

SIMULACIJSKI MODEL OGREVANJA GREDEC V PEČI ALLINO

A SIMULATION MODEL OF BILLET REHEATING IN THE ALLINO FURNACE

**Anton Jaklič¹, Tomaž Kolenko², Branislav Glogovac¹, Brane Keček³,
Jure Jamer³**

¹Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

²Univerza v Ljubljani, NTF – Oddelek za materiale in metalurgijo, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

³SŽ Metal Ravne d. o. o., Koroška c. 14, 2390 Ravne na Koroškem, Slovenija
anton.jaklic@imt.si

Prejem rokopisa – received: 2003-10-20; sprejem za objavo – accepted for publication: 2004-02-10

V prispevku je predstavljen simulacijski model ogrevanja gredic v peči Allino v valjarni Metal Ravne. Simulacijski model deluje v realnem času in je vključen v nadzorni sistem peči Allino. Izmenjava toplote med dimnim plinom, steno peči in gredico je obravnavana z modelom treh temperatur. Obravnava toplotnega sevanja pri ogrevanju gredic zahteva natančno upoštevanje kompleksne geometrije, ki jo imajo stene peči, skupaj z založenimi gredicami. Izmenjava toplote med ploskvami v peči je zato v modelu obravnavana z uporabo matrike geometrijskih faktorjev vidnosti. Ta matrika je predhodno določena s splošnim modelom za izračun matrike geometrijskih faktorjev vidnosti z uporabo metode Monte Carlo. Temperatura poda peči je odvisna od trenutne založitve v peči. V modelu je za posamezni dolžinski segment določena z bilanco toplotnih tokov na podu peči. Prevajanje v gredicah je obravnavano z metodo končnih diferenc v treh prostorskih dimenzijah. Vrednotenje modela smo izvedli z meritvami ogrevanja preskusne gredice v peči Allino. Za uporabniško prijazno delo je bil za simulacijski model razvit grafični uporabniški vmesnik (GUI).

Ključne besede: simulacija ogrevanja, realni čas, ogrevanje gredic, toplotno sevanje, peč ALLINO

This paper presents a simulation model of billet reheating in the Allino furnace at the Metal Ravne Steelworks. The model is connected to a monitoring system of the Allino furnace and simulates in real-time. The heat exchange between the furnace gas, the furnace wall and the billet surface is calculated using a three-temperature model. The exact treatment of the complex geometry of the furnace enclosure, including the billets, is important in radiation heat-exchange calculations. In the model the radiation heat exchange between surfaces in the furnace enclosure is determined using a view-factor matrix. The matrix is determined before the simulation by a general model for view-factor determination based on the Monte Carlo method. The furnace bottom temperature depends on the number of charged billets in the furnace. In the model furnace the bottom temperature is calculated on the basis of heat balance on the furnace bottom for an individual furnace length segment. The heat conduction in the billets is determined using the 3D finite-difference method. The model is validated using measurements of billet reheating in the Allino furnace. A graphical user interface (GUI) has been developed to assure user-friendly use of the simulation model.

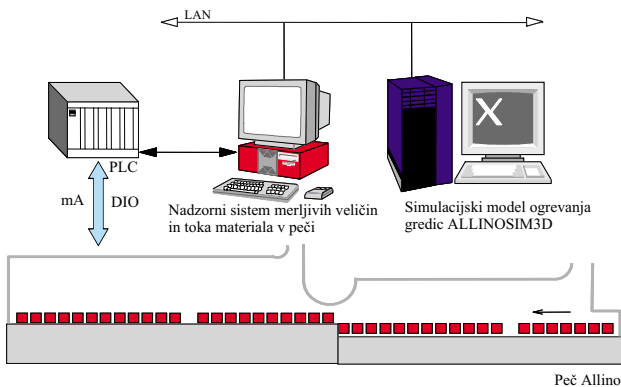
Keywords: simulation of reheating, real-time, billet reheating, thermal radiation, ALLINO furnace

1 UVOD

Moderne računalniško vodene valjarniške linije za valjanje profilov zahtevajo kot vhodni material gredice, ki so kvalitetno ogrete v ozkih tolerančnih mejah. Gredice se najpogosteje ogrevajo v kontinuirnih koračnih pečeh. Pri tem na proces ogrevanja vplivajo različni dejavniki kot so: različno dolgi časi med koraki peči, načrtovani in nenačrtovani zastoji, različne vrste kvalitet jekel in dimenzij gredic, ki se hkrati nahajajo v peči, idr. Vsi ti vplivi otežijo pregled nad temperaturnim poljem vsake posamezne gredice. Za vodenje procesa ogrevanja v kontinuirni koračni peči je ključnega pomena poznanje temperaturnega polja vsake posamezne gredice, ki se nahaja v peči. Merilne metode, kot je npr. merjenje ogrevanja gredice z vlečnimi termoelementi, se uporabljajo le občasno na preskusni gredici, medtem ko merjenje z optičnim pirometrom da le informacijo o temperaturi površine gredice. Najprimernejši način za določitev temperaturnih polj vseh gredic, ki se nahajajo

v peči, je uporaba simulacijskega modela, ki deluje v realnem času. Zato smo za peč Allino (**Slika 1**), ki se nahaja v valjarni profilov v Metal Ravne, d. o. o., razvili simulacijski model, ki v realnem času izračunava temperaturna polja vseh (do 71) gredic, ki se hkrati ogrevajo v peči. Tako razvit simulacijski model omogoča operaterju peči poznanje trenutnega temperaturnega polja in zgodovine ogrevanja vseh gredic, ki se ogrevajo v peči. S stališča zagotavljanja kakovosti pa simulacijski model omogoča arhiviranje zgodovine ogrevanja za vsako gredico, katere ogrevanje je bilo spremljano s simulacijskim modelom.

Za delovanje v realnem času je treba simulacijskemu modelu zagotoviti sprotne merjene vrednosti v peči. Zato je simulacijski model po lokalnem računalniškem omrežju povezan z nadzornim sistemom merljivih veličin in toka materiala v peči Allino (**Slika 1**). Slednji na vsakih deset sekund zapiše datoteko "Allino.dat" na računalnik, na katerem teče simulacijski model. V tej datoteki se nahajajo vse trenutne izmerjene vrednosti v



Slika 1: Vključitev simulacijskega modela na peč Allino
Figure 1: Connection of the simulation to the Allino-furnace monitoring system

peči in podatki o gredicah, ki se nahajajo na posameznih položajih v peči. Na **sliki 2** je prikazan nadzorni pult peči Allino, rezultati simulacijskega modela ALLINOSIM3D, ki deluje v realnem času, se prikazujejo na desnem monitorju.

2 MODELIRANJE

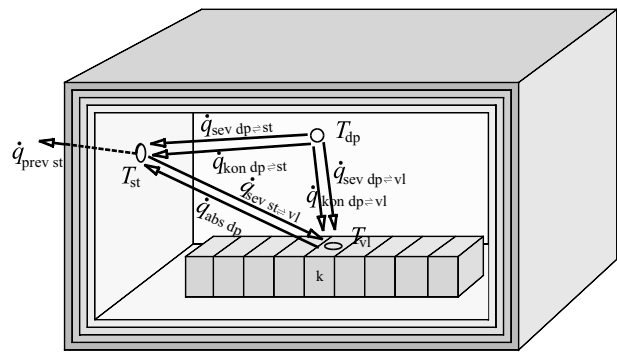
Za čim bolj natančen matematični opis dogajanja pri ogrevanju gredic v koračni peči je treba upoštevati vse mehanizme, ki pomembno vplivajo na izmenjavo toplote v peči.

2.1 Izmenjava toplote med dimnim plinom, steno peči in površino gredice

Izmenjava toplote med dimnim plinom, steno peči in površino gredice je v modelu, ki ga je razvil Heiligenstaedt¹, obravnavana s tremi temperaturami (**Slika 3**). Peč po dolžini razdelimo na manjše dolžinske segmente,



Slika 2: Nadzorni pult peči Allino – Simulacijski model ogrevanja gredic v realnem času ALLINOSIM3D (desni monitor)
Figure 2: The command desk of the Allino-furnace – The real-time simulation model of the billet-reheating process ALLINOSIM3D (right monitor)



Slika 3: Izmenjava toplote med dimnim plinom, steno peči in površino gredice
Figure 3: The heat exchange between the furnace gas, furnace wall and the billet surface

za katere lahko predpostavimo majhne temperaturne spremembe. Dimni plin izmenjuje toploto s steno peči s sevanjem $\dot{q}_{sev dp \leftrightarrow st}$ in s konvekcijo $\dot{q}_{kon dp \leftrightarrow st}$. Hkrati dimni plin izmenjuje toploto z vložkom, ki se prenaša s sevanjem $\dot{q}_{sev dp \leftrightarrow vl}$ in s konvekcijo $\dot{q}_{kon dp \leftrightarrow vl}$. Del toplote, ki jo stena prejme, se izgublja zaradi prevajanja navzven, kar opisuje toplotni tok $\dot{q}_{prev st}$. Stena peči izmenjuje toploto z vložkom, kar opisuje toplotni tok $\dot{q}_{sev st \leftrightarrow vl}$, katerega del se pri prenosu absorbira v dimnem plinu $\dot{q}_{abs dp}$. Vsi toplotni tokovi so temperaturno odvisni, zato je za njihovo določitev potrebno poznati vse tri temperature, ki nastopajo v obravnavanem sistemu. Njihov izračun je natančneje opisal Kolenko³. Temperatura stene peči T_{st} je merjena z regulacijskimi termoelementi, v vmesnih točkah pa je interpolirana, temperaturo površine gredice T_{vl} računamo po korakih in je poznana iz prejšnjega računskega intervala, temperatura dimnega plina T_{dp} je neznan. Za določitev T_{dp} v obravnavanem segmentu je treba na notranji strani peči zapisati bilanco toplotnih tokov in poiskati ničlo funkcije, kot predlaga Kolenko³:

$$f(T_{dp}) = \dot{q}_{sev dp \leftrightarrow st}(T_{dp}, T_{st}) + \dot{q}_{kon dp \leftrightarrow st}(T_{dp}, T_{st}) - \dot{q}_{prev st}(T_{st}) - \dot{q}_{sev st \leftrightarrow vl}(T_{st}, T_{vl}) + \dot{q}_{abs dp}(T_{st}, T_{vl}) \quad (1)$$

2.2 Sevanje ploskev

V visokotemperaturnih ogrevnih pečeh je toplotno sevanje med ploskvami dominantni način izmenjave toplote⁴, zato je treba ta mehanizem v simulacijskem modelu zajeti bolj natančno. Toplotni tok stene peči na površino gredice $\dot{q}_{sev st \leftrightarrow vl}$ obravnavamo po zakonih o sevanju trdnih površin. Geometrijo peči z založenimi gredicami razdelimo na manjše ploskve, za katere lahko predpostavimo pogoj izoternosti ploskev. Za ploskev k na **sliki 4** lahko zapišemo bilanco toplotnih tokov sevanja $\dot{Q}_{k \leftrightarrow}$ kot razliko med prejetim $\dot{Q}_{k \leftarrow}$ in oddanim sevanjem $\dot{Q}_{k \rightarrow}$ ⁵:

$$\dot{q}_{sev st \leftrightarrow vl, k} A_k = \dot{Q}_{k \leftrightarrow} = \dot{Q}_{k \leftarrow} - \dot{Q}_{k \rightarrow} = \sum_{j=1}^j [\epsilon_j(T_j) \sigma T_j^4 A_j f_{j \rightarrow k}] - \epsilon_k(T_k) \sigma T_k^4 A_k \quad (2)$$

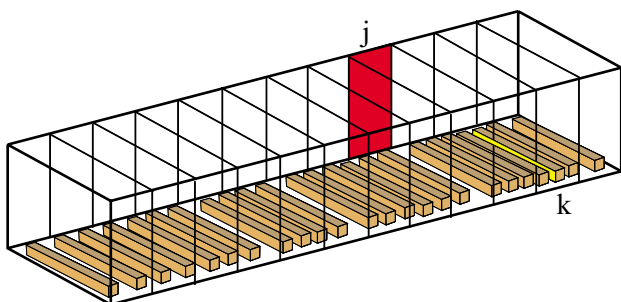
Pri tem prejetu sevanje $\dot{Q}_{k\leftarrow}$ zapišemo kot vsoto prispevkov sevanj vseh J ploskev v peči skupaj s ploskvami gredic na ploskev k . V enačbi (2) so: ε emisivnost ploskve, σ Stefan-Boltzmannova konstanta ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-2}$), T absolutna temperatura ploskve (K), A ploščina ploskve (m^2) in $f_{j \rightarrow k}$ je geometrijski faktor vidnosti iz ploskve j na ploskev k , ki pove, kolikšen delež, ki ga seva ploskev j v okolico, prestreže ploskev k . Za vseh J ploskev obravnavane geometrije lahko bilanco sevanj zapišemo z vektorsko matrično obliko²:

$$\dot{Q}_{\leftarrow [J \times 1]} = \dot{Q}_{\leftarrow [J \times 1]} - \dot{Q}_{\rightarrow [J \times 1]} = \mathbf{F}_{[J \times J]} \cdot \dot{Q}_{\rightarrow [J \times 1]} - \dot{Q}_{\rightarrow [J \times 1]} \quad (3)$$

Tako lahko vektor bilance toplotnih tokov $\dot{Q}_{\leftarrow [J \times 1]}$ za celotno geometrijo izračunamo ob poznanju matrike geometrijskih faktorjev vidnosti \mathbf{F} in ob poznanju vektorja oddanih toplotnih tokov $\dot{Q}_{\rightarrow [J \times 1]}$.

Pri izračunih toplotnega sevanja je glavna težava določitev matrike geometrijskih faktorjev vidnosti \mathbf{F} . Prostor peči Allino, skupaj z založenimi gredicami, pomeni zapleteno geometrijo za izračun matrike \mathbf{F} , ker se nekatere od teh ploskev med seboj ne vidijo, nekatere se vidijo le delno, upoštevati pa je treba tudi odbito sevanje (Slika 4). Za določitev te matrike smo zato uporabili statistično simulacijsko metodo Monte Carlo, ki omogoča obravnavo najzahtevnejših primerov. Ta metoda je še posebej primerna za obravnavo toplotnega sevanja, ker po kvantnem modelu sevanja energija potuje v obliki diskretnih delcev (fotonov)⁶. Sevano moč \dot{Q}_k ploskve k razdelimo na veliko število delcev N_k , ki jim pripišemo enake deleže moči \dot{Q}_k/N_k . Nato te delce pošljemo v prostor v naključnih smereh v skladu s porazdelitveno funkcijo, ki opisuje lastnost materiala. Delce preko odbojev spremljamo do njihove absorpcije na eni izmed ploskev obravnavane zaprete geometrije. Ploskvi j , v kateri se delec absorbira, prištejemo delež moči \dot{Q}_k/N_k , ki ga nosi absorbirani delec. Tako lahko s seštetjem absorbiranih delcev $N_{k \rightarrow j}$ na ploskvi j in z upoštevanjem deležev moči posameznega delca direktno določimo toplotni tok s ploskve k na ploskev j . Pri določitvi geometrijskih faktorjev vidnosti pa absorbirano moč na ploskvi j delimo s celotno sevano močjo ploskve k , \dot{Q}_k .

$$F_{k \rightarrow j} = \lim_{N_k \rightarrow \infty} \frac{N_{k \rightarrow j} \dot{Q}_k / N_k}{\dot{Q}_k} = \lim_{N_k \rightarrow \infty} \frac{N_{k \rightarrow j}}{N_k}$$



Slika 4: Prostor peči z založenimi gredicami
Figure 4: The furnace enclosure with the charged billets

Ko gre število delcev N_k , izsevanih s ploskve k proti neskončno, razmerje med številom absorbiranih delcev $N_{k \rightarrow j}$ na ploskvi j in številom izsevanih delcev N_k s ploskve k opisuje geometrijski faktor vidnosti s ploskve k na ploskev j . Izračun matrike geometrijskih faktorjev vidnosti je procesorsko in časovno zelo intenziven. Za celotno peč, pri gostoti emisije žarkov 10^6 m^{-2} traja izračun s PC-računalnikom (Pentium 4, 2,4GHz, 512MB RAM) 17 ur. Zato matriko \mathbf{F} izračunamo pred simulacijo za različne primere založitev gredic. Na začetku simulacije preberemo matrike \mathbf{F} za različne založitve gredic in v realnem času izračunamo izmenjavo toplote s sevanjem ploskev po enačbi (3).

2.3 Prevajanje v gredici

Prevajanje toplote v gredici, postavljeni v kartezični koordinatni sistem (x, y, z) opisuje naslednja parcialna diferencialna enačba:

$$\rho(\vartheta) c_p(\vartheta) \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(\vartheta) \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(\vartheta) \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\vartheta) \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right] \quad (4)$$

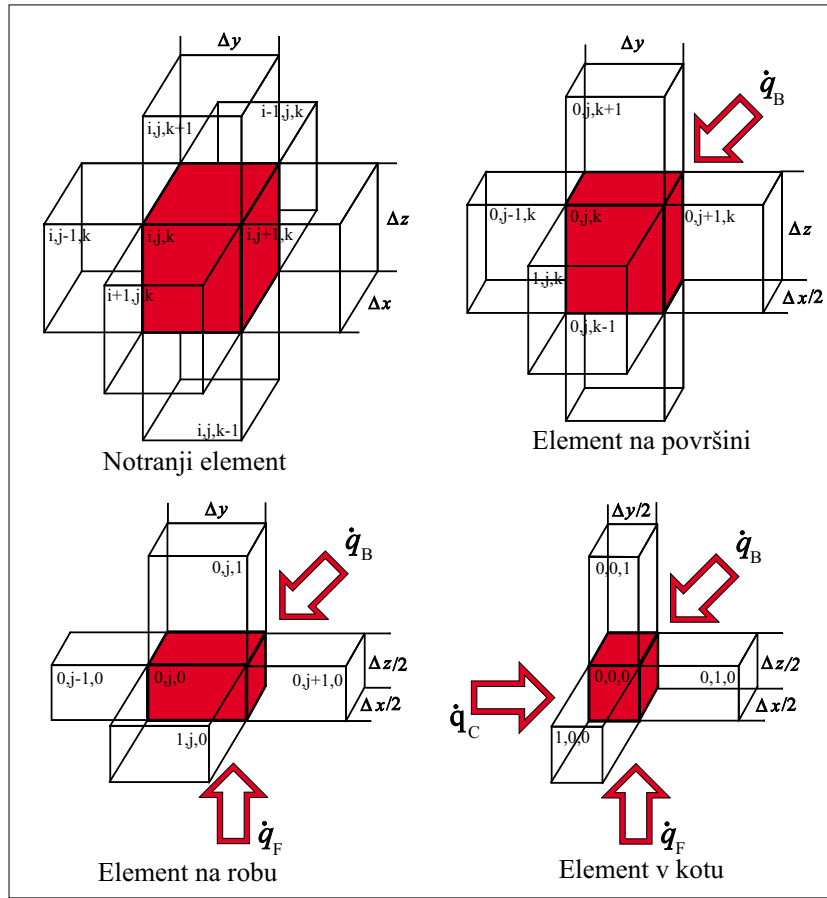
V enačbi (4) so: ϑ temperatura ($^{\circ}\text{C}$), ρ gostota (kg/m^3), λ toplotna prevodnost ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) in c_p specifična toplota ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Toplotna prevodnost in specifična toplota sta temperaturno odvisni veličini. V simulacijskem modelu so zajeti podatki za 372 kvalitet jekel, ki so razvrščene v 8 statističnih skupin. Za obravnavanje prevajanja v treh prostorskih dimenzijah je uporabljena metoda končnih diferenc. Vsako gredico v peči razdelimo z mrežo na manjše elemente ($9 \times 15 \times 15$ elementov), za katere predpostavimo izotermičnost temperaturnega polja. Ločeno obravnavamo elemente v notranjosti gredice, ploskovne elemente, elemente na robu in elemente v kotu (Slika 5). Za vsak tip elementa zapišemo enačbo bilance toplotnih tokov in izrazimo temperaturo ϑ v naslednjem časovnem koraku $t + \Delta t$. Tako dobimo rekurzijsko enačbo za izračun temperature v naslednjem časovnem trenutku $t + \Delta t$.

Na elemente v notranjosti gredice (Slika 5) vpliva šest sosednjih elementov:

$$\vartheta_{i,j,k}^{t+\Delta t} = \frac{\lambda \Delta t}{c_p \rho} \left[\frac{\vartheta_{i-1,j,k}^t + \vartheta_{i+1,j,k}^t - 2\vartheta_{i,j,k}^t}{\Delta x^2} + \frac{\vartheta_{i,j-1,k}^t + \vartheta_{i,j+1,k}^t - 2\vartheta_{i,j,k}^t}{\Delta y^2} + \frac{\vartheta_{i,j,k-1}^t + \vartheta_{i,j,k+1}^t - 2\vartheta_{i,j,k}^t}{\Delta z^2} \right] + \vartheta_{i,j,k}^t \quad (5)$$

Pri ploskovnih elementih (Slika 5) je potrebno dodatno upoštevati še zunanji toplotni tok \dot{q}_B :

$$\vartheta_{0,j,k}^{t+\Delta t} = \frac{2\lambda \Delta t}{c_p \rho} \left[\frac{\dot{q}_B}{\lambda \Delta x} + \frac{\vartheta_{1,j,k}^t - \vartheta_{0,j,k}^t}{\Delta x^2} \right] + \vartheta_{0,j,k}^t \quad (6)$$



Slika 5: Štirje različni tipi elementov za obravnavo prevajanja v gredici z metodo končnih diferenc
Figure 5: Four different types of elements used by the finite-difference method for the rectangular geometry

$$+ \frac{\partial'_{0,j-1,k} + \partial'_{0,j+1,k} - 2\partial'_{0,j,k}}{2\Delta y^2} + \frac{\partial'_{0,j,k-1} + \partial'_{0,j,k+1} - 2\partial'_{0,j,k}}{2\Delta z^2} \Big] + \partial'_{0,j,k}$$

$$\Delta t \leq \frac{c_p \rho}{2\lambda} \frac{1}{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)} \quad (9)$$

Pri elementih na robu (Slika 5) nastopata toplotna tokova iz dveh strani \dot{q}_B in \dot{q}_F :

$$\partial'_{0,j,0}^{t+\Delta t} = \frac{4\lambda\Delta t}{c_p\rho} \left[\frac{\dot{q}_B}{2\lambda\Delta x} + \frac{\partial'_{1,j,0} - \partial'_{0,j,0}}{2\Delta x^2} + \frac{\partial'_{0,j-1,0} + \partial'_{0,j+1,0} - 2\partial'_{0,j,0}}{2\Delta y^2} + \frac{\dot{q}_F}{2\lambda\Delta z} + \frac{\partial'_{0,j,1} - \partial'_{0,j,0}}{2\Delta z^2} \right] + \partial'_{0,j,0} \quad (7)$$

V obravnavanem primeru je bil časovni korak simulacije izbran $\Delta t = 1$ s.

2.4 Temperatura poda peči

Na elemente v kotih gredice (Slika 5) vplivajo zunanji toplotni tokovi iz treh strani \dot{q}_B , \dot{q}_F in \dot{q}_C :

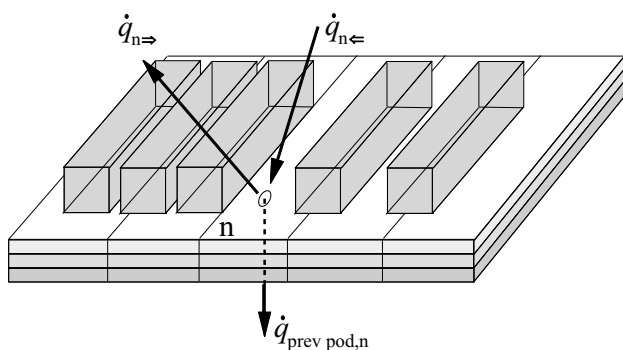
$$\partial'_{0,0,0}^{t+\Delta t} = \frac{2\lambda\Delta t}{c_p\rho} \left[\frac{\dot{q}_B}{\lambda\Delta x} + \frac{\partial'_{1,0,0} - \partial'_{0,0,0}}{\Delta x^2} + \frac{\dot{q}_C}{\lambda\Delta y} + \frac{\partial'_{0,1,0} - \partial'_{0,0,0}}{\Delta y^2} + \frac{\dot{q}_F}{\lambda\Delta z} + \frac{\partial'_{0,0,1} - \partial'_{0,0,0}}{\Delta z^2} \right] + \partial'_{0,0,0} \quad (8)$$

Gredice pri ogrevanju v peči ležijo na obzidanem podu (slika 6). Temperatura poda v peči je po dolžini peči različna in raste od začetnega proti končnemu delu peči. Zato pod razdelimo na manjše površine, za katere predpostavimo homogeno temperaturno polje. Temperatura poda je odvisna tudi od založenosti peči. Na delu, ki je pokrit z gredico, se pod ogreva le preko gredice, zato je hladnejši od nepokritega dela poda, ki se ogreva tudi od sten peči in dimnih plinov. Zato je bil razvit algoritem za izračun temperature posameznih delov poda peči².

Algoritem temelji na bilanci toplotnih tokov za posamezen del poda peči.

$$f(T_n) = \dot{q}_{n \leftarrow} - \dot{q}_{n \rightarrow} - \dot{q}_{\text{prev pod, n}} = \sum_{j=1}^n \left[\varepsilon_j(T_j) \sigma T_j^4 f_{j \rightarrow n} \right] - \varepsilon(T_n) \sigma T_n^4 - \dot{q}_{\text{prev pod, n}} \quad (10)$$

Izbira velikosti mreže in časovni korak simulacije nista poljubna. Stabilnost metode je za notranje točke zagotovljena, če je izpolnjen naslednji pogoj⁷:



Slika 6: Določitev temperature posameznih delov poda peči

Figure 6: Determination of the temperature of the individual furnace-floor elements

Prejeto toplotno sevanje $\dot{q}_{n \leftarrow}$ je določeno z vsoto prispevkov sevanj vseh ploskev obravnavane geometrije peči, oddano sevanje ploskve $\dot{q}_{n \rightarrow}$ je določeno s Stefan-Boltzmannovim zakonom, izgube s prevajanjem skozi pod peči $\dot{q}_{\text{prev pod, n}}$ so določene za realno obzidavo poda peči Allino, sestavljene iz K plasti, po enačbi za prevajanje skozi sestavljeno steno:

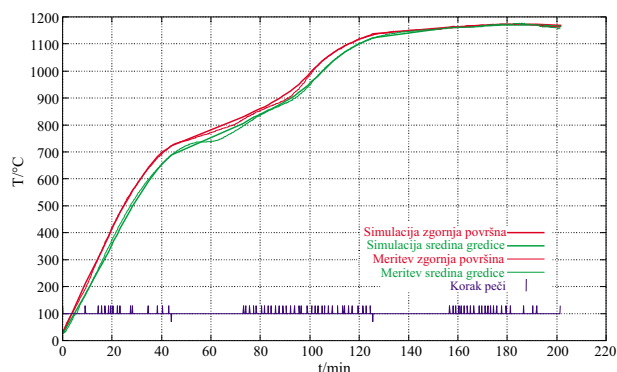
$$\dot{q}_{\text{prev pod, n}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^K \left(\frac{d_k}{\lambda_k(T_k)} \right) + \frac{1}{a_{\text{zrak}}}} \cdot (T_n - T_{\text{zrak}}) \quad (11)$$

V enačbi (11) so: d debelina k -tega sloja obzidave (m), λ toplotna prevodnost ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) sloja k , a_{zrak} toplotna prestopnost med steno poda na okoliški zrak ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$), T_{zrak} temperatura okoliškega zraka pod pečjo (K) in T_n temperatura zgornje površine poda peči. Ker so lastnosti posameznih slojev obzidave sestavljenega poda temperaturno odvisne, je treba enačbo (11) reševati iteracijsko. Za določitev temperature T_n n -tega dela poda, je treba poiskati ničlo funkcije (10).

3 VREDNOTENJE SIMULACIJSKEGA MODELA

Simulacijski model je bil vrednoten z meritvami na peči Allino. Te so bile izvedene z dvema oplaščenima vlečnima termoelementoma (tip-K, $\phi 3$ mm, $L = 25$ m) na testni gredici kvalitete CK45, kvadrata 150 mm in dolžine 3300 mm. Kvaliteta CK45 je bila izbrana, ker so za to kvaliteto dobro poznane toplotno-fizikalne lastnosti. S termoelementom TC1 (**Slika 7**) je bila merjena temperatura tik pod površino gredice, s termoelementom TC2 (**Slika 7**) pa je bila merjena temperatura v sredini gredice. Primerjava rezultatov simulacije in meritev je prikazana na **sliki 7**.

Rezultati kažejo na zelo dobro ujemanje, ki smo ga dobili med izmerjenima in izračunanima potekoma ogrevanja v celotnem območju, kar kaže na to, da so v modelu upoštevani vsi pomembni mehanizmi, ki nastopajo pri izmenjavi toplote v peči Allino.



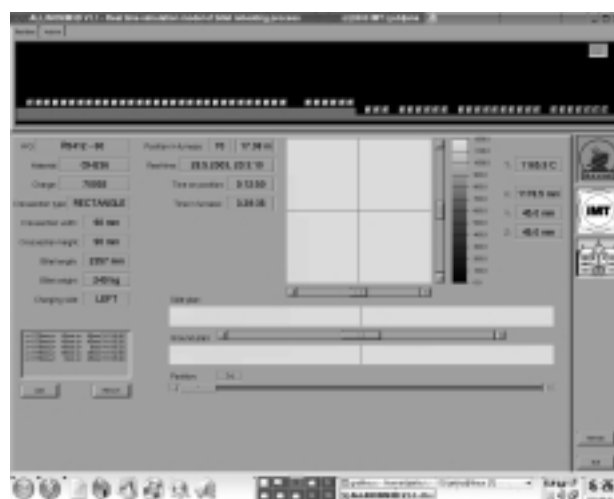
Slika 7: Primerjava med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi pri ogrevanju preskusne gredice v peči Allino

Figure 7: A comparison between measured and calculated reheating curves of the test billet during the reheating in the Allino furnace

4 UPORABNIŠKI VMESNIK

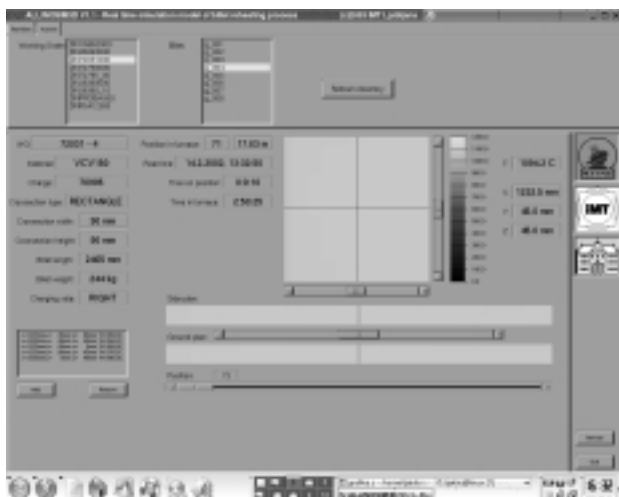
Simulacijskemu modelu ogrevanja gredic v peči Allino ALLINOSIM3D je dodan grafični uporabniški vmesnik (GUI). Ta omogoča uporabniško prijazen prikaz simulacijskih rezultatov. GUI teče vzporedno s simulacijskim modelom ogrevanja gredic, podatkovno sta programa sklopljena preko dinamično osveževanih tekstovnih datotek. Vmesnik deluje na dva načina: *Realni čas* in *Arhiv*. Na **sliki 8** je prikazan način *Realni čas*, kjer je v zgornjem delu prikazan stranski pogled na peč Allino in vse gredice, ki se ogrevajo v peči.

Vmesnik omogoča izbiro poljubne gredice, ki se tedaj nahaja v peči. Za izbrano gredico se v spodnjem delu prikažejo njeni podatki. Izračunano temperaturno polje je prikazano s tremi prerezi obarvanimi v skladu s toplotno barvno lestvico. Posamezne prereze lahko interaktivno izbiramo z drsniki. Privzeto je prikazano



Slika 8: Grafični uporabniški vmesnik simulacijskega modela ogrevanja gredic v realnem času ALLINOSIM3D (način v realnem času)

Figure 8: The GUI of the real-time simulation model of the steel-billet reheating process ALLINOSIM3D (real-time mode)



Slika 9: Grafični uporabniški vmesnik simulacijskega modela – arhivski način

Figure 9: The GUI of the simulation model – Archive mode

trenutno temperaturno polje in podatki za trenutni položaj gredice (pozicija v peči, čas na položaju, skupni čas v peči...), drsnik pomikov pa omogoča interaktivni pregled zgodovine ogrevanja po posameznih položajih v peči do začetnega.

Način *Arhiv* omogoča ogled poteka ogrevanja že ogretyh gredic, kar je pomembno predvsem s stališča zagotavljanja kakovosti. Gredice so v arhivu sortirane po delovnih nalogih, izbira poteka po izbirni tabeli (**Slika 9**). Tako lahko za vsako gredico, katere ogrevanje je bilo spremljano s simulacijskim modelom, pogledamo njen potek ogrevanja pri posameznih položajih v peči.

5 SKLEP

Predstavljeni simulacijski model ogrevanja gredic ALLINOSIM3D, ki deluje v realnem času na peči Allino v Metal Ravne omogoča nadzor nad nemerljivimi veličinami, ki jih predstavljajo temperaturna polja gredic med ogrevanjem v peči. Algoritmi prenosa toplote so izbrani tako, da omogočajo simulacijo v realnem času. V

modelu sevanja ploskev je v obliki geometrijskih faktorjev vidnosti upoštevana kompleksna geometrija prostora peči, ki vsebuje tudi založene gredice. Temperatura poda peči se računa za vsak element na podlagi bilance toplotnih tokov. Prevajanje toplote v gredici je obravnavano v treh prostorskih dimenzijah z metodo končnih diferenc. V simulacijskem modelu so zajete toplotnotehnične lastnosti za 372 kvalitet jekel, ki so razvrščene v 8 statističnih skupin. Vrednotenje simulacijskega modela, kjer smo dobili dobro ujemanje v celotnem poteku ogrevanja, kaže, da so v modelu upoštevani vsi pomembni mehanizmi, ki nastopajo pri izmenjavi toplote v peči Allino. Za uporabniško prijazen prikaz rezultatov simulacijskega modela je razvit grafični uporabniški vmesnik, ki omogoča prikaz trenutnega temperaturnega polja vseh gredic, ki se ogrevajo v peči, in tudi njihove zgodovine ogrevanja. Tako operaterju peči v realnem času daje informacije o nemerljivih veličinah, ki so potrebne za optimalno vodenje peči. Arhivski način daje informacije o poteku ogrevanja že ogretyh gredic, kar je pomembno za spremljanje in zagotavljanje kakovosti. Z uvedbo simulacijskega modela na peči Allino je mogoče v njej natančno nadzirati dogajanje pri ogrevanju občutljivih orodnih jekel.

6 LITERATURA

- ¹ Heiligenstaedt W.: *Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen*, Verlag Stahleisen mBH, Düsseldorf, 1966
- ² Jaklič A.: *The role of view-factor at optimal reheating in a continuous furnace*, PhD thesis (in Slovene), University of Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering, Ljubljana, Slovenia, 2002
- ³ Kolenko T., Glogovac B., Jaklič A.: *An analysis of a heat transfer model for situations involving gas and surface radiative transfer*, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 15 (1999), 349–365
- ⁴ Mbioc A. and Weber R.: *Radiation in enclosures – elliptic boundary value problem*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2000
- ⁵ Modest M. F.: *Radiative heat transfer*, McGraw-Hill Book Company, New-York, 1993
- ⁶ Siegel R., Howell J. R.: *Thermal radiation heat transfer*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981
- ⁷ Tomšič G.: *Izbrana poglavja iz matematike*, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1994