

UPORABA SIMULACIJE OHLAJANJA AVSTENITNIH JEKEL ZA IZRAČUN OHLAJANJA MALOOGLEJČNIH JEKEL

USE OF A SIMULATION FOR THE COOLING OF AUSTENITIC STEELS FOR A COOLING CALCULATION FOR LOW-CARBON STEELS

Janko Kokošar

SŽ Acroni, d. o. o., Cesta B. Kidriča 44, 4270 Jesenice, Slovenija
jkokosar@acroni.si

Prejem rokopisa – received: 2003-10-23; sprejem za objavo – accepted for publication: 2003-11-11

Več trakov raznih vrst jekel je bilo hlajeno na hladilni liniji štekla pri različnih hitrostih traku in z različnimi hladilnimi sekcijami. Za vsak trak lahko dobimo meritev končne temperature valjanja, temperature navijanja in hitrost traku. Z uporabo simulacije ohlajanja za avstenitna jekla ugotovimo, kakšno hitrost mora imeti trak avstenitnega jekla pri drugih uporabljenih parametrih ohlajanja, da dosežemo na koncu hladilne linije želene temperature. Pomembno je izračunati razmerje te simulirane hitrosti z izmerjeno hitrostjo za maloogljčno jeklo. Z analizo razmerij hitrosti za avstenitno in maloogljčno jeklo lahko ocenimo, kje se dogajata premena iz avstenita v ferit ter magnetna premena, kako je to odvisno od kemijske sestave jekla, in točneje napovemo, kolikšno hitrost traku je treba uporabiti, da dosežemo želene temperature traku pred navijanjem. S še večjim številom podatkov in analiz bo možno dobiti še izboljšane informacije in točnejše temperature navijanja.

Ključne besede: maloogljčna jekla, štekel, hlajenje, premena, ferit, avstenit, magnetna premena

Some strips of different steel grades were cooled on a Steckel-mill cooling table using different speeds of strips and different cooling sections. The final temperature of rolling, the coiling temperature and the speed of every strip were measured. A simulation of the cooling of austenite steels at the measured final rolling temperature and the other parameters gives the speed that allows a proper coiling temperature. The ratio of the simulated speed for austenitic steel versus the measured speed for low-carbon steel is calculated afterwards. An analysis of these ratios can give estimations of where the austenite-to-ferrite transformation and the magnetic transformation occur, and how this depends on the chemical composition of the steel. It is also possible to predict more precisely the strip speed that gives the target coiling temperature. More data and analyses will give better information and more precise coiling temperatures.

Key words: low-carbon steels, Steckel, cooling, phase transformation, ferrite, austenite, magnetic transformation

1 UVOD

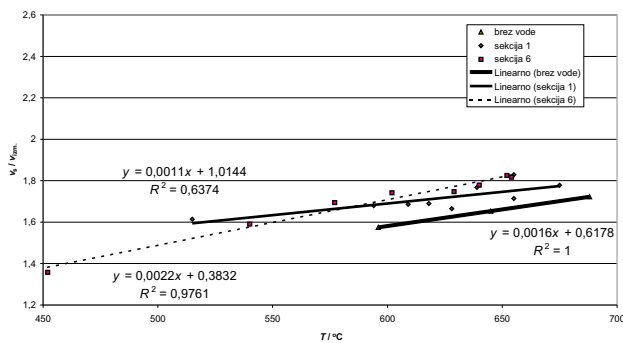
V člankih ^{1,2} je opisana simulacija za hlajenje avstenitnih trakov na hladilni liniji štekla. Simulacija je tudi preverjena. Predvsem se ta uporablja za mnogoogljčna jekla, ki imajo po končani transformaciji sicer perlitno mikrostrukturo, vendar je za samo dogajanje pri hlajenju traku dovolj že obravnavava v avstenitnem območju. Dodatni problem pri simuliranju hlajenja pa je jeklo, pri katerem moramo pri simulaciji upoštevati tudi ohlajanje v feritnem območju. Temperatura sproščanja premenske toplote je zelo odvisna od kemične sestave, od hitrosti ohlajanja, poleg tega pa je specifična toplota pri magnetni premeni zelo odvisna od temperature.

Zato sem za maloogljčna jekla uvedel posebno metodo za približevanje pravilni simulaciji. Trakovi raznih vrst jekel so bili na hladilni liniji štekla hlajeni pri različnih hitrostih traku in z različnimi hladilnimi sekcijami. Za vsak trak se zapisujejo meritve končne temperature valjanja, temperature navijanja in hitrosti traku. Simuliramo ohlajanje avstenitnega jekla in pri tem uporabimo iste hladilne sekcije, isto končno temperaturo valjanja, temperaturo navijanja in debelino, kot jo ima opazovani trak maloogljčnega jekla. S simulacijo pa

izračunamo neko hitrost traku. Za vsak trak izračunamo razmerje med izračunano in izmerjeno hitrostjo traku. Ta razmerja obravnavamo v odvisnosti od uporabljenih sekcij, od končne temperature valjanja in temperature navijanja. Tako je možno oceniti, kje potečeta premena iz avstenita v ferit in magnetna premena ter odvisnost premene od kemijske sestave jekla. Točneje lahko napovemo, kakšno hitrost traku je treba uporabiti, da dosežemo želene temperature traku. Dodatne meritve in analize bodo dale še izboljšane informacije in s tem točnejše temperature navijanja.

2 IZVEDBA MERITEV IN OBDELAVA REZULTATOV

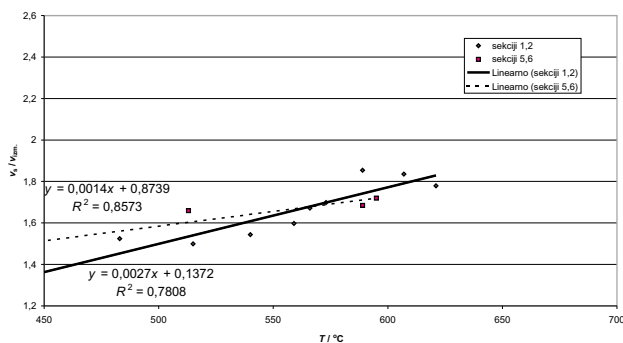
Za izvedbo meritev je bilo izbrano predvsem maloogljčno jeklo Elmag. Potrebno je bilo dobiti rezultate pri raznih temperaturah navijanja traku na hladilni liniji štekla. Jeklo Elmag je bilo izbrano, ker različne temperature navijanja traku ne vplivajo na njegovo uporabnost. Hladilna linija dolžine 70 m, kjer trak, ki se pomika proti hladnemu navijalniku, hladimo z vodno prho, je razdeljena na šest enakih hladilnih sekcij.



Slika 1: Vpliv temperature navijanja jekla Elmag na razmerje simulirane hitrosti traku za avstenitno jeklo (v_s) glede na izmerjeno hitrost traku (v_{izm}). Prikazani so primeri brez uporabe hladilne vode, primeri hlajenja s hladilno sekcijo 1 in s hladilno sekcijo 6 (zadnja sekcija). Delež ogljika je 0,01 %. Debelina traku pri Elmagu je 2,4 mm.

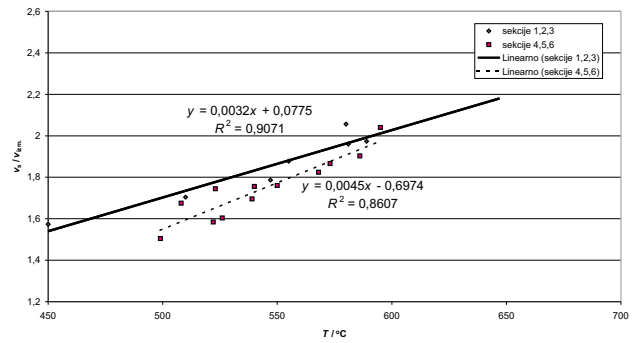
Figure 1: The influence of the coiling temperature of steelgrade Elmag on the ratio of the simulated strip speed for austenite (v_s) versus the measured strip speed (v_{izm}). Examples without the use of cooling water, with the use of cooling section 1 and with the use of cooling section 6 (last section) are presented. Carbon content is 0.01 %. Thickness of strips is 2.4 mm.

Trakovi so bili ohlajani z uporabo različnih hladilnih sekcij. Da ne bi bilo teh kombinacij hladilnih sekcij preveč, so vedno izbrane samo tiste na začetku ali samo na koncu hladilne linije. Na primer sekcije 1, 2, 3 in 4, ali pa sekcije 3, 4, 5, 6, če imamo opravka s štirimi hladilnimi sekcijami. Izkušnje kažejo, da so pri uporabi hladilnih sekcij na začetku linije temperature navijanja višje, uporaba hladilnih sekcij na koncu linije pa omogoča nižje temperature navijanja. Za vsak naviti kolobar se podatki o končni temperaturi valjanja, temperaturi navijanja, hitrosti traku in uporabljenih hladilnih sekcijah shranijo v informacijskem sistemu. Temperatura traku se po dolžini spreminja, večji odmik imajo predvsem temperature sprednjega in zadnjega konca traku, zato pri preskusih upoštevamo temperature bolj v sredini traku, kjer so najbolj stabilne, čeprav ne popolnoma konstantne.



Slika 2: Prikazani so primeri hlajenja z uporabo hladilnih sekcij 1 in 2 ter primeri hlajenja z uporabo hladilnih sekcij 5 in 6. Delež ogljika je 0,01 %.

Figure 2: Examples for cooling using sections 1 and 2 and sections 5 and 6 are presented. Carbon content is 0.01 %.



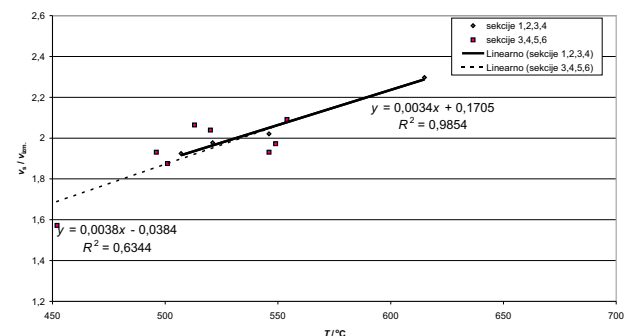
Slika 3: Prikazani so primeri hlajenja s hladilnimi sekcijami 1, 2 in 3 ter primeri hlajenja s hladilnimi sekcijami 4, 5 in 6. Delež ogljika je 0,01 %.

Figure 3: Examples for cooling using sections 1, 2 and 3 and sections 4, 5 and 6 are presented. Carbon content is 0.01 %.

Ti podatki so bili uporabljeni za simulacijo ohlajanja avstenitnih jekel. Kot vhodni podatki za simulacijo so uporabljeni končna temperatura valjanja, temperatura navijanja, debelina traku in aktivirane hladilne sekcije, kot rezultat pa dobimo hitrost traku, ki je potrebna, da dosežemo zahtevano temperaturo navijanja. Seveda navadno simulacije izvajamo tako, da je rezultat temperatura navijanja traku. Zato je bilo prej potrebno narediti veliko simulacij ohlajanja traku pri različnih končnih temperaturah valjanja, aktiviranih hladilnih sekcijah in hitrostih traku. Iz dobljenih rezultatov izračunamo, kolikšna hitrost traku je potrebna, da zagotovimo izbrano temperaturo navijanja pri drugih (zgoraj omenjenih) parametrih.

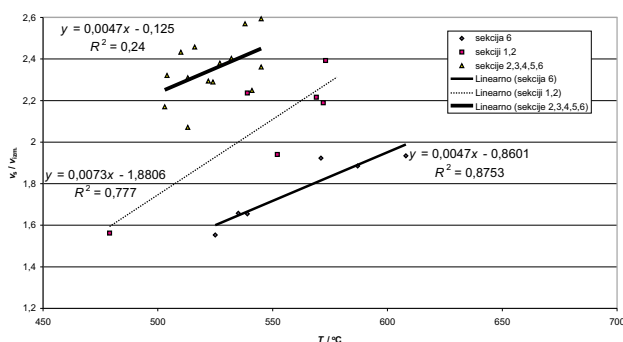
Končni rezultat matematične obdelave meritev je razmerje izračunane hitrosti traku avstenitnega jekla v primerjavi z izmerjeno hitrostjo traku. Potem primerjamo, kako je to razmerje odvisno od drugih parametrov, kot je na primer temperatura navijanja.

Poleg jekla Elmag je bilo uporabljenih še nekaj drugih maloogljčnih jekel. Tudi pri teh smo iskali, kolikšna so bila razmerja zgoraj omenjenih hitrosti. Jeklo



Slika 4: Prikazani so primeri hlajenja s hladilnimi sekcijama 1, 2, 3 in 4 ter primeri hlajenja s hladilnimi sekcijami 3, 4, 5 in 6. Delež ogljika je 0,01 %, razen pri višjih treh točkah serije za sekcije 1, 2, 3 in 4, ki veljajo za 0,03 % C.

Figure 4: Examples for cooling with sections 1, 2, 3 and 4 and with sections 3, 4, 5 and 6 are presented. Carbon content is 0.01 %, except for the three highest points of the series for sections 1, 2, 3 and 4. Carbon content is 0.03 % in these cases.



Slika 5: Prikazani so primeri hlajenja za nekatera konstrukcijska jekla. Uporabljene sekcije so 6, ali 1 in 2 ali 2, 3, 4, 5 in 6. Debeline trakov so od 2 mm do 3 mm. Delež ogljika so nekoliko večji kot 0,04 %. **Figure 5:** Examples of the cooling of some structural steels are presented. The sections used are 6, or 1 and 2 or 2, 3, 4, 5 and 6. Thicknesses of strips are from 2 mm to 3 mm. Carbon content is a little over 0.04 %.

Elmag vsebuje okrog 0,01 % ogljika, včasih tudi več, ostala jekla pa imajo ta delež večji, vsaj 0,03 %. Če je delež ogljika 0,01 %, se vsa premenska toplota sprosti že pri temperaturi nad 830 °C. Na to kažejo dilatometrijske meritve. To pomeni, da poteče transformacija iz avstenita v ferit, še preden trak pride na hladilno linijo. Če pa so deleži ogljika večji, se premenska toplota sprošča tudi na hladilni liniji. To pa povzroči, da se povečajo tudi ta razmerja hitrosti, ker je trak treba peljati še počasneje, da se enako ohladi.

3 ANALIZA REZULTATOV

Razmerja med izračunanimi in izmerjenimi hitrosti so prikazana predvsem v odvisnosti od temperature navijanja. Vsaka serija na grafikonu velja za svojo skupino hladilnih sekcij.

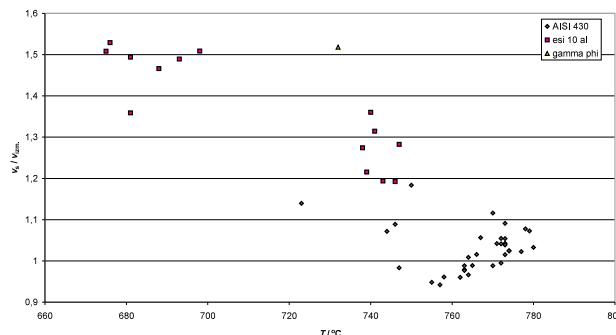
Oznaka na y-oseh diagramov pomeni razmerje simulirane hitrosti za avstenitno jeklo (v_s) proti izmerjeni hitrosti traku (v_{izm}) iz maloogljičnega jekla.

Najprej je pomembno, da so raztrosi točk okoli regresijskih premic majhni. Odmik od regresijske premice deljen z razmerjem hitrosti pri tisti točki da tudi relativni odmik od napovedane hitrosti. Glavni cilj je ugotoviti, kakšna mora biti hitrost traku, da se približamo ciljni temperaturi traku pred navijanjem.

Pomembno je tudi, da so strmine regresijskih premic približno istega velikostnega reda, kar kaže, da je povsod v ozadju isti pojav, to je povečanje specifične toplote zaradi magnetne premene.

Ugotovimo tudi, da več uporabljenih hladilnih sekcij pomeni tudi večje vrednosti razmerij hitrosti. Vzrok je lahko v tem, da se pri več uporabljenih hladilnih sekcijah že zmanjša tlak hladilne vode in zato tudi intenziteta hlajenja. Tega pa simulacija ohlajanja še ne upošteva. Iz teh primerov bo treba še točno ugotoviti, kakšen je ta vpliv.

S **slike 5**, ki velja za maloogljična jekla z deležem ogljika nekoliko nad 0,04 %, lahko vidimo, da so



Slika 6: Prikazani so primeri hlajenja brez aktiviranja hladilnih sekcij za nekatera jekla, ki se na hladilni liniji že nahajajo v feritnem območju. Debeline trakov so 2,5 mm in 4 mm.

Figure 6: Examples of some steels that are already in the ferrite region during the passing of the cooling line. No cooling water is used in these cases. Thicknesses of strips are 2,5 mm and 4 mm.

razmerja hitrosti večja, kot so za jeklo Elmag z 0,01 % ogljika. Delež ogljika pri teh jeklih je vsaj nad 0,04 %. Vzrok za večja razmerja hitrosti je v tem, da se pri jeklih z višjim deležem ogljika sprošča premenska toplota že med hlajenjem. Zato je treba za doseg želene temperature navijanja trakove hladiti še bolj intenzivno, hitrosti traku med hlajenjem morajo biti še manjše in zato je razmerje med izračunano in izmerjeno hitrostjo še večje.

Na **sliki 6** pa so prikazana razmerja za nekatera jekla, ki imajo na hladilni liniji že popolnoma feritno mikrostrukturo. Pomembno je, da je pri temperaturah nad 750 °C razmerje hitrosti blizu 1. Vzrok je v tem, da nad temi temperaturami še ni magnetne premene. Curiejeva temperatura je sicer 768 °C, vendar pa je dejanska temperatura sredine traku malo višja od izmerjene s pirometrom in tudi sama meritev temperature je nekoliko netočna. Pri temperaturah nad magnetno premeno je specifična toplota jekla, ki se nahaja v feritnem območju, približno podobna specifični toploti avstenitnega jekla.

Proti nižjim temperaturam ta razmerja hitrosti naraščajo kot posledica povečanja specifične toplote zaradi magnetne premene. Pri še nižjih temperaturah pa specifična toplota spet pada in kar ima za posledico manjša razmerja hitrosti. To pa je razvidno s **slik 1 do 4**.

4 NADALJNE ANALIZE

Točnosti napovedi temperatur je možno še izboljšati, če ugotovimo odvisnosti razmerij hitrosti od končne temperature valjanja, od debeline, od kemijske sestave in od drugih parametrov. Treba bo še ugotoviti, kako ogljik in drugi kemijski elementi vplivajo na sproščanje premenske toplote (seveda preko razmerij hitrosti). Iz sedanjih rezultatov lahko sklepamo, da takšen način analize lahko da zadovoljive rezultate.

ZAHVALA

Zahvaljujem se sodelavcem iz Raziskav in razvoja in Vroče valjarne v Acroniju za pomoč pri meritvah in za

odgovore na vprašanja ter posebno mag. Alešu Lagoju. Zahvaljujem se tudi sodelavcem iz Procesne avtomatike za prenos podatkov.

5 LITERATURA

- ¹J. Kokošar, *Materiali in tehnologije*, Ljubljana, 34 (2000) 5, 239–241
- ²J. Kokošar, *Materiali in tehnologije*, Ljubljana, 36 (2002) 3–4, 159–161