

# Razvoj programske opreme za procesno vodenje potisne peči z vidika energetskega optimiranja

## Development of Software for the Process Control of Pusher Furnace from an Optimum Energetic Standpoint

T. Kolenko, F. Pavlin, B. Sicherl, Univerza v Ljubljani, Ljubljana  
B. Glogovac, IMT, Ljubljana

*Prikazana je konceptualna rešitev nadzora učinkovitosti porabe energije goriva za procesno vodenje potisne peči s stališča optimalne porabe kemijske toplote goriva. Za prikaz izkoristka kemijske toplote goriva sta združena model ogrevanja plošč in avtomatska akvizicija merilnih signalov ter njihova obdelava z računalnikom. Izkoristek toplote je prikazan za vsak časovni interval med dvema pomikoma plošč.*

*Ključne besede: numerična simulacija, trenutni termični izkoristek, ogrevanje plošč*

*The conceptual solution of efficient fuel energy use monitoring for the process control of a pusher type furnace from the view point of optimal use of chemical heat of fuel is dealt with. To show the efficiency of chemical heat of fuel the slab reheating model and automatic acquisition of transducer signals and their treatment on the computer are combined. The heat efficiency is shown for each time interval between two moves of slabs.*

*Key words: numerical simulation, instantaneous thermal efficiency, slab reheating*

### 1 Uvod

Glede ciljev procesnega vodenja ogrevanja so si literaturni viri enotni. Predvsem je potrebno doseči željeno temperaturo in enakomernost njene porazdelitve po preseku plošč ob minimalni porabi goriva<sup>1</sup>. Vendar dajejo nekatera dela prednost kvaliteti ogrevanja<sup>2</sup>, druga se posvečajo bolj učinkoviti porabi energije<sup>3</sup>, tretja zopet uporabi modelov pri predvidevanju obratovanja po konstrukcijskih spremembah<sup>4,5</sup>. Glede strategije vodenja vedno več del poroča o poseganju računalnikov v nastavljanje temperatur po conah peči<sup>6,7</sup> in v regulacijo porabe goriva<sup>8</sup>.

Vzporedno z razvojem računalniške simulacije procesa ogrevanja v potisni peči, ki omogoča nadzor nad temperaturno porazdelitvijo v vseh ploščah, smo razvili še model za vodenje potisne peči z vidika energetskega optimiranja. Povezava obeh modelov predstavlja konceptualno rešitev problema procesnega vodenja potisne peči, ki bo omogočila kontrolo ogrevanja posamezne plošče glede na kvalitetno ogrevanje in smotno porabo energije. Dosedanja stopnja razvoja modela omogoča možnost analize storilnosti peči v odvisnosti od temperaturnih razmer v peči, vrste jekla, debeline plošč, končne temperature in njene enakomernosti po preseku ter prikaza izkoristka kemijske toplote goriva za poljuben časovni interval obratovanja.

V okviru meritev smo razvili programsko opremo za vrednotenje merilnih signalov, ki omogoča izdelavo toplotne bilance. Razvili smo tudi del programske opreme, ki povezuje model ogrevanja in model za energetskega analizo procesa ogrevanja, ker ni mogoče prikazati toplotnih tokov v peči samo z meritvami.

### 2 Akumulirana toplota v plošči

Model ogrevanja plošč temelji na numeričnem računanju temperaturnega polja po enačbi za nestacionarno prevajanje

toplote v eni dimenziji:

$$\rho c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{d\lambda}{d\vartheta} \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)^2 \quad (1)$$

Akumulirano toploto v rezini plošče širine  $dx$  izračunamo po znani metodi. Volumen rezine  $A dx$ , kjer je plošev  $A$  pravokotna na smer toplotnega toka, pomnožimo z gostoto  $\rho$ , da dobimo maso. Množenje mase s specifično toploto  $c_p$  da akumulirano toploto, če temperatura naraste za eno stopinjo; če naraste za  $\partial \vartheta$  v času  $\partial t$ , je akumulirana toplota v časovni enoti:

$$dq_{ak} = A dx \rho c_p \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (2)$$

Glede na en. (2) predstavlja izraz na levi strani en. (1) akumulirano toploto v enoti volumna in časa. Zato je na osnovi en. (1) možno izračunati akumulirano toploto v časovni enoti, če poznamo temperaturno porazdelitev v plošči. En. (1) pomnožimo z  $dx$  in z integracijo po debelini plošče "s" dobimo akumulirano toploto na enoto površine in časa:

$$dq_{ak} = \int_0^s \left[ \lambda \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{d\lambda}{d\vartheta} \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)^2 \right] dx \quad (3)$$

V diferencialni obliki ima en. (3) naslednjo obliko:

$$q_{ak}^p = \sum_{m=1}^n \lambda \frac{[\vartheta_{m-1}^p - 2\vartheta_m^p + \vartheta_{m+1}^p]}{\Delta x} + \frac{d\lambda}{d\vartheta} \frac{[\vartheta_{m-1}^p - \vartheta_{m+1}^p]^2}{4\Delta x} \quad (4)$$

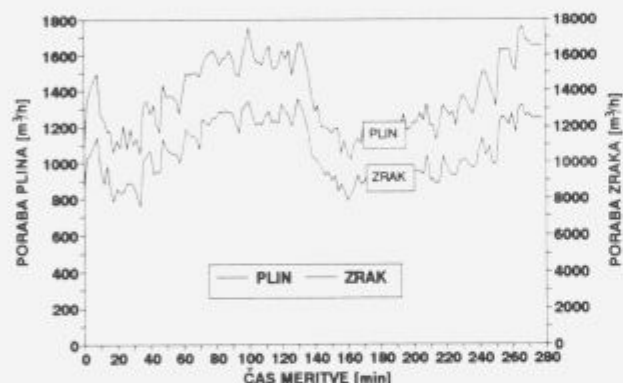
kjer gredo indeksi točk, ki predstavljajo posamezne rezine v plošči, od 0 do  $n + 1$ , "p" pa je časovni indeks. Odvod toplotne prevodnosti po temperaturi računamo iz tabele za toplotno prevodnost po ustreznem pravilu za numerično odvajanje. Akumulirano toploto v času  $\Delta t$  dobimo, če pomnožimo en. (4) z  $\Delta t$ , akumulirano toploto v daljši časovni periodi pa tako, da seštejemo akumulirane toplote vseh časovnih intervalov, ki periodo sestavljajo (en. 5):

$$q_{ak} = \sum_{p=1}^i q_{ak}^p \Delta t, \quad (5)$$

kjer je "i" število časovnih intervalov v časovni periodi.

### 3 Meritve na peči

Za meritve temperatur in pretokov plina in zraka smo uporabili instalirane senzorje na peči. Vrednosti signalov smo preko sistema za zajemanje meritvenih podatkov shranjevali na disk osebnega računalnika. Z upoštevanjem ustreznih pretvornih faktorjev je prikazana izmerjena poraba plina z diagramom na sliki 1 za prehodni čas testne plošče skozi peč.



Slika 1. Poraba plina in zraka za zgorevanje.

Figure 1. Fuel gas and combustion air consumption.

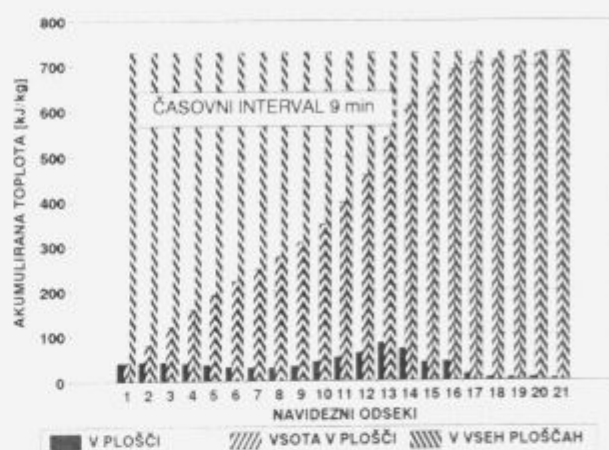
Izmerjene temperature con z instaliranimi senzorji ne zadostujejo za matematično simulacijo ogrevanja testne plošče. Zato smo z optičnim pirometrom izmerili temperaturo notranjega površja sten peči na dostopnih mestih in iz meritev z interpolacijo določili temperaturni profil notranjega površja sten peči.

### 4 Izkoristek kemijske toplote plina

Razlogi za uvedbo procesnega vodenja so predvsem enakomerno ogretje plošč, doseganje željene temperature plošč in prilagajanje storilnosti peči delu na valjalni progii v primeru, da prihaja do zastojev. Zato je potreben ustrezen model ogrevanja, ki pa vzporedno z zajemanjem meritev porabe plina omogoča na osnovi izračuna akumulirane toplote v ploščah tudi prikazati izkoristek kemijske toplote plina za poljuben časovni interval.

Potek akumulacije toplote v plošči, ki bi se ogrevala v stacionarnih pogojih, je prikazan z diagramom na sliki 2. Diagram prikazuje koliko toplote se akumulira v plošči v posameznem navideznem odseku in celotno akumulirano toploto v plošči do posameznega navideznega odseka peči. Poleg akumulacije toplote v plošči je prikazana tudi akumulacija toplote v vseh ploščah, ki so v peči med dvema

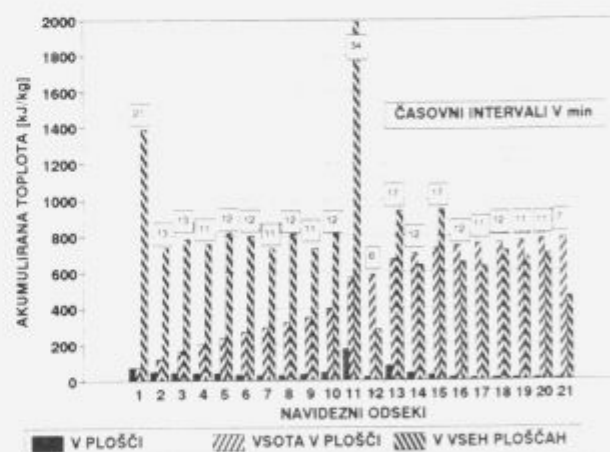
pomikoma. V stacionarnih pogojih je celotna akumulacija toplote v plošči v zadnjem navideznem odseku peči enaka akumulaciji toplote v vseh ploščah, ki so v peči med dvema pomikoma.



Slika 2. Akumulacija toplote v ploščah v stacionarnih pogojih.

Figure 2. Heat accumulation in slabs at stationary conditions

Podobno je prikazan izračun akumulacije toplote za testno ploščo z diagramom v sliki 3. Za vsak odsek je prikazan tudi čas zadrževanja testne plošče v odseku. Rezultati meritev celotne porabe plina iz diagrama v sliki 1 so v sliki 4 prikazani kot kemijska toplota plina, porabljena v časovnih intervalih zadrževanja testne plošče v posameznem navideznem odseku peči. Poleg porabe kemijske toplote sta za vsak navidezni odsek peči prikazana tudi ustrezna akumulirana toplota v vseh ploščah, to je tako imenovana koristna toplota, in izkoristek kemijske toplote plina.



Slika 3. Akumulacija toplote v ploščah med prehodom testne plošče skozi peč.

Figure 3. Heat accumulation in slabs during the test slab transition through the furnace.

### 5 Sklep

V okviru raziskave so bile izvedene meritve na potisni peči za kontrolo matematičnega modela ogrevanja in za analizo toplotne bilance ogrevanja v peči. Izdelan je koncept



Slika 4. Izkoristek kemijske toplote goriva v intervalih med pomiki testne plošče skozi peč.

Figure 4. Efficiency of chemical heat of fuel in intervals between the test slab moves through the furnace.

povezave modela ogrevanja plošč z izračunom toplotne bilance iz podatkov merilnih senzorjev na peči. Povezavo predstavlja izračun akumulirane toplote v ploščah, ki so v peči med dvema pomikoma. To je koristna toplota, ki je brez modela ogrevanja ni možno ugotoviti za časovni interval med dvema pomikoma. Ekonomičnost ogrevanja je prikazana z deležem akumulirane toplote v razmerju do kemijske toplote plina v vsakem časovnem intervalu

med dvema pomikoma. V prikazu zgodovine ogrevanja posamezne plošče je možno poleg časa zadrževanja plošče v posameznem navideznem odseku peči, dosežene temperature, temperaturne razlike v plošči, temperature sten peči in toplotnih fizikalnih lastnosti plošče podati tudi izkoristek kemijske toplote kurilnega plina.

## 6 Literatura

- Hollander, F. in R.L. Huisman: Computer Controlled Reheating Furnaces Optimize Hot Strip Mill Performance, Iron and Steel Engineer, sept. 1972, 43-56
- Koinis, F.J. in R.W. Meyer: Improved thermal efficiency in reheat furnaces through heat transfer analysis and correlation, Iron and Steel Engineer, Feb. 1982, 43-46
- Kuck A., R. Klima in D. Sucker: Ein Programmsystem zur Prozeßsteuerung von Durchlauf-Wärmofen, Stahl u. Eisen, 102, Nr.18, 867-872
- Laws, W.R.: The reheating of slabs prior to rolling, Iron and Steel, aug. 1971, 231-241
- Zongyu, L., P.V. Barr in J.K. Brimacombe: Computer simulation of the slab reheating furnace, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.27, No.3, 1988, 187-196
- Glatt, R.D. in F.X. Macedo: Computer Control of reheating furnaces, Iron and Steel International, dec. 1977, 381-395
- Leden, B.: A Control System for Fuel Optimization of Reheating Furnaces, Scandinavian Journal of Metallurgy, 15, 1986, 16-24
- Hollander, F.: Design, development and performance of on-line computer control in a 3-zone reheating furnace, Iron and Steel Engineer, 1982, 44-52