

بررسی اثر تغییرات درصد کربن آهن اسفنجی بر روی مصرف انرژی کوره‌های قوس الکتریکی

هومن فخرنبوی^۱، سروش پرویزی^۲، سید خطیب الاسلام صدرنژاد^۳، مهرا ن خرم نیا^۴

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف

۳- استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف

۴- کارشناسی ارشد متالورژی، مدیر فناوری تولید فولاد سازی، شرکت فولاد خوزستان

Investigation of Carbon percentage in DRI & method of Carbonous materials addition , on Electric Arc Furnace Steel making costs

Hooman Fakkhr Nabavi¹, Soroush Parvizi², S.K. Sadrnezhaad³, Mehran Khorramnia⁴

1: M.Sc. student of materials engineering, Sharif University of Technology

2: M.Sc. student of materials engineering, Sharif University of Technology

3: Professor, Sharif University of Technology

4: M.Sc. of Metallurgy, Manager of Steel processing, Khuzestan Steel.

چکیده

در این مقاله اثر افزایش درصد کربن آهن اسفنجی در شارژ کوره‌های قوس الکتریک، بر روی هزینه‌های فولاد سازی بررسی شده است. شارژ ورودی به کوره دارای ۹۰٪ آهن اسفنجی فرض شده است و درصد کربن آهن اسفنجی بین ۱/۵٪ تا ۳٪ متغییر گرفته شده است، همچنین کوره قابلیت تزریق $15 \text{ Nm}^3/\text{tLs}$ اکسیژن را دارد. علاوه بر این مقداری کربن نیز به صورت آنتراسیت به کوره تزریق یا افزوده می‌شود. در هر دو حالت افزایش مواد کربن‌ده با افزایش درصد کربن اسفنجی کاهش قیمت را خواهیم داشت اما در شرایط برابر چنانچه از تزریق به جای شارژ توده‌ای استفاده شود قیمت تمام شده پایین‌تر خواهد بود. روند افت قیمت فولاد، با افزایش درصد کربن آهن اسفنجی در روش تزریق، کندتر می‌باشد. در درصد‌های بالاتر آهن اسفنجی مشاهده می‌شود که، مینیمم هزینه‌های تولید فولاد در درصد‌های پائین‌تر آهن اسفنجی بدست می‌آید. واژه‌های کلیدی: کوره قوس الکتریک، بهینه‌سازی انرژی، آهن اسفنجی، مواد کربن‌ده

Abstract

In this paper, effect of increasing carbon percentage in DRI on the cost of produced steel is investigated. For calculation we use mass balance & some assumptions that simulate the operation of EAF. Specification of input charge as follows: 90% DRI, 1.5_3% Carbon in DRI, $15 \text{ Nm}^3/\text{tLs}$ Oxygen injection. Further more bulk Anthracite injected to the EAF is possible. In the case of added & injected carbon because of the lower price of Anthracite, total cost was decreased but in other condition if we use injection instead of bulk added, because of the higher efficiency of injection the final price decreased. We can understand from this work that decreasing the cost of the produced steel in the case of injection Anthracite was slower than the carbon added in DRI. If we use this calculation for other percent of DRI in charge we consider that we can use lower carbon percent in charges that contain higher percent of DRI.

Key Words: Electric Arc Furnace, Energy Optimization, Direct Reduced Iron, Carbonous materials

در صر کربن شارژ آهن اسفنجی بر روی مصرف انرژی و هزینه تولید بررسی شده است. شارژ ورودی به کوره دارای ۹۰٪ آهن اسفنجی با درصد کربن متفاوت در نظر گرفته شده است. همچنین تا اثر دو روش تزریق کربن و افزایش کربن بصورت توده‌ای (در هنگام شارژ قراضه) که معمولاً استفاده می‌شوند نیز بررسی شده‌اند.

فرضیات:

۱. آهن اسفنجی ورودی می‌تواند بین ۱/۵ تا ۳٪ درصد کربن داشته باشد و با زیاد شدن درصد کربن آهن اسفنجی به کوره، مقدار آهن موجود در آهن اسفنجی کاهش می‌یابد که رابطه آنها بصورت زیر می‌باشد:

$$\%Fe_{tot} = 92 - 0.93 \times \%C_{DRI} \quad (1)$$
 درصد فلزی شدن (Metallization) ثابت و برابر ۹۱/۵ درصد می‌باشد. فولاد تولیدی دارای ۰/۰۸٪ کربن است.
۲. کربن ورودی به سیستم آنتراسیت و دارای ۸۷٪ کربن می‌باشد.
۳. نرخ بازیابی کربن اضافی (Excess Carbon) موجود در آهن اسفنجی ۱۰۰٪ می‌باشد.
۴. نرخ بازیابی برای اضافه کردن کربن بصورت توده‌ای (Bulk)، ۲۵٪ و برای تزریق کربن (Injection) ۸۰٪ می‌باشد. این کربن به محلول فولاد مذاب می‌رود و می‌تواند به‌عنوان سوخت برای اکسیژن تزریق شده عمل کند [۱۸].
۵. کوره قابلیت تزریق ۱۵ متر مکعب اکسیژن بازا هر تن مذاب تولیدی را دارد. کربن تزریقی به کوره ۸۵٪ به CO و ما بقی به CO₂ تبدیل می‌شود.
۶. میزان تولید سرباره بازا هر تن شارژ فلزی (دارای ۸۵٪ آهن اسفنجی)، ۱۰۷Kg در نظر گرفته شده است و این مقدار با افزایش درصد آهن اسفنجی تا ۹۵٪ به ۱۱۶ Kg بر تن شارژ فلزی می‌رسد. این فرض برای سهولت درک مطلب می‌باشد و با محاسبات برنامه مورد استفاده تا حدود زیادی منطبق است.
۷. سرباره دارای ۱۹/۵٪ FeO می‌باشد.
۸. قراضه و آهن اسفنجی با ترکیب زیر وارد کوره قوس الکتریک می‌شوند.

صنایع آهن و فولاد یکی از پر مصرف‌ترین صنایع مصرف‌کننده انرژی در جهان می‌باشند. مصرف انرژی جهانی این صنایع در سال ۱۹۹۰، ۱۹-۱۸ اگزا ژول بوده است (۱۵-۱۰ مصرف سالانه انرژی در صنعت) [۱]، و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۲۰ به ۲۵ اگزا ژول برسد [۱]. تولید فولاد در سال ۱۹۴۵، ۱۰۰ میلیون تن بوده است و تا سال ۱۹۹۰ به ۷۷۰ میلیون تن رسیده است [۲و۳] و پیش‌بینی می‌شود که با روند رو به رشد سالانه ۱/۷٪ در سال ۲۰۲۰ به ۱۲۸۰ میلیون تن در سال برسد [۱]. بهینه‌سازی انرژی تنها راه جلوگیری از روند رو به رشد مصرف انرژی در این صنعت می‌باشد و مطالعات زیادی در زمینه بهینه‌سازی انرژی در کوتاه مدت، تا ۱۵-۱۰ سال آینده انجام شده است [۴-۷] و پیش‌بینی می‌شود که با تکنیک‌های مناسب می‌توان مصرف انرژی در سال ۲۰۲۰ را به ۲۰ اگزا ژول کاهش داد (کاهش در حدود ۲۰٪) [۱].

انرژی الکتریکی حدود ۶۵٪ انرژی ورودی کوره‌های قوس الکتریک را تامین می‌کند و روش‌هایی که بتوانند با تنظیم بهینه شارژ ورودی یا تکنیک‌های جانبی دیگری که علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید، مصرف انرژی الکتریکی را نیز کاهش دهند اهمیت زیادی دارند. استفاده از انرژی شیمیایی واکنش‌های درون کوره می‌تواند راه حل مناسبی برای این مساله باشد. در زمینه کاهش مصرف انرژی با استفاده از احتراق بعدی (Post combustion) تکنیک‌های مختلفی گسترش یافته است [۸-۱۲]. همچنین یک سری مدل‌سازی برای کفی شدن سرباره انجام شده است که میزان کفی شدن را با توجه به ترکیب سرباره و دما و مواد افزودنی بررسی می‌کند [۱۳-۱۵]. کفی شدن سرباره علاوه بر کاهش صدای قوس، از تلفات انرژی قوس نیز جلوگیری می‌کند. در تحقیقات بعدی اثر شارژ DRI داغ (HDRI) بررسی شده است و این روش با وارد کردن مقداری انرژی به سیستم، انرژی الکتریکی مصرفی را کاهش می‌دهد [۱۶].

برای بهینه کردن عملیات ذوب و آلیاژسازی و حد اقل کردن هزینه‌های تولید فولاد در کوره‌های القائی نیز یک برنامه کامپیوتری تحت برنامه DOS، قبلاً ساخته شده که شرح آن در مرجع ۱۷ آورده شده است.

در این مقاله از یک برنامه کامپیوتری مورد استفاده در شرکت فولاد خوزستان استفاده شده است. این برنامه یک مدل استاتیک می‌باشد که با وارد کردن اطلاعات ورودی، رفتار بعدی کوره، ترکیب و مقدار سرباره، انرژی الکتریکی مورد نیاز، هزینه‌ها و ... را محاسبه می‌کند. مبنای کاری این برنامه موازنه جرمی و حرارتی می‌باشد. با کمک این برنامه و مبنای محاسباتی آن، تاثیر

جدول ۱: ترکیب کربن و آهن شارژهای فلزی پایه آهن

	Total Fe	Given Yield	%C
DRI	Variable	94	Variable
Scrap	95.24	92.5	0.15

جدول ۲: محاسبه هزینه آهن اسفنجی، قراضه و آنتراسیت با توجه به درصدهای متفاوت کربن در آهن اسفنجی (شارژ دارای ۹۰٪ آهن اسفنجی فرض شده است)

% C in DRI	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9
Kg DRI	۱۰۵۶.۷	۱۰۵۸.۹	۱۰۶۱.۰۸	۱۰۶۳.۳	۱۰۶۵.۴۸	۱۰۶۷.۷	1067	1072.13
Cost of DRI 160\$/t	۱۶۹.۱	۱۶۹.۴	۱۶۹.۸	۱۷۰.۱	۱۷۰.۵	۱۷۰.۸	171.2	171.5
%FeO	۹.۹	۹.۸۸	۹.۸۷	۹.۸۴	۹.۸۲	۹.۸	9.78	9.76
Kg FeO from DRI	۱۰۴.۷	۱۰۴.۷	۱۰۴.۷	۱۰۴.۷	۱۰۴.۷	۱۰۴.۷	۱۰۴.۷	۱۰۴.۷
Kg Scrap	۱۱۳.۵۱	۱۱۳.۵۱	۱۱۳.۵۱	۱۱۳.۵۱	۱۱۳.۵۱	۱۱۳.۵۱	۱۱۳.۵۱	۱۱۳.۵۱
Cost of Scrap 145\$/t	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46
%FeO in Scrap	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
Kg FeO from Scrap	۲.۲۷	۲.۲۷	۲.۲۷	۲.۲۷	۲.۲۷	۲.۲۷	۲.۲۷	۲.۲۷
Total input FeO	۱۰۶.۹۷	۱۰۶.۹۷	۱۰۶.۹۷	۱۰۶.۹۷	۱۰۶.۹۷	۱۰۶.۹۷	۱۰۶.۹۷	۱۰۶.۹۷
Kg Slag	۱۳۳.۴۱	۱۳۳.۶۵	۱۳۳.۹	۱۳۴.۱۵	۱۳۴.۴	۱۳۴.۶۶	134.9	135.16
Kg FeO in slag	۲۶	۲۶.۰۶	۲۶.۱۱	۲۶.۱۶	۲۶.۲	۲۶.۲۶	۲۶.۳۱	۲۶.۰۶
Kg FeO reduced to Fe	۸۰.۹۷	۸۰.۹۱	۸۰.۸۶	۸۰.۸۱	۸۰.۷۶	۸۰.۷۱	۸۰.۶۶	۸۰.۶
Kg Oxygen Free from FeO	۱۸۰.۲	۱۸۰.۱	۱۸	۱۷.۹۹	۱۷.۹۸	۱۷.۹۷	۱۷.۹۶	۱۷.۹۵
Kg C from DRI	۱۵.۸۵	۱۸	۲۰.۱۶	۲۶.۱۶	۲۶.۲	۲۶.۷	28.88	31.1
Kg C from scrap	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱
Kg C in Steel	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸
Kg C Burned	۱۵.۱۶	۱۷.۳۱	۱۹.۴۷	۲۱.۶۴	۲۳.۸۲	۲۶	28	30.4
Kg Oxygen needed for C combustion	۲۳.۲	۲۶.۴۸	۲۹.۸	۳۳.۲	۳۶.۴۵	۳۹.۷	42.84	46.5
Kg Oxygen injection	۲۱.۴۲	۲۱.۴۲	۲۱.۴۲	۲۱.۴۲	۲۱.۴۲	۲۱.۴۲	۲۱.۴۲	۲۱.۴۲
Bulk Carbon addition								
Kg Oxygen Remained from injection	۱۶.۲۴	۱۲.۹۵	۹.۶۲	۶.۲۱	۲.۹۵	none	None	none
Kg Anthracite from addition at 25% recovery	۴۴.۴	۳۴.۶۵	۲۴.۹	۱۴.۹	۴.۸۵	none	None	none
Cost of Anthracite at 0.1\$/Kg	۴.۴۴	۳.۴۶	۲.۵	۱.۵	۰.۴۸	none	None	none
Carbon injection								
Kg Oxygen Remained from injection	۱۸۰.۳	۱۴.۷۴	۱۱.۴۳	۸.۱۲	۴.۸	none	None	none
Kg Anthracite from addition at ۸۰% recovery	۱۳.۸۷	۱۰.۸۲	۷.۸	۴.۶۶	۱.۵	none	None	none
Cost of Anthracite at 0.1\$/Kg	۱.۳۹	۱.۰۸	۰.۷۸	۰.۴۶	۰.۱۵	none	None	none

درصد فلزی شدن آهن اسفنجی، ۹۱/۵٪ می باشد.

۲٪ اکسید آهن در قراضه وجود دارد.

مقادیر آنها را در شارژ از رابطه زیر محاسبه می کنیم:

$$m_i = 1000 \times m_f / (\%Fe_{tot} \times \%Yield) \quad (۲)$$

٪ درصد قراضه و یا آهن اسفنجی در شارژ فلزی

m_i وزن شارژ فلزی

$\%Fe_{Tot}$ درصد آهن موجود در شارژ فلزی

Yield٪: درصد از آهن شارژ که قابلیت تولید فولاد دارد.

بحث و بررسی:

همانطوری که می دانیم، مقداری از اکسید آهن ورودی به سیستم به سرباره می رود و بقیه آن احیا می شود، که مقداری اکسیژن از این احیا آزاد می شود.

$$\text{Oxygen form Iron Reduction} = (\text{FeO}_{\text{Charged}} - \text{FeO}_{\text{Slag}}) \times 0.22 \quad (۳)$$

برای افزایش درصد کربن بدون کاهش درصد آهن ابداع شده است.

مصرف انرژی الکتریکی در حالت تزریق و افزایش کربن و در درصد‌های مختلف کربن آهن اسفنجی، تغییر زیادی نمی‌کند زیرا مجموع کربن ورودی به سیستم ثابت بوده و انرژی شیمیایی تولید شده حاصل از احتراق کربن، تغییری نکرده و بنابراین مصرف انرژی الکتریکی ثابت است.

این محاسبات را می‌توان برای شارژ‌های با درصد‌های متفاوت آهن اسفنجی انجام داد.

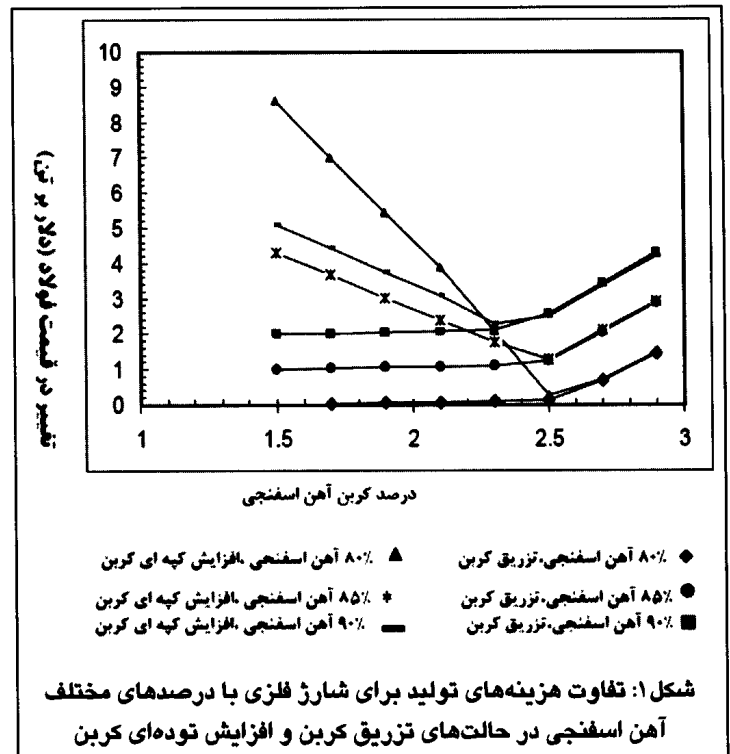
تفاوت هزینه تولید فولاد در تزریق و افزایش توده‌ای فولاد شارژ آهن اسفنجی با ۱/۵٪ کربن (کربن پایه):

با توجه به یکسان بودن مصرف انرژی الکتریکی و مقدار آهن اسفنجی شارژ شده، تفاوت در هزینه‌های تولید در مقدار شارژ آنتراسیت می‌باشد که در حالت افزایش توده‌ای شارژ با ۱/۵٪ کربن قیمت از حالت تزریق، ۲٪ گران‌تر است. قیمت آنتراسیت به ازاء هر کیلوگرم، ۰/۱۱\$ در نظر گرفته شده است.

نتیجه‌گیری:

مشاهده می‌شود که در حالت افزایش توده‌ای کربن (با راندمان ۲۰٪) با افزایش درصد کربن اسفنجی، به دلیل کاهش مقدار شارژ آنتراسیت کاهش قیمت را خواهیم داشت. در شرایط برابر چنانچه از تزریق به جای شارژ توده‌ای استفاده شود به دلیل راندمان بالاتر تزریق (۸۰٪) قیمت تمام شده پایین‌تر خواهد بود. در روش تزریق، با افزایش درصد کربن آهن اسفنجی، روند کاهش کمی و تقریباً ثابتی در قیمت فولاد تولیدی مشاهده می‌شود. در درصد‌های بالای کربن، در آهن اسفنجی، با توجه به محدودیت کوره در تزریق اکسیژن از طریق لانس‌ها، شارژ آنتراسیت به کوره قطع می‌شود زیرا تمام اکسیژن باید صرف سوختن کربن موجود در شارژ شود. در غیر این صورت آنتراسیت محترق نشده، همراه با سرباره خارج شده و در خارج از کوره باعث پفکی شدن سرباره می‌شود. برای شارژ باید، درصد کربن بگونه‌ای انتخاب شود که امکان تزریق مقدار کافی از مواد کربن ده (مانند آنتراسیت) به کوره باشد، تا بتوان سرباره پفکی ایجاد کرد (سرباره پفکی از احتراق مواد کربن ده در مرز بین سرباره و مذاب و تولید گاز CO ایجاد می‌شود). لازم بذکر است در حالت تزریق کربن، افت قیمت شدیدی در درصد‌های بالای کربن نسبت به درصد‌های پایین‌تر کربن مشاهده نمی‌شود ولی مواردی را که در بالا ذکر شد باید رعایت شوند.

با توجه به مفروضات بالا، تغییرات قیمت فولاد برای شارژ‌های با درصد‌های مختلف آهن اسفنجی بررسی شده است



این اکسیژن در اثر واکنش با کربن موجود در شارژ بخشی از

این کربن را می‌سوزاند و بقیه کربن از طریق تزریق اکسیژن از لانس‌ها سوزانده می‌شود. حد اکثر قابلیت تزریق اکسیژن از طریق لانس‌ها به کوره $15 \text{ Nm}^3/\text{tIs}$ ($21/4 \text{ kg/tIs}$) می‌باشد که مقداری از آن صرف احتراق کربن شارژ می‌شود و مقداری دیگر نیز باقی می‌ماند که قابلیت سوزاندن آنتراسیت را دارد. از روی این میزان اکسیژن می‌توان حد اکثر مقدار آنتراسیتی را که می‌توان به کوره شارژ کرد، مشخص نمود. اکسیژن، ۸۵٪ کربن را به CO و بقیه را ابتدا به CO و سپس به CO_2 تبدیل می‌کند.

$$(\text{t})\text{O}_2 = C_{\text{Burned}} \times 28/12 \times 0.85 + C_{\text{Burned}} \times 44/12 \times 0.15$$

بنابراین هر کیلوگرم اکسیژن می‌تواند تقریباً، ۰.۶۵ کیلوگرم

کربن را بسوزاند.

اکسیژنی که از تزریق برای سوزاندن آنتراسیت باقی می‌ماند

عبارت است از:

$$(\text{t})\text{O}_2^{\text{Anth}} = 21.42 - \text{O}_{\text{Reduced}}^{\text{Fe}} - \text{O}_{\text{Burned}}^{\text{C}}$$

وزن بخشی از اکسیژن تزریق شده که صرف سوزاندن آنتراسیت می‌شود.

در اثر تغییر درصد کربن DRI ورودی، مقدار شارژ DRI لازم برای تولید ۱ تن فولاد تغییر می‌کند، زیرا با افزایش هر درصد کربن، یک کاهش درصد، در چیزی دیگر که عمدتاً آهن است اتفاق می‌افتد. بنابراین ضرورتاً افزایش ارزش سوختی کربن، کاهش بازدهی فولاد است و لازم است تا شارژ DRI به کوره افزایش یابد تا آهن مورد نیاز سیستم تامین شود. البته برای حل این مشکل در روش‌های جدید کوره‌های میدرکس راه‌های جدیدی

Proceedings, vol. 55(1997), Iron and Steel Society, p305-314.

[11] Frank A. Vonesh, Nicolas G. Perrin: " Post- combustion for the electric arc furnace," Iron and Steel Engineer, June 1995, p30-32.

[12] G. Daughtridge, P. Mathur: "Recent developments in post-combustion technology at Nucor Plymouth," Electric Furnace Conference Proceedings, vol. 52(1994), Iron and Steel Society, p135-138.

[13] J. J. KERR and R. J. FRUEHAN,"Additions to Generate Foam in Stainless Steelmaking", METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B. VOLUME 35B, AUGUST 2004- 643.

[14] Lan HONG. Masahiro HIRASAWA¹) and MasamichiSANO ,"Behavior of Slag Foaming with Reduction of Iron Oxide in Molten Slags by Graphite" ,ISIJ International, Vol. 38 (1998), No.2, pp.1339-1345 .

[15] Morales, R.D., Lule, R., Lopez, F., Camachi, J., and Romero, J.A., "The slag foaming practice in EAF and its influence on the steelmaking shop productivity", ISIJ International, Vol. 35, No. 29, pp. 1054-1062,2001.

[16] Gilbert Whitten ,"Hot Transport-Midrex Style Midrex Technologies,Inc,In Press.

[۱۷] صدر نژاد، س.خ. و سرکمری، م. شییه‌سازی فرایند تولید فولاد در کوره القائی، سمپوزیوم فولاد ۷۹، ۳- 4 اسفند ۱۳۷۹، شرکت فولاد خوزستان، ۱۲۳-۱۱۳، ۱۳۷۹.

[18] Sammt, F.L., "The pros and cons of high carbon DRI as EAF feed", Steel Times, Vol. 222, No. 10, pp. Oct. 1994. 398-399,Oct.1994.

[19] M. J. Thomson, N. G. Kournetas, E. Evenson, I. D. Sommerville, A. McLean, and J. Guerard," Effect of oxyfuel burner ratio changes on energy efficiency in electric arc furnace at Co- Steel Lasco",Ironmaking and Steelmaking 2001 Vol. 28 No. 3.

و مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آهن اسفنجی در شارژ، نقطه مینیمم به سمت درصدهای پائین‌تر کربن می‌رود و همچنین قیمت فولاد نیز افزایش می‌یابد، بنابراین می‌توان برای شارژهای با آهن اسفنجی بیشتر از درصد کربن کمتر در آهن اسفنجی استفاده کرد. انتخاب درصد آهن اسفنجی در شارژ علاوه بر قیمت قراضه و آهن اسفنجی به مقدار قراضه در دسترس و ظرفیت تولید آهن اسفنجی بستگی دارد. کلیه اطلاعات این مقاله به صورت مطالعه موردی و بر مبنای محاسبات تئوریک می‌باشد و می‌توان برای حالت‌های دیگر آنرا گسترش داد.

مراجع

[1] WEC. 1995. *Energy Efficiency Improvement Utilizing High Technology— An Assessment of Energy Use in Industry and Buildings*. London: World Energy Council.

[2] Int. Iron Steel Inst. 1992. *Steel Statistics Yearbook 1992*. Brussels: IISI

[3] Int. Iron Steel Inst. 1996. *Statistics on Energy in the Steel Industry (1996 Update)*. Brussels: IISI.

[4] E, Beer J de, Blok K. 1993. Energy conservation in the iron and steel industry. In *Energy Efficiency in Process Technology*, pp. 91– 100. Amsterdam: Elsevier .

[5] Faure H. 1993. *The new technologies for iron and steelmaking*. Presented at 27th IISI Annual Meeting and Conference, Paris

[6] Maier W, Angerer G. 1986. *Rational Energy Use by New Technologies (Rationelle Energieverwendung durch neue Technologien)*. K " oln: Verlag T " uV Rheinland GmbH (In German).

[7] Int. Iron Steel Inst. 1982. *Energy and the Steel Industry*. Brussels: IISI

[8] Manfred Reinhardt, Dieter W. Reiber: "Practice of ALARC-PCTM post-combustion at Von Roll Ltd., Gerlafingen," 5th European electric steel congress Proceedings, 1995, p117-125.

[9] D.S. Gregory, D.K. Ferguson, F. Slootman, et al: "Results of ALARC-PCTM post-combustion at Cascade steel rolling mills," Iron and Steelmaking, May 1996, p49-56.

[10] D. Koncsics, P. Mathur, D. Engle: "Results of oxygen injection in the EAF with Praxair Coherent Jet Injectors - a novel technology," Electric Furnace Conference