

# Določanje temperaturnega polja kontinuirno odlitih blumov

## Definition of the Field Temperature of Continuous Cast Blooms

M. Jotanović<sup>1</sup>, Železarna Zenica  
E. Pivić, Metalurški inštitut Zenica  
D. Pihura, Metalurški fakultet Zenica

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-11-22

*U radu je opisan matematički model odvodjenja toplote pri kontinuiranom livenju čelika. Model se sastoji od diferencijalne jednačine dvodimenzionalnog instacionarnog prenosa toplote sa izrazima za granične uslove, kao sastavnim djelovima modela. Za rješavanje diferencijalne jednačine korištena je eksplicitna metoda konačnih razlika za rješavanje na personalnom računaru. Prikazani su rezultati proračuna temperaturnog polja u kontiodlivku, presjeka 340\*260 mm, ugljeničnog čelika u zoni kristalizatora, sekundarnog hlađenja i uslovima hlađenja na zraku.*

*Ključne riječi: matematički model, kontinuirno ljevanje, temperaturno polje*

*Pregled matematičnoga modela prenosa toplote pri kontinuirnem litju jekla. Model je izdelaan na podlagi diferencijalne jednačine dvodimenzionalnoga instacionarnoga prenosa toplote, z upoštevanjem mejnih pogojev, kot sestavnih delov modela. Za rešitev diferencijalne jednačine je uporabljena eksplicitna metoda končnih diferenc za delo z osebnim računalnikom. Prezentirani so rezultati izračunov temperaturnega polja odlitka preseka 340\*260 mm, visokoogljčnega jekla za področje kristalizatorja, sekundarnega hlađenja in pri pogojih ohlajevanja na zraku.*

*Ključne besede: matematični model, kontinuirno litje*

*In this paper mathematical model of heat transfer during CC of steel is described. Model is consisted of differential equation 2D instationary heat transfer connected with boundary conditions, as components of model. For solving of differential equation it was used explicite method final differences for solving by use of personal computer. Results are presented for temperature field in CC bloom with section 340\*260 mm, of high carbon steel in the zone of water cooled copper mould, secondary cooling and in condition of cooling on the air.*

*Key words: mathematical model, continuously casting*

### 1 Uvod

Kod praćenja termičko-tehnološkog rada postrojenja kontiliva putem matematičkog modeliranja ispituju se za konkretne tehnološko-eksploatacione uslove kretanja i promjene instacionarnog temperaturnog polja kontiodlivka u pojedinim fazama tehnološkog vodjenja kontiliva. U tom kontekstu postavlja se matematički model instacionarnog polja u procesu termičko-tehnološkog vodjenja kontiliva.

Na osnovu postavljenih termodinamičkih diferencijalnih jednačbi odvodjenja toplote, uzimajući u obzir i relativne termičko-tehnološke faktore vodjenja kontiliva i njihovim uvodjenjem u postavljeni matematički model, kao rješenje iz modela sagledavaju se procesi kristalizacije koji se odvijaju u toku odvodjenja toplote sa kontiodlivka. U cjelosti se sagledava kako sa promjenom temperaturnog polja raste debljina očvrslog sloja i kolika se dubina tečne faze ostvaruje u odlivku u funkciji brzine livenja. Moderna tehnologija vodjenja kontinuiranog livenja zahtijeva stalno praćenje kretanja i promjena instacionarnog temperaturnog polja, jer se na osnovu njega, odnosno putem matematičkog modeliranja mogu sagledati funkcije optimalne brzine livenja u zavisnosti od termofizičkih karakteristika čelika koji se lije na kontilivu.

### 2 Termofizičke karakteristike materijala

Posmatrane su termofizičke karakteristike ugljeničnog čelika sa sadržajem ugljika od 0,60%. Na osnovu hemijske analize je dobijen slijedeći analitički izraz promjene koeficijenta toplotne vodljivosti (I) u zavisnosti od temperature:

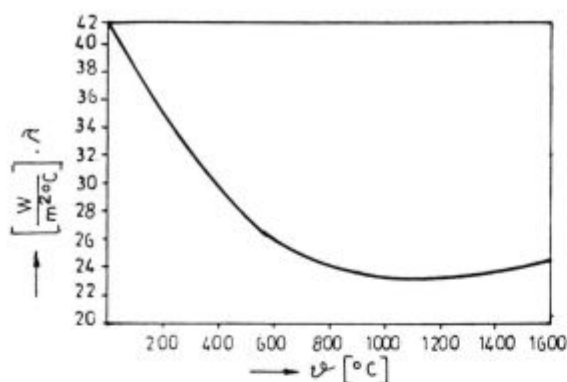
$$\lambda(\vartheta) = 41,34155 - 0,013647x\vartheta + 7,1 \sin 0,00196395 (\vartheta - 1350) \quad (1)$$

Ova funkcija (1) promjene koeficijenta toplotne vodljivosti od temperature grafički je prikazana na slici 1 i korištena je u matematičkom modeliranju.

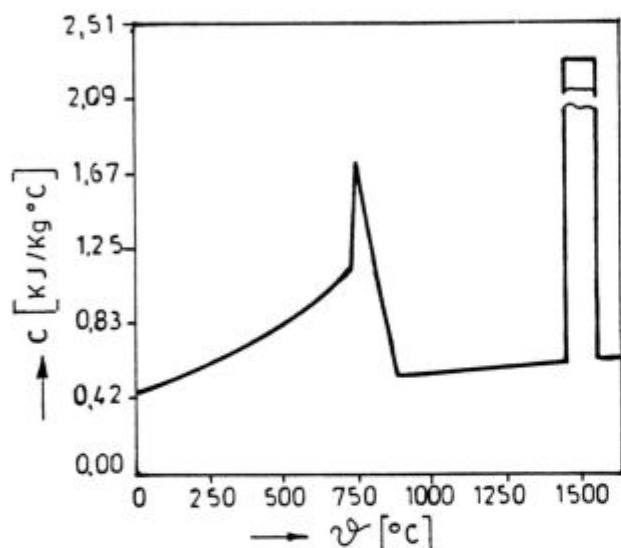
Na slici 2 je predstavljen diagram promjene specifične toplote čelika u funkciji temperature. Uočava se kakve su promjena vrijednosti promjene naročito u području likvidusa, kao i području čvrste faze.

Koeficijent prelaza toplote ( $\alpha$ ) sa formiranog kontiodlivka na kristalizator je funkcija više faktora kao što su: brzina livenja, veličina zazora izmjene u površini kontiodlivka i kristalizatora, kao i toplotnog toka sa kontiodlivka na kristalizator. Mnogobrojni rezultati ispitivanja koeficijenta prelaza toplote ( $\alpha$ )<sup>1</sup> su dati u funkciji veličine ostvarenog zazora između kristalizatora i odlivka, za različite materijale kristalizatora. Za bakreni kristalizator promjena veličine zazora je u funkciji vremena prolaska kontiodlivka kroz kristalizator:

<sup>1</sup> M. JOTANOVIĆ  
Železarna Zenica  
72000 Zenica, Bosna i Hercegovina



Slika 1: Spremembe koeficienta toplotne prevodnosti in temperatur  
Figure 1: Change of coefficients of heat conduction and temperature



Slika 2: Specifična toplota materiala v funkciji temperatur v področju strjevanja

Figure 2: Specific heat of materials as function of temperature in solidification field

$$\alpha(t) = 1250 + 3846.154xt + 30\sin 96.66(t-\vartheta) \quad (2)$$

a za zonu sekundarnog hladjenja ta zavisnost je izražena obrascem:

$$\alpha(t) = 185.25 + 1590xt + 15\sin 31.416(t-0.025) \quad (3)$$

Kod hlađenja na zraku koeficijent prelaza toplote računa se kao funkcija:

$$\alpha(t) = f(\vartheta_n, -t) \quad (4)$$

### 3 Postavka matematičkog modela

Baza matematičkog modela je Fourierova diferencijalna jednačina za instacionarno temperaturno polje sa ukomponovanom funkcijom promjene koeficijenta toplote vodljivosti materijala kontiodlivka:

$$c(\vartheta) \cdot \rho(\vartheta) \cdot (\delta\vartheta)/(\delta t) = \lambda(\vartheta) \cdot (\delta^2\vartheta)/(\delta x^2) + (\delta\lambda)/(\delta\vartheta) \cdot (\delta\vartheta)/(\delta x)^2 \quad (5)$$

Granični uslov za rješavanje diferencijalne jednačine je:

$$\lambda(\vartheta) \cdot (\delta\vartheta)/(\delta x) \text{ (za } x=0 \text{ i } x=5) = \alpha(t) \cdot \vartheta \text{ (za } x=0 \text{ i } x=5) - \vartheta_k \quad (6)$$

Prema tome sistem jednačina sa kojima je postavljen matematički model se sastoji od jednačina (5), (6), (3) za  $\vartheta$  od  $\vartheta = \vartheta_k$  do  $t=0$ . Navedeni sistem predstavlja osnovu za matematički model. Međutim, mora se uzeti u obzir da u tehnološkim studijama ovoga karaktera gdje se matematički model u termodinamičkom smislu provodi u kontinuitetu i gdje kontiodlivak neposredno poslije kristalizatora sprovodi kroz operaciju direktnog hladjenja vodom, a zatim se hladi na vazduhu, mijenja se koeficijent prelaza toplote sa kontiodlivka na okolinu. Prikazani sistem jednačina predhodno je numerički razvijen. Numerički razvijena diferencijalna jednačina za promjenu instacionarnog polja površine kontiodlivka ima slijedeći oblik:

$$\begin{aligned} \vartheta_{i,j+1} &= \vartheta_{i,j} + (\lambda(\vartheta)/c\rho) \cdot \Delta T/\Delta x^2 < \\ &< \vartheta_{i,j} + (\alpha(t)/\lambda(\vartheta)) \cdot \Delta x \cdot (\vartheta_{i,j} - \vartheta_k) > \\ &> (\vartheta \cdot \Delta T/c \cdot \rho) \cdot (\alpha(t)/\lambda(\vartheta))^{2**} \cdot (\vartheta_{i,j} - \vartheta_k) \end{aligned} \quad (8)$$

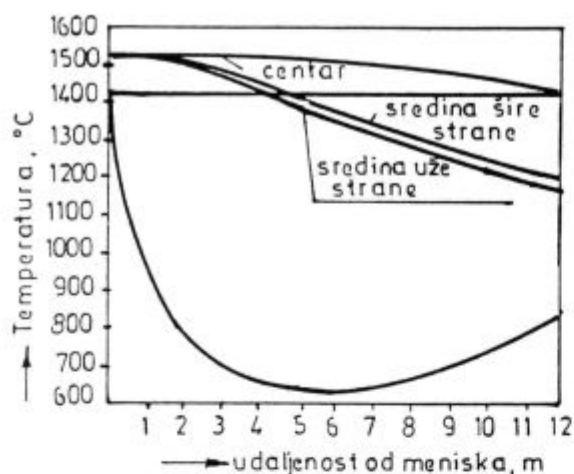
Za unutrašnji segment kontiodlivka se koristi razvijena slijedeća numerička jednačina:

$$\begin{aligned} \vartheta_{i,j+1} &= \vartheta_{i,j} + (\lambda(\vartheta)/c\rho) \cdot \Delta T/\Delta x^2 < \\ &< \vartheta_{i,j} + (\alpha(t)/\lambda(\vartheta)) \cdot \Delta x \cdot (\vartheta_{i,j} - \vartheta_k) > \end{aligned} \quad (9)$$

Za izračun temperature u jednoj tački polja instacionarnog temperaturnog polja ( $\vartheta_{i,j+1}$ ) treba poznavati vrijednosti u tri tačke polja i to u vremenu koje slijedi, to jest u vremenima  $\vartheta_{i+1,j}$ ;  $\vartheta_{i,j}$ ;  $\vartheta_{i-1,j}$ .

### 4 Rezultati matematičkog modeliranja

Model je primjenjen za proračun temperaturnih polja u kontiodlivku u zoni kristalizatora, sekundarnog hladjenja i hladjenja na zraku, uz uzimanje u obzir temperature livenja taline od 1526°C i brzine livenja 0,01 m/s. Iz dvodimenzionalnog matematičkog modela su dobijene vrijednosti promjena i kretanja instacionarnog temperaturnog polja kontiodlivka tokom prolaza kroz kontiliv. Na slici 3 se vidi temperatura tačaka površine, sredine te strana kontiodlivka u zavisnosti od rastojanja tačaka od meniska tečnog čelika u kristalizatoru, kao i solidus tačaka. Sa izborom dimenzija se mijenjaju i temperature u pojedinim tehnološkim fazama prolaza kontiodlivka kroz kontiliv. Naglim opadanjem temperature površine odlivka u kristalizatoru mijenja se i temperatura na ostalim segmentima. Dalje je vidljivo da je koeficijent gradijenta temperature najveći u kristalizatoru, dok je na izlazu iz kristalizatora najmanji. Uzrok ovome je u dosta velikom intenzitetu sekundarnog hladjenja odmah na kraju kristalizatora. Međutim, kod sekundarnog hladjenja temperaturne krive kontinuirano opadaju, dok na izlazu kontiodlivka iz područja sekundarnog hladjenja na vazduhu, temperatura uz površinu počinje da raste. Razlog je u razlici intenziteta odvoda i dovoda toplote. Očvršćavanje i konfiguracija slojeva kontiodlivka pred-



Slika 3: Pregled računskih temperatur centra in polovice dolžine od centra proti strani kontiodlivka

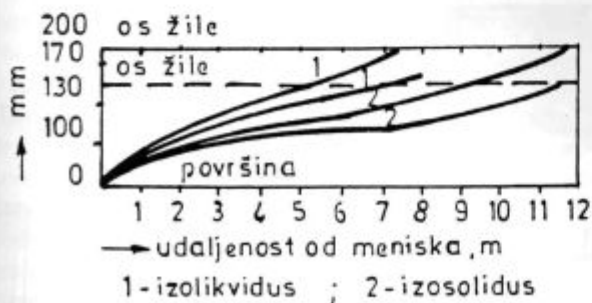
Figure 3: Review of calculated temperatures of centre and middle distance of CC bloom

stavlja funkciju debljine očvrnutog sloja u zavisnosti od dužine kontiodlivka (slika 4).

Formiranje površina likvidusa i solidusa u zavisnosti od dužine kontiodlivka je pod utjecajem funkcije  $\vartheta = f(s,t)$  kako je prikazano na slici 5, ali samo za četvrtinu presjeka kontiodlivka zbog simetrije.

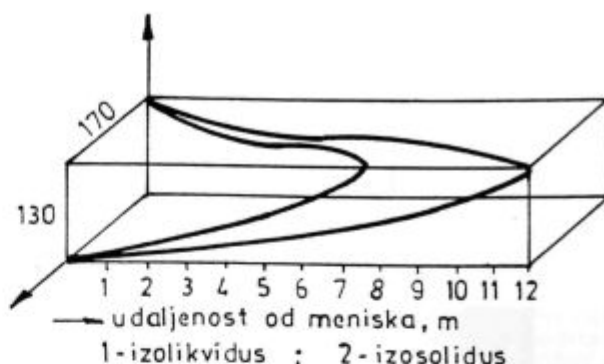
## 5 Zaključci

1. Rezultati proračuna ukazuju na mogućnost da se matematičkim modeliranjem odredi debljina i temperatura kore kontiodlivka za određene pogonske uslove, bez direktnog vršenja opita u pogonu.
2. Na osnovu dobijenih rezultata se može sagledati i proces kristalizacije kontiodlivka u zavisnosti od brzine livenja, kao i termofizičkih osobina materijala, te drugih parametara procesa. Ovo omogućava šire sagledavanje optimalnih uslova rada kontiliva.
3. Brzina livenja, kao i termofizičke osobine materijala, te drugi parametri proesa značajni su ne samo za ostvarenu dužinu tečne faze kontiodlivka nego i za



Slika 4: Isotherma solidusa in likvidusa stran kontiodlivka: 1. izolikvidus in 2. izosolidus

Figure 4: Isothermal solidus and liquidus of walls of CC bloom: 1. isosolidus and 2. isolikvidus



Slika 5: Prostorni diagram funkcije:  $\vartheta = f(s,t)$ : 1. izosolidus in 2. izolikvidus

Figure 5: Volume diagram function:  $\vartheta = f(s,t)$ : 1. isosolidus and 2. isolikvidus

konfiguraciju očvrnutog sloja i za statičku izdržljivost.

4. Model daje korisne informacije koje se mogu koristiti kod razmatranja poboljšanja tehnologije kontilivenja. Na taj način se može predvidjeti kinetika rasta kore, dubina (dužina) tečne faze i temperatura površine. Istovremeno, poznavanje linija likvidusa i solidusa i konkretnih parametara procesa livenja, može se prema teoriji dvofaznih područja u svakom momentu procesa livenja, kada linija likvidusa dostiže osu kontiodlivka, predvidjeti raspored strukturnih zona.
5. U okviru ovoga rada mora se izvršiti detaljnije proučavanje pojava i karaktera promjena polja instacionarnih termičkih napreznja u kontiodlivku i utjecaja na kvalitet kontiodlivaka.

## 6 Simboli

$\lambda$  - koef. toplotne vodljivosti

$\vartheta$  - temperatura

$\vartheta_n$  - temperatura spoljne okoline

$\vartheta_k$  - temperatura hladnije strane

$c(\vartheta)$  - funkcija promjene spec. toplote od temperature

$\rho(\vartheta)$  - funkcija promjene gustine od temperature

## 7 Literatura

- <sup>1</sup> Brandtstatter, W., *Ergebnisse Warmetechnischer Messungen in der Kokile beim Stranggussen*, Mitteilung aus der Vereinigen Deutsche Metallwerke, Frankfurt, 1981
- <sup>2</sup> Frederikson, H., *Scand. J. Metallurgy*, 1983, 12, 13
- <sup>3</sup> Rodberg, B., *Scand. J. Metallurgy*, 1983, 13-20
- <sup>4</sup> Dedr, M i dr., *Hutnicke Listy*, 1976, 771/9
- <sup>5</sup> Stefanescu, D. M., *Metals Handbook*, Metals Park, Ohio 1988, 114/8 i 136/141
- <sup>6</sup> Evteev, D. P. i dr., *Neprevirnoe litje*, Metallurgija, Moskva, 1984, 154/9
- <sup>7</sup> Borisov, V. T., *Teorija dvufaznoj zoni metaličeskogo slitka*, Metallurgija, Moskva 1987, 154/9