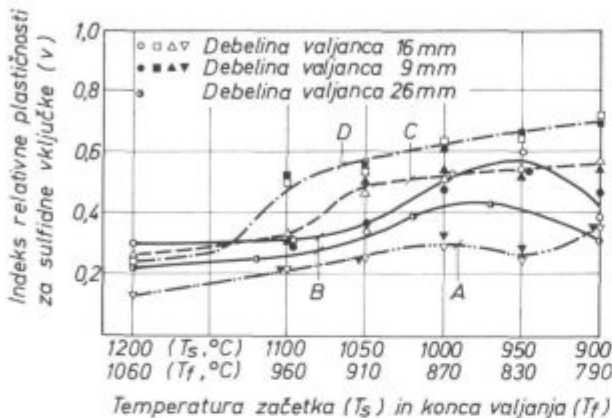
nih slojih z dolžino nekaj mm (sl. 8 c). V ploščah, ki so bile gašene po valjanju, smo opazili mikrostrukturo iz velikih bajnitnih zrn v drobnozrnati matici iz ferita in perlita (sl. 8 d). Ta mikrostruktura kaže, da se ni izvršila rekristalizacija avstenita do konca med zaporednimi redukcijami pri končni temperaturi valjanja 870°C in nižje. Pri končni temperaturi valjanja 790°C se je del valjanja izvršil že v dvofaznem področju avstenit-ferit. Odvisnost med temperaturo valjanja in in-

deksom relativne plastičnosti vključkov manganovega sulfida je podobna v jeklih C in D, kot v jeklu B z dvema izjemama. V jeklih C in D ni znakov transformacije avstenita med valjanjem, področje hitrega povečanja indeksa relativne plastičnosti pa je pomaknjeno k višji temperaturi, najvišje je v jeklu B, ki je legirano z niobijem.

Tudi razvoj mikrostrukture v odvisnosti od pogojev valjanja je v jeklih C in D podoben kot v jeklu C. Pri visoki temperaturi konca valjanja dobita obe jekli mikrostrukturo iz enakomernih poligonalnih zrn ferita in perlita (sl. 9 a in 10 a). Večja lečasta zrna in skupki zrn se pojavijo po valjanju pri nizki končni temperaturi (sl. 9 b, 9 c in 10 c). V plošči iz jekla D, ki je bila gašena z visoke temperature konca valjanja 1060°C, je mikrostruktura iz poligonalnih zrn avstenita; v plošči, ki je bila gašena s končne temperature valjanja 790°C, pa je mikrostruktura le iz sploščenih zrn avstenita (sl. 10 b in 10 d), kar je znak, da ni bilo rekristalizacije.

Mikrostruktura je dokaz, da pride do hitrega povečanja indeksa relativne plastičnosti manganovega sulfida pri vroči deformaciji jekla pod temperaturo T_{pr} , ko se ne izvrši popolna rekristalizacija avstenita med parcialnimi redukcijami jekla. Ta temperatura je nad 960°C v mikrolegiranem jeklu D, kar se ujema s starejšimi ugotovitvami pri jeklu iste vrste (14) in je nekaj višje, kot se sicer navaja za tovrstna jekla (15).

Torej povzroča delna rekristalizacija avstenita po prehodih med valji precejšnje povečanje relativne plastičnosti vključkov manganovega sulfida. Začetna temperatura, ko se to hitrejše večanje indeksa relativne plastičnosti začne T_{pr} , je odvisna od sestave jekla. Pri enakih pogojih valjanja to



Slika 6

Odvisnost med začetno temperaturo valjanja (T_s) in indeksom relativne plastičnosti vključkov manganovega sulfida (v).

Na abscisi so tudi končne temperature valjanja plošč (T_f) z debelino 9 in 16 mm iz jekel A, C in D ter debelin 9, 16 in 27 mm iz jekla B.

Fig. 6

Relationship between the initial rolling temperature (T_s) and the index of relative plasticity of manganese sulphide inclusions (v). Final rolling temperatures of 9 and 16 thick plates (T_f) made of A, C, and D steel, and 9, 16, and 27 mm thick plates made of B steel are marked also on the abscissa.

Slika 8 a, b, c in d

Jeklo B. Mikrostruktura v 16 mm ploščah. Povečava 100 ×. a) Končna temperatura valjanja 910°C, ohlajeno na zraku; b) Končna temperatura valjanja 870°C, ohlajeno na zraku; c) Končna temperatura valjanja 790°C, ohlajeno na zraku; d) Končna temperatura valjanja 790°C, gašeno v vodi.

Fig. 8

a, b, c, and d Microstructure of 16 mm B steel plates. Magnification 100 ×. a. Final rolling temperature 910°C, cooled in air, b. Final rolling temperature 870°C, cooled in air, d. Final rolling temperature 790°C, quenched in water. c. Final rolling temperature 790°C, cooled in air.

Slika 9 a, b in c

Jeklo C. Mikrostruktura v 16 mm ploščah. Končne temperature valjanja 960, 910 in 790°C, ohladitev na zraku. Povečava 100 ×.

Fig. 9

a, b, and c Microstructure of 16 mm C steel plates. Final rolling temperatures 960, 910, and 790°C, cooled in air. Magnification 100 ×.

Slika 10 a, b, c in d

Jeklo D. Mikrostruktura v 16 mm ploščah. Povečava 100 ×. a) Končna temperatura valjanja 1060°C, ohladitev na zraku; b) Končna temperatura valjanja 1060°C, gašenje v vodi; c) Končna temperatura valjanja 830°C, ohladitev na zraku; d) Končna temperatura valjanja 790°C, gašenje v vodi.

Fig. 10

a, b, c, and d Microstructure of 16 mm D steel plates. Magnification 100 ×. a. Final rolling temperature 1060°C, cooled in air, b. Final rolling temperature 1060°C, quenched in water, c. Final rolling temperature 830°C, cooled in air, d. Final rolling temperature 790°C, quenched in water.

temperaturo poveča dodatek mangana, ogljika in niobija v jeklo, pri čemer je vpliv niobija najmočnejši. Zanimivo pa je, da je hitra rast indeksa relativne plastičnosti sulfidnih vključkov omejena na relativno ozko temperaturno področje. Ko se temperatura zniža pod mejo tega področja T_{pr} , postane rast relativne plastičnosti počasnejša in podobna rasti nad temperaturo T_{pr} , ki je pri vseh jeklih podobna.

Sestava sulfidnih vključkov je bila v vseh jeklih podobna. Jekla so bila pomirjena z aluminijem, torej v manganovem sulfidu ni bilo kisika, ki močno povečuje trdoto in zmanjša deformabilnost. V vseh jeklih je elektronska mikroanaliza pokazala podobno količino železa v manganovem sulfidu. Torej lahko trdimo, da različno ponašanje vključkov pri valjanju ni posledica razlike v sestavi.

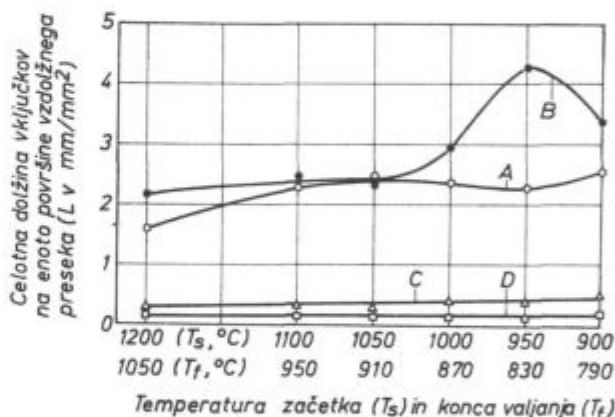
Ovisnost med temperaturo valjanja in indeksom relativne plastičnosti ne kaže nobenih znakov deformacijske utrditve manganovega sulfida in njegove rekristalizacije. Vključki so v vseh jeklih enake sestave. V primeru, da bi prihajalo v njih do procesov deformacijske utrditve in mehčanja z rekristalizacijo, ki bi se odražali na relativni plastičnosti, bi pričakovali, da bo v odvisnostih na sl. 6 pri vseh jeklih neka značilnost pri približno enaki temperaturi. Tega ni, zato se nam zdi utemeljen sklep, da deformacijska utrditev in rekristalizacija manganovega sulfida ne prihajata v poštev kot dejavnika, ki zaznavno vplivata na relativno plastičnost.

Zato se nam zdi popolnoma utemeljeno, če odvisnost med temperaturo valjanja in indeksom relativne plastičnosti manganovega sulfida, ki je prikazana na sl. 6, razložimo le z dogajanjem v jeklu.

Nad temperaturo T_{pr} znižanje temperature povzroča počasno in stalno večanje indeksa relativne plastičnosti manganovega sulfida. Razlaga je, da z znižanjem temperature raste razmerje med trdoto jekla in trdoto vključkov (5, 6). Ko se jeklo valja pod T_{pr} , rekristalizacija avstenita ni popolna po vsaki redukciji debeline valjanca. Ko se zniža temperatura, raste delež nerekrystaliziranega avstenita in približno pod T_{nr} je mikrostruktura večinoma iz nerekrystaliziranih

avstenitnih zrn. Naraščajoča količina nerekrystaliziranega avstenita pod T_{pr} povečuje trdoto jekla, torej raste razmerje med trdoto matriksa in trdoto vključkov. To povečuje, kot je bilo že omenjeno, indeks relativne plastičnosti sulfidnih vključkov. Pod temperaturo T_{nr} poprava avstenita verjetno preprečuje hitro naraščanje trdote matriksa, povečanje trdote postaja podobno kot nad T_{pr} . Indeks relativne plastičnosti je večji, zato ker je trša matica, ki obdaja sulfidne vključke.

Omenili smo že, da je količina vključkov v toplo valjanih trakovih in ploščah odvisna pri enaki količini žvepla od sestave jekla (10, 11, 12). Jasno je sedaj, da je to razliko potrebno povezati z razliko v relativni plastičnosti manganovega sulfida v različnih jeklih. To nam potrjuje tudi primerjava slike 6 s sliko 11. Zadnja prikazuje razmerje med temperaturo valjanja in količino sulfidnih vključkov. Omenili smo že, da sta bili jekli C in D razmeroma siromašni z žveplom, imeli sta malo sulfidnih vključkov in je bila natančnost pri določanju količine vključkov enake velikosti kot količina vključkov. Odvisnost med temperaturo valjanja in relativno plastičnostjo ter med temperaturo valjanja in količino vključkov je zelo



Slika 11

Vpliv začetne (T_s) in končne (T_f) temperature valjanja plošč iz jekel A in B na količino sulfidnih vključkov.

Fig. 11

Influence of the initial (T_s) and the final (T_f) rolling temperature for A and B steel plates on the amount of sulphide inclusions.

Tabela 1: Sestava jekel, količina vključkov in vsebnost železa v sulfidnih vključkih

Jeklo	Vrsta	Element v %									
		C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Fe ¹	L ²
A	Č. 0462	0,14	0,22	0,50	0,01	0,034	0,05	—	—	3,1	0,62
B	Č. 0562	0,16	0,33	1,24	0,017	0,027	0,02	—	—	3,1	1,22
C	Č. 1531	0,48	0,24	0,62	0,013	0,01	0,02	—	—	2,7	0,21
D	Nioval 47	0,15	0,42	1,48	0,008	0,006	0,056	0,055	0,07	2,4	0,08

¹ Vsebnost železa v vključkih manganovega sulfida v slabih

² Dolžina sulfidnih vključkov na mm² površine vzdolžnega preseka slabov

podobna pri jeklih A in B. Jeklo B ima v ploščah, ki so valjane v intervalu temperature nepopolne rekristalizacije avstenita, pomembno povečanje količine sulfidnih vključkov. Ta je izražena, kot smo že povedali, z dolžino sulfidnih vključkov na mm² površine vzdolžnega preseka valjanca.

Pri valjanju pri temperaturi delne premene avstenita v ferit se opaža zmanjšanje količine vključkov, vendar kaže jeklo A, da je zmanjšanje relativne plastičnosti zaradi valjanja v dvofaznem področju avstenita in ferita omejeno na zelo ozek interval temperature in zato nima tehnološkega pomena.

Končno lahko sklepamo, da je vzrok za različno količino sulfidnih vključkov v toplo valjanih trakovih in ploščah iz različnih jekel, ki imajo enako količino žvepla, predvsem v različnosti rekristalizacijske sposobnosti teh jekel pri zaporednih redukcijah debeline pri valjanju. Velja tudi, da sta manj pomembna vpliv utrditve jekla zaradi trdne raztopine, torej direktn vpliv legiranja jekla in vpliv transformacije avstenita med valjanjem.

4. Sklepi

Izvršili smo raziskave s ciljem, da opredelimo vpliv temperature valjanja na relativno plastičnost sulfidnih vključkov v 4 različnih jeklih. Začetna temperatura je bila v intervalu med 1200 in 900° C, končna temperatura pa v intervalu med 1050 in 790° C. Valjanje se je izvršilo v 7 prehodih s skupno redukcijo 73 % v eni vročini. Zaradi verifikacije smo izvršili tudi valjanje z večjo in manjšo redukcijo. Deformacija vključkov je bila določena kot razmerje njihove povprečne dolžine v valjancu in v začetnem slabu. Na osnovi rezultatov raziskave smo izoblikovali naslednje sklepe:

— vpliv temperature valjanja na relativno plastičnost sulfidnih vključkov je odvisen od sestave jekla,

— utrditev avstenita s trdno raztopino zaradi legiranja v jeklo elementov, ki so topni v avstenitu, na primer mangan in silicij, povečuje relativno plastičnost,

— deformacijska utrditev jekla, zato ker se med zaporednimi prehodi med valji ne izvrši kompletna rekristalizacija avstenita, poveča relativno plastičnost mnogo bolj kot utrditev jekla

zaradi trdne raztopine. Dodatek mangana, ogljika, in posebno niobija, zadržuje rekristalizacijo jekla med zaporednimi redukcijami debeline pri valjanju,

— relativna plastičnost hitreje raste v omejenem intervalu temperature kot nad tem intervalom in pod njim. To razlagamo z vplivom rekristalizacije in poprave na trdoto jekla med valjanjem,

— delna transformacija avstenita v ferit med valjanjem zmanjša relativno plastičnost v sorazmerno ozkem intervalu temperature,

— valjanje jekla v temperaturnem intervalu, ko prihaja do deformacijske utrditve avstenita med valjanjem, lahko dvakrat poveča količino vključkov, izraženo kot dolžino vključkov na enoto površine vzdolžnega preseka valjanca, katerega redukcija pri valjanju je dosegla 73 %.

Analize vključkov je izvršila M. Jakupovič.

Sredstva za to raziskovalno delo je prispevala Železarna Jesenice.

Viri

1. T. Malkievicz and S. Rudnik: JISI, 1963, 201, 33—38.
2. P. J. H. Maunder and J. A. Charles: *ibid.*, 1968, 206, 705 do 715.
3. T. J. Baker and J. A. Charles: *ibid.*, 1973, 211, 187—192.
4. T. J. Baker and J. A. Charles: *ibid.*, 1972, 210, 680—690.
5. K. B. Gove and J. A. Charles: *Metals Techn.*, 1974, 1, 425—431.
6. T. J. Baker, K. B. Gove and J. A. Charles: *Metals Techn.*, 1976, 3, 183—193.
7. K. B. Gove: Ph. D. Thesis, University of Cambridge, 1972. Loc. cit. ref. 8.
8. A. Segal and J. A. Charles: *Metals Techn.*, 1977, 4, 177 do 182.
9. D. M. Keane, C. M. Sellars and W. J. Mc G. Tegart: *Deformation under hot working conditions*, ISI Publ. 108, 1968, 21—28.
10. F. Vodopivec, J. Arh and B. Ralič: *Železarski Zbornik*, 1975, 9, 167—179.
11. F. Vodopivec, J. Arh, B. Ralič and T. Lavrič: *Revue de Métallurgie*, 1978, 75, 691—698.
12. F. Vodopivec, M. Gabrovšek, I. Rak, B. Ralič and J. Zvočelj: *Železarski Zbornik*, 1978, 12, 1—16.
13. D. Dulieu and I. G. Davis: *Metals Techn.*, 1975, 2, 178 do 194.
14. F. Vodopivec, M. Gabrovšek and M. Kmetič: *Härterei-Technische Mitteilungen*, 1977, 32, 284—291.
15. I. L. Dillamore, R. F. Dewsnap and M. G. Frost: *Metals Techn.*, 1975, 2, 294—302.

ZUSAMMENFASSUNG

Einfluss des Warmwalztemperaturintervalles auf das relative Verformungsvermögen der Mangansulfideinschlüsse in den Stählen C 0462, C 0562, C 1530 und Nioval 47 ist untersucht worden. Die Walzanfangstemperatur war 1200 bis 900° C, die Walzendtemperatur 1050 bis 790° C. In einer Hitze sind aus Brammen von 55 mm Dicke Platten von 16 mm Dicke, und zum Vergleich auch Platten von 26 mm Dicke, aus Stahl C 0562 ausgewalzt worden. In zwei Hitzen sind Platten von 9 mm Dicke ausgewalzt worden. Die 16 mm dicken Platten wurden in 7 Stichen mit Abnahmen von 11,7 bis 23,8 % ausgewalzt. In Brammen und in ausgewalzten Platten ist die durchschnittliche Länge von einem Drittel der Einschlüsse, mit der grössten Länge bestimmt worden. Aus dieser wurde dann das relative Verformungsvermögen der Mangansulfideinschlüsse, welche nach der Analyse im Elektronenmikroskop etwa 3 % Fe enthalten, errechnet.

Die Untersuchungsergebnisse zeigten folgendes:

— der Einfluss der Walztemperatur auf das relative Verformungsvermögen der Mangansulfideinschlüsse ist von der Stahlzusammensetzung abhängig.

— die Verfestigung von Austenit mit Mn, C und Nb in harter Lösung, vergrössert das relative Verformungsvermögen von Mangansulfid.

— die Verfestigung von Stahl verursacht durch die unvollkommene Rekristallisation von Austenit nach der Verformung durch die aufeinanderfolgende Dickenabnahme vergrössert das relative Verformungsvermögen stärker als das durch die Verfestigung der harten Lösung bewirkt wird.

— das relative Verformungsvermögen der Sulfideinschlüsse wächst schnell in einem bestimmten Temperaturintervall wegen der Überdeckung der Verformungsverfestigung, der Rekristallisation, und der Austeniterholung.

— eine teilweise Umwandlung von Austenit in Ferrit während der Walzung vermindert das relative Verformungsvermögen in einem begrenzten Temperaturintervall.

— das Warmwalzen von Stahl im Intervall des grössten relativen Verformungsvermögens der Sulfideinschlüsse, kann die Einschlussmenge, ausgedrückt durch die Einschlusslänge in der Längsschnitteinheit des Walzgutes, verdoppeln.

SUMMARY

Influence of the temperature interval of hot rolling C 0462, C 0562, C 1530, and Nioval 47 steel on the relative plasticity of manganese sulphide inclusions was investigated. Initial rolling temperature varied between 1200 and 900° C, and the final one between 1050 and 790° C. In one heat, 16 mm plates (for comparison also 26 mm plates) were rolled out of 55 mm C 0562 steel slabs. In two heats, also 9 mm plates were rolled. Rolling 16 mm plates included 7 passes with partial reductions between 11.7 and 23.8 %. The mean length of the one third of inclusions with the greatest length was determined in the slabs and rolled plates thus enabling the calculation of the relative plasticity of manganese sulphide inclusions which contain about 3 % Fe as obtained by the electron microanalyzer.

The investigation results are the following:

— The influence of the rolling temperature on the relative plasticity of manganese sulphide inclusions depends on the steel composition;

— hardening of austenite due to manganese, carbon, and niobium solid solution increases the relative plasticity of manganese sulphide;

— deformation hardening of steel because of incomplete recrystallization of austenite between the consecutive reductions of thickness increases the relative plasticity much more than the solid solution hardening;

— relative plasticity of sulphide inclusions increases fast in certain temperature interval because the deformation hardening, the recrystallization and the recovery of austenite are overlapped;

— partial transformation of austenite into ferrite during rolling reduces the relative plasticity in a limited temperature interval;

— hot rolling of steel in the interval of the highest relative plasticity of sulphide inclusions can twice increase the amount of inclusions which is expressed by the length of inclusions per unit of longitudinal cross section of the rolled piece.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовали влияние температурного интервала горячей прокатки на относительную пластичность включений сернистого марганца в сталях марок C 0462, C 0562, C 1530 и Nioval 47. Начальная температура составляла от 1200 до 900°, а конечная — от 1050 до 790°. За один нагрев были прокатаны из слэбов толщиной прибл. 55 мм пластины в толщине 16 мм, а для сравнения из стали марки C 0562 пластины в толщине 26 мм. С двумя нагревами прокатаны также пластины толщиной 9 мм. Прокатывание пластин толщиной 16 мм велось в 7 проходов с парциальной редукции между 11,7 и 23,8 %. В слэбах и в катаных пластинах определяли среднюю длину 1/3 включений самой большой длины, и из длины высчитали относительную пластичность включений сернистого марганца, которые на основании анализа в электронном микроанализаторе содержат прибл. 3 % Fe.

Результаты исследований показали следующее:

— влияние темп-ры прокатывания на относительную пластичность включений сернистого марганца зависит от состава стали;

— упрочнение аустенита с твердым раствором под действием марганца, углерода и ниобия увеличивает относительную пластичность сернистого марганца;

— на основании того, что рекристаллизация аустенита, в связи с последовательным уменьшением толщины вполне не выполняется, деформационное упрочнение стали увеличивает относительную пластичность гораздо эффективнее, чем это выполняет упрочнение с твердым раствором;

— относительная пластичность сульфидных включений быстро увеличивается в определенном темп-ом интервале вследствие перекрытия деформационного упрочнения, рекристаллизации и доделки аустенита;

— в определенном, ограниченном темп-ом интервале, частичное трансформирование аустенита в феррит уменьшает во время прокатки относительную пластичность;

— горячая прокатка стали в интервале максимальной пластичности сульфидных включений в состоянии в двойне увеличивает количество включений; это выражено величиной включений на единицу продольного сечения прокатного изделия.