

# Temperaturno polje v ingotu

## The Temperature Field in Ingots

Kosec B<sup>1</sup>, F. Pavlin, M. Dretnik, S. Žnidarič, FNT, Ljubljana

Izdelali smo matematični model ogrevanja ingotov pravokotnega prereza. V praksi smo ga uporabili pri reševanju problema ogrevanja ingotov kvadratnega prereza iz ravenskih jekel OCR 12 SP in OCR 12 VM v komornih pečeh.

*Ključne besede: ingot, temperaturno polje, matematični model*

*The mathematical model of heating ingots of rectangular cross sections has been done. At practical work this model was used to solve the heating problem of the square cross section ingots from Ravne steel plant in the chamber furnaces. The steel quality were OCR 12 SP and OCR 12 VM, respectively.*

*Key words: ingot, temperature field, mathematical model*

### 1. Uvod

Na katedri za Metalurško energetiko našega odseka smo v sodelovanju z Metal d.o.o., Železarne Ravne izdelali matematični model ogrevanja ingotov v komornih pečeh.

Naša naloga je bila identificirati fizikalni problem, izdelati matematični model in ga preveriti v praksi na problemu ogrevanja ingotov kvadratnega prereza iz ravenskih jekel OCR 12 SP in OCR 12 VM v komornih pečeh.

### 2. Matematični model

Ingoti so bili predgreti: začetno temperaturno polje v ingotu je bilo predpostavljeno kot homogeno.

Material ingota je bil homogen in izotropen. Znotraj ingota ni bilo izvorov in ponorov toplote.

Izdelali smo ravninski (2D) in prostorski (3D) model ogrevanja ingotov ter primerjali dobljene rezultate z obema modeloma za testne primere. Ugotovili smo, da so odstopanja med njimi minimalna, zato smo obravnavali problem ogrevanja ingotov v komorni peči z 2D modelom. V tem primeru so časi računanja neprimerno krajši, prikaz rezultatov nazornejši in tudi napaka izračuna ni bistveno večja.

Kritični prerez ingota<sup>1</sup>, v katerem so največji temperaturni gradienti, je prerez x-y pri  $z = L/2$ . Zaradi geometrije ingota, ter začetnih in robnih pogojev (slika 1) smo lahko zaradi simetrije obravnavali temperaturno polje samo za 1/4 prereza.

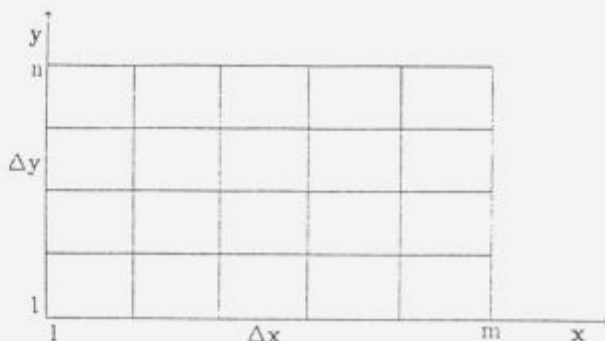
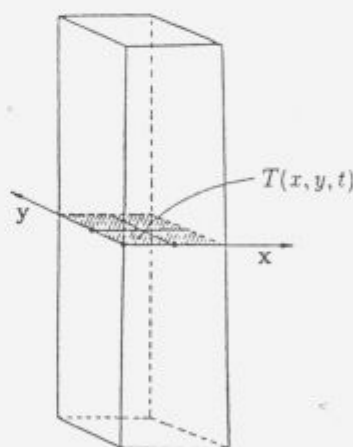
Linija največjih temperaturnih gradientov v kritičnem prerezu je linija (1,n) - (m,n) oziroma (m,1) - (m,n).

Znotraj ingota, kjer se toplota prenaša le s prevajanjem toplote, opišemo temperaturno polje s pomočjo parcialne diferencialne enačbe prevajanja toplote v dveh dimenzijah<sup>(2)</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Začetni pogoj je podano temperaturno polje v ingotu ob času  $t = 0$ . V začetnem trenutku opazovanja smo v ingotu predpostavili homogeno temperaturno polje:

$$T(x,y,0) = T_0 \quad (2)$$



Slika 1: Ingot, računsko območje<sup>(1)</sup>  
Figure 1: Ingot, calculating region<sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> mag. Borut KOSEK, dipl. inž. stroj.  
Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Montanistika.  
Aškerčeva 12, 61000 Ljubljana

Na površini ingota smo upoštevali prenos toplote med ingotom in medijem v peči z mehanizmom prestopa in sevanja (Neumannov robni pogoj) (slika 1):

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_k \cdot (T_m - T) + \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_m^4 - T^4) \quad \text{pri } x = 1$$

in

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_k \cdot (T_m - T) + \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_m^4 - T^4) \quad \text{pri } y = 1 \quad (3)$$

kjer je  $\alpha_k$  toplotna prestopnost,  $\sigma$  Stefan - Boltzmanova konstanta,  $\epsilon$  emisivnost,  $T$  in  $T_m$  pa trenutni temperaturi na površini ingota oziroma v peči. Na simetrijskih oseh pa velja:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{pri } y = n\Delta y, 0 \leq x \leq m\Delta x$$

in

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{pri } x = m\Delta x, 0 \leq y \leq n\Delta y \quad (4)$$

Zaradi relativno preproste geometrije ingota smo za numerično reševanje uporabili metodo končnih diferenc (MKD)<sup>(5)</sup>. Parcialno diferencialno enačbo prevajanja toplote znotraj ingota in časovno spremenljive robne pogoje smo reševali eksplicitno.

Model upošteva funkcijsko odvisnost lastnosti materiala ingota od temperature<sup>(6)</sup>. Spreminjanje toplotne prevodnosti ( $\lambda$ ) in specifične toplote ( $c$ ) s temperaturo smo popisali s polinomi III. reda; funkcijsko odvisnost gostote materiala od temperature pa z naslednjim izrazom<sup>(5)</sup>:

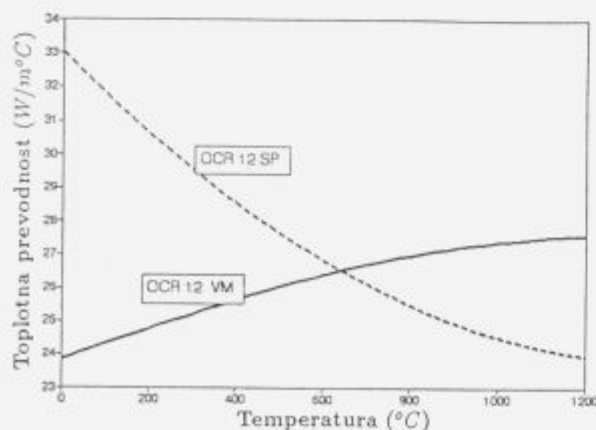
$$\rho = \frac{\rho_0}{(1 + \alpha)^3} \quad (5)$$

kjer se tudi linearni razteznostni koeficient ( $\alpha$ ) spreminja v odvisnosti od temperature po polinomu III. reda,  $\rho_0$  pa predstavlja gostoto materiala pri sobni temperaturi.

Na podlagi matematičnega modela smo izdelali računalniški program. Program je izdelan tako, da omogoča vpogled v temperaturno polje v ingotu ob poljubnem času njegovega segrevanja v peči, v časovnih intervalih 10 sekund.

### 3. Uporaba modela v praksi

Materiala preizkusnih ingotov sta bili ravenski jekli OCR 12 SP in OCR 12 VM. Toplotne in mehanske lastnosti teh dveh jekel so enake lastnostim jekel X155CrMoV12-1 oziroma



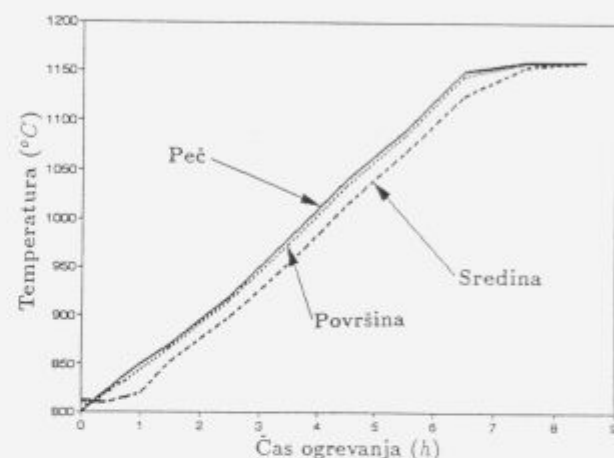
Slika 2: Toplotna prevodnost materiala ingota  
Figure 2: Heat conductivity of the ingot material

X20CrMoV12-1 po standardu DIN<sup>(6)</sup>. Vsi ingoti so enakih dimenzij, kvadratnega prereza in rahlo konični v vzdolžni smeri (440 x 440 x 1300 mm).

Temperatura v komornih pečeh je bila izmerjena ob določenih časovnih intervalih. Med posameznimi izmerjenimi vrednostmi smo predpostavili linearno spreminjanje (naraščanje) temperature. Spreminjanje temperature, v odvisnosti od časa v pečeh I (nova peč) in III (stara peč), je prikazano na slikah 3 in 4.

S pomočjo matematičnega modela smo analizirali temperaturna polja v ingotih, segrevanih v komornih pečeh I in III.

Na slikah 3 in 4 je prikazan časovni potek temperatur v peči, ter na sredini in na površini ingota za primera ogrevanja ingotov v komornih pečeh I oziroma III.

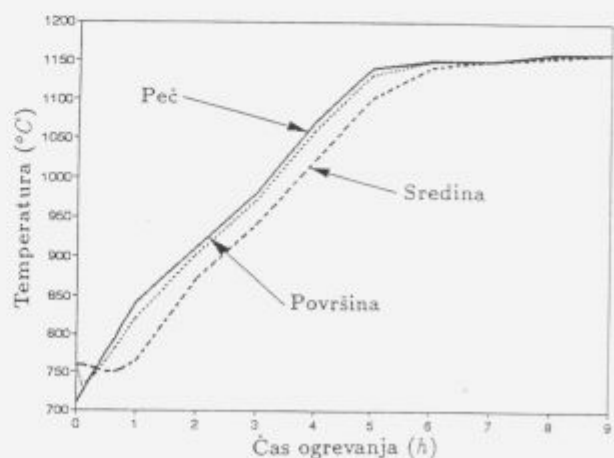


Slika 3: Porazdelitev temperatur v ingotu in peči (peč I, material: OCR 12 SP)

Figure 3: Temperature distribution in ingot and furnace (furnace I, material: OCR 12 SP)

V peči I smo ogrevali ingot iz jekla OCR 12 SP, z začetno temperaturo 811°C. Začetna temperatura v peči je bila nekoliko nižja (800°C). Diagram na sliki 3 nazorno kaže, da je prišlo v ingotu na začetku ogrevanja v peči I do procesa ohlajanja ingota. Proces ogrevanja ingota se prične šele po približno 30 minutah (slika 3).

Nadaljnji režim ogrevanja je bil zelo primeren, saj so bile po prerezu ingota temperaturne razlike ves čas v zelo ozkem inter-



Slika 4: Porazdelitev temperatur v ingotu in peči (peč III, material: OCR 12 VM)

Figure 4: Temperature distribution in ingot and furnace (furnace III, material: OCR 12 VM)

valu (do približno 35°C). Na koncu ogrevanja smo dobili po cellem prerezu ingota relativno zelo homogeno temperaturno polje.

Morali bi dvigniti začetno temperaturo v peči vsaj nad začetno temperaturo ingota; tako bi se izognili začetnemu padcu temperature v ingotu in obenem občutno skrajšali celotni čas samega ogrevanja.

Večji problem je ogrevanje ingotov v stari komorni peči (peč III). Tu smo ogrevali ingote iz jekla OCR 12 VM. Začetna temperatura ingota je bila 758°C, začetna temperatura v peči celo samo 710°C (slika 4). Tudi v tem primeru je prišlo v prvi fazi ogrevanja zaradi prenizke temperature v peči do inverznega procesa t.j. do ohlajanja ingota, le da je zaradi neprimerno večje razlike med začetnima temperaturama ( $\Delta T = 48^\circ\text{C}$ ) padec temperature v ingotu še neprimerno večji kot v prvem primeru. Proces ogrevanja se je tu normaliziral šele tik pred koncem prve ure ogrevanja.

Nadaljnji režim ogrevanja je bil tudi v tem primeru do 6. ure ogrevanja zelo dober, pri nadaljnem ogrevanju pa je bil dvig temperature v peči prepočasen. Učinek zadnjih treh ur ogrevanja bi lahko dosegli s hitrejšim dvigom temperature v neprimerno krajšem času. Na sliki 4 vidimo, da je zadnje tri ure ogrevanja temperaturno polje v prerezu ingota praktično homogeno. Glede na velik padec temperatur na začetku ogrevanja je nujno dvigniti začetno temperaturo peči. V komorni peči je v zadnjem ogrevalnem intervalu potrebno izbrati tudi optimalnejši režim ogrevanja.

#### 4. Zaključek

Izdelan matematični model, uporabljen pri reševanju problema ogrevanja predgretih jeklenih ingotov v komorni peči, je pokazal idejno rešitev optimiranja ogrevanja, z vidika zmanjšanja porabe energije in skrajšanja časa ogrevanja.

Delo kaže nujnost povezave eksperimenta (toplotno tehnične meritve) z matematičnim modeliranjem in numeričnim reševanjem.

#### 5. Literatura

- <sup>1</sup> Kosec B.: Temperaturne spremembe na valjih pri kontinuimem litju Al trakov, Magistrsko delo, FNT - Odsek za metalurgijo in materiale, Ljubljana, 1993
- <sup>2</sup> Lindon C. T.: Heat Transfer, Prentice Hall, New Jersey, 1992
- <sup>3</sup> Malinowski Z., Lenard J. G., Davies M. E.: A study of the heat-transfer coefficient, *Journal of Materials Processing Technology*, 41, 1994, 125 - 142
- <sup>4</sup> Rohsenow M. W., Hartnett P. J., Ganic N. E.: Handbook of Heat Transfer Applications, McGraw-Hill Book Company, New York, 1985
- <sup>5</sup> Smith G. D.: Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods, Clarendon Press, Oxford, 1978
- <sup>6</sup> STAHL-Eisen Werkstoffblätter (SEW) des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, Physikalische Eigenschaften von Stählen, Düsseldorf, 1992
- <sup>7</sup> Wick H. J.: Untersuchungen zur optimalen Schätzung der Kerntemperatur von Blöcken im Tiefofen, Technische Hochschule Aachen, 1977