

Temperaturno polje v valjih pri kontinuirnem litju aluminijevih trakov

Temperature Distribution Field Inside the Working Roll at Continuous Casting of Aluminium Strips

Kosec Bojan, T. Kolenko, F. Pavlin, FNT Odsek za metalurgijo in materiale, Ljubljana

Izdelali smo matematični model in računalniški program za izračun temperaturnega polja v jeklenih valjih za kontinuirno litje aluminijevih trakov. Konstrukcija valjev je dvodelna, iz jedra in plašča, ki sta izdelana iz jekel z različnimi toplotnimi lastnostmi. Valji so preko kanalov med jedrom in plaščem notranje vodno hlajeni.

Ključne besede: matematični model, temperaturno polje, kontinuirno vlivanje, jekleni valji

A mathematical model and a computer program to calculate the temperature distribution field inside the working rolls for continuous casting of aluminium strips have been developed. Working rolls consist of two sections, of a core and a shell, which are made of steels with different thermal properties. Inside the working rolls, between the core and the shell, there is a system of water cooled channels.

Key words: mathematical model, temperature distribution field, continuous casting, working rolls

1. Uvod

Livarsko valjarniški postopki izdelave trakov se glede na to, da valji opravljajo istočasno vlogo kokile in preoblikovalnega orodja razlikujejo od postopkov preoblikovanja, pri katerih imajo valji zgolj vlogo orodja.

Proces strjevanja poteka bistveno počasneje od plastične deformacije kovine. Strjevalna toplota, ki se sprošča bodisi pri konstantni temperaturi (čisti aluminij) ali v ozkem temperaturnem intervalu je mnogo večja od toplote, ki jo oddaja trdna kovina med ohlajanjem v sorazmernem temperaturnem intervalu. Proces strjevanja je torej najbolj počasen in zato kontrolira hitrost celotnega postopka.

Velika količina toplote, ki se pri strjevanju praktično v celoti prenese na valje, zahteva tudi bolj intenziven način hlajenja, kot je poznan pri konvencionalnem valjanju. Valji morajo biti hlajeni podobno kot vodno hlajene kokile ali orodja za tlačno litje kovin.

Kontinuirna izdelava trakov zahteva stabilne temperaturne pogoje (temperaturo taline, temperaturo orodja). Zato je potrebno toploto z valja hitro odvesti. To pa je možno le z ustreznim odvodom skozi steno orodja s pomočjo hladilne tekočine (vode). Debeline stene orodja (valja) so zaradi tega omejene (od 50 do 25 mm), da ne predstavljajo prevelikih toplotnih uporov.

2. Matematični model

Prenos toplote v notranjosti valja opišemo matematično s pomočjo Fourierjeve parcialne diferencialne enačbe prevajanja toplote:

$$(\lambda \times \partial_i) \cdot i + Q = \rho \times c \times \frac{\partial T}{\partial t} \quad i = 1, 2, 3$$

in ustreznimi začetnimi in robnimi pogoji. Analitično reševanje parcialne diferencialne enačbe je mogoče le v posebnih primerih.

rih, kadar so geometrija, začetni in robni pogoji enostavni, lastnosti materiala pa preproste temperaturne funkcije. Pri reševanju praktičnih problemov pa naletimo pri analitičnem reševanju na nepremostljive težave in je zato nujna uporaba numeričnih metod.

Zaradi relativno preproste geometrije valjev za kontinuirno litje aluminijevih trakov smo uporabili za numerično reševanje metodo končnih diferenc (MKD).

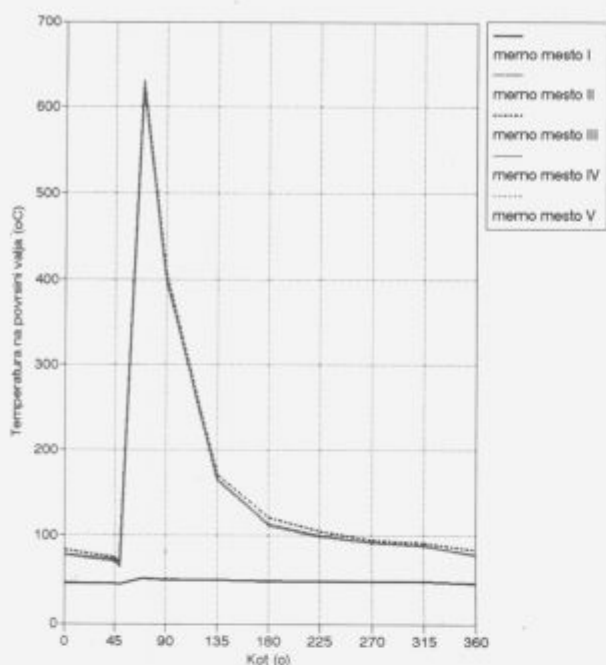
Za reševanje smo zaradi same geometrije valja izbrali najustreznejši t.j. cilindrični koordinatni sistem.

Enačbe prevajanja toplote znotraj valja smo reševali po eksplisitni shemi, pri določenih začetnih in robnih pogojih.

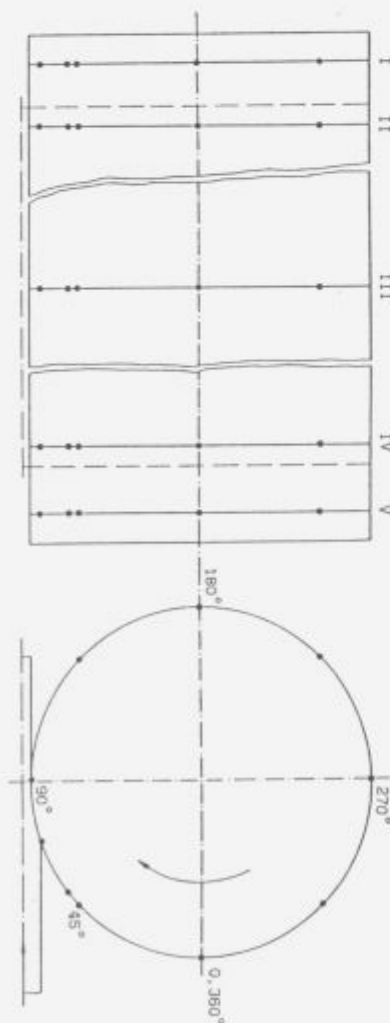
Začetni pogoj je poznano temperaturno polje v valju v začetnem trenutku opazovanja. Robni pogoji pa so izmerjene temperatura na površini valja, ki se periodično spreminjajo s periodo $2 \times \pi$ in temperatura hladilne vode, ki se linearno spreminja vzdolž koordinate z . Pri vsakem obratu temperatura površine valja pri stiku s tekočim aluminijem zelo hitro naraste s približno $70-75^\circ\text{C}$ na 630°C , pade na približno 400°C tam kjer je zadnjič v stiku s trakom in se zopet ohladi na $70-75^\circ\text{C}$ (Slika 1).

Temperature smo merili na zgornjem valju, v posameznih točkah površine pri zasukih za kot 45° , ter neposredno pred in po primarni ohlajevalni coni (Slika 2). Meritve so opravili strokovnjaki iz firme Lauener Engineering iz Švice. Sami smo merili dodatno še z dotikalnimi termoelementi Ni-Ni-Cr v nekaterih točkah in smo dobili rezultate, ki so se v izbranih testnih točkah zelo dobro ujemali z meritvami Lauener Engineeringa.

Temperaturni krivulji za merilni mesti I in V, oziroma za II, III in IV so si zelo podobne (Slika 1). Da smo v nadaljevanju poenostavili robne pogoje, smo privzeli, da sta prvi dve krivulji enaki krivulji V, druge tri pa vse enake krivulji III.



Slika 1. Potek temperature na površini valja



Slika 2. Merna mesta na površini zgornjega valja

Hiter odvod toplote s površine valja je pomemben iz vsaj dveh razlogov: za proces strjevanja traku in za zmanjšanje temperaturne (toplotne) obremenitve jekla, ki hitro zmanjšuje njegove mehanske lastnosti in pospeši proces temperaturnega utrujanja.

Identificirali smo fizikalni problem in izdelali matematični model porazdelitve temperature (temperaturnega polja) v dvo-plastnih, notranje vodno hlajenih, rotirajočih jeklenih valjih za kontinuirno litje aluminijevih trakov.

Sestavljeni problem smo reševali tako, da smo jedro in plašč valja obravnavali ločeno, povezano le preko robnih pogojev na meji med njima.

Za obravnavo temperaturnega polja v jedru valja smo izdelali 2D model $\theta = \theta(r, z, t)$, medtem pa, ko smo za plašč zaradi periodičnih temperaturnih robnih pogojev na površini valja izdelali 3D model $\theta = \theta(r, z, \phi, t)$.

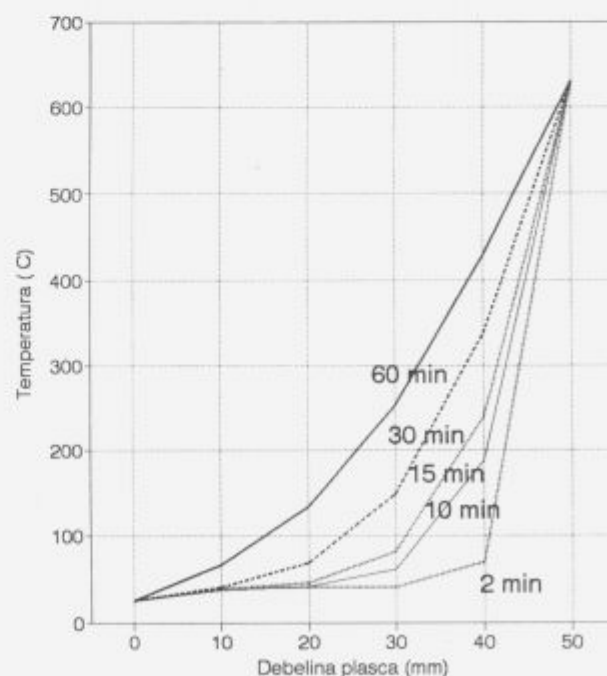
Pri izračunu temperaturnega polja v valju smo predpostavili, da je na začetku opazovanja v jedru oziroma plašču valja homogeno temperaturno polje temperature θ_j oziroma θ_p . Znotraj valja ni izvorov oziroma ponorov toplote in da se toplota s plašča v celoti odvede s hladilno vodo.

Toplota prehaja s traku na valj na delu, ki predstavlja približno 1/16 obsega valja. Obhodni čas valja je približno 120 sekund.

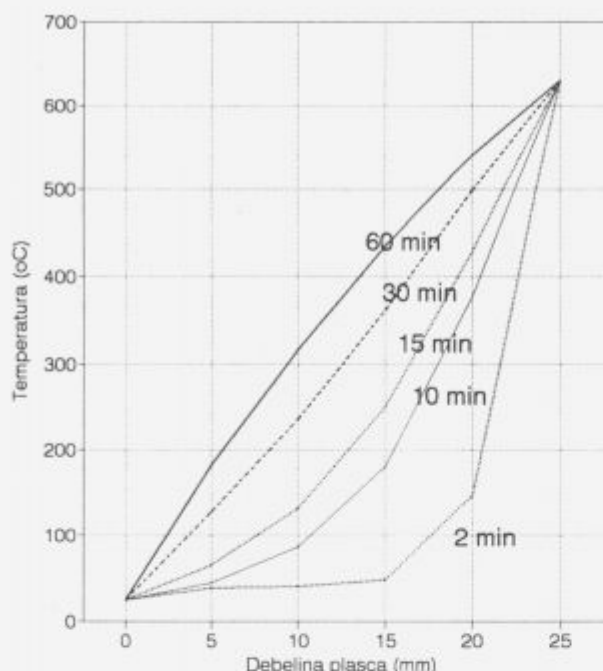
Toplotne in mehanske lastnosti jekel jedra (AFNOR 35CD4) in plašča (AFNOR 30C12) valja so funkcije temperature. Temperaturna prevodnost jekla AFNOR 30C12 je na temperaturnem intervalu med 20 in 600°C, praktično konstantna, kar je močno poenostavilo izračun temperaturnega polja v plašču valja.

3. Rezultati

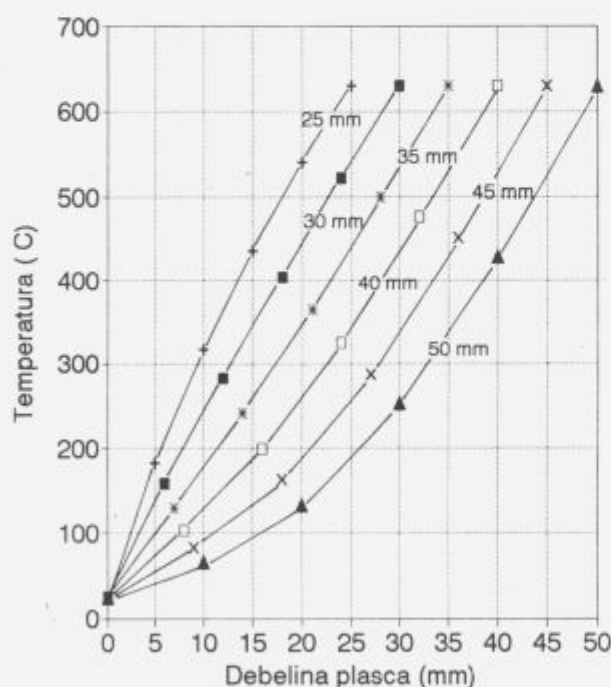
Temperature v jedru valja so v primeru nepredgretega jedra valja v območju med 20 in 40°C. Jedro se sicer med procesom počasi segreva, vendar temperatura ne preseže 40°C (zgornje temperature območja). V primeru predgretja valja (na 140°C),



Slika 3. Temperature na sredini temperaturno najbolj obremenjenega vzdolžnega prereza plašča valja po različnih časovnih intervalih, pri začetni temperaturi 40°C in debelini plašča 50 mm



Slika 4. Temperature na sredini temperaturno najbolj obremenjenega vzdolžnega prereza plašča valja po različnih časovnih intervalih, pri začetni temperaturi 40°C in debelini plašča 25 mm



Slika 5. Temperature na sredini temperaturno najbolj obremenjenega vzdolžnega prereza valja pri različnih debelinah plašča, pri začetni temperaturi 40°C in času 60 min.

pride v jedru celo do procesa ohlajanja. Tudi v tem primeru padejo temperature zelo hitro v območje med 20 in 40°C. Po približno 60 minutah pa že skoraj ni več bistvene razlike med temperaturnima poljema v predgretem in nepredgretem jedru valja.

Temperature v jedru valja so relativno nizke. V jedru ni poškodb zaradi temperaturnih obremenitev, zato je jedro trajni del valja.

Temperature v plašču se gibljejo na intervalu med približno 20 do 630°C. Ker so debeline plaščev relativno majhne (med 50 in 25 mm), prihaja v plašču do velikih temperaturnih gradientov. Temperaturni gradienti naraščajo z manjšanjem debeline po obnovi valjev.

Temperaturno najbolj obremenjena prereza valja sta vzdolžni, kjer je na površini valja maksimalna temperatura temperaturnega kroga in prečni pri $z = L/2$. Iz tega sledi, da so v plašču valja največji temperaturni gradienti na sredini temperaturno najbolj obremenjenega vzdolžnega prereza.

4. Zaključek

Temperature v valjih določajo deformacije in napetosti v valjih. Od tega sta odvisna dva pojavi: temperaturna utrujenost in poškodbe zaradi temperaturnih šokov. Naslednja logična problema pri kontinuirnem litju trakov sta izračun notranjih temperaturnih napetosti v valju in integralna ocena popuščne obstojnosti kot posledica ponavljajoče se temperaturne obremenitve jekla med najnižjo in najvišjo temperaturo temperaturnega kroga. Na ta način bi se približali vnaprejšnji napovedi začetka in hitrosti rasti razpok.

Delo je potrdilo potrebo po neposredni povezavi eksperimenta (toplotno tehničnih meritev) z matematičnim modeliranjem procesov in numeričnim reševanjem.

5. Literatura

- Esser F., Kruse H.: *Beitrag zur Berechnung der termischen Erstarrungsvorgänge durch Rechneranwendung*, Teil III.: Anwendungsbeispiele Aluminium-Gießswalzen und Erstarrung in die Schweissnaht, Neue Hütte, 1974, 1, 15-21
- Holman J. P.: *Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Company, New York 1986
- Jaluria Y., Torrance K. E.: *Computational Heat Transfer*, New York 1986
- Kosec B.: *Temperaturne spremembe na valjih pri kontinuirnem litju aluminijevih trakov*, Magistrsko delo, FNT-Odsek za metalurgijo in materiale, Ljubljana 1993
- Kosec L., Igerc N., Gnamuš J., Urnaut B.: *Jeklo za plašče obnovljivih valjev za kontinuirno litje kovinskih trakov*, FNT-Odsek za metalurgijo in materiale, Ljubljana 1982
- Necati Özisik M.: *Heat Transfer - A Basic Approach*, McGraw-Hill Book Company, New York 1985
- Rao S.: *The Finite Element Method in Engineering*, Pergamon Press, London 1989