

Optimalna raba energentov v obločni peči

Optimal Energy Use in Electro Arc Furnace

Janez Bratina, Alojz Rozman, Železarna Ravne, Ravne na Koroškem

Optimiranje stroškov uporabljenih energentov v obločni peči omogoča cenejšo proizvodnjo jekla. Poleg električne energije sta najpogostejša energenta kisik (z eventualnim dodajanjem ogljika) in zemeljski plin. Za ekonomično uporabo energentov je poleg njihovih fizikalnih zakonitosti upoštevati tudi cene.

Ključne besede: obločna peč, stroškovno energijsko optimiranje, energijska vrednost vpihanega kisika, cene energentov.

With optimal energy use of different energy sources in an electric arc furnace we can produce steel economically. Besides electric energy, the most frequently used energents are oxygen (with optional carbon use) and natural gas. For maximum economic efficiency not only known real energy values but also energy prices, have to be considered.

Key words: electric arc furnace, energy cost optimum, oxygen energy value, energy prices.

1 Energijski delež energentov v obločni peči

Klasična tehnologija izdelave jekla v obločni peči je zahtevala cca 70% delež električne energije v bilanci potrebne energije, medtem ko je ta delež pri modernih tehnologijah še samo 30% do 40%. Take rezultate so lahko zagotavljale močnostne obločne peči s specifičnimi transformatorskimi močmi nad 600 kVA / t ter seveda uporaba dodatnih (neelektriških) energentov, kar vse je omogočilo doseganje šaržnih časov okrog 60 min. Vse ostrejši stroškovni pritiski pa so poleg energijskega maksimiranja za čim krajše izdelavne čase stavili v ospredje predvsem stroškovno energijsko optimiranje in to v vseh fazah izdelave jekla v obločni peči.

"Izkoristek električne energije" kot razmerje med potrebno ($W_{pot} = 400$ kWh/t) in dovedeno električno energijo ($W_{el} = 400 - 500$ kWh/t) je dosegel vrednost 100%, kar pomeni, da lahko v moderni obločni peči vse njene toplotne izgube pokrivamo z drugimi neelektriškimi energenti.

2 Energijska vrednost vpihanega kisika

Energijska vrednost vpihovanja kisika v peč je odvisna od razpoložljivih oksidantov v vložku, od načina vpihovanja kisika in od količin v peč dovedenega kisika. Maksimalno dosežene vrednosti, ki so bile dobljene pri dodajanju ogljika za penečo žlindro, so visoko nad 100 kWh/t in so bile dosežene pri specifični porabi kisik nad 45 kgO₂ / t.

Bilančni pregled potreb po kisiku za tipično sestavo vložka podaja **Tabela 1**, iz katere je razvidno:

- da je za prikazan primer naravna t.j. tehnološko nujna

- količina kisika med 25 kgO₂ / t in 35 kgO₂ / t,
- da je ustrezen energijski efekt med 80 kWh / t in 100 kWh / t,
- da je specifična energijska vrednost kisika med 2.9 kWh/t in 3.6 kWh/t.

Pri tem so stroški tako pridobljene kWh odvisni od potrebnih energentov in njihovih cen; kalkulatívni energijski stroški izhajajo iz sledečih vrednosti:

Če predpostavimo, da nam z vpihavanjem kisika v talino peči da je 1 kg kisika z naravno oksidacijo od gornjih elementov 3.2 kWh, dobimo pri ceni kisika med 15.7 Pf / kgO₂ in 24.3 Pf / kgO₂ strošek tako pridobljene kWh: $(15.7 - 24.3) \text{ Pf / kgO}_2 : 3.2 \text{ kWh / kg} = 4.9 - 7.6 \text{ Pf / kWh}$.

Če presežemo količine kisika, ki so potrebne za naraven odgor, je potrebno v ceno kWh prišteti še ceno ogljika; pri ceni karburita 70 Pf / kg dobimo ceno kWh:

- pri popolnem zgorevanju: $(1 \times (15.7 - 24.3) \text{ Pf / kgO}_2 + 0.355 \times 70 \text{ Pf / kgC}) / 3.2 \text{ kWh / kg} = 12.7 - 16.4 \text{ Pf / kWh}$
- pri nepopolnem zgorevanju: $(1 \times (15.7 - 24.3) \text{ Pf / kgO}_2 + 0.75 \times 70 \text{ Pf / kgC}) / 1.68 \text{ kWh / kg} = 38.9 - 45.7 \text{ Pf / kWh}$

Energijska vrednost v peč vpihanega kisika je kot funkcija uporabljenih količin kvadratična parabola, ki kaže na znano dejstvo, da se z naraščajočo količino kisika na tipični način (z zasičenjem) zmanjšuje njegova energijska vrednost:

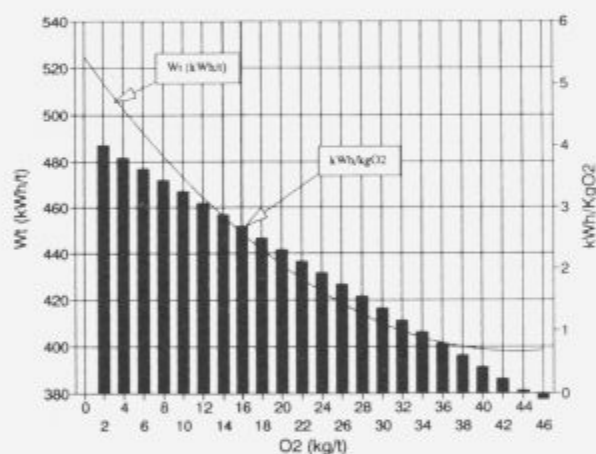
$$Y (\text{kWh / kg}) = a \cdot X^2 (\text{kgO}_2 / \text{t})^2 - b \cdot X (\text{kgO}_2 / \text{t}) + c$$

Po Inagaki¹ so zgornji parametri $a=0.138$, $b=8.382$, $c=520$. Izmerjene vrednosti na UHP 45 t na Ravnah potrjujejo japonske ugotovitve. Potek funkcije po navedeni kvadrati-

Tabela 1: Energijska vrednost odgora elementov v obločni peči

Table 1: Elements yield energy value

	C	Si	Mn	Cr	Fe	Skupaj
Odgor %	0.45	0.25	0.2	0.05	2.0-4.0	
kg/t	4.5	2.5	2.0	0.5	20-40	
kg/kg O ₂	12/32 = 0.375	28/32 = 0.875	55/16 = 3.438	104/48 = 2.167	110/48 = 2.292	
kgO ₂ / t	12.00	2.86	0.581	0.231	8.72-17.45	24.4-33.1
kWh / kgO ₂	3.5	7.9			2.5	3.27-3.54
kWh / t	42.0	22.6			21.8-43.6	86.4-108.2



Slika 1: Energijska vrednost kisika v obločni peči

Figure 1: Oxygen energy value in electro arc furnace

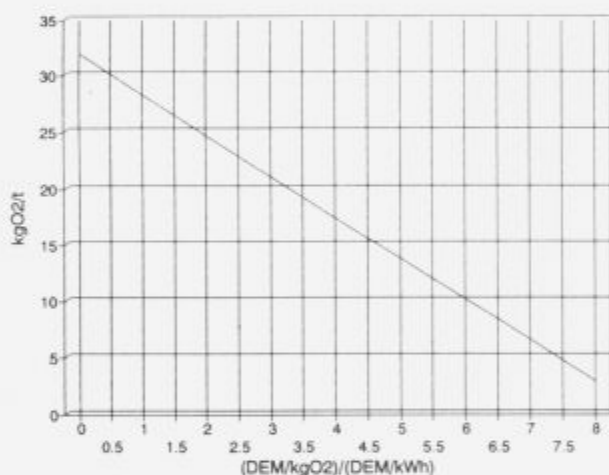
čni paraboli kaže **slika 1**; vidimo, da obstoja neka količina kisika, pri kateri postane njegova energijska vrednost nič:

$$X_0 = b / (2 \cdot a) = 30.4 \text{ kgO}_2 / \text{t}$$

Stroškovno optimalna količina kisika kot energijskega nosilca, s katerim nadomeščamo električno energijo, je odvisna tako od cene električne energije C_e (Pf / kWh) kot od cene kisika C_k (Pf / kgO₂); najnižje skupne energijske stroške bomo dobili pri:

$$X_{oo} = (b - C_k / C_e) / (2 \cdot a) \text{ (kgO}_2 / \text{t)}$$

Na **sliki 2** je prikazana stroškovno optimalna poraba kisika v odvisnosti od razmerja cen kisika in električne energije. Razpon današnjih cen kisika in električne energije je glede na veljaven tarifni sistem za električno energijo odvisen



Slika 2: Optimalne količine kisika v obločni peči

Figure 2: Optimum energy use in electro arc furnace

predvsem od časa, v katerem obratuje obločna peč (ponoči-podnevi, pozimi-poleti), ter od možnosti v oskrbi s kisikom; razpon razmerij cen se giblje med 2 in 7 in daje optimalne količine kisika med 25 kgO₂ / t in 5 kgO₂ / t.

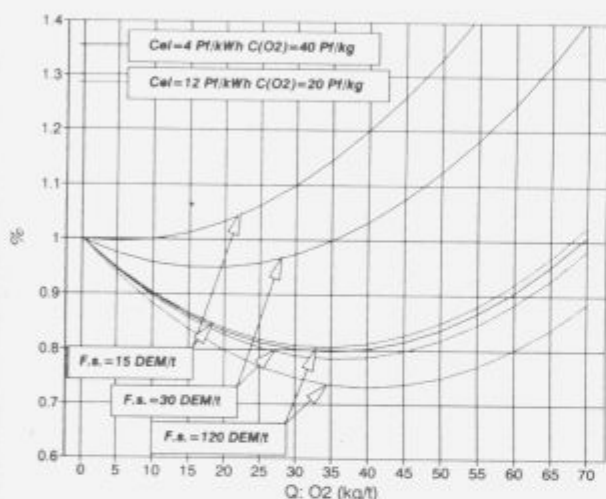
Če v stroškovno energijsko optimiranje vključimo še obračun stalnih stroškov, ki jih je potrebno zajeti v toni proizvoda, nam moč dodatnega energijskega vira s skrajšanjem izdelovalnih časov zmanjšuje tudi njihov delež v skupnih stroških; količina kisika, ki je potrebna za doseganje najnižjih skupnih stroškov, je poleg razmerja cen kisika in električne energije odvisna še od višine stalnih stroškov A (Pf / kWh), preračunanih na teoretično potrebno električno energijo za izdelavo jekla:

$$X_{oo} = (b - C_k / (C_e + A)) / (2 \cdot a) \text{ (kgO}_2 / \text{t)}$$

Naprave z velikimi stalnimi stroški bodo torej zahtevale večjo porabo kisika, kot bi ga sicer določalo le razmerje

cen. Iz podane enačbe tudi sledi, da obstoja mejno razmerje cen energentov, pri katerem se nahaja stroškovni optimum pri količini kisika nič. Ob tem je pripomniti, da zgornjo izvajanje velja le za obratovanje, pri katerem pomeni skrajšanje izdelovalnih časov povečanje prodaje. Pri nespremenjenem obsegu prodaje ima skrajšanje izdelavnih časov bistveno manjši vpliv na zmanjšanje skupnih stroškov: deleži stalnih stroškov se ne spreminjajo, zmanjšujejo se le vsi časovno odvisni specifični potroški.

Relativne stroške izdelave jekla pri uporabi kisika in pri upoštevanju stalnih stroškov kaže **slika 3**. Razpon stalnih stroškov, ki se pri domačih proizvajalcih giblje od 15 DEM / t do 120 DEM/t, daje vrednosti stalnih stroškov $A=3,75-30,00$ Pf/kWh.



Slika 3: Optimalne količine kisika v obločni peči z upoštevanjem stalnih stroškov

Figure 3: Optimum oxygen use in electric arc furnace with regard to fixed costs

3 Energijska vrednost zemeljskega plina

Energijska vrednost zemeljskega plina se pri njegovem zgorevanju s pomočjo oxy-fuel-air gorilcev v prostor obločne peči računa s cc 7 kWh/Sm³, kar predstavlja pri gorilni vrednosti zemeljskega plina 9,47 kWh/Sm³ za toplotno tehnično neugodno konstrukcijo obločne peči visok povprečni toplotni izkoristek (74%) zgorevanja plina v peči. Vendar je ta podatek le navidezno tako ugoden, saj običajni referenčni toplotni efekt zgorevanja zemeljskega plina, ki ga omogoča zgorevanje z visokim presežkom kisika, povečuje "naravno" zgorevanje oksidantov v vložku, česar seveda ne moremo in ne smemo pripisovati uporabi zemeljskega plina.

Za popolno zgorevanje zemeljskega plina s kisikom potrebujemo za 1 Sm³ zemeljskega plina 2.736 Skg kisika in pri tem dobimo 7 kWh. Energijski strošek je:

- pri 100% uporabi kisika: $(28,0 \text{ Pf} / \text{Sm}^3 + 2,736 \times (15,7-24,3 \text{ (Pf/kgO}_2))) / 7,0 = 10,13 - 13,49 \text{ Pf/kWh}$

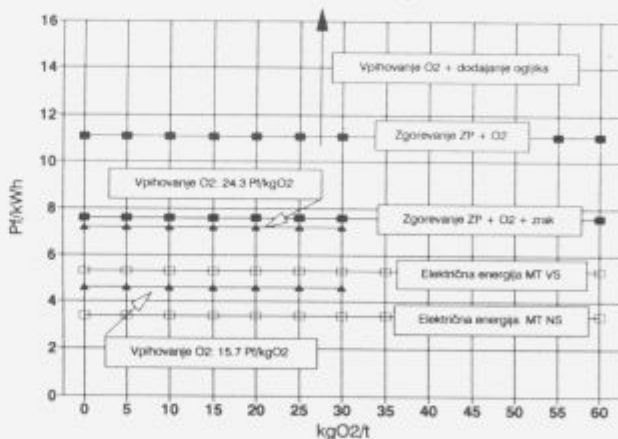
- pri 50% uporabi kisika pa: 7.57 - 8.75 Pf / kWh

Upoštevanje energijske vrednosti naravnega odgora vložka pomeni dejansko zmanjšanje energijske vrednosti zemeljskega plina: realne vrednosti zemeljskega plina so pri termičnem izkoristku obločne peči 50% le okrog 5 kWh / Sm³. Seveda je pri obravnavi gospodarnosti uporabe zemeljskega plina v obločni peči potrebno poudariti še njegove druge pomembne prednosti: enakomernejše taljenja vložka, preprečevanje sesutja vložka v krater pod elektrodo, doseganje enakomernejše temperature žilindre po površini, kontrolirano zgorevanje plina in oksidantov vložka z vodenjem presežka kisika in z vodenjem oblike in temperature plame, ki ga omogoča zvezna nastavitve razmerja kisik / zrak. Upoštevati je tudi druge tehnološke posebnosti obločnih peči, ki uporabljajo zemeljski plin, kot so izkoriščanje toplote dimnih plinov za sušenje in predgrevanje vložka ali izkoriščanje toplote iz vodnega hladilnega sistema.

4 Zaključek

Stroškovno optimiranje različnih energentov v elektroobločni peči mora poleg fizikalnih zakonitosti pri prenosu toplote na vložek upoštevati stroške, ki nastajajo pri njihovi uporabi. Pri uporabi električne energije in vpihovanju kisika v talino so optimalne količine kisika lahko določljive in so odvisne izključno od razmerja cene kisik / električna energija. Ker se cena električne energije skladno s tarifnim sistemom menja tako v teku dneva oziroma tedna kakor tudi glede na sezone, se optimalne količine kisika spreminjajo sorazmerno s ceno električne energije: čim nižja je cena električne energije, tem manjša je optimalna količina kisika in obratno.

Cena kWh različnih energentov v EOP



Slika 4: Pregled cen energentov

Figure 4: Energy price overview

Pospeševanje potrebe po kisiku z dodajanjem karburita v talino obločne peči je s čisto energetskega vidika zaradi njegove visoke cene neupravičeno; da bi veljal kot pomembnejši energent v obločni peči, bi morala biti njegova cena vsaj trikrat nižja od sedanje vrednosti. Uporaba zemeljskega plina kot tretjega energenta v obločni peči je odvisna predvsem od razmerja njegove cene proti cenam kisika in električne energije; za intenzivnejšo uporabo zemeljskega plina v obločni peči je ta v naših domačih razmerah še vedno predrag, saj je cena preko zemeljskega plina dobljene kWh reda velikosti cene električne energije, zato ga uporabljamo v primerih potrebnega inenziviranja proizvodnje jekla ter za zmanjšanje koničnih obremenitev v odjemu električne energije. Dolgoletna neuspešna slovenska prizadevanja, da bi pričeli zemeljski plin uporabljati za sicer ekološko sprejemljivo kogeneracijsko proizvodnjo električne energije, le dokazujejo njegovo nespremenljivo ceno, ki jo bremenijo visoki stalni stroški slabo izkoriščenega omrežja. Aktualna cenovna razmerja med energenti elektroobločne peči prikazuje **slika 4**.

5 Literatura

- ¹ E. Inagaki: Integrated Oxygen Enrichment Control to attain Maximum Overall Economy in Steelmaking Arc Furnaces; UIE Malaga 1988
- ² G. Gitman, V. Sver: Pyretron System for the DC EAF; 14th Annual Symposium Process Control System For Electric Furnace Steelmaking; Atlanta, Georgia, November 1992