

# SPECIFI^NA PORABA TOPLOTE KOT FUNKCIJA STORILNOSTI POTISNE PE^I

## SPECIFIC HEAT CONSUMPTION AS A FUNCTION OF PUSHER FURNACE THROUGHPUT

TOMA@ KOLENKO<sup>1</sup>, B. GLOGOVAC<sup>2</sup>, A. JAKLI^2, D. MIKEC<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, NTF OMM, A{ker-eva 12, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>IMT, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana

<sup>3</sup>D. Mikec, ACRONI d.o.o., Cesta Borisa Kidri-a 44, 4270 Jesenice

*Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-12-19*

Prikazan je nov na-in ugotavljanja specifi-ne porabe toplote in termi-nega izkoristka za kontinuirne procese ogrevanja. Na primeru potisne pe-i je prikazano, kako izra-unavamo oba parametra u-inkovitosti rabe kemijske energije goriva v realnem -asu. Na ta na-in je mo' no tudi v kratkem -asu ugotoviti odvisnost specifi-ne porabe toplote od storilnosti pe-i za razli-ne obratovne pogoje.

Klju-ne besede: specifi-na poraba toplote, kontinuirno ogrevanje plo{-

A new method of calculation of the specific heat consumption and thermal efficiency of continuous reheating processes is shown. Using the example of a pusher-type furnace, it is shown how both parameters of fuel efficiency utilisation may be calculated in real time. In this manner the dependency of the specific heat consumption as a function of the furnace throughput can be established for different operating conditions in a reasonable length of time.

Key words: specific heat consumption, continuous reheating of slabs

### 1 UVOD

Pri prehodu na nove metalur{ke postopke, pri rekonstrukcijah pe-i ali le pri spremembi na-ina vodenja pe-i je zmanj{anje porabe energije za ogrevanje pomemben razlog za poseg v tehnologijo<sup>1</sup>. Pogosto se izbolj{anje tehnologije dokazuje s prikazom specifi-ne porabe energije v odvisnosti od storilnosti, v katerem je mo' no razlo-iti vrednosti primerjanih re'imov ogrevanja<sup>2,3</sup>. Tudi ra-unalni{ki nadzorni sistemi ogrevanja prispevajo k zmanj{anju specifi-ne porabe goriva. Zato niso redki viri, ki gospodarnost investicije ra-unalni{kega vodenja opravi-ujejo tudi z energijskimi prihranki<sup>4</sup>. Literatura prihranke tudi navaja v {tevilkah, npr. od 10 do 15%<sup>5</sup>, manj pa so v literaturi opisane meritve in modeli ra-unanja termi-nega izkoristka in specifi-ne porabe toplote, ki sta osnovna toplotnotehni-na parametra za oceno procesa ogrevanja vlo'ka v ogrevnih pe-eh. Deloma je to razumljivo, ker so metode ugotavljanja specifi-ne porabe in termi-nega izkoristka 'e ute-ene v diagnostiki obratovanja pe-i. To dr' i za ob-asno in deloma tudi za periodi-no obratuje-e pe-i, pri tistih s kontinuirnim ogrevanjem, posebno -e gre za pogosto menjavanje re'imov ogrevanja glede na vrsto jekla in dimenzije vlo'ka, pa je postopek ugotavljanja specifi-ne porabe toplote in termi-nega izkoristka mo' no dopolniti z matemati-nim modeliranjem.

### 2 SPECIFI^NA PORABA TOPLOTE IN TERMI^NI IZKORISTEK

Kontinuirni procesi v praksi niso stacionarni. Zna-ilni zgled je ogrevanje plo{- v potisni pe-i, kjer -asovni

intervali, v katerih potiskamo plo{-e skozi pe- zaradi zastojev na vzporednih procesih niso konstantni. Zato so za vsako plo{-o temperaturni pogoji v odvisnosti od -asa druga-ni. ^e ho-emo nadzirati temperaturno porazdelitev v vsaki plo{-i po celotni dol'ini pe-i, potrebujemo matemati-ni model, ki deluje v realnem -asu.

Iz istega razloga je pri kontinuirnem procesu ogrevanja te' ko izmeriti specifi-no porabo kemijske toplote goriva v realnem -asu. Ta je odvisna tudi od -asovnega intervala, v katerem opazujemo proces. Tako kot pri ugotavljanju temperature plo{-, si moramo tudi pri meritvi specifi-ne porabe toplote pomagati z matemati-nim modelom.

Izra-un akumulirane toplote v realnem -asu pri ogrevanju jeklenih plo{- z gostoto  $r$ , specifi-no toploto  $c$  in toplotno prevodnostjo  $l$  izpeljemo iz ena-be za prevajanje toplote v nestacionarnem temperaturnem polju (ena-ba (1)).

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

Leva stran ena-be (1) pomeni akumulirano toploto v plo{-i na enoto prostornine in -asa. Glede na desno stran ena-be (1) je mo' no izra-unati akumulirano toploto pri poznani temperaturni porazdelitvi v plo{-i. ^e pomno'imo desno stran ena-be (1) z  $dx$  in integriramo po debelini plo{-e  $s$ , dobimo akumulirano toploto na enoto ploskve in -asa (ena-ba (2)).

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

Akumulirano toploto računamo v časovnih korakih  $\Delta t$ . Velikost časovnega koraka  $\Delta t$  določimo glede na stabilnost uporabljene numerične metode. Akumulirano toploto v časovnem koraku dobimo z množenjem akumulirane toplote na enoto ploskve in površine (ena-ba (2)) z  $\Delta t$  (ena-ba (3)).

$$\Delta q_{ak}^p = q_{ak} \Delta t, \quad (3)$$

kjer je  $p$  časovni indeks. Za izračun akumulirane toplote v daljšem časovnem intervalu, npr. ene minute, ki je v našem zgledu interval vzorjenja meritev na peč, moramo seštejati akumulirane toplote vseh časovnih korakov, ki so v tem časovnem intervalu (ena-ba (4)).

$$\Delta q_{ak}^{iv} = \sum_{iv} \Delta q_{ak}^p \quad (4)$$

kjer je  $iv$  interval vzorjenja. Akumulirano toploto v intervalu vzorjenja izračunamo za vsako ploščo posebej. Zato jo lahko izrazimo tudi na enoto mase, tako da delimo ena-ba (4) za vsako ploščo z njeno debelino in gostoto. V danem primeru pomeni ena-ba (4) akumulirano toploto v  $\text{kJ/m}^2$   $iv$  oziroma v  $\text{kJ/kg}$   $iv$ .

Specifična poraba toplote je v zvezi s termičnim izkoristkom, ki je definiran kot razmerje koristne toplote proti porabljeni. Koristno toploto izračunamo iz temperaturne porazdelitve v ploščah kot akumulirano toploto tako, da za vsako ploščo pomnožimo ena-ba (4) s ploščino ploskve, ki je pravokotna na toplotni tok, in akumulirane toplote v ploščah seštejemo. Porabljeno toploto izračunamo iz meritev porab plina v peč. Ti izračuni potekajo v vsakem intervalu vzorjenja. Zato lahko smatramo izračunani izkoristek kot trenutni termični izkoristek.

Specifična poraba toplote je po definiciji porabljena toplota na enoto mase vročaka, ki se je v peč ogrel na predpisane temperaturne pogoje. Seveda pa pri določitvi specifične porabe toplote za interval vzorjenja, ki je krajši od intervala pomika plošč, ne vemo, s katero maso vročaka bi delili porabljeno toploto, saj v tem kratkem času nismo ogreli vročaka na zahtevane temperaturne pogoje. Zato v tem primeru tudi porabe toplote, izračunane na enoto mase in interval vzorjenja, ne moremo imenovati specifične. Problem je rešljiv z izračunanim trenutnim termičnim izkoristkom. Če delimo akumulirano toploto na enoto mase in interval vzorjenja s termičnim izkoristkom, dobimo porabljeno kemijsko toploto goriva na enoto mase in interval vzorjenja. S seštevanjem vseh porab kemijske toplote goriva na enoto mase in interval vzorjenja v intervalu pomika dobimo specifično porabo toplote.

Matematično izrazimo proces izračuna specifične porabe toplote v intervalu pomika takole. Če imamo podatke o porabi toplote na kg in na interval vzorjenja kot funkcijo površine, lahko s seštevanjem določimo specifično porabo toplote.

*Specifična poraba toplote =*

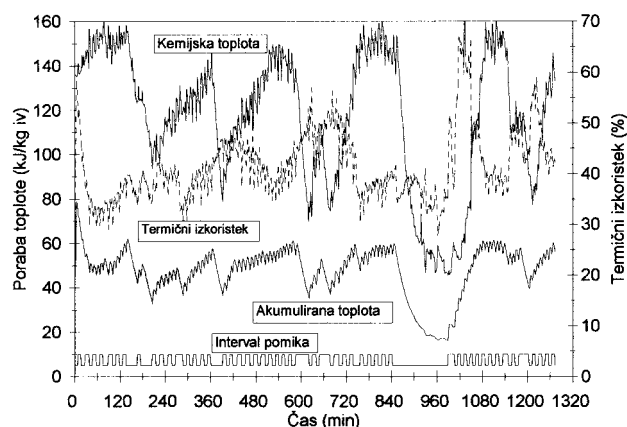
$$= \sum_{ip} (\text{Poraba toplote na kg na } iv), \quad (5)$$

kjer pomeni  $ip$  časovni interval pomika plošč. Srednjo specifično porabo toplote za več intervalov pomika plošč, ki sestavljajo daljše obdobje, dobimo s seštevanjem specifičnih porab vseh intervalov pomika in deljenjem vsote s številom intervalov pomika.

*Srednja specifična poraba toplote =*

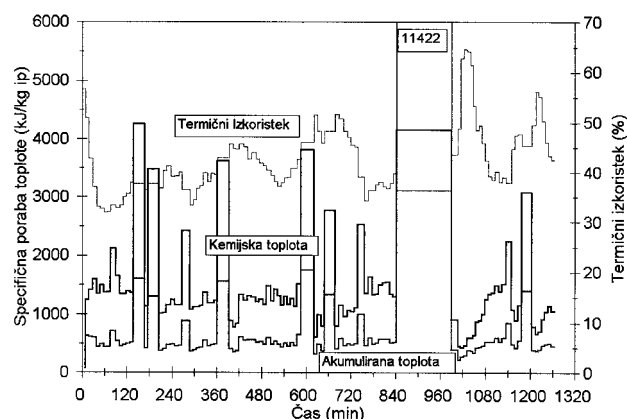
$$= \frac{\sum_{i=1}^p (\text{specifična poraba toplote})_i}{P} \quad (6)$$

kjer je  $P$  število intervalov pomika plošč.



Slika 1: Potek trenutnega termičnega izkoristka in porabe toplote v  $\text{kJ/kg}$   $iv$  med ogrevanjem vroč zalaganega elektro jekla

Figure 1: Time history of the thermal efficiency and heat consumption in  $\text{kJ/kg}$   $si$  at reheating of hot charged electric steel ( $si$  = sampling interval)



Slika 2: Potek trenutnega termičnega izkoristka in specifične porabe toplote v  $\text{kJ/kg}$   $ip$  med ogrevanjem vroč zalaganega elektro jekla

Figure 2: Time history of the thermal efficiency and specific heat consumption in  $\text{kJ/kg}$   $pi$  at reheating of hot charged electric steel ( $pi$  = push interval)

### 3 PRIKAZ TRENUTNE SPECIFI^NE PORABE TOPLOTE

Opisani postopek izra-una trenutne specifi-ne porabe kemijske energije goriva je prikazan z diagramoma za ogrevanje preko sto plo{- toplo zalo' enega elektro jekla v potisni pe-i. Prikazani so poraba kemijske toplote na enoto mase in interval vzor-enja (slika 1) in vsote teh vrednosti, ki pomenijo specifi-no porabo toplote za posamezen interval pomika (slika 2). Izra-unana je tudi povpre-na oziroma srednja specifi-na poraba toplote 1424 kJ/kg za -as od osme do 1264 minute, v katerem smo ogreli sto tri plo{-e, kar je dalo storilnost 48,5 t/h.

Postopek je mo'no izvesti tudi za kraj{a obdobja v tem -asovnem intervalu. Nekaj izra-unov je prikazanih v tabeli 1.

Tabela 1: Storilnost in specifi-na poraba toplote

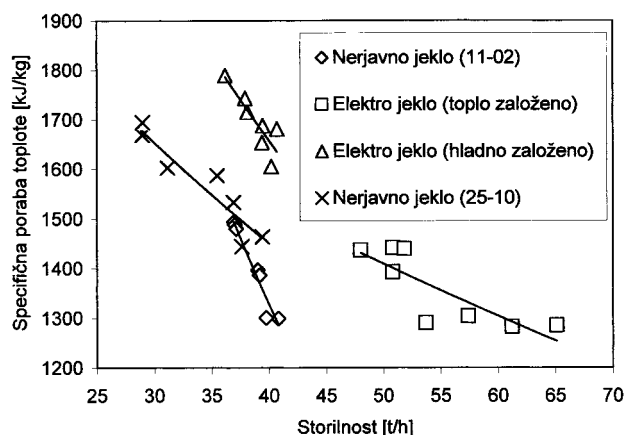
meje (min)	{tevilno plo{-	storilnost (t/h)	specifi-na poraba toplote (kJ/kg)
206... 492	26	53,7	1291
306... 584	27	57,4	1304
485... 776	25	50,8	1393
8... 1264	103	48,6	1424

### 4 SPECIFI^NA PORABA TOPLOTE V ODVISNOSTI OD STORILNOSTI

Podobno analizo smo naredili {e za hladno zalo' eno elektro jeklo in za dve kampanji ogrevanja nerjavnih jekel. Rezultati analize so na diagramu (slika 3), ki prikazuje specifi-no porabo toplote v odvisnosti od storilnosti pe-i za hladno in toplo zalagano elektro jeklo in za dve kampanji hladno zalaganega nerjavnega jekla. Pomemben parameter je tudi debelina plo{-. Debelina plo{- iz elektro jekla je 200 mm, iz nerjavnega jekla z veliko vsebnostjo kroma pa je 160 mm.

### 5 SKLEP

U-inkovitost porabe kemijske toplote goriva v potisni pe-i lahko dose'emo le s pazljivim nadzorom pogojev, pod katerimi jo prevedemo v koristno toploto. Rezultat nadzora s stali{-a koristne rabe energije sta podatka o specifi-ni porabi toplote in termi-ni izkoristek pe-i. Poleg izvedbe konstrukcije pe-i in merilno-regulacijske opreme vpliva na specifi-no porabo toplote ve- obra-tovalnih parametrov, kot npr. ogrevalne zahteve, dimenzije vlo'ka, vrsta jekla, za-etna temperatura vlo'ka in zastoji. V prikazih specifi-ne porabe toplote v odvisnosti



Slika 3: Specifi-na poraba toplote v odvisnosti od storilnosti pe-i  
Figure 3: Specific heat consumption as a function of furnace throughput

od storilnosti pe-i, ki jih dajejo energetska gospodarstva obratov, ti parametri niso razlo-ljivi, kar ne daje jasne podobe o gospodarnosti s toploto. Z izra-unom porabe toplote na enoto mase vlo'ka in -asa z izra-unano akumulacijo toplote in termi-nim izkoristkom ter njeno integracijo po -asu lahko ugotovimo zgoraj omenjeno odvisnost specifi-ne porabe toplote od storilnosti za kraj{a -asovna obdobja, v katerih so vplivni parametri konstantni. Smiselno je tudi prikazati specifi-no porabo toplote na interval pomika, kar omogo-a spremljanje tega parametra v realnem -asu na zaslonu ra-unalnika. Tak{en prikaz je v -lanku skupaj z diagrami specifi-ne porabe toplote v odvisnosti od storilnosti lo-eno za hladno in vro-e zalagano elektro jeklo in za hladno zalagano nerjavno jeklo dveh kampanj. V diagramih je prikazan tudi termi-ni izkoristek, izra-unan v realnem -asu.

### 6 LITERATURA

- H. Hammer: Konzeption und Betriebserfahrungen mit dem neuen 200-t/h-Hubbalkenofen einer Mittelbandstrasse, *Stahl und Eisen*, 109 (1989) 22, 73-78
- F. T. Münch, F. Raffauf, M. Röder, R. Klima: Untersuchungen zur Verbesserung der Energieausnutzung und der Temperaturgleichmässigkeit in Wärmeöfen. *Stahl und Eisen*, 116 (1996) 3, 49-54
- W. Evers, R. Klima, A. Krause, A. Kuck, A. Plottke: Energieoptimale modellgestützte Führung einer Walzwerksofengruppe. *Stahl und Eisen*, 108 (1988) 10, 489-497
- H. Klammer, G. Woelk, W. Brüsecke, H. J. Heidemüller: Dynamisch-adaptive Prozessführung eines 35-t/h-Drehherdofens mit Rechnervernetzung auf PC-Basis, *Stahl und Eisen*, 110 (1990) 9, 103-109
- R. J. Schurko, C. Weinstein, M. K. Hanne, D. J. Pellechia: Computer control of rehear furnaces: A comparison of strategies and applications, *Iron and Steel Engineer*, (1987) maj, 37-42