

تأثیر تشکیل سرباره پفکی در کوره قوس الکتریک بر مصرف انرژی الکتریکی

سیما امین‌الرعایا* و حسین ادريس**

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۷۹/۱۰/۱۱ - دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۹/۷)

چکیده - نیاز به کارخانجات کوچک فولادسازی، ایجاد روشهای جدید تولید فولاد، کاهش هزینه تولید و آلودگی محیط زیست و افزایش تولید، از جمله عواملی بودند که باعث ورود کوره های قوس الکتریک در صنعت فولادسازی شدند. این کوره ها از جمله مصرف کنندگان عمده انرژی الکتریکی در صنعت اند. تحقیقات وسیع چند دهه اخیر، پیشگرم قراضه، به کارگیری همزن و مشعلهای سوخت - اکسیژن، استفاده از شارژ گرم، سوزاندن گاز خروجی از سطح، کاهش درصد آهن اسفنجی در شارژ، تشکیل امولسیون سرباره - گاز - مذاب (پفکی نمودن سرباره) را به عنوان عوامل کاهش مصرف انرژی الکتریکی معرفی کردند. ایجاد سرباره پفکی یکی از اقتصادپتیرین و در عین حال مفیدترین این عاملهاست. کاهش مصرف انرژی، الکتروود، نسوز، زمان ذوب و افزایش راندمان تولید از مزایای ایجاد سرباره پفکی در کوره ها به شمار می آید. در این تحقیق، سرباره پفکی در کوره های با ظرفیت ۲۰۰ تن و در شرایط صنعتی مورد بررسی قرار گرفته است. کاهش مصرف انرژی الکتریکی از ۶۷۰kwh/ton به ۵۸۰kwh/ton و کاهش زمان ذوب از ۱۳۰ به ۱۱۵ دقیقه و افزایش توان الکتریکی ورودی از الکتروودها به کوره از نتایج به دست آمده این تحقیق است. مناسبترین درصد FeO سرباره ۲۴-۲۰ درصد و مناسبترین بازیسیته ۲/۲-۲ حاصل شده است.

واژگان کلیدی: کوره قوس الکتریک، انرژی، آهن اسفنجی، سرباره پفکی

The Effect of Foamy Slag on Power Consumption in Electric Arc Furnaces

S. Aminorroaya and H. Edris

Department of Materials Science and Metallurgy, Isfahan University of Technology

Abstract: *In electric arc furnace steelmaking units, the essential parameters are reducing price, increasing production and decreasing environmental pollution. Electric arc furnaces are the largest users of electric energy in industry. The most important techniques that can be used to reduce the electric energy consumption in electric arc furnaces are scarp preheating, stirring, use of burners and hot charge and foamy slag. Between these methods, the use of foamy slag is the most useful and economical factor. Foamy slag can reduce the amount of energy, electrodes, refractory consumption, and tap to tap time while it also increases productivity.*

In this study, method of production and optimum conditions for foamy slag in a 200-ton electric arc furnace were investigated. The use of foamy slag in this research can reduce the electric energy consumption from 670 to 580 kwh/t and the melting time from 130 to 115 min. and that the electric power input can be increased. It also shows that with foamy slag, the optimum amount of FeO in slag is 20-24 percent and the optimum basicity is 2-2.2.

Keywords: *electric arc furnace, energy, DRI, foamy slag*

** - استادیار

* - کارشناسی ارشد

| | | | |
|-------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| A | ثابت وابسته به ترکیب شیمیایی سرباره | ρ (kg/m ³) | دانسیتة |
| B | ثابت وابسته به ترکیب شیمیایی سرباره | Σ (s) | اندیس پفکی شدن |
| H (m) | ارتفاع پفک (ارتفاع سرباره پفکی منهای ارتفاع سرباره) | μ (pa.s) | ویسکوزیته |
| T (K) | دمای سرباره | μ_e (pa.s) | ویسکوزیته ظاهری |
| V (m/s) | سرعت خروج گاز از سطح | ϵ | درصد ذرات فاز دوم در سرباره |
| σ (mNm ⁻¹) | کشش سطحی | | |

۱- مقدمه

نیروی محرکه پفکی شدن سرباره، انرژی حبابهای CO است که در طول ذوب و تصفیه از واکنشهای کربن محلول در فولاد با FeO موجود در سرباره، کربن محلول در مذاب با اکسیژن تزریقی درون کوره و کربن تزریق شده در کوره با FeO موجود در سرباره ایجاد شده است.



این سه واکنش به ترتیب در فصل مشترک سرباره - مذاب، گاز- مذاب و جامد - سرباره انجام می شود [۱]. پژوهشگران [۲ و ۳]، دیفوزیون مولکولهای FeO در لایه سرباره را کنترل کننده کینتیک واکنشهای تشکیل CO در کوره های قوس الکتریک می دانند. پس از تشکیل حبابهای CO، این حبابها از محل تشکیل خود جدا می شوند و در لایه سرباره به سمت بالا حرکت می کنند و زیر لایه سرباره تجمع می یابند. سپس با پیوستن حبابها به یکدیگر، فیلم سرباره پاره شده و حبابها خارج می شوند [۴]. مجموعه این فرایند باعث پفکی شدن سرباره می شود.

تلاشهای انجام شده برای تعیین زمان باقیماندن حبابها در سرباره و معرفی معیاری برای نمایش پفکی شدن سرباره، منجر به معرفی اندیس پفکی شدن توسط بیکرمن^۱ به صورت معادله (۴) شد [۵]:

$$\Sigma = H / V \quad (4)$$

تحقیقات ایتو و فروهان [۶] بر روی سرباره های CaO-SiO₂-FeO (سرباره های کوره قوس و کنورتور) نشان

کوره های قوس الکتریک یکی از مصرف کنندگان عمده انرژی الکتریکی در صنعت محسوب می شوند. تلاشهای زیادی برای کاهش مصرف انرژی الکتریکی در این کوره ها انجام شده است و منجر به ایجاد کوره های قوس الکتریک دومرحله ای و شارژ مداوم نیز شده است. مهمترین عوامل مؤثر بر کاهش مصرف انرژی الکتریکی در کوره های قوس الکتریک شامل سیستم مسدود کننده ورود هوا به کوره، پیشگرم قراضه، دمش گاز خنثی، مشعلهای سوخت - اکسیژن، اضافه کردن ترکیبات گرمازا به شارژ، به کارگیری شارژ گرم (DRI گرم یا چدن مذاب)، استفاده از بازوهای آلومینیومی برای الکترودها، سوزاندن گاز خروجی از سطح، کاهش درصد آهن اسفنجی در شارژ، افزایش درجه فلزی DRI و درصد کربن موجود در آن و استفاده از امولسیون گاز- سرباره - مذاب (پفکی کردن سرباره) است. مفیدترین و اقتصادیترین عامل کاهش انرژی در EAF، سرباره پفکی است. زیرا در مقایسه با سایر روشها به تجهیزات کمتری نیاز دارد.

کاهش مصرف انرژی در حدود ۱۰-۳۰ kwh/t فولاد خام، کاهش مصرف الکتروود و نسوز ناشی از کاهش تشعشعات، افزایش راندمان گرمایی کوره، بهبود انتقال گرما، حفاظت از پانلهای کوره، کاهش زمان ذوب و گازهای محلول در فولاد، کاهش مقدار سرباره تولیدی و امکان افزایش طول قوس بدون افزایش در گرمای تلف شده از مزایای ایجاد سرباره پفکی در کوره های قوس الکتریک به حساب می آیند.

سرباره است که وابسته به شارژ به کار رفته در کوره، زاویه دمش، عمق دمش، ماده کربنی تزریقی در کوره، توان ترانسفورماتور و تنظیمات الکتریکی کوره است. این عوامل سبب شده است که برای هر کوره، ویژگیهای سرباره مورد نیاز برای پفکی شدن آن با انجام آزمایشات به دست آید.

۲- روش تحقیق

در انجام آزمایشها از کوره قوس الکتریک ۲۰۰ تن با توان ترانسفورماتور ۹۰MVA و قطر داخلی ۵/۵ متر و الکترودهایی با قطر ۶۰ سانتیمتر و وزن تقریبی ۱/۲۲ تن استفاده شد. نسوز کوره منیزیتی و در خط سرباره منیزیتی - کربنی است. سبب ۴۰ تنی قراضه، همراه با یک تن کک در کوره ای با ۵ تا ۱۰ تن مذاب باقیمانده از ذوب قبل، شارژ شده و باقیمانده مواد خام تا رسیدن به نسبت ۱۸/۸۲ قراضه به آهن اسفنجی، با شارژ مداوم DRI با سرعت ۲۴۰۰kg/min تامین می شود. میانگین ترکیب شیمیایی DRI به کار رفته در جدول (۱) به نمایش گذاشته شده است. رژیم شارژ کوره در شکل (۱) خلاصه شده است. کوره مجهز به سیستم تخلیه از کف (EBT) با قطر ۲۰ سانتیمتر است. دمش اکسیژن، متان و کربن با استفاده از لانس مافوق صوت اتوماتیک انجام شده است. این لانس از دقیقه ۱۸ وارد کوره شده و دمش اکسیژن و متان به ترتیب با سرعتهای ۱۱۵۰ m³/h و ۴۰۰m³/h آغاز می شود. از دقیقه ۳۰، این سرعتها به ترتیب به ۲۳۰۰m³/h و ۸۰۰m³/h تغییر می یابد. از این زمان، تزریق کک نفت خام با ابعاد ۰ تا ۳ میلیمتر توسط هوای فشرده آغاز می شود. پژوهشگران [۱۰ و ۱۲] نشان داده اند که مناسبترین ماده کربنی برای تزریق درون سرباره، کک نفت خام است. زاویه دمش اکسیژن با افق ۴۳ درجه است و تزریق در ۱۰ تا ۶۰ سانتیمتر زیر سطح سرباره انجام می شود.

نمونه گیری از ذوب و سرباره در پایان ذوب انجام شده است و دما با ترموکوپلهای یکبار مصرف Pt-Pt, 13%RH تعیین شده است. نمونه ذوب با دستگاه اسپکترومتر و سرباره با XRF مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفته است. با تغییر شدت

داد که Σ برای سرباره های با ترکیب و دمای ثابت، مقدار ثابتی است و می تواند به خواص فیزیکی و شیمیایی سرباره وابسته باشد. این محققان معادله (۵) را برای اندیس پفکی شدن به دست آوردند:

$$\Sigma = 5700 \mu / (\rho\sigma)^{0.5} \quad (5)$$

بررسی جیانگ و فروهان [۷] بر روی این اندیس و استفاده از مقادیر اندازه گیری شده ویسکوزیته، معادله (۶) را به نمایش گذاشت:

$$\Sigma = 359 \mu / (\rho\sigma)^{0.5} \quad (6)$$

در سرباره های واقعی، حبابها از واکنشهای شیمیایی به دست می آیند. این امر باعث شد که زیهانگ و فروهان [۸] اثر اندازه حبابها را نیز وارد معادله کرده و از طریق تحلیل ابعادی معادله (۷) را به دست آوردند:

$$\Sigma = 115 \mu^{1.2} / \rho\sigma^{0.2} d^{0.9} \quad (7)$$

بررسی و همکارانش [۹] بر پفکی شدن سرباره ها در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد که سرباره های با دمای بالا و اضافه شونده های پایین، سیالهای نیوتنی هستند و Σ برای آنها عدد ثابتی است ولی برای سرباره های با دمای پایین و وجود ترکیبات اضافه در سرباره، Σ مقدار ثابتی نیست.

چنانچه معادلات نیز نشان می دهند، با افزایش ویسکوزیته و کاهش دانسیته و کشش سطحی سرباره، پفکی شدن بهبود می یابد. محققان نشان داده اند که حضور ذرات فاز دوم درون سرباره، باعث افزایش ویسکوزیته می شود و μ_e را برای ویسکوزیته این نوع سرباره با نام ویسکوزیته ظاهری معرفی کردند:

$$\mu_e = \mu (1 - 0.35 \varepsilon)^{-2.5} \quad [10] \text{ معادله روسکو} \quad (8)$$

$$\mu_e = \mu (1 + 5.5 \varepsilon)^{-2.5} \quad [7] \text{ معادله برینکمن} \quad (9)$$

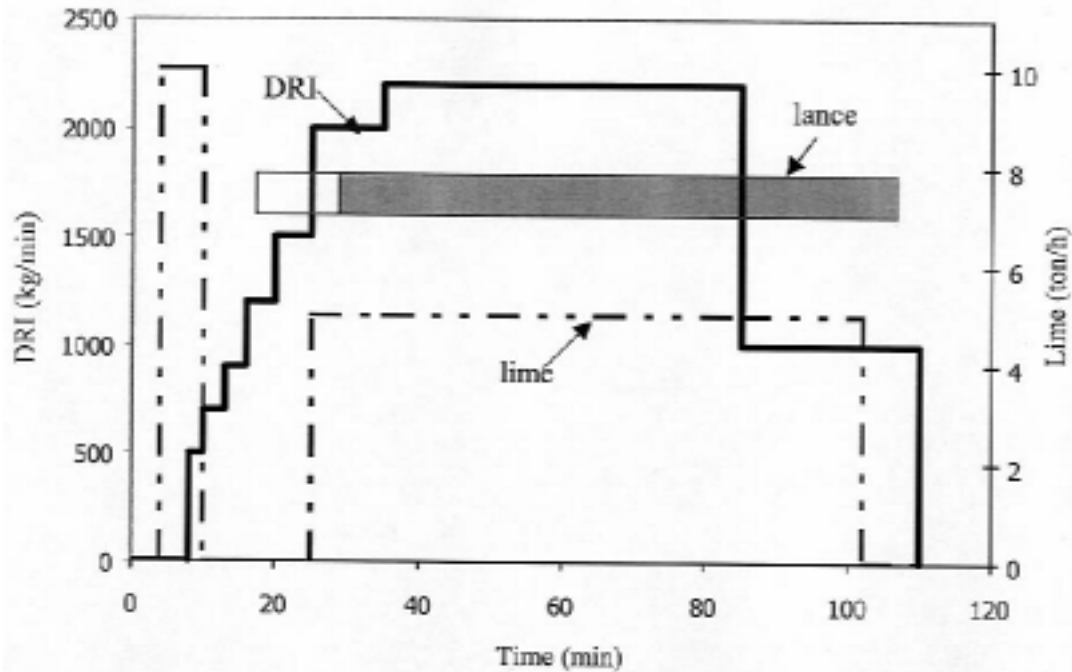
$$\mu_e = \mu (1 - \varepsilon)^{-2.5} \quad [11] \text{ معادله هاپل} \quad (10)$$

در معادلات (۹) و (۱۰) این فرض وجود دارد که اندازه ذرات فاز دوم تقریباً ۱۰۰ میکرومتر است.

آنچه در سرباره ها بر ویسکوزیته، دانسیته و کشش سطحی تاثیر می گذارد، بازیسیته و درصد MgO و FeO موجود در

جدول ۱- میانگین ترکیب DRI

| اجزا | C | Fe _m | Fe _t | Mt | FeO | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | MgO |
|------|------|-----------------|-----------------|------|------|------------------|-----|--------------------------------|------|
| درصد | ۱/۹۳ | ۸۱/۵۸ | ۸۸/۹۷ | ۹۱/۶ | ۹/۵۴ | ۲/۲۶ | ۲/۱ | ۰/۳۸ | ۰/۷۶ |



شکل ۱- رژیم شارژ کوره

برینکمن و هاپل که در معادلات (۸) تا (۱۰) به نمایش گذاشته شد، بر روی ویسکوزیته انجام شد و نهایتاً برای هر نمونه، ۶ اندیس پفکی شدن به دست آمد. برای سادگی و دقت محاسبات از برنامه رایانه‌ای استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

برای کاهش مصرف انرژی الکتریکی در کوره های قوس الکتریک در کنار ایجاد سرباره پفکی در کوره، سعی بر آن است که حداکثر انرژی شیمیایی نیز با تزریق اکسیژن و کربن وارد سیستم شود. این عمل با افزایش مصرف اکسیژن انجام می شود. در این تحقیق، توانایی سیستم مکش گاز خروجی کوره، محدود کننده سرعت تزریق اکسیژن و متان در سرباره بوده است. پس از تثبیت سرعت دمش اکسیژن و متان، اولین متغیر در رژیم شارژ، سرعت تزریق کربن در سرباره است. در شکل (۲)

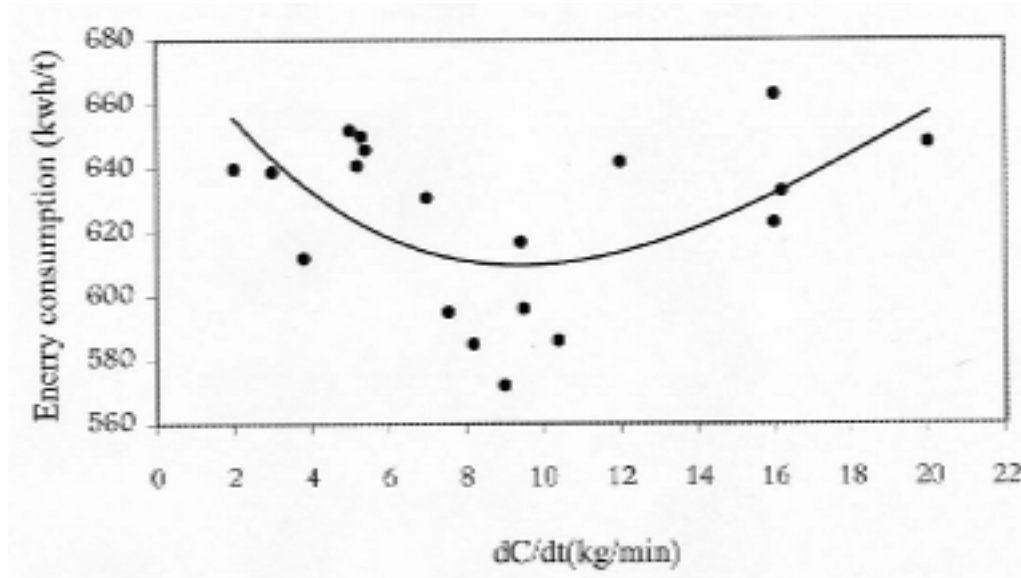
دمش کربن، اکسیژن و متان، میزان آهک شارژ شده و رژیم شارژ کوره، مناسبترین شرایط برای ایجاد سرباره پفکی در کوره های مورد آزمایش تعیین شده است. برای محاسبه اندیس پفکی شدن از معادله (۶) استفاده شد دانسیته سرباره از معادله (۱۱) [۱۳] و کشش سطحی از معادله (۱۲) [۱۳] و ویسکوزیته از معادله (۱۳) [۱۴] به دست آمد.

$$\rho = 2460 + 18 (\%FeO + \%MnO) \quad (11)$$

$$\sigma = 754.24 - 569.4 (\%SiO_2/100) - 137.13 (\%FeO/100) \quad (12)$$

$$\mu = AT \exp (B/T) \quad (13)$$

با استفاده از مدل‌های اورباین^۵ و ریود^{۱۴} ویسکوزیته سرباره محاسبه شد. با فرض دمای ۱۸۲۳ K برای سرباره و دسته بندی سرباره به $FeO, CaO+MgO+MnO, Al_2O_3+P_2O_5+SiO_2$ و با به کارگیری نمودار سه تایی FeO, SiO_2, CaO درصد ذرات فاز دوم در سرباره تعیین شد و هر سه تصحیح روسکو،



شکل ۲- تغییرات شدت تزریق کربن با مصرف انرژی الکتریکی

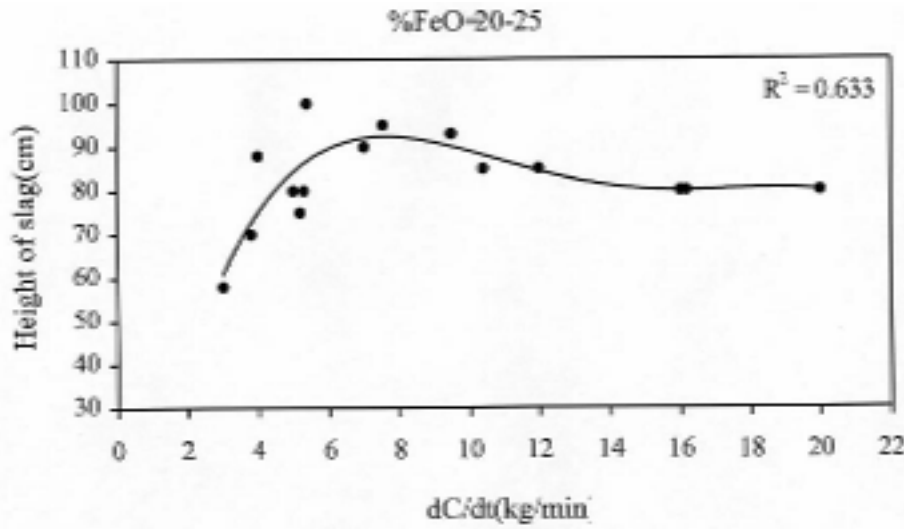
ارتفاع سرباره نشان می دهد که ارتفاع سرباره می تواند معیار مناسبی برای ارزیابی سرباره پفکی باشد. چنانچه از این منحنیها مشخص است، در صورتی که درصد FeO سرباره بین ۲۰ تا ۲۵ باشد، ارتفاع سرباره بیشتر و مصرف انرژی الکتریکی کمتر است. هر چه درصد FeO در سرباره افزایش می یابد، ویسکوزیته کاهش و کشش سطحی و دانسیته افزایش می یابد [۶] و در نتیجه پفکی شدن سرباره کاهش نشان می دهد. پس درصد FeO برابر با ۲۰ تا ۲۵ درصد شرایط مناسبتری برای سرباره پفکی فراهم می کند.

در شکل (۵) رابطه مصرف انرژی الکتریکی با بازیسیته سرباره در اکسید آهن ۲۰ تا ۲۵ درصد ترسیم شده است. با کاهش بازیسیته تا حوالی ۲/۱ مصرف انرژی الکتریکی کاهش می یابد زیرا با افزایش بازیسیته سرباره، ویسکوزیته کاهش و کشش سطحی افزایش می یابد [۱۱] و افت پفکی شدن را به همراه دارد ولی افزایش مجدد مصرف انرژی در بازیسیته های پایتتر ناشی از حضور ذرات فاز دوم در سرباره است. با حضور ذرات فاز دوم، ویسکوزیته افزایش می یابد و بر فرایند کاهش ویسکوزیته و افزایش کشش سطحی و دانسیته ناشی از افزایش بازیسیته غالب می شود.

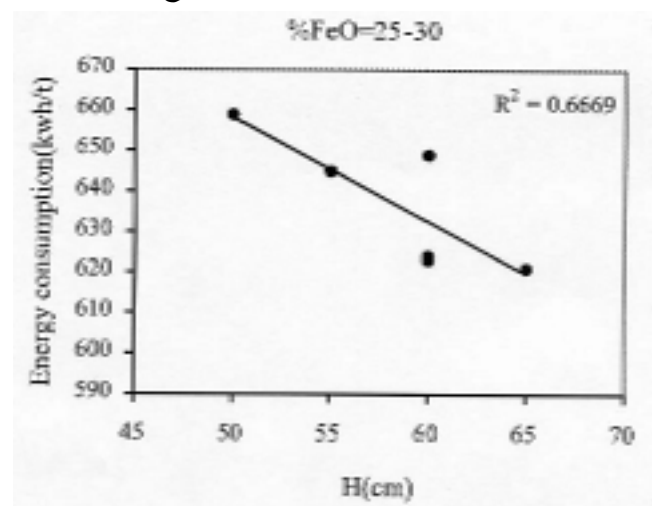
در شکل (۶) ارتباط بازیسیته با ارتفاع سرباره در اکسید آهن

تغییرات شدت دمش کربن در مقابل مصرف انرژی الکتریکی به نمایش گذاشته شده است. با افزایش شدت دمش کربن، مصرف انرژی کاهش می یابد تا به مینیمی در حوالی ۹ kg/min برسد. با افزایش شدت تزریق، کربن بیشتری در اختیار FeO قرار می گیرد و سرعت تولید CO افزایش می یابد و پفکی شدن سرباره بهبود می یابد و مصرف انرژی الکتریکی کاهش می یابد. پس از ۹kg/min با افزایش سرعت دمش کربن، درصد کربن موجود در ذوب با سرعت کمتری افت می کند. این امر باعث افزایش زمان ذوب و در نتیجه باعث افزایش مصرف انرژی الکتریکی می شود. معیار دیگری از پفکی شدن (ارتفاع سرباره) در شکل (۳) در مقابل شدت دمش کربن به نمایش در آمده است. چنانچه در این نمودار مشاهده می شود، پس از ۹kg/min نیز افت ارتفاع سرباره چشمگیر نیست. این موضوع نشان می دهد که افزایش سرعت دمش، باعث افت پفکی شدن سرباره نشده است و افزایش انرژی مشاهده شده در این ناحیه، مربوط به افزایش زمان ذوب است.

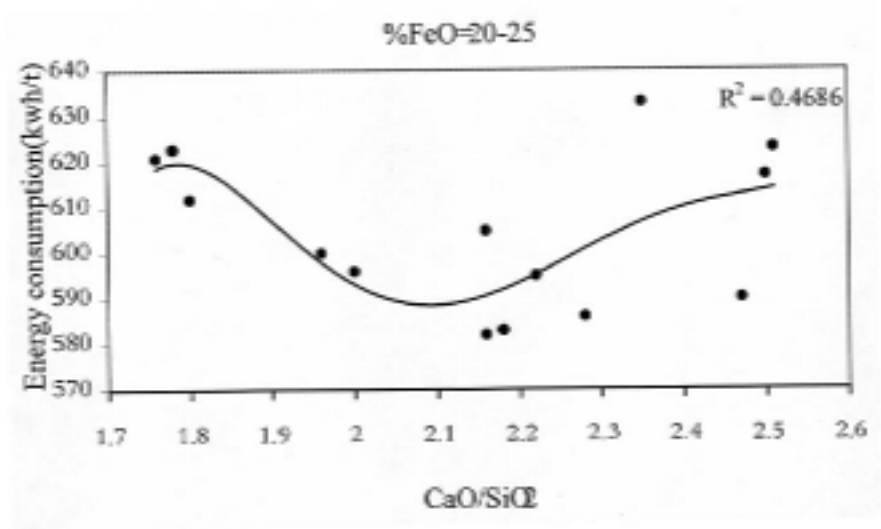
در شکل (۴) ارتباط ارتفاع سرباره با مصرف انرژی الکتریکی در درصدهای مختلف اکسید آهن رسم شده است. در هر دو نمودار کاهش مصرف انرژی الکتریکی با افزایش ارتفاع سرباره مشاهده می شود. ارتباط خطی بین مصرف انرژی و



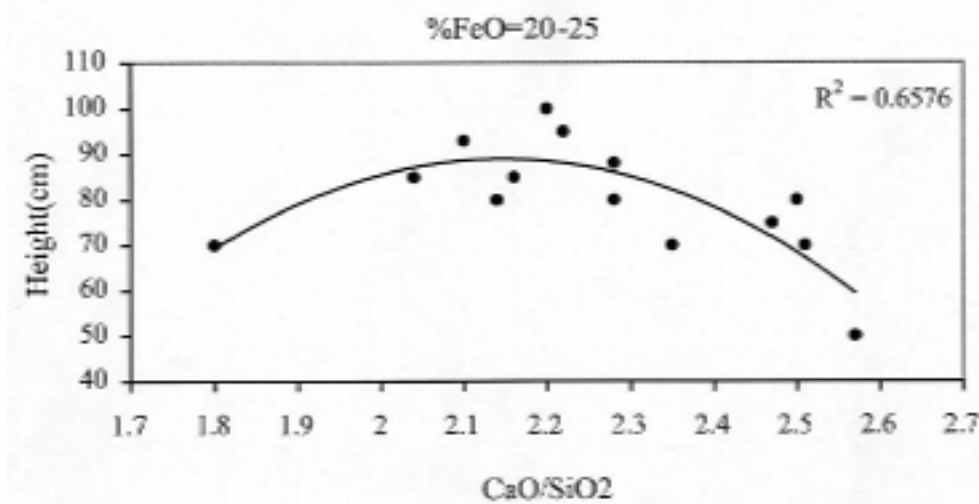
شکل ۳- تغییرات شدت دمش کربن با ارتفاع سرباره



شکل ۴- ارتباط ارتفاع سرباره با مصرف انرژی الکتریکی در درصد های مختلف FeO



شکل ۵- رابطه مصرف انرژی الکتریکی با بازیسته سرباره در اکسید آهن ۲۰-۲۵ درصد



شکل ۶- ارتباط بازیسته با ارتفاع سرباره در اکسید آهن ۲۰-۲۵ درصد

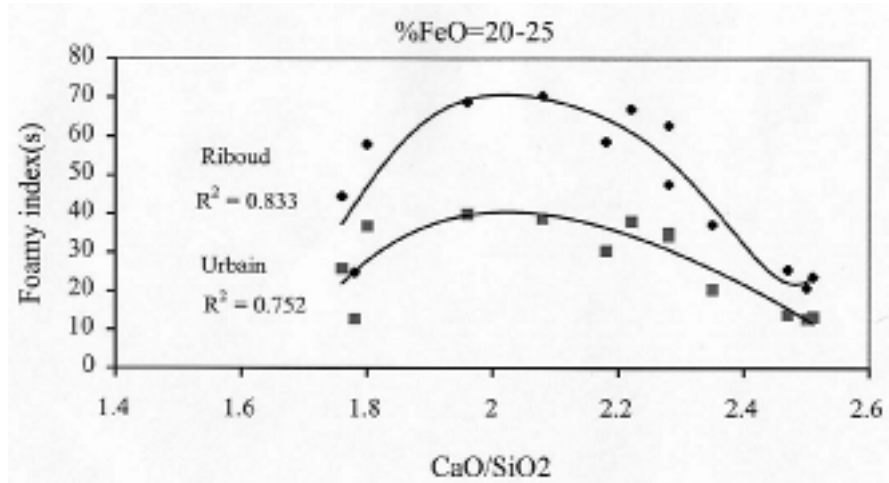
بالاتر است. مورالز و همکارانش [۱] دلیل این واقعه را به وجود سطوح فعال سیلیکا نیز مربوط دانسته اند. آنان اظهار داشتند، مولکولهای SiO₂ اطراف مولکولهای FeO را در بر می گیرد و فضا برای واکنش FeO با کربن را کاهش می دهد که این شرایط در درصدهای پایین FeO مشهودتر است. پس از این درصد FeO، مجدداً مصرف انرژی الکتریکی افزایش می یابد. علت این اثر را می توان به این صورت بیان کرد که هر چه درصد FeO افزایش می یابد، ویسکوزیته کاهش، کشش سطحی و دانسیته افزایش می یابد و پفکی شدن سرباره کاهش نشان می دهد [۱۱]. در درصدهای FeO بالاتر از این دامنه، شرایط کاهش پفکی شدن بر فرایند در دسترس قرار گرفتن FeO غالب شده و باعث افزایش مصرف انرژی الکتریکی در سرباره می شود.

در شکل (۱۱) ارتباط درصد FeO موجود در سرباره با ارتفاع در بازیسته ۲ تا ۲/۲ مشاهده می شود. ماکزیمم ایجاد شده در حوالی ۲۲ تا ۲۴ درصد FeO مشابه با نمودار (۱۰) قابل توجیه است. پس می توان نتیجه گرفت که درصد FeO بین ۲۰ تا ۲۴ درصد به عنوان مناسبترین درصد FeO موجود در سرباره برای کاهش مصرف انرژی در محدوده بازیسته ۲ تا ۲/۲ است. در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) ارتباط درصد FeO موجود در سرباره با اندیس پفکی شدن به نمایش گذاشته شده است. هر

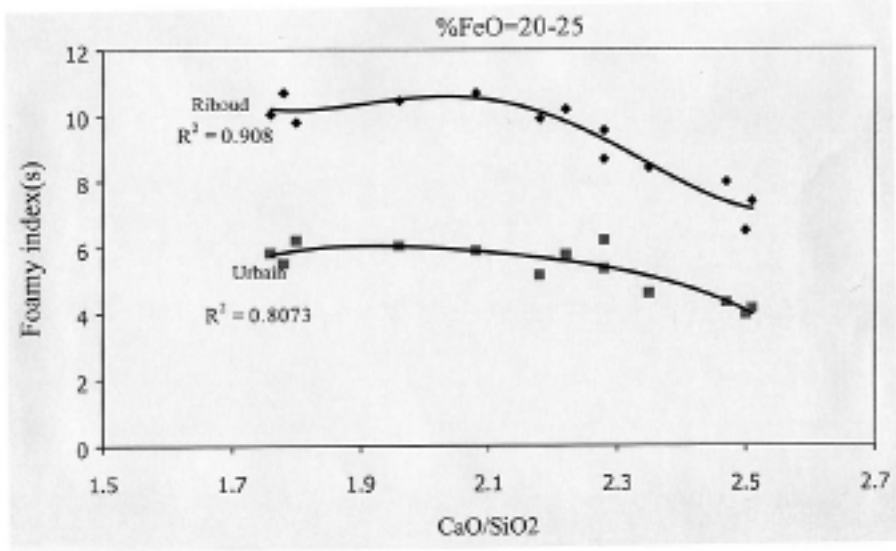
۲۰ تا ۲۵ درصد نشان داده شده است. این نمودار نیز ماکزیممی در ۲/۱ را به نمایش می گذارد که توجیهی مشابه با نمودار (۵) دارد.

در شکل (۷) ارتباط بازیسته سرباره با اندیس پفکی شدن با استفاده از تصحیح روسکو برای ویسکوزیته در سرباره‌هایی با ۲۰ تا ۲۵ درصد FeO به نمایش گذاشته شده است. این منحنیها ماکزیممی در حوالی ۱/۹۵ تا ۲/۱۵ را نشان می دهند. در شکل (۸) رابطه بازیسته با اندیس پفکی شدن رسم شده است ولی در این نمودار از تصحیح برینکمن استفاده شده است. ماکزیمم این منحنی در حوالی ۱/۹ تا ۲/۲ است. در شکل (۹) که از تصحیح هاپل برای ویسکوزیته استفاده شده است، ماکزیمم در اطراف ۲ تا ۲/۲ دیده می شود. از مقایسه بین شکل‌های (۵) تا (۹) می توان نتیجه گرفت که بهترین شرایط برای پفکی شدن سرباره های با ۲۰ تا ۲۵ درصد اکسید آهن، داشتن بازیسته‌ای بین ۲ تا ۲/۲ است.

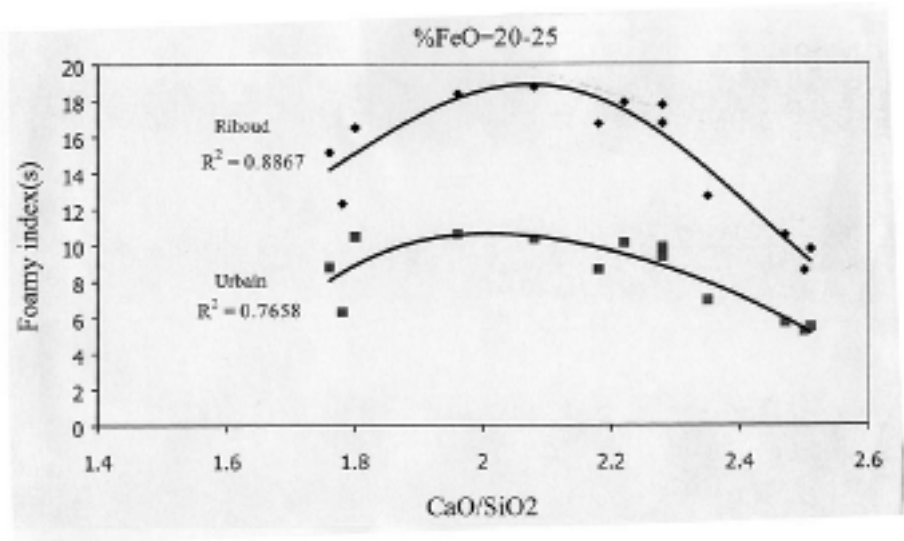
حال لازم است مناسبترین درصد FeO نیز در این دامنه از بازیسته بدست آید. در شکل (۱۰) ارتباط درصد FeO موجود در سرباره با مصرف انرژی الکتریکی در بازیسته ۲ تا ۲/۲ به نمایش گذاشته شده است. با افزایش درصد FeO تا حوالی ۲۲ تا ۲۳ درصد، مصرف انرژی الکتریکی کاهش می یابد که نتیجه حضور مولکولهای FeO در کنار کربن و تشکیل CO با سرعت



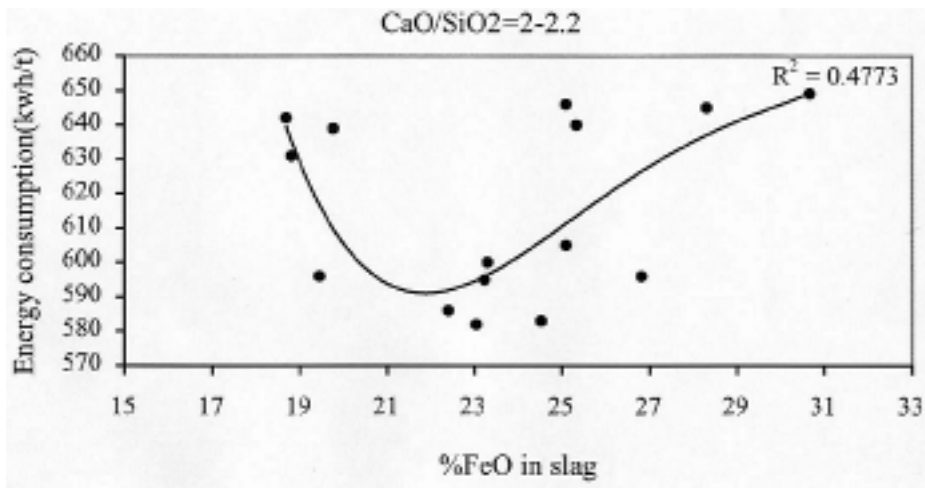
شکل ۷- رابطه بازیسته سرباره با اندیس پفکی شدن ($100 \times \Sigma$) با استفاده از تصحیح Roscoe در اکسید آهن ۲۰-۲۵ درصد



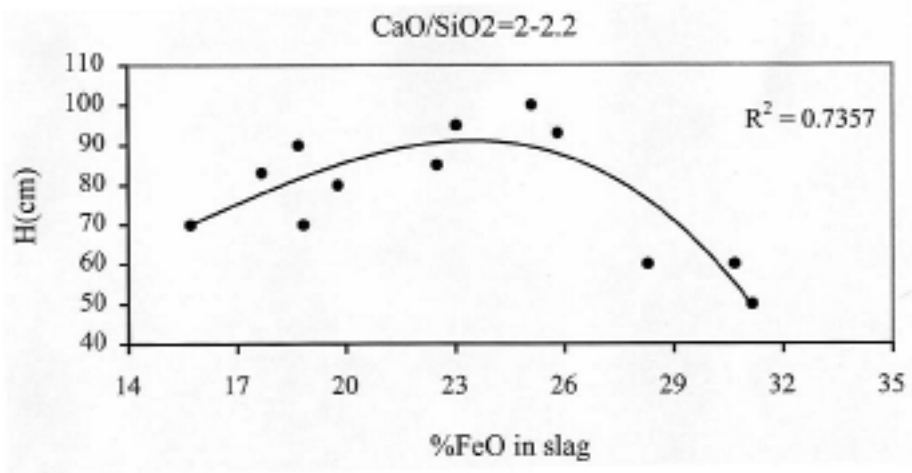
شکل ۸- رابطه بازیسته سرباره با اندیس پفکی شدن ($100 \times \Sigma$) با استفاده از تصحیح Brinkman در اکسید آهن ۲۰-۲۵ درصد



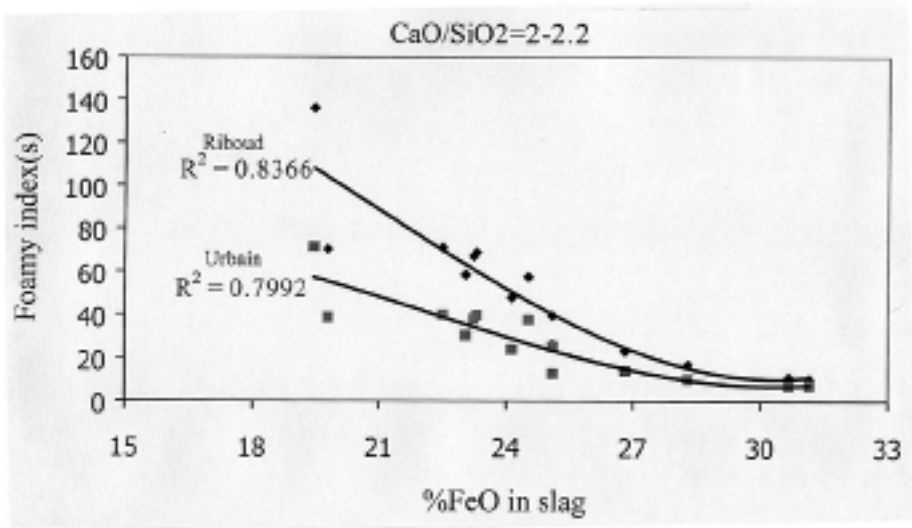
شکل ۹- رابطه بازیسته سرباره با اندیس پفکی شدن ($100 \times \Sigma$) با استفاده از تصحیح Happel در اکسید آهن ۲۰-۲۵ درصد



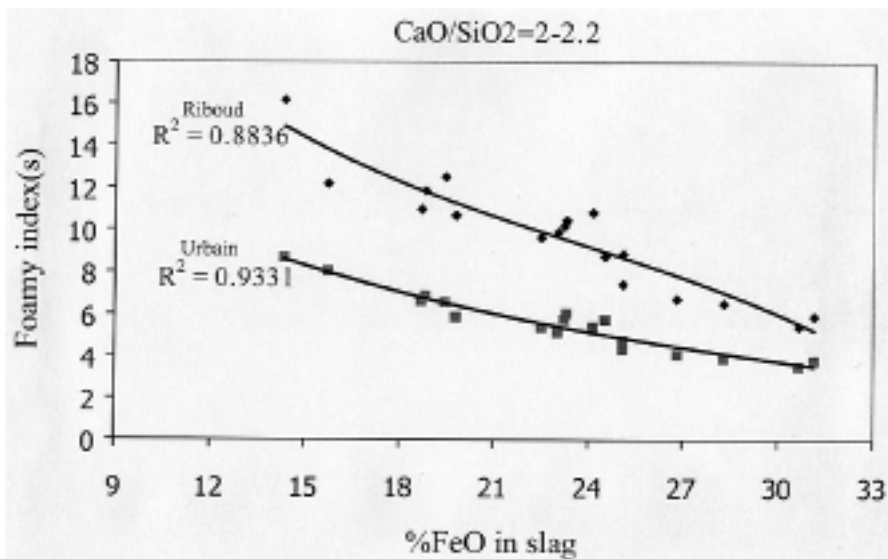
شکل ۱۰- ارتباط درصد FeO سرباره با مصرف انرژی الکتریکی در بازسسته ۲-۲/۲



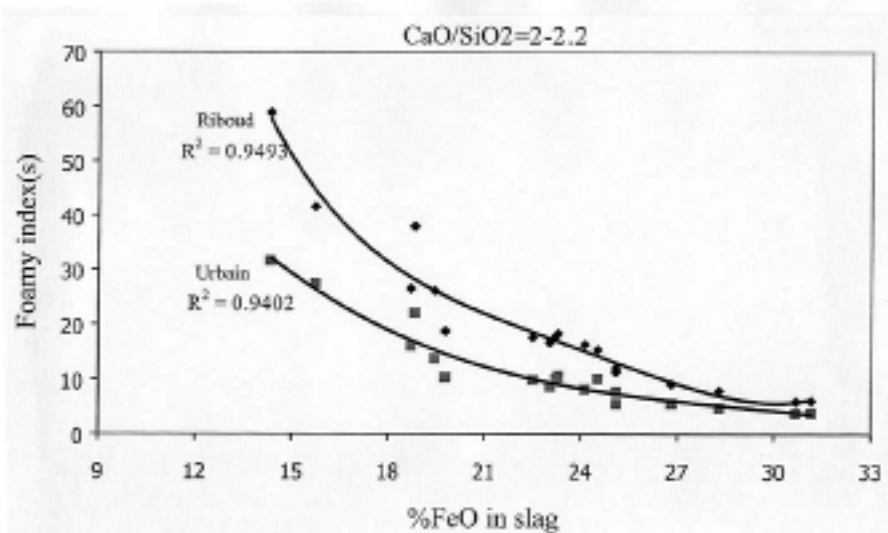
شکل ۱۱- ارتباط درصد FeO با ارتفاع سرباره در بازسسته ۲-۲/۲



شکل ۱۲- رابطه درصد FeO سرباره با اندیس پفکی شدن ($100 \times \Sigma$) با به کارگیری تصحیح Roscoe در بازسسته ۲-۲/۲



شکل ۱۳- رابطه درصد FeO سرباره با اندیس پفکی شدن ($100 \times \Sigma$) با به کارگیری تصحیح Brinkman در بازسینه ۲-۲/۲



شکل ۱۴- رابطه درصد FeO سرباره با اندیس پفکی شدن ($100 \times \Sigma$) با به کارگیری تصحیح Brinkman در بازسینه ۲-۲/۲

این دو جدول نتیجه می‌گیریم که عملکرد الکترودها در شرایط سرباره پفکی بسیار مناسبتر است و همان‌طور که از مقایسه توان ورودی حاصل، توان الکتریکی ورودی به کوره نیز افزایش می‌یابد. هر چه مصرف اکسیژن در کوره‌های قوس الکتریک افزایش می‌یابد، به دلیل جایگزینی انرژی الکتریکی با انرژی شیمیایی، مصرف انرژی الکتریکی کاهش می‌یابد. در شکل (۱۵) ارتباط اکسیژن مصرفی به ازای هر تن فولاد تولیدی در مقابل مصرف انرژی نشان داده شده است. افت انرژی مشاهده شده در این منحنی نه تنها به دلیل انرژی شیمیایی

چه درصد FeO افزایش می‌یابد، اندیس پفکی شدن کاهش می‌یابد. دلیل نبود اکسترمم در این منحنیها آن است که در محاسبه اندیس پفکی شدن، فرض شده است که سرعت تولید گاز ثابت است و افزایش درصد FeO سرباره، اثر خود را صرفاً بر ویسکوزیته، دانسیته و کشش سطحی نشان می‌دهد ولی در عمل، سرعت تولید گاز ثابت نیست و بر پفکی شدن تاثیر می‌گذارد.

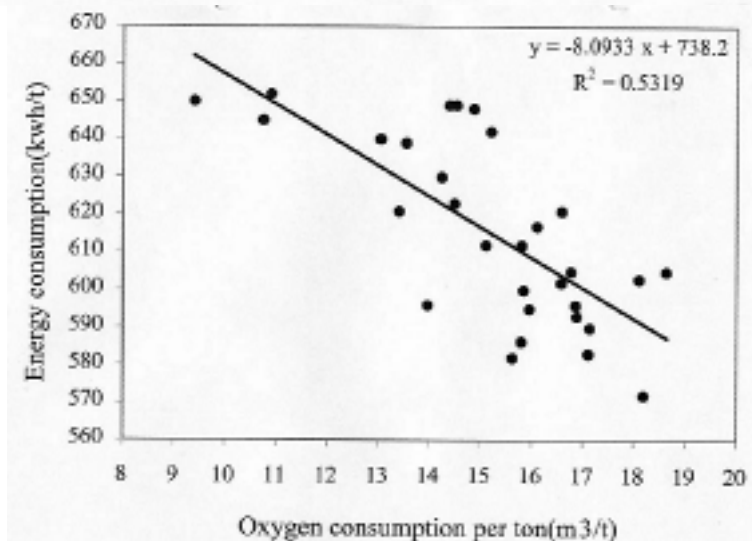
در جداول (۲) و (۳) نتایج حاصل از دو ذوب با سرباره پفکی خلاصه شده است. از مقایسه انحراف معیار جریانها در

جدول ۲- وضعیت الکتریکی کوره با سرباره پفکی

| Active power | AV.Volt | AV.AMP | COSPHI | Curr1 | Curr2 | Curr3 |
|--------------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 62.596 | 642 | 65412 | 0.81 | 67456 | 68061 | 68790 |
| | | | STDV | 5654 | 5333 | 618 |

جدول ۳- وضعیت الکتریکی کوره بدون سرباره پفکی

| Active power | AV.Volt | AV.AMP | COSPHI | Curr1 | Curr2 | Curr3 |
|--------------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 58.0202 | 639 | 61047 | 0.83 | 59990 | 62973 | 60173 |
| | | | STDV | 14581 | 10718 | 10184 |



شکل ۱۵- رابطه مصرف اکسیژن با مصرف انرژی الکتریکی

ورودی بلکه ناشی از ایجاد سرباره پفکی در کوره است.

۴- نتیجه گیری

- ایجاد سرباره پفکی در کوره های مورد آزمایش، کاهش ۱۵ دقیقه در زمان ذوب و ۸۵ kWh/t مصرف انرژی الکتریکی را نشان داده است. این در حالی است که درصد FeO سرباره از ۲۵ تا ۳۵ به ۲۰ تا ۲۴ درصد کاهش یافته است.

- اپتیمم سرعت دمش گرافیت ۹ kg/min همراه با ۲۳۰۰ m³/h اکسیژن و ۸۰۰ m³/h متان است.
- مناسبترین درصد FeO برای ایجاد سرباره پفکی ۲۰ تا ۲۴ درصد و اپتیمم بازیسیته سرباره ۲ تا ۲/۲ است.
- اندیس پفکی شدن قابلیت تعیین اپتیمم درصد FeO موجود در سرباره را دارا نیست.
- ایجاد سرباره پفکی باعث کاهش نوسانهای جریان الکترونها و در نتیجه افزایش توان ورودی به کوره شده است.

تحقیقاتی، تحقیق و توسعه و ناحیه فولادسازی مجتمع فولاد مبارکه به دلیل همکاری در انجام این تحقیق تشکر می‌کنند.

واژه نامه

- | | | |
|--------------|-----------|-----------|
| 1. Bickerman | 3. Happel | 5. Riboud |
| 2. Roscoe | 4. Urbain | |

مراجع

- Morales, R. D., Lule, R., Lopez, F., Camacho, J., Romero, J. A. "The Slag Foaming Practice in EAF and its Influence on the Steelmaking Shop Productivity," *ISIJ international*, Vol. 35, No. 9, pp. 1054-1062, 1995.
- Min, D. J., Han, J. W., Ghung, W. S. "A Study of the Reduction Rate of FeO in Slags by Solid Carbon," *Metallurgical and materials transaction B*, Vol. 30, No. 4, pp. 215-221, 1991.
- Sarma, B., Cramb, A. W., Fruehan, R. J. "Reduction of FeO in Smelting Slags by Solid Carbon: Experimental Results," *Metallurgical and materials transaction B*, Vol. 27, No. 10, pp. 717-730, 1996.
- Ogawa, Y., Huin, D., Gaye, H., Tokumitsu, N. "Physical Model of Slag Foaming," *ISIJ international*, Vol. 33, No. 1, pp. 224-232, 1993.
- Pathak, DC., Sadar, MK., Singa, PK., Jha, KN. "Foamy Slag Practice in Electric Arc Steelmaking," *SEAFISI Quaterly*, No. 10, pp. 94-101, 1997.
- Ito, K., Fruehan, R. J., "Study on Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags: Part1. Foaming Parameters and Experimental Results," *Metallurgical transaction B*, Vol. 20, No. 8, pp. 515-521, 1989.
- Jiang, R., Fruehan, R. J. "Slag foaming in Bath Smelting," *Metallurgical transaction B*, Vol. 22, No. 8, pp. 481-489, 1991.
- Ghag, S. S., Hayes, P. C., Lee, H. G., "The Prediction of Gas Residence Times in Foaming CaO-SiO₂-FeO Slags," *ISIJ international*, Vol. 38, No. 11, pp. 1216-1224, 1998.
- Wu, K., Chu, S., Qian, W., Niu, Q. "Investigation into Rheological Characteristic and Foaming Behaviour of Molten Slags," *Steel research*, Vol. 70, pp. 248-251, 1987.
- Burström, E., Ye, G. "Influence of Different Parameters on Stability of Foaming Slag," Conference: Scaninject VI, 6th International Conference on Refining Processes, Lulea, Sweden, pp. 231-240, 1992.
- Ito, K., Fruehan, R. J., "Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags: part2. Dimensional Analysis and Foaming in Iron and Steelmaking Process", *Metallurgical transaction B*, Vol. 20, No. 8, pp. 509-514, 1989.
- Ozawa, M., Kitagawa, S., Nakayama, S., Tokesono, Y. "Reduction of FeO in Molten Slags by Solid Carbon in the Electric Arc Furnace Operation," *Transaction ISIJ*, Vol. 26, pp. 621-629, 1986.
- Morales, R. D., Podriguez, H., Garnica, P., Romero, J. A. "A Matematical Model for the Reduction Kinetics of Iron Oxide in Electric Furnace Slags by Graphite Injection," *ISIJ international*, Vol. 37, No. 11, pp. 1208-1512, 1998.
- Mills, Keene, "BOS slags," *International Materials Reviews*, Vol. 32, Nos. 1, 2, pp. 1-112, 1987.