OPTIMALIZÁCIA OHREVU VSÁDZKY Z HĽADISKA MINIMALIZÁCIE STRÁT KOVU PREPALOM

Kostúr K., Terpák J.

Katedra informatizácie a riadenia procesov, Fakulta BERG, TU Košice, Slovensko

THE HEATING OPTIMISATION WITH SCALE MINIMISATION

Kostúr K., Terpák J.

Department of Informatics and Control Engineering, BERG Faculty, TU Košice, Slovakia

Abstract

Contribution deals by optimisation of metal heating from standpoint of scale minimisation. Mathematical model present basic tool for simulation and analysis of heating and scale forming in a continual heating furnace with countercurrent. Mathematical model of heating includes the following processes: fuel combustion process (understoichiometry, overstoichiometry), mass transfer process, conduction, convection and radiation heat transfer process, air suction process into the furnace. Solution of the mathematical model is solution of algebraic and differential equations system. Non iteration method was developed for solution equations system. This method is base of algorithm of simulation model. Mathematical model of scale forming depend on time, temperature and coefficient of air surplus. Simulation model was developed by FORTRAN program language. The models were verificated. Real data and data from model simulation are comparable. Optimal criterion expresses the minimisation of scale. Restrictions for solving of optimal heating have been defined follow: maximal difference between maximum and minimal temperature of charge section on furnace end have to be less as 9°C, the required value of surface temperature have to be 1250°C, air surplus more than 1 for combustion of combustible component in waste gas at temperature under 900°C. The simulation appears that modification of combustion mode decreases of scale forming. In the contribution are described arrangements for reduction of creating scale forming minimisation. Arrangements minimise scale forming from 30 to 50 %, increase quality of heating, and saving energy about 34,5%.

Key words: mathematical model, creating of scale, optimisation, optimal heating trajectories, scale minimisation

Abstrakt

Príspevok sa zaoberá optimálnym ohrevom kovovej vsádzky z hľadiska minimalizácie prepalu kovu. Jeho zníženie znamená pre výrobcu nielen zvýšenú výťažnosť polotovaru, ale predovšetkým zvýšenie kvality pri následovnom tvárnení.

Za posledných 20 rokov významne prispeli k riešeniu problematiky znižovania prepalu kovu matematické a simulačné modely. Do tejto skupiny sa radí aj tento príspevok, ktorý analyzuje a skúma optimálne trajektórie pomocou simulačných modelov. Výskum je aplikovaný na ohrev oceľových blokov z nízkouhlíkových ocelí. Ohrev sa uskutočňuje v priebežnej kontinuálne pracujúcej ohrievacej peci s protiprúdnym systémom. Aby sa mohol komplexne posúdiť vplyv faktorov na tvorbu prepalu

kovu bol zostavený simulačný model, ktorý je stručne charakterizovaný. Simulačný model bol vytvorený v programovacom jazyku FORTRAN. Matematický model ohrevu rieši nasledovné procesy: proces spaľovania palív (dokonalé, nedokonalé), proces prenosu hmoty a tepelnej energie vedením, prúdením, sálaním, proces nasávania falošného vzduchu do pracovného priestoru pece. Riešenie uvedených procesov vedie k riešeniu sústavy nelineárnych algebraických a diferenciálnych rovníc. Pre ich riešenie bola vyvinutá efektívna neiteračná metóda, na základe ktorej je postavený algoritmus simulačného modelu ohrevu vsádzky v peci. Ďalej bol zostavený matematický model tvorby prepalu kovu, ktorý zohľadňuje závislosť od času, teploty a prebytku vzduchu, resp. kyslíka.

Modely boli verifikované. V rámci inžinierskej presnosti je pomerne dobrá zhoda medzi hodnotami zistenými v prevádzke a simulačným modelom. Prepal kovu podľa simulácie je vyšší (3,1%) než vykázaný prevádzkou (2,5 až 3%). Ak bola prevádzková hodnota určená ako rozdiel predváhy a váhy po tvárnení, potom tento rozdiel môžeme akceptovať, pretože nie všetok prepal počas tvárnenia vsádzky bol odstránený.

Optimalizačné kritérium predstavuje minimalizáciu prepalu s nasledujúcimi obmedzeniami: rozdiel medzi maximálnou a minimálnou teplotou po priereze vystupujúcej vsádzky z pece nesmie byť väčší než maximálne prípustný teplotný rozdiel (ε=9°C), druhé obmedzenie vyjadruje podmienku, že vsádzka na výstupe z pece musí dosiahnuť na povrchu žiadanú teplotu ($t_{\check{Z}}$ = 1250°C), a nakoniec tretie obmedzenie, ktoré z hľadiska cieľa minimalizovať prepal kovu je protirečivé, vyjadruje podmienku spaľovania s prebytkom vzduch m >1 za tým účelom, aby došlo k spáleniu horľavých zložiek v spalinách pred ich výstupom z pece.

Simulácie ukázali, že sú možnosti znižovania prepalu hlavne úpravou spaľovacieho režimu. Pre konkrétnu priebežnú ohrievaciu pec môžeme návrhy smerujúce k zníženiu straty kovu prepalom nasledovne formulovať:

Utesniť miesta, ktoré sú zdrojom nasávania falošného vzduchu do pece, predovšetkým v mieste vyťahovania vsádzky z pece.

Utesniť netesnosti, ktorými vniká falošný vzduchu z podpecia, prípadne iné zdroje falošného vzduchu v úseku teplôt 900°C - 1250°C.

Riadiť spaľovací pomer tak, aby v teplotnom úseku 900°C - 1250°C bol prebytok vzduchu m≤1. Kontrola podľa koncentrácie O_2 v spalinách.

Riadiť spaľovací pomer v úseku teplôt 700°C-900°C, tak, aby bol zabezpečený prebytok spaľovacieho vzduchu m >l.

Žiadané hodnoty pre reguláciu nastaviť podľa grafických priebehov optimálnych trajektórii.

Týmito opatreniami je možné znížiť prepal kovu o 30 až 50 %, zvýšiť kvalitu ohriatej vsádzky, čo sa prejaví zvýšenou akosťou finálnych výrobkov a navyše dôjde i k úspore energie vo výške 34,5 %.

Príspevok sa zaoberá optimálnym ohrevom kovovej vsádzky z hľadiska minimalizácie prepalu kovu. Matematický model predstavuje základný nástroj pre simulácie a analýzu ohrevu a tvorby prepalu v priebežnej kontinuálne pracujúcej ohrievacej peci s protiprúdnym systémom. Matematický model ohrevu zahŕňa nasledujúce procesy: proces spaľovania palív (dokonalé, nedokonalé), proces prenosu hmoty a tepelnej energie vedením, prúdením, sálaním, proces nasávania falošného vzduchu do pracovného priestoru pece. Riešenie matematického modelu je riešením sústavy nelineárnych algebraických a diferenciálnych rovníc. Pre ich riešenie bola vyvinutá efektívna neiteračná metóda, na základe ktorej je postavený algoritmus simulačného modelu. Matematický model tvorby prepalu kovu zohľadňuje závislosť množstva prepalu od času, teploty a prebytku vzduchu. Simulačný model bol vytvorený v programovacom jazyku FORTRAN. Modely boli verifikované a je pomerne dobrá zhoda medzi hodnotami zistenými v prevádzke a simulačným modelom. Optimalizačné kritérium predstavuje minimalizáciu prepalu s nasledujúcimi obmedzeniami: rozdiel medzi maximálnou a minimálnou teplotou po priereze vystupujúcej vsádzky z pece nesmie byť väčší než 9°C, druhé obmedzenie vyjadruje podmienku, že vsádzka na výstupe z pece musí dosiahnuť na povrchu žiadanú teplotu ($t_{\check{Z}}$ = 1250°C), a nakoniec tretie obmedzenie vyjadruje podmienku spaľovania s prebytkom vzduch m >1, aby došlo k spáleniu horľavých zložiek v spalinách pred ich výstupom z pece. Simulácie ukázali, že sú možnosti znižovania prepalu hlavne úpravou spaľovacieho režimu. Pre konkrétnu priebežnú ohrievaciu pec sú uvedené návrhy smerujúce k zníženiu straty kovu prepalom. Uvedenými opatreniami je možné

znížiť prepal kovu o 30 až 50 %, zvýšiť kvalitu ohriatej vsádzky, čo sa prejaví zvýšenou akosťou finálnych výrobkov a navyše dôjde i k úspore energie vo výške 34,5 %.

1. ÚVOD

V trhovom hospodárstve je optimalizácia procesov predmetom zvýšeného záujmu. Proces ohrevu kovovej vsádzky tiež nie je výnimkou. Najfrekventovanejšie ciele optimalizácie ohrevu vsádzky sú:

minimalizácia mernej spotreby energie,

maximalizácia výkonnosti priemyselných pecí,

minimalizácia straty kovu jeho prepalom,

maximálna (TQC) kvalita produkcie,

a ich vzájomné kombinácie. Niektoré ciele optimalizácie sa vzájomne podporujú (sú v súlade) iné zase naopak sú protichodné a optimálne riešenie v takýchto prípadoch je z ekonomického hľadiska kompromisom. V rámci nášho príspevku sa budeme venovať hľadaniu optimálneho riadenia ohrevu kovovej vsádzky z hľadiska minimalizácie prepalu kovu. Jeho zníženie znamená pre výrobcu nielen zvýšenú výťažnosť polotovaru, ale predovšetkým zvýšenie kvality následovným tvárnením spracovaných výrobkov. Preto zabráneniu, resp. zníženiu tvorby prepalu je neustále venovaná veľká pozornosť v odborných kruhoch [1-5].

Za posledných 20 rokov významne prispeli k riešeniu problematiky znižovania prepalu kovu matematické a simulačné modely. Do tejto skupiny sa radí i náš príspevok, ktorý analyzuje a skúma optimálne trajektórie pomocou simulačných modelov. Výsledky výskumu sú aplikované na ohrev oceľových blokov z nízkouhlíkových ocelí. Ohrev sa uskutočňuje v priebežnej kontinuálne pracujúcej ohrievacej peci s protiprúdnym systémom. Tepelný príkon pece je zabezpečený bočnými horákmi, ktoré z hľadiska riadenia sú rozdelené do piatich regulačných horákových zón. Odťah spalín je umiestnený cca v 1/9 dĺžky pece od miesta vstupu vsádzky. Z hľadiska oxidácie povrchu vsádzky je najväčším problémom v súčasnosti falošný vzduch nasávaný v mieste vsádzania a vyťahovania vsádzky z pece a tiež pozdĺž pece v dôsledku netesností a v horákovom systéme pracujúcom s väčším prebytkom vzduchu.

2. POUŽITÁ METÓDA

2.1 SIMULAČNÝ MODEL

Jedna z definícii simulačného modelu udáva, že "Simulačný model je prostriedok, ktorý pre definované väzby medzi vstupnými veličinami, parametrami a výstupnými veličinami, parametrami simulovaného systému a jazykom modelu umožní previesť simuláciu podľa deterministického postupu" [6]. Ak je jazykom modelu matematika, potom zvyčajne hovoríme o matematickom modeli (matematický popis problému). Zvyčajne matematický model realizujeme vo vhodnom programovacom jazyku a tak získavame vhodný prostriedok pre výskum zložitých procesov, javov - simulačný model (počítačový model). Náš simulačný model bol vytvorený v programovacom jazyku FORTRAN. Z hľadiska obsahu je však dôležitejší matematický model. Z tohto pohľadu model rieši nasledovné procesy:

proces spaľovania palív (dokonalé, nedokonalé) [6],

proces prenosu hmoty a tepelnej energie vedením, prúdením, sálaním [7-9],

proces nasávania falošného vzduchu do pracovného priestoru pece [8].

Riešenie uvedených procesov vedie na riešenie sústavy nelineárnych algebraických a diferenciálnych rovníc. Pre ich riešenie bola vyvinutá neiteračná metóda [10], na základe ktorej je postavený algoritmus simulačného modelu ohrevu vsádzky v peci. Uvedený simulačný model umožňuje imitovať ohrev vsádzky v protiprúdnych priebežných priemyselných peciach. Pre účely sledovania tvorby prepalu kovu bola zrealizovaná softvérová nadstavba, ktorá je založená na nasledovnom matematickom modeli:

(1)

(2)

(3)

kde S je oxidačná plocha kovu [m^2],

T - teplota [K],

τ- čas [hod],

m - prebytok spaľovacieho vzduchu [-],

- vektory koeficientov.

Poznámka: V ďalšom cez T budeme označovať teplotu v °K a cez t - teplotu v °C.

Keďže ohrev v priemyselných peciach je riadený na úrovni stabilizácie automatickou reguláciou, bol simulačný systém doplnený modelom regulácie (Fig. l).

Model regulácie na základe porovnania žiadaných hodnôt teplôt **w** v regulačných zónach so simulovanými teplotami **t** určuje regulačná odchýlku:

(4)

pre každú regulačnú j-tu zónu. Výstupom z modelu regulácie je vektor riadiacich veličín:

(5)

kde V_{pj} - objemový tok paliva v j-tej regulačnej zóne [$m^3.s^{-1}$].

Fig.1 Complex simulation model scheme

Model regulácie obsahuje viacero stabilizačných algoritmov, z ktorých užívateľ má možnosť si vybrať. Pre ilustráciu uveďme aspoň všeobecne známy typ PSD algoritmus, ktorým bol určovaný objemový tok paliva

(6)

(7)

kde K_p, K_I, K_D - proporcionálna, integračná, derivačná konštanta,

k - krok regulácie

$\Delta\tau$ - perióda regulácia

- stredná hodnota riadiacej veličiny

2.2 VERIFIKÁCIA SIMULAČNÉHO MODELU

Overenie simulačných modelov je vždy problematické, nakoľko len časť veličín je možné zmerať a porovnať výsledkami simulácie. Pre výkonnosť pece 34,13 $t.h^{-1}$ boli získané namerané údaje počas prechodu vsádzky pecou bežným technologickým režimom ohrevu ako teplota povrchu vsádzky (t) koncentrácia kyslíka (O_2) merná spotreba energie (m_s) a strata kovu prepalom (p). Ich porovnanie je uvedené v tabuľke I. Z uvedenej tabuľky je zrejmé, že v rámci inžinierskej presnosti je pomerne dobrá zhoda medzi hodnotami zistenými v prevádzke a simulačným modelom. Prepal kovu podľa simulácie je vyšší než vykázaný prevádzkou. Ak však zdôrazníme, že prevádzková hodnota bola určená ako rozdiel predváhy a váhy po tvárnení, potom tento rozdiel môžeme akceptovať, pretože nie všetok prepal počas spracovania vsádzky bol odstránený. Uvádzané rozpätie koncentrácie kyslíka zistené prevádzkovým analyzátorom je zrejme spôsobené reguláciou objemového toku paliva v horákoch a z toho vyplývajúcich aj tlakových zmien v pracovnom priestore pece. Na obrázku 2 (Fig.2) je znázornený priebeh simulovanej teploty a nárast prepalu počas ohrevu. Z obrázku 3 (Fig.3) je zrejmá relácia medzi teplotou povrchu vsádzky a koncentráciou kyslíka v spalinách t.j. hlavných faktorov na oxidácie kovu. Označme tento stav ako variant 1.

Table I The comparison of field and simulation data

Čas pobytu				Porovnávané veličiny				
vsádzky	zistené v prevádzke				určené simuláciou			
v peci	O_2	t	m_s	p	O_2	t	m_s	p
[s]	[%]	[°C]	[$GJ.t^{-1}$]	[%]	[%]	[°C]	[$GJ.t^{-1}$]	[%]
4230		1111				1081		
6204		1180,8				1050,8		
6768								
7614	6-7	1208			6,2	1224,7		

9024	4-5	1240			5,0	1245,9		
9870		1250	1,45	2,5 - 3,0		1254,6	1,45	3,1

Fig.2 Increase of temperature and scale during heating of metal for furnace hourly output 34,13 $t.h^{-1}$

Fig.3 Oxygen concentration in waste gas and temperature trajectory for furnace hourly output 34,13 $t.h^{-1}$

3. ANALÝZA VÝSLEDKOV

Ak označíme a(T, m, τ) ako funkciu pre určenie prepalu z povrchu 1 m^2 vsádzky, potom môžeme optimalizačné kritérium sformulovať ako funkcionál

[kg] (8)

ktorý musí nadobudnúť minimálnu hodnotu,

kde τ_K - doba pobytu vsádzky v peci [h],

S - plocha vsádzky, na ktorej vznikajú okuje [m^2].

Pre ohrev vsádzky v rámci formulácie optimalizačného problému musíme sformulovať obmedzenia v tvare

(9)

$$T(O, \tau_K) = T_{\check{z}} \qquad (10)$$

(11)

kde ε - maximálne prípustná teplotný rozdiel vsádzky po priereze [K]

$T_{\check{z}}$ - žiadaná teplota vsádzky na výstupe z pece [K]

T_{dz} - dolná medza zápalnosti horľavých plynov [K]

T^h - horná teplotná medza [K].

Interpretujeme význam obmedzujúcich podmienok. Prvé obmedzenie označené ako vzťah (9) vyjadruje podmienku, že rozdiel medzi maximálnou a minimálnou teplotou po priereze vystupujúcej

vsádzky z pece nesmie byť väčší než maximálne prípustný teplotný rozdiel (ε=9°C). Druhé obmedzenie (10) vyjadruje podmienku, že vsádzka na výstupe z pece musí dosiahnuť na povrchu žiadanú teplotu tž = 1250°C). A nakoniec tretie obmedzenie (11), ktoré z hľadiska cieľa minimalizovať prepal kovu je protirečivé vyjadruje podmienku spaľovania s prebytkom vzduch m >1 za tým účelom, aby došlo k spáleniu horľavých zložiek v spalinách pred ich opustením pece. Dolná medza zápalnosti je definovaná predpokladanou existenciou CO, CH_4 a jej hodnoty je možné prebrať z tabuľky II.

Table II Temperature fire of combustible component

Horľavá zložka	zápalná teplota[°C]
CO	610-660
Zemný plyn	750-850
CH_4	650-750

Existencia CO v spalinách je opodstatnená nedokonalým spaľovaním paliva (12) (zemný plyn) pri vysokých teplotách, ak cieľom je minimalizovať prepal kovu.

$$4CH_4 + 7O_2 \rightarrow 8H_2O+2CO+2CO_2 \qquad (12)$$

V skutočnosti ani táto podmienka nezaručí dokonalé spálenie zvyškov CO, pretože balastné látky v spalinách (CO_2, N_2) zhoršujú zápalnosť, ale z optimalizačného hľadiska je potrebná formulácia obmedzenia (11). Horná teplotná medza je definovaná teplotou pri ktorej začína prudký nárast prepalu kovu. Bola zvolená hodnota t_h = 900°C. Ďalší význam obmedzenia (11) spočíva vo vytvorení oxidov typu hematit a magnetit už pri nižších teplotách, keď tvorba prepalu nie je ešte významná. Vytvorené vrstvy oxidov potom sťažia difúziu kyslíka k nezoxidovanému kovu.

Riešením uvedenej optimalizačnej úlohy môžeme získať optimálne trajektórie ohrevu pre ľubovoľný ohrievací agregát s priamym ohrevom. Pre riešenie takýchto komplikovaných úloh je výhodné použiť princíp optimalizácie s modelom [11, 12].

Na obrázku 4 (Fig.4) je znázornený princíp optimalizácie s modelom. Princíp je veľmi jednoduchý a príbuzný experimentálnym optimalizačným postupom. Základom je simulačný model, ktorý imituje chovanie optimalizovaného objektu. Optimalizačný algoritmus založený na vhodnej optimalizačnej metóde pripravuje pre každý optimalizačný krok nové vstupné údaje takým spôsobom, aby optimalizačné kritérium dosiahlo extrém a obmedzenia boli splnené.

Fig.4 Opitimisation with model principle

Matematický popis, na základe ktorého bol postavený simulačný model, je uvedený v kapitole Simulačný model. Optimalizačné kritérium je definované funkcionálom (8) a blok obmedzení tvoria podmienky (9), (10), (11). Optimalizačný algoritmus bol založený na gradientnej metóde

(13)

} (14)

kde t_j - žiadaná teplota v j - tej regulačnej zóne (j = 1, ..., 5),

m_j - žiadaná hodnota prebytku spaľovacieho vzduchu v regulačnej zóne j,

i - poradie optimalizačného kroku,

h - veľkosť optimalizačného kroku.

Proces optimalizácie podľa výpočtovej schémy (13) prebiehal dovtedy, kým hodnota funkcionálu (8) klesala. Po každom optimalizačnom kroku (13) prebehla simulácia ohrevu s novými žiadanými hodnotami .

Na obrázkoch 5 a 6 (Fig.5 and 6) je znázornená optimálna trajektória ohrevu. Ak ju porovnáme s obrázkami 2 a 3 (Fig.2 and 3) potom môžeme konštatovať, že došlo k spomaleniu nárastu povrchovej teploty práve v oblasti fázovej premeny, kde merná tepelná kapacita ocele prudko rastie. V oblasti intenzívnej tvorby okovín prebieha spaľovanie paliva s prebytkom m = 1. A naopak v oblasti teplôt 750-900°C, ktorá sa rozšírila v porovnaní s prvým variantom, koncentrácia kyslíka narastá, čím sa zabezpečí spálenie CO, prípadne zemného plynu z predchádzajúcej oblasti (t > 900°C), kde prebiehalo spaľovanie so stechionometrickým pomerom, resp. v reálnych podmienkach nedokonalé spaľovanie. Označme tento stav ako variant 2.

Fig.5 Optimal heating trajectory for furnace hourly output 34,13 $t.h^{-1}$

Fig.6 Optimal oxygen concentration in waste gas for furnace hourly output 34,13 $t.h^{-1}$

Ďalej sa analyzovali optimálne režimy s kratším pobytom vsádzky v peci. Preto sa uvažoval ohrev s vyššou výkonnosťou 41,05 $t.h^{-1}$. Potom boli hľadané optimálne trajektórie z hľadiska prepalu kovu i pre tento výkon. Na obrázku 7 a 8 (Fig.7 and 8) je znázornený optimalizovaný priebeh teploty prepalu vsádzky a koncentrácie kyslíka pre výkonnosť pece 41,05 $t.h^{-1}$. Tento stav odpovedá 5-temu variantu z I. etapy riešenia. Označme tento stav ako variant 3. V porovnaní s variantom druhým sa dosiahol o niečo nižší prepal kovu, čo je však v dôsledku kratšieho pobytu vsádzky v peci. Podobne, ako v druhom variante i v tomto prípade zníženie prepalu takmer o 50 % treba hľadať v úprave spaľovacích pomerov. I v tomto prípade na obrázku 7 a 8 (Fig.7 and 8) prebiehalo spaľovanie pri teplotách povrchu 900°C s prebytkom vzduchu m = 1.

Fig.7 Optimal heating trajectory for furnace hourly output 41 $t.h^{-1}$

Fig.8 Optimal oxygen concentration in waste gas for furnace hourly output 41 $t.h^{-1}$

Proces optimalizácie ďalej pokračoval smerom k nižším hodnotám prepalu kovu. Podstatnú zmenu v trajektóriach ohrevu zaznamenávala len trajektória prebytku spaľovacieho vzduchu, ktorého hodnota sa zmenšovala. Negatívnym javom z ekologického hľadiska však bolo narastanie nespálených horľavých zložiek (CO) v spalinách. Na obrázku 9 a 10 (Fig.9 and 10) sú uvedené optimálne trajektórie pre prebytok m = 0,9. V tomto štvrtom variante koncentrácia CO pri teplote t = 900°C, čiže v mieste nad teplotou zápalnosti dosahovala l,8%. Pri prebytku m = 0,8 už koncentrácia CO činila 3,6%. Zdôraznime, že tieto hodnoty sú zo simulácií a nezohľadňujú také vplyvy ako je konštrukcia horákov a tým i stupeň premiešania zemného plynu so vzduchom. Inými slovami povedané simuluje sa stav horenia paliva ideálne premiešaného so spaľovacím vzduchom. Ak zvážime ešte tieto faktory, potom môžeme konštatovať, že koncentrácia CO bude v spalinách vyššia, než sme uvádzali.

Fig.9 Optimal heating trajectory for furnace hourly output 41 $t.h^{-1}$ with using air surplus 0,9 in the temperature area above 900°C.

Fig.10 Optimal air surplus for furnace hourly output 41 $t.h^{-1}$ with using air surplus 0,9 in the temperature area above 900°C

Aj keď cieľom našej práce je optimalizovať ohrev z hľadiska prepalu, musíme zvážiť vplyv zvýšenej koncentrácie CO v spalinách. Ak vzniknuté nespálené horľavé zložky pri teplote vyššej, než 900°C zhoria pri nižších teplotách, potom nedôjde k strate energie v dôsledku nedopalu plynného paliva a podobne spaliny neprekročia povolené limity emisií. O tom, či horľavé zložky v spalinách počas ich prúdenia v peci i za vyššej koncentrácie kyslíka a nižších teplôt zhoria, rozhodujú tri podmienky:

teplota pecného priestoru musí byť vyššia než teplota zápalnosti,

rýchlosť prúdenia spalín musí byť menšia než rýchlosť horenia,

koncentrácia horľavých zložiek s kyslíkom, resp. so vzduchom musí byť taká, aby bola medzi dolnou a hornou medzou zápalnosti.

Bližší rozbor splnenia týchto troch podmienok ukázal nasledovné. Prvá podmienka je splnená viď obmedzenie (9). Druhá podmienka je tiež splnená. Avšak tretia podmienka pri tak nízkych koncentráciach CO nemôže byť splnená. Aj technicky je možné doriešiť dopal CO v spalinách mimo pec špeciálnym zariadením, to však znamená zvýšené investície na toto zariadenie.

Vzhľadom na skutočnosť, že dnes sú vyrábané horáky v prijateľných cenových reláciach, ktoré dokážu pracovať s prebytkom spaľovacieho vzduchu m = 1,05 uvádzame na obrázku 11 a 12 (Fig.11 and 12) optimálne trajektórie pre tento prebytok spaľovacieho vzduchu. Označme tento stav ako 5-ty variant. Potom môžeme konštatovať, že oproti 1.variantu (neoptimálny) i v tomto prípade je možné znížiť prepal kovu o 30%.

Fig.11 Optimal heating trajectory for furnace hourly output 41 $t.h^{-1}$ with using air surplus 1,05 in the temperature area above 900°C

Fig.12 Optimal air surplus for furnace hourly output 41 $t.h^{-1}$ with using air surplus 1,05 in the temperature area above 900°C

ZÁVER

Pomocou simulačného modelu sme preukázali reálne možnosti znižovania prepalu. V tabuľke III sú porovnané varianty l až 5 z hľadiska merného prepalu. Úpravou, predovšetkým spaľovacieho režimu, je možné oproti porovnávaciemu režimu (variant l) znížiť straty kovu prepalom.

Table III The comparison of loss metal by scal e

Variant	Merný prepal	Merná spotreba	Poznámka

	[kg.m^{-2}]	[GJ.t^{-1}]	
1	14,45	1,45	Súčasnosť, 34 t.h^{-1}
2	8,58	1,04	m = 1, 34 t.h^{-1}
3	8,02	0,954	m = 1, 41 t.h^{-1}
4	6,09	0,98	m = 0,9 41 t.h^{-1}
5	9,69	0,95	m = 1,05 41 t.h^{-1}

Pre konkrétnu priebežnú ohrievaciu pec môžeme návrhy smerujúce k zníženiu straty kovu prepalom nasledovne formulovať:

Utesniť miesta, ktoré sú zdrojom nasávania falošného vzduchu do pece, predovšetkým v mieste vyťahovania vsádzky z pece, napríklad riadením tlakových pomerov tak, aby bol pretlak s dodatočným odvodom spalín.

Utesniť netesnosti, ktorými vniká falošný vzduchu z podpecia, prípadne iné zdroje falošného vzduchu v úseku teplôt 900°C - 1250°C.

Riadiť spaľovací pomer tak, aby v teplotnom úseku 900°C - 1250°C bol prebytok vzduchu m 1. Kontrola podľa koncentrácie O_2 v spalinách cez spätnú väzbu na ovládanie spaľovacieho pomeru.

Riadiť spaľovací pomer v úseku teplôt 700°C-900°C, tak, aby bol zabezpečený prebytok spaľovacieho vzduchu m >l.

Žiadané hodnoty pre reguláciu nastaviť podľa grafických priebehov optimálnych trajektórii.

Pec vybaviť horákmi tak, aby umožnili v moduloch nad 900°C nedokonalé spaľovanie (m=1) a naopak horáky v moduloch 700oC-900°C musia zabezpečiť spaľovanie s prebytkom vzduchu (m>1).

Týmito opatreniami je možné znížiť prepal kovu o 30 až 50 %, zvýšiť kvalitu ohriatej vsádzky, čo sa prejaví zvýšenou akosťou finálnych výrobkov a navyše dôjde i k úspore energie vo výške 34,5 %.

Článok bol vypracovaný ako súčasť riešenia projektov VEGA 1/7099/20 a 1/7098/20.

LITERATÚRA

[1] Kostúr, K.: Minimalizácia nákladov na palivo a straty kovu pri ohreve brám v narážacej peci, 1994, Hutnícke listy č.7-8, s.43-47

[2] Kremer, R., Klika, R., , K.: Tepelná technika, 1970, SNTL Praha

[3] Kuzelev, M. J., Skvorcov, A. A.: Nagrev metalla podkovku i štampovku v plamennych pečach, 1960, Sudpromgiz Leningrad

[4] Singer, K.: Nové způsoby ohřevu, 1962, Hutnícke aktuality VÚHŽ č.13, Praha

[5] Šmálek, J. a kol.: Průmyslové pece ve strojírenství, 1965, SNTL Praha

[6] Kostúr, K.: Simulačné modely tepelných agregátov, 1997, Štroffek Košice, 170s.

[7] Kostúr, K.: Optimisation of heatin slabs using a simulation model, 1991, Transaction of the TU Košice, Riečansky science publishing, Vol.1, No.2, Cambridge, pp.199-203

[8] Kostúr, K.: The mathematical model of tunnel furnace, 1994, Transaction of the TU Košice, Riečansky science publishing, Vol.2, No.3-4, Cambridge, pp. 193 - 199

[9] Dorčák, Ľ., Koštial, I., Benková, M.: Nové algoritmy pre prenos energie žiarením a ich využitie pri riadení tepelných procesov, 1987, Hutnícke aktuality č.2

[10] Kostúr, K.: Projektovanie priemyselných pecí pomocou modelov, 1996, In: Energetické premeny, Zborník z medzinárodnej konferencie, Technická univerzita Košice, 12.-13.6.1996, s.15-23

[11] Pokorný I., Kostúr, K.: Mathematical model of thermal aggregates, 1998, Acta Montanistica Slovaca, roč. 3, č. 2, pp. 137-142

[12] Kostúr, K.: The analysis of Optimal Productions Conditions in the Push Furnace, 1997, METALLURGY, Vol. 36, pp. 33-36