

استفاده بهینه از الکترودهای گرافیتی در کوره‌های قوس الکتریکی¹

ترجمه: محمدحسین نشاطی

خلاصه

هزینه‌های الکترود برای فولادسازی در کوره‌های قوس الکتریکی (EAF) در حدود 15-20 درصد از هزینه‌های تبدیل را تشکیل می‌دهد. داده‌های مصرف ویژه کوره‌های مختلف با اندازه و نحوه عملیات مختلف، بسیار متفاوت است. دانش در مورد متغیرهایی تأثیرگذار بر مصرف الکترود باید به صورتی گسترش یابد که شرایط عملیاتی بهینه که در آن مصرف کنندگان و تولیدکنندگان الکترود به یک اندازه علاقمند هستند حاصل شود. مصرف الکترود یکی از عوامل تشکیل دهنده کل هزینه تولید در یک کارخانه فولادسازی الکتریکی می‌باشد و این هزینه کل است که باید بهینه‌سازی شود. در این مقاله نشان داده شده که چگونه مصرف الکترود به جریان، قطر کوره، قطر الکترود و بهره‌وری وابسته است. برخی از عوامل مهم موثر بر نرخ شکستگی الکترودها مورد بحث قرار گرفته و بسیاری از آنها تحت تأثیر فولادساز قرار می‌گیرند. یک تمرین نظری در تغییر ضریب توان در طی ذوب کردن برای یک کوره مدرن به منظور مطالعه رابطه بین تغییرات بهره‌وری و مصرف الکترود انجام شد. نتایج نشان داد که مصرف الکترود کمتر با بهره‌وری پایین‌تر مرتبط است. بنابراین نتیجه‌گیری شد که استراتژی دستیابی به حداقل مصرف الکترود، لزوماً با حداقل هزینه کل منطبق نیست. نشان داده شده که می‌توان بر برخی از معایب ضریب توان بالای ذوب کردن با استفاده از یک راکتور اضافی در کوره اولیه غلبه کرد.

مقدمه

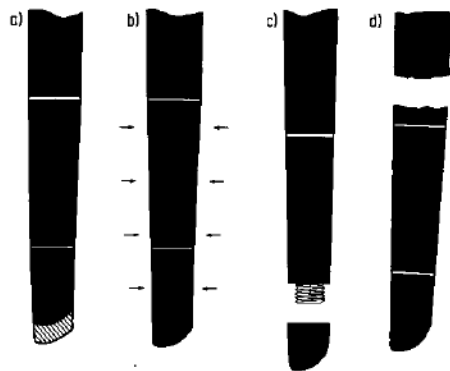
انتخاب روش عملیاتی در کوره‌های قوس بسیار گسترده است. اما، یک استراتژی منطقی با هدف حداقل هزینه کل یا حداکثر سود، بسته به مقدار فروش می‌باشد. تعیین این استراتژی، متأسفانه ساده نیست، نه تنها به دلیل پیچیدگی‌های روابط متقابل بلکه همچنین به علت اینکه برخی از روابط معین به صورت ضعیفی کمی‌سازی شده‌اند. یک نتیجه مهم از نیاز به بهینه‌سازی هزینه‌های کل این است که استراتژی دستیابی به این مقدار بهینه الزاماً منطبق با استراتژی‌ای که هزینه‌های یک پارامتر خاص را به حداقل می‌رساند نیست. به عبارت دیگر، در مورد الکترودها، عملیات کوره که حداقل مصرف الکترود را ارائه می‌دهد ممکن است بطور همزمان حداقل هزینه کل را ارائه ندهد. این نکته دوباره در پایان این مقاله بحث شده است.

مکانیزم اصلی مصرف الکترود

مصرف الکترود معمولاً به صورت کیلوگرم گرافیت به ازای هر تن فولاد تولید شده، (kg/t)، بیان می‌شود. اما، برای معنی‌دار بودن مقایسه‌ها باید همیشه روشن شود که چند تن فولاد برای محاسبه مصرف استفاده می‌شود:

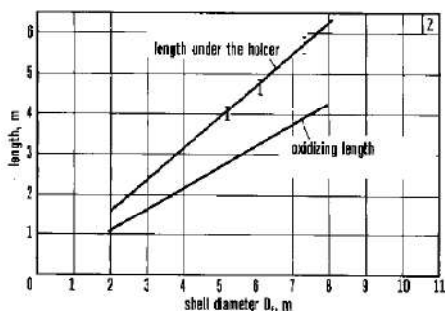
- وزن شارژ کوره (قراضه، کل جامدات و/یا مایع)،
- وزن پاتیل (فلز مذاب)،
- وزن شمش (اینگات) یا بیلت.

¹ - Ben Bowman, Optimum use of electrodes in arc furnaces, Metallurgical Plant and Technology, January 1983.



شکل 1- چهار مهمترین جزء مصرف الکتروود:
 (a) مصرف نوک
 (b) اکسایش جانبی
 (c) افتاد
 (d) شکستگی اتصال بالایی

نوع مصرف	اجزا	درصد سهم از کل
پیوسته	مصرف جانبی	30~70
	مصرف نوک	30~70
متناوب	شکستگی اتصال بالایی	5~20
	تلفات کندگی	3~10



شکل 2- رابطه بین طول الکتروود، طول بخش ستون الکتروود با اکسایش جانبی و قطر پوسته کوره D_f (منبع: کاتالوگ سازندگان کوره)

مصرف الکتروود را می‌توان به چهار جزء تقسیم کرد، که دو مورد آنها را می‌توان به عنوان "پیوسته" توضیح داد و می‌تواند بطور سیستماتیک به پارامترهای عملکرد مربوط باشند، در حالی که دو مورد دیگر "متناوب" هستند (شکل 1). توزیع مصرف کل به میزان گسترده‌ای کوره به کوره متفاوت است، با حدود کلی به صورتی که در جدول 1 نشان داده شده است.

تأثیرات سیستماتیک بر مصرف الکتروود

مصرف جانبی. اکسایش الکتروودهای گرافیتی در کوره‌های قوس پدیده‌ای پیچیده است، اما پارامترهای اصلی سطح آن و زمان هستند. همانطور که از شکل الکتروود مشهود است سرعت اکسایش درون کوره ثابت نیست؛ هرچه به نوک نزدیکتر، سرعت اکسایش بیشتر. Valchev [1] اندازه‌گیری‌ها بر روی الکتروود قطر 300mm را گزارش کرده است. سرعت متوسط حدود $7.2 \text{ kg/m}^2\text{h}$ -1.5 بود. در کنگره UIE در ورشو [2] او ارقام اندازه‌گیری شده در کوره 110 تن را گزارش کرد که در محدوده از 2.4 تا $7.2 \text{ kg/m}^2\text{h}$ ، با متوسط حدود $3.4 \text{ kg/m}^2\text{h}$ قرار داشتند.

اندازه‌گیری‌های تونل باد سرعت اکسایش در هوا برای الکتروودهای AGR و AGX توسط Schwabe ارائه شده است [3]. در دمای 1300°C سرعت اکسایش از 2 تا $10 \text{ kg/m}^2\text{h}$ با تغییر سرعت جریان هوا از 0 تا 2 m/s تغییر کرد.

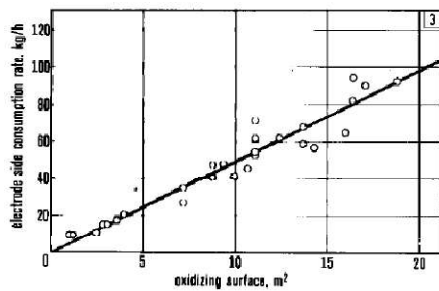
برای برقراری روابط تجربی، داده‌های کوره‌های زیادی مورد نیاز است. Cosh [4] اندازه‌گیری‌ها بر روی پنج کوره کوچک را گزارش داده است در حالی که نویسندگان [5] به داده‌های 22 کوره دیگر با اندازه‌های مختلف دسترسی داشته است.

شکل 2 همبستگی خوب بین طول الکتروود (از نگهدارنده تا نوک) و قطر پوسته کوره، D_f (منحنی بالا)، را نشان می‌دهد. طول در معرض اکسایش الکتروودها در داخل کوره نیز همبستگی خوبی با قطر کوره (منحنی پایینی) دارد.

این همبستگی‌ها منتج از این واقعیت است که کوره‌های با اندازه‌های مختلف هندسه‌های مشابهی دارند.

این طول اکسایش و قطر الکتروود امکان محاسبه مساحت سطح اکسایش را فراهم می‌سازد، با این فرض که متوسط قطر مخروط الکتروود 0.85 قطر اصلی باشد.

شکل 3 نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل را که در آن میانگین سرعت اکسایش برای کوره‌های مختلف نسبت به مساحت سطح محاسبه شده رسم شده‌اند نشان می‌دهد. فرض شده که اکسایش در سرتاسر زمان عملیات کوره رخ می‌دهد، بر خلاف مصرف نوک که فرض می‌شود فقط در زمانهای پاور-آن اتفاق می‌افتد (مطلب زیر را ببینید). داده‌های شکل 3 یک میانگین سرعت اکسایش ویژه $4.93 \text{ kg/m}^2\text{h}$ با انحراف معیار $0.59 \text{ kg/m}^2\text{h}$ را نشان می‌دهد. این ارقام در محدوده گزارش شده در مطالب منتشره قبلی قرار دارد.



شکل 3- همبستگی بین سرعت مصرف ویژه جانبی و مساحت سطح در معرض اکسایش.

این بدان معنی است که حال می‌توان از سرعت اکسایش ویژه برای ایجاد یک رابطه تجربی ساده بین مصرف جانبی، W_s (kg/t)، و بهره‌وری، p (t/h)، برای هر اندازه کوره استفاده کرد. در واقع مساحت سطح الکترودهای مخروطی هم به D_0 ، قطر اصلی و هم به D_t ، قطر نوک الکتروده بستگی دارد. اما، در عمل، حداکثر گستره نسبت D_t/D_0 از 0.6 تا 0.8 است به طوری که در بدترین حالت تقریب $D_t/D_0 = 0.7$ فقط سبب خطای $\pm 6\%$ در مساحت می‌شود. بنابراین می‌توان فرض کرد مساحت سطح تنها به D_0 و طول اکسایش وابسته است، که خودش متناسب با قطر پوسته کوره، D_f (نگاه کنید به شکل 2) می‌باشد. نتیجه نهایی این است که:

$$W_s = 21.2 \frac{D_f \cdot D_0}{p} \dots\dots\dots (1)$$

مصرف نوک. چند مطلب اندک منتشر شده در مورد اندازه‌گیری مصرف نوک الکتروده در کوره‌های قوس، یعنی با جریان در محدوده 1 تا 100kA وجود داشته است. در زمره گزارش‌های قبلی اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط Preston و Ravenscroft [6] می‌باشد که محدوده 1 تا 3kA روی الکترودهای 100mm را در بر می‌گیرد. نتیجه‌گیری آنها این بود که سرعت مصرف نوک متناسب با جریان است اما ثابت تناسب به پله ولتاژ (تپ ولتاژ) ترانسفورماتور مورد استفاده وابسته است. اندازه‌گیری‌های انجام شده در آزمایشگاه تحقیقات قوس شرکت بریتیش استیل (BSC) در محدوده 3 تا 9kA و بر روی کوره-هائی در بازه 30 تا 70kA توسط بومن [7] در کنگره UIE در ورشو در سال 1972 گزارش شد. اندازه‌گیری و نظریه هر دو وابستگی میزان مصرف نوک به I^2 و نیز وابستگی معکوس به قطر نوک الکترودها را نشان دادند. در همان کنفرانس چند اندازه-گیری در 17 و 21kA توسط Okamura و همکاران [8] گزارش شده است. در سال 1978، کارهای بیشتر انجام شده در BSC توسط جوردن [9] گزارش شد: اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی وابستگی واضح به I^2 را در گستره 3 تا 9 kA نشان دادند در حالی که همبستگی برای وابستگی به $I^{3/2}$ برای گستره 1 تا 60kA تحت این فرض که سرعت مصرف مستقل از قطر نوک باشد به دست آمد.

تجزیه و تحلیل کنونی

تجزیه و تحلیل ارائه شده در اینجا بر اساس مشاهدات و داده‌های گردآوری شده در گسترده وسیعی از کوره‌های قوس توسط همکاران نویسنده (مهندسين خدمات فنی در سراسر اروپای غربی) می‌باشد. تجزیه و تحلیل اولیه از سرعت مصرف کل الکتروده، kg/h، با ضرب کردن kg/t گزارش شده و بهره‌وری بر حسب t/h صورت گرفت. داده‌ها برای 55 کوره، همه استفاده‌کننده از الکترودهای قطر 500 mm، یک بار دیگر وابستگی به I^2 را نشان دادند.

به منظور ادامه تجزیه و تحلیل با جزئیات دقیق‌تر فرض شد که وابستگی سرعت مصرف نوک به جریان به صورت I^2 برقرار باشد. این فرض به شدت توسط دقیق‌ترین اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی پشتیبانی می‌شود. آنگاه پذیرش این فرض ناچاراً منتج شد به اینکه وابستگی به قطر الکتروده نیز وجود دارد، زیرا وابستگی به I^2 برای الکترودهای کوچک همانند مورد الکترودهای قطر بزرگ نیست. این وابستگی به قطر همچنان باید تعیین شود.

اندازه‌گیری‌های مفصل الکتریکی و الکتروده برای 22 کوره دیگر قابل دسترس بود [5]، طیفی از قطر الکترودها از 400 تا 600 mm را در بر می‌گرفت. در هر مورد مقدار I^2 به طور مستقیم یا غیرمستقیم از طریق مقادیر ثبت شده MVAR، MW و ولتاژ اندازه‌گیری شد:

$$I^2 = \frac{MW^2 + MVAR^2}{3V^2} \dots\dots\dots (1a)$$

قطر نوک در چند مورد با عکسبرداری اندازه‌گیری شد؛ در سایر موارد برآورد شد. مصرف نوک از سرعت مصرف کل، بجز شکستگی و قطر نوک از طریق رابطه هندسی زیر محاسبه شد:

$$\frac{Q_{tip}}{Q_{total}} = (D_t/D_0)^2 \dots\dots\dots (2)$$

که در آن D_0 قطر الکترود کامل است.

برای تعیین وابستگی تجربی قطر نوک الکترود نمودار Q_{tip} (kg/h) تقسیم بر I^2 نسبت به قطر نوک با مقیاس log-log ترسیم شد. پراکندگی نقاط برای الکترودهای 400 تا 600 mm به تنهایی برای ایجاد یک همبستگی قابل اعتماد خیلی زیاد بود؛ خط کشیده شده نیز از داده‌های Ravenscroft و Preston [6] و دقیق‌ترین داده‌های نوک الکترود مربوط به اندازه‌گیری‌های عکاسی استفاده می‌کند. شیب خط -0.58 می‌باشد به طوری که تابع وابستگی بین سرعت مصرف نوک، قطر و جریان را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$Q_{tip} (kg/h) = k \cdot \frac{I^2}{D_t^{0.58}} \dots\dots\dots (2a)$$

کیفیت همبستگی را می‌توان از نمودار log-log حاصلضرب $Q_{tip} \times D_t^{0.58}$ نسبت به جریان تشخیص داد، همانطور که در شکل 4 نشان داده شده، که در آن خط دارای شیب 2 است. بنابراین یک رابطه واحد، جریان‌های از 1 تا kA 60 یا تقریباً 4 برابر مقدار سرعت مصرف را در بر می‌گیرد. با این وجود باید توجه کرد که برخی نقاط تا 30 درصد بالاتر از خط هستند.

سرعت مصرف نوک معادله (2a) ضرب در زمان H، و تقسیم بر وزن فولاد G، مصرف ویژه نوک بر حسب kg/t را به دست می‌دهد:

$$W_t \triangleq 2.5 \left(\frac{0.347}{D_t} \right)^{0.58} \cdot \left(\frac{I}{50} \right)^2 \cdot \left(\frac{H}{1.5} \right) \cdot \left(\frac{100}{A=G} \right) \dots\dots\dots (3)$$

یا

$$W_t \triangleq 0.0361 \cdot \frac{I^2 \cdot H}{G \cdot D_t^{0.58}} \dots\dots\dots (3a)$$

در تمام موارد، تن مورد استفاده به صورت تن شارژ شده، تن مذاب، یا تن محصول باید هماهنگ باشند.

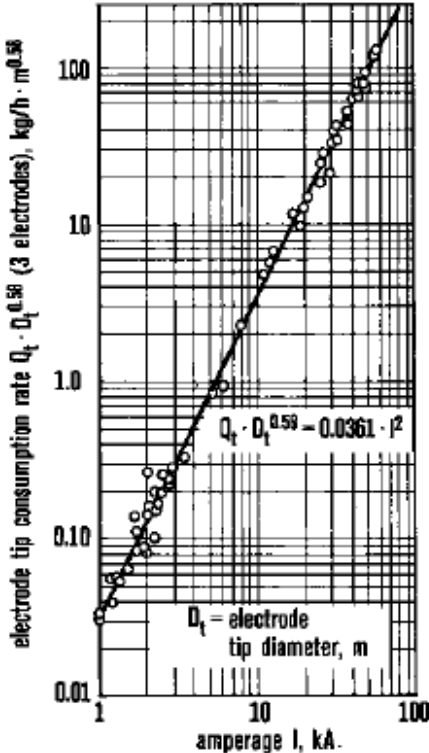
معادله (3) به صورتی تنظیم می‌شود که کوره ای که قطر نوک 347mm، جریان r.m.s 50kA، زمان پاور-آن 1.5 ساعت و ظرفیت 100 تن دارد، مصرف نوک 2.5kg/t را داشته باشد.

بسیاری از کوره‌ها به ابزار دقیقی برای نشان دادن r.m.s جریان مجهز نیستند. یک حالت جایگزین معادله (3) می‌تواند با جایگزینی جریان از طریق رابطه زیر حاصل شود:

$$I^2 = \frac{MVAR}{3X} \dots\dots\dots (4)$$

که در آن X راکتانس است.

اگر متوسط راکتانس عملیاتی، \bar{X} ، را بتوان برای کل ذوب برقرار کرد آنگاه حاصلضرب $I^2 \cdot H$ را می‌توان با $\frac{1}{3} \cdot MVARh/\bar{X}$ جایگزین کرد. در این روش معادله (3) را می‌توان به صورت زیر مرتب کرد:



شکل 4- رابطه بین سرعت مصرف نوک برای 3 الکترود، جریان و قطر نوک (معادله 2، (2a) را ببینید)

$$W_t \triangleq 2.5 \left(\frac{347 \text{ mm}}{D_t} \right)^{0.58} \cdot \left(\frac{\text{KVARh/t}}{450} \right) \cdot \left(\frac{4 \text{ m}\Omega}{\bar{X}} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$W_t \triangleq 0.012 \cdot \frac{q}{D_t^{0.58} \cdot \bar{X}} \dots \dots \dots (5a)$$

این بدان معنی است که یک کوره با قطر نوک 347 mm "مصرف کننده" انرژی راکتیو 450 KVAR_h/t در متوسط راکتانس عملیاتی 4 mΩ دارای مصرف نوک 2.5 kg/t می باشد.

معادله های (3) و (5) وابستگی ضعیف به قطر نوک را نشان می دهند. دومی را می توان توسط یک روش تکرارشونده برآورد کرد زیرا، به جز شکستگی، رابطه هندسی بین نوک و کل مصرف را می توان برای بررسی منطقی بودن قطر نوک برآورد شده مورد استفاده قرار داد. یعنی:

$$(D_t/D_0)^2 \approx \frac{W_t}{W_t+W_s} \dots \dots \dots (6)$$

مقادیر D_t در معادلات (5) و (6) باید به صورت منطقی سازگار باشند.

برآورد مصرف کل. معادله های (1)، (3) و (5) اساس مدل برای مصرف الکترو، به جز شکستگی را تشکیل می دهند. برای تعیین دقت آنها در طیفی از کوره ها، با شیوه های عملیاتی و ظرفیت های مختلف بکار گرفته شدند، که طیف وسیع متناسری از مصرف الکترو را ارائه دادند. مقایسه مصرف واقعی الکترو با مقدار محاسبه شده آن از این معادله ها در **شکل 5** نشان داده شده، که در آن سهم شکستگی لحاظ نشده است.

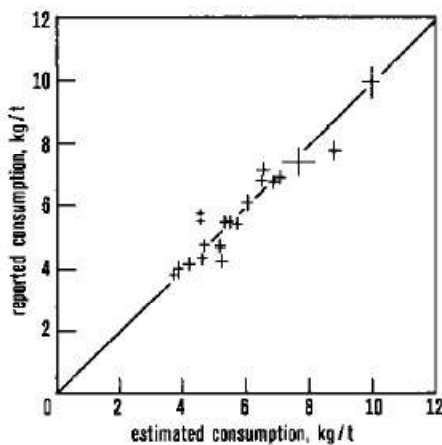
محدوده تحت پوشش از 3.7 تا 10 kg/t است. همانطور که دیده می شود، همبستگی خوبی برقرار می باشد؛ حداکثر انحراف حدود 18 درصد است، اما اکثر نقاط درون حدود 10 درصد انحراف از رقم برآورد شده می باشند.

تلفات ناشی از شکستگی الکترو

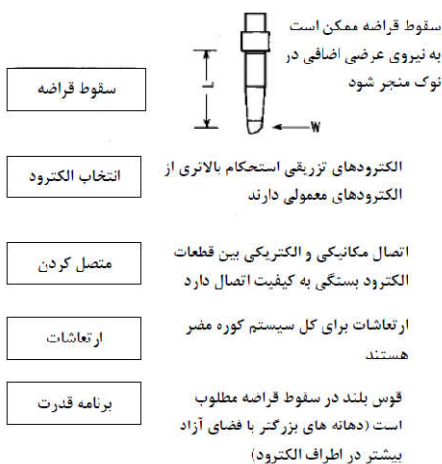
موقعیت بحرانی برای شکستگی در اتصال بلافاصله زیر نگهدارنده الکترو اتفاق می افتد. **شکل 6** پنج پارامتر موثر بر این شکستگی را نشان می دهد.

اثر قراضه. طرح مندرج در شکل 6 مفهوم بار شکستگی، W (تن) را توضیح می دهد که هنگامی که به نوک در فاصله L از نگهدارنده اعمال گردد باعث می شود که اتصال درست زیر نگهدارنده بشکند. وزن قراضه شارژ شده در هر ذوب به طور معمول 50 تا 100 برابر W است! این نسبت نیاز به حداقل رساندن تا حد ممکن اثرات خطرناک افتادن قراضه که مستلزم انتخاب دقیق توزیع وزن قراضه و شارژ مناسب کوره می باشد را نمایان می سازد.

گرید الکترو. توانایی الکترو برای مقاومت در برابر افتادن قراضه با استحکام الکترو افزایش می یابد. الکتروهای تزریقی (برای مثال گرید AGX) مستحکم تر از کیفیت معمولی (AGR) هستند. **جدول 2** نتایج عملیاتی 5 کوره قوس اروپایی، تماماً با قطر پوسته 6.4 متر را نشان می دهد، که در آنها از هر دو گرید الکترو در طی مدت 6 تا 12 ماه استفاده شده است (در برخی از موارد به صورت استفاده ناپیوسته).



شکل 5- مجموع مصرف ویژه الکترو، اندازه گیری شده در مقابل محاسبه شده (اندازه+خطاهای اندازه گیری را نشان می دهد)



شکل 6- پارامترهای موثر بر شکستگی اتصال بالا.

نرخ شکستگی در جدول 2 به صورت نسبت تعداد شکستگی اتصال بالا به تعداد الکترودهای اضافه شده به کوره، برحسب درصد تعریف می‌شود.

داده‌های جدول روندهای زیر را نشان می‌دهند:
- نرخ شکستگی اتصال بالا:

کوره	قطر پوسته m	وزن شارژ t	TJ% شکستگی		نسبت $\frac{AGR}{AGX}$
			AGR	AGX	
1	6.4	120	7.4	3.3	2.24
2	6.4	120	13.2	7.6	1.74
3	6.4	130	17.5	7.9	2.22
4	6.4	140	22.2	7.0	3.17
5	6.4	145	53.0	15.1	3.51
متوسط					2.58

- با استفاده از الکترودهای تزریقی در مقایسه با کیفیت معمولی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد؛

- تغییرات زیادی را از یک کوره به کوره دیگر حتی با همان اندازه پوسته و قطر الکترو نشان می‌دهد؛

- تمایل به افزایش با بالا رفتن وزن شارژ دارد (طبق توضیحات در بخش اثر قراضه).

در بسیاری از موارد، نرخ شکستگی کمتر مشاهده شده با الکترودهای تزریقی می‌تواند این گرید گرانتر را از لحاظ اقتصادی قابل توجیه کند، حتی هنگامی که گرافیت از ستون‌های شکسته بازیافت می‌شود.

کیفیت اتصال. توضیح کمی اثر کیفیت اتصال دشوار است. اما اگر بتوان اتصالات گرافیت را با همان دقت اتصالات کابل/باس-بار (آماده‌سازی سطح، گشتاور صحیح پیچ) انجام داد می‌توان به حداکثر استحکام در اتصال دست یافت. تمام تلاش‌ها برای جلوگیری از تلفات استحکام به علت گردوغبار بر روی رزوه‌ها و سطح انتهائی، رزوه‌های شکسته، و غیره باید با توجه به حساسیت بالای نرخ شکستگی به استحکام اتصال اتخاذ شود، همانطور که در بالا نشان داده شده است.

ارتعاشات. کوره‌ها متحمل ارتعاشات یا رزونانس قوی همراه با نرخ‌های شکستگی بالاتر متناظر با آنها می‌شوند. در برخی موارد اصلاح در عملکرد تنظیم یا تغییرات در عملکرد الکتریکی می‌تواند نرخ شکستگی را کاهش دهد. در موارد استثنایی یک بازسازی مکانیکی برای فرار از شرایط رزونانس ضروری تشخیص داده می‌شود.

برنامه قدرت. در طی مرحله ذوب کردن با فروبری الکترودها تشخیص داده شده که کار با قوس بلند با ضریب توان بالا برای ایجاد دهانه‌های بزرگ در اطراف الکترودها مفید است. فرض بر این است که در هنگامی که دهانه‌های بزرگ وجود دارند، بزرگی نیروهای نیروهای مکانیکی وارد بر ستون الکترودها در زمان نشست و سقوط قراضه کاهش می‌یابد، به تقلیل نرخ شکستگی منتج می‌شود.

انتخاب پارامترهای عملکرد برای برنامه قدرت

ورودی قدرت بالا با قوس بلند یا کوتاه. در طی توسعه تکنولوژی UHP کوره‌ها به دیواره‌ها و سقف نسوز مجهز شده‌اند. پس از اینکه دیواره‌ها در طی ذوب کردن در معرض قوس قرار می‌گرفتند محافظت از مواد نسوز تا آنجا که ممکن است برای باقیمانده مدت ذوب با اتخاذ قوس‌های کوتاه با ضریب توان کم و جریان بالا ضروری بود.

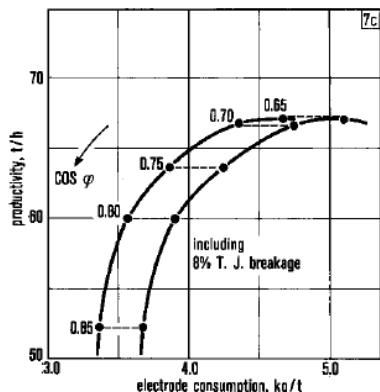
ابداع دیواره‌ها و سقف‌های خنک‌شونده با آب، همراه با ایجاد سرباره

پفکی، به فولادساز در درجه اول از نظر ضرورت محافظت از نسوز در عملیات کوره کمک کرده است. در نتیجه طول قوس می‌تواند

جدول 3- عملیات کوره فرضی برای مطالعه اثر ضریب توان بر بهره‌وری و مصرف الکترو.		
کوره با قطر پوسته 6.4 متر، WCP، الکترودهای 600 mm شارژ 3 سید قراضه: 55 تن + 40 تن + 25 تن = 120 تن		
عملیات		
پاور-آف برای تخلیه برای پاور-آن ذوب بعدی = 10 دقیقه		
زمانهای شارژ مجدد = 3 دقیقه		
تاخیرات = 1 ساعت در روز		
تمرین اثر تغییر دادن ضریب توان چیست؟		
ذوب کردن شامل $6m^3 O_2/t$ حداکثر ولتاژ: 580v انتخاب	$\cos \varphi$	تصفیه حرارت دادن تا $1680^\circ C$ ولتاژ: 480v $\cos \varphi$
1	0.85	0.75
2	0.80	0.70
3	0.75	0.65
4	0.70	0.60
5	0.65	0.55

منحنی دست راست شامل افزودن اثرات 8 درصد شکستگی اتصال بالا می‌باشد. منحنی‌ها نشان می‌دهند که بهره‌وری و مصرف الکتروود هر دو با افزایش ضریب توان (در محدوده 0.65 تا 0.85 برای ضریب توان) کاهش می‌یابند.

این مثال نشان می‌دهد که حداقل مصرف الکتروود تنها با افت قابل توجه بهره‌وری می‌تواند بدست آید. در بیشتر موارد بعید است



شکل 7c- بهره‌وری (تن محصول بر ساعت) و مصرف الکتروود برای ضریب توان‌های مختلف در جدول 3 (منحنی دست چپ بدون شکستگی، منحنی دست راست شامل 8٪ نرخ شکستگی اتصال بالا)

که حداقل هزینه کل یا حداکثر سود در ارتباط با عملیات در حداقل مصرف الکتروود باشد: احتمالاً حالت بهینه با استراتژی‌های دیگری حاصل خواهد شد. این استراتژی مطلوب، به راحتی قابل تعیین نیست، احتمالاً از یک کوره تا کوره دیگر و با زمان (یعنی با بازار) تغییر خواهد کرد.

مزایای راکتور اضافی. برای اجتناب از معایب و هنوز حفظ مزایای عملیات با ضریب توان پایین، یک راکتور در محدوده اندازه 1 تا 2 mΩ می‌تواند برای تغییر در اولیه، حداقل در زمان ذوب کردن در نظر گرفته شود. حداکثر تپ ولتاژ ترانسفورماتور باید برای عملیات با ضریب توان 0.7 شامل راکتور طراحی شود. به این ترتیب یک قوس بلند جریان پایین تر (مشابه ضریب توان 0.8 بدون راکتور) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این مزایای مصرف الکتروود کمتر را حفظ می‌کند، اما تلفات شدیدتر MW در شروع ذوب کردن را حذف می‌کند و نوسانات ولتاژ را کاهش می‌دهد. پس از ذوب کردن راکتور می‌تواند از مدار خارج شود به طوری که قوس‌های کوتاه‌تر لازم برای رسیدن به نرخ بالای افزایش دما هنوز هم بتواند مورد استفاده قرار گیرد.

برآورد می‌شود که هزینه‌های سرمایه‌ای بیشتر مربوط به این طرح می‌تواند بیش از بهبود حاصل در ذوب کردن سریعتر در اوایل ذوب کردن باشد.

جدول 4- مثال استفاده از راکتور اضافی.

راکتانس اضافی (mΩ)	تپ ولتاژ	cos φ (اولیه)	شروع ذوب کردن			پایان ذوب کردن		
			MW	kA	MVA	MW	kA	MVA
0	600	0.817	34.4	41.3	41.9	43.0	50.9	52.6
2	698	0.700	37.7	44.5	53.8 (1)	43.0	50.9	61.4 (2)

(1) این ارقام شامل راکتور است؛ در مورد (1) ترانسفورماتور کوره به تنهایی در 44.2MVA کار می‌کند؛ در مورد (2) ترانسفورماتور کوره به تنهایی در 50.4MVA کار می‌کند.

جدول 4 نمونه‌ای از اثرات طراحی کوره با یک راکتور اضافی را نشان می‌دهد. هر دو کوره در 43.0MW و 50.9kA در پایان ذوب کردن کار می‌کنند، اما کوره با راکتانس در 37.7MW در مقایسه با 34.4MW در کوره بدون راکتانس آغاز می‌کند.

مراجعه:

- 1) Valchev, A.: "Laws of rate of oxidation of the side surface of graphite electrodes for 10 tonne furnaces". Translation of Rudodobiv Met., 1969, 24 (4), p. 10/14.
- 2) Valchev, A.: "Efficient use of coated graphite electrode". U. I. E., Warsaw, Paper no. N 409.
- 3) Schwabe, W. E.: "The mechanics of consumption of graphite electrodes in electric steel furnaces". AIME Electric Furnace Conference, Toronto, 1971.
- 4) C o s h , T . A . : "Graphite electrode consumption in electric arc furnaces". J. Iron & Steel Soc., March 1957, p. 328/32.
- 5) Bowman, B.: Unpublished data from Union Carbide Europe, 1975.
- 6) Ravenscroft, J., and M. Preston: "Distribution of electrode consumption in an arc furnace". Metallurgica, December 1959.
- 7) Bowman, B.: "Measurements and theory of electrode tip wear". U. I. E. Congress, Warsaw, 1972, Paper no. N 408.
- 8) Okamura, M., M. Watanabe, K. Usui and J. Kon: "UHP arc furnace electrodes". Paper no. N 404.
- 9) Jordan, G. R. : "Electrode erosion in electric arc furnaces - the controlling factors". Ironmaking & Steelmaking, 1978, no. 4, p. 177/83.
- 10) Bowman, B.: Unpublished data from Union Carbide Europe, 1973.