کوره‌های قوس الکتریکی DC – گذشته، حال و آینده[1]

ترجمه: محمدحسین نشاطی

چکیده

کوره قوس DC برای اولین بار سی سال پیش [دهه 1980] **بصورت صنعتی برای ذوب تصفیه‌ای** (smelting) **نرمه‌های کرومیت جهت تولید فروکروم (FeCr) مورد استفاده قرار گرفت. از آن زمان، از این نوع کوره‌ها برای کاربردهای مختلفی از جمله ذوب تصفیه‌ای ایلمنیت برای تولید سرباره تیتانیا و چدن خام، بازیابی کبالت از سرباره ذوب‌کننده‌های تصفیه‌ای فلزات غیرآهنی و ذوب تصفیه‌ای سنگ‌های لاتریت نیکل برای تولید فرونیکل (FeNi) استفاده شده است. قدرت این کوره‌ها از 12 MW تا 72 MW برای فروکروم و تا 80 MW برای فرونیکل افزایش یافته است. بزرگترین این کوره‌ها به دو الکترود احتیاج دارند تا بتوانند جریان کافی برای تولید این قدرت زیاد را داشته باشند. مروری بر کوره‌های مختلف قوس DC در حال استفاده، همراه با بحث در مورد راه‌های احتمالی افزایش بیشتر قدرت این کوره‌ها در آینده ارائه می‌شود.**

مقدمه و تاریخچه

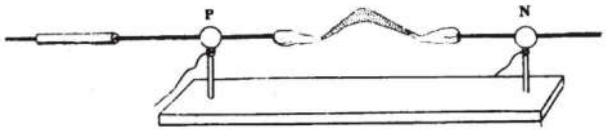
شرح اولیه یک قوس توسط هامفری دیوی

اولین توصیف کتبی شناخته‌شده از قوس الکتریکی ساخته انسان از کارهای هامفری دیوی در اوایل دهه 1800 نشات می‌گیرد. آزمایش‌های اولیه وی در سال 1800، تنها چند ماه پس از ابداع باتری برقی توسط ولتا، مستلزم ایجاد جرقه در هنگام ایجاد و قطع یک مدار الکتریکی شد.

"من فهمیدم که این ماده [ذغال چوب کاملا سوخته] دارای خواص یکسان با اجسام فلزی در ایجاد شوک و جرقه در هنگام محیط اتصال بین دو سر پیل گالوانیک سیگنور ولتا است. هنگامی که ذغال چوب داغ است، جرقه واضح است." [1]

سر همفری دیوی در کتاب خود در سال 1812، عناصر فلسفه شیمیایی [2]، اولین توصیف و نمودار (نشان داده شده در **شکل 1**) از شعله کمانی افقی بلند را ارائه می‌دهد که آنرا "قوس (arc)" نام می‌نهد.

"وقتی قطعات ذغال چوب با طول حدود یک اینچ و قطر حدود یک ششم اینچ به یکدیگر نزدیک شدند (در سی-امین و چهلمین قسمت از یک اینچ)، جرقه درخشانی ایجاد شد، و بیش از نیمی از حجم ذغال چوب به سفیدی مشتعل شد و با عقب کشیدن نقاط از یکدیگر، تخلیه پیوسته از طریق هوای گرم، در فضایی حداقل برابر با چهار اینچ، ایجاد درخشان‌ترین کمان نور بالا رفته، گسترده، و مخروطی شکل در وسط صورت گرفت. وقتی هر ماده‌ای وارد این کمان می‌گردید، فوراً مشتعل می‌شد؛ پلاتینا [آلیاژی از پلاتین] به آسانی موم در شعله یک شمع معمولی ذوب شد؛ کوارتز، یاقوت کبود، منیزیا، آهک، همگی وارد همجوشی شدند؛ تکه‌های الماس، و خرده‌های ذغال چوب و گرافیت، به سرعت ناپدید شدند، و به نظر می‌رسید که در آن



شکل 1. تخلیه الکتریکی "کمان" افقی، بصورتی که در کتاب "عناصر فلسفه شیمیایی" تالیف سر همفری دیوی نشان داده شده است.

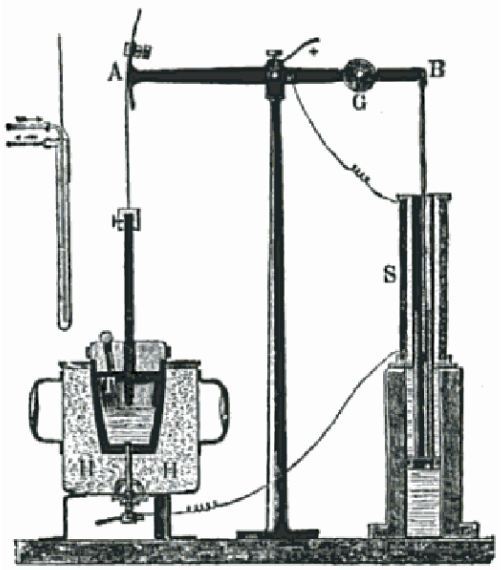
[1]- Rodney T. Jones, DC ARC FURNACES – PAST, PRESENT, AND FUTURE, 2014.

تبخیر می‌شوند، حتی هنگام برقراری اتصال در محل تخلیه شده توسط پمپ هوا؛ اما هیچ مدرکی مبنی بر اینکه قبلاً ذوب شده‌اند وجود نداشت. " [2]

کوره قوس الکتریکی DC توسط سر ویلیام زیمنس

ایده پشت کوره قوس الکتریکی DC (جریان مستقیم) برای مدت زمان بسیار طولانی وجود داشته است. استفاده از آن برای ذوب فله ای فلزات حداقل به سال 1878 میلادی باز می‌گردد، زمانی که سر ویلیام زیمنس از کوره قوس DC از یک کاتد گرافیتی عمودی، با قوس منتقل‌شده به مذاب در تماس با یک آند پایین خنک‌شده با آب استفاده کرد (**شکل 2**) [3].

حدود دو دهه پس از آن، اولین کوره قوس الکتریکی AC (جریان متناوب) ابداع شده توسط پل هرولت، ثبت اختراع شد و اولین بار در لا پراس، فرانسه، در سال 1900 شروع به کار کرد. اولین کوره AC در آمریکا در سال 1906 در فیلادلفیا نصب شد. از آن پس، تکنولوژی کوره الکتریکی بدلیل استفاده از جریان AC برای انتقال انرژی کارآمد از نیروگاه‌های بزرگ مرکزی (به دنبال پیشرفت‌های انجام شده توسط نیکولا تسلا و جورج وستینگهاوس در سال‌های 1887 و 1888) و استفاده از ترانسفورمرهای کاهش پله-ای محلی برای تأمین جریان زیاد مورد نیاز در کوره‌ها تقریباً بطور کامل بر پایه AC تبدیل شد.



شکل 2. کوره DC ثبت اختراع شده توسط سر ویلیام زیمنس در سال 1878.

تجاری‌سازی قابل توجه تکنولوژی کوره DC در دهه 1990 رخ داد، هنگامی که تقاضای زیادی برای کوره‌های قوس DC برای ذوب کردن قراضه فولاد وجود داشت، به دنبال توسعه یکسوکننده‌های پر توان حالت جامد. در همین زمان حدود 80 کوره قوس الکتریکی DC در نیمکره شمالی ساخته شد.

ویژگی‌های کوره‌های قوس DC

کوره قوس DC بطور معمول شامل یک پوسته استوانه‌ای فولادی آستر شده با مواد نسوز، با الکترود گرافیتی مرکزی (کاتد) قرار گرفته بصورت عمودی از یک دهانه در مرکز سقف است. اتصال آند در کف کوره در تماس مستقیم با لایه فلز مذاب است که توسط لایه‌ای از سرباره مذاب پوشانده شده است. این انرژی با استفاده از قوس پلاسمای باز که بین نوک پایینی کاتد و سطح بالای سرباره مذاب برقرار می‌گردد، تأمین می‌شود. حداقل یک قسمت مرکزی از سطح سرباره باز (پوشیده نشده توسط مواد خوراک) است. به علت اینکه تامین انرژی کوره از نوع الکتریکی است، دمای بسیار بالایی (>1500°C) قابل دستیابی است. حمام باز امکان می‌دهد تا مواد خوراک ریز، بدون ریسک مسدودشدن گاز ناشی از واکنش‌های شیمیایی به داخل کوره تغذیه شوند. (بر خلاف کوره بلند، یا کوره قوس غوطه‌ور، که مواد خوراک درشت به منظور تامین بستر متخلخل لازم است تا امکان دهند گازهای واکنش نفوذ کرده و از منطقه واکنش خارج شوند.)

کانه ریزتر و نیاز به دمای بسیار بالا منتج به انتخاب کوره با قوس باز (AC یا DC) می‌شود. لازم به ذکر است که کانه‌های ریز امکان استفاده از راکتور بستر سیال برای پیشگرمایش یا پیش–احیا را فراهم می‌آورند و این می‌تواند باعث صرفه‌جویی قابل-توجهی در مصرف انرژی در هنگام استفاده با یک کوره قوس DC شود.

در مورد کوره‌های قوس باز، کوره های DC چند مزیت نسبت به کوره‌های AC دارند. یک مزیت خاص در کوره دایره‌ای این است که در مورد کوره قوس DC تک الکترودی دافعه قوس وجود ندارد، در مقایسه با مورد AC که در آن قوس‌ها یکدیگر را دفع می‌کنند، به سمت دیواره‌ها می‌زند و منجر به ایجاد مناطق گرم (هات اسپات) در نواحی دیواره‌های جانبی در نزدیکترین مجاورت به

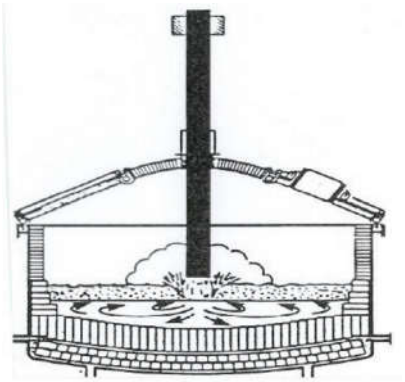
الکترودها می‌شوند. کوره‌های DC همچنین مصرف الکترود کمتری دارند. در کوره‌های DC بزرگ، جریان الکتریکی بالاتری را می‌توان در هر الکترود منتقل کرد (یا از الکترودهای کوچکتر می‌توان برای همان جریان استفاده کرد)، بدلیل "اثر پوسته‌ای" AC که در آن جریان در محیط بیرونی الکترودها متمرکز است.

برخی از کاربردهای گذشته و فعلی کوره‌های قوس DC

پیشرفت‌های اولیه در کاربرد کوره‌های قوس DC برای ذوب تصفیه‌ای کرومیت

کشور آفریقای جنوبی از نظر داشتن ذخایر زیادی از کرومیت بسیار خوش‌اقبال است. متأسفانه بسیاری از "کرومیت‌های ترانسوال" بسیار شکننده هستند و در نتیجه انباشته‌های زیادی از این کانه‌های ریز موجود است. این مسئله چالش خاصی را برای شرکت مینتک (Mintek) مطرح کرد تا راه‌حلی برای این مشکل ارائه کند. پیتر جوچنس از مینتک، "کوره‌های پلاسما" را به عنوان یک راه‌حل ممکن برای مشکل "نرمه‌های کرومیت" معرفی کرد. شرکت مینتک و شرکت میدلبورگ (Middelburg Steel & Alloys، اکنون بخشی از شرکت سامانکور کروم) آزمایش‌های ذوب تصفیه‌ای بر روی کوره‌های پلاسمای قوس منتقل‌شده کارخانه آزمایشی ترونیک (Tetronic) در انگلستان را در سال 1979/80 انجام دادند. این آزمایش‌ها از نظر متالورژیکی موفق بودند، اما افزایش مقیاس این نوع کوره به کوره‌های بسیار بزرگ مورد نیاز برای صنعت فروآلیاژها دشوار به نظر می‌رسید.

تقریباً در همین زمان، و همچنین در دهه 1970، شرکت ASEA در سوئد یکسوکننده‌های تریستور با قدرت بالا را تولید کرد. Sven-Einar Stenkvist در مورد تبدیل کوره‌های قوس باز AC به DC، عمدتاً برای فولادسازی، تحقیق کرد. وی ایده استفاده از قوس‌زنی الکترود کاتدی گرافیتی بر روی حمام سرباره/فلز به عنوان آند را اجرا کرد و یک بستر رسانای الکتریکی و یک الکترود گرافیتی توخالی برای ذوب تصفیه‌ای سنگ آهن ریز دانه ابداع نمود، که در آن مواد خوراک از طریق الکترود به بستر قوس پلاسما تغذیه می‌شدند. این کوره در **شکل 3** نشان داده شده است.



شکل 3. کوره قوس الکتریکی DC شرکت ASEA

نیک بارکزا از شرکت مینتک هم‌افزایی بین متالورژی را که در طی کار آزمایشی در واحد تترونیک اثبات شده بود، و قابلیت افزایش مقیاس کوره قوس DC شرکت ASEA را تشخیص داد. این جایی است که در آن کاربرد الکترودهای گرافیتی از پیش‌پخته در کوره قوس DC به انجام رسیده بود. مینتک برای پشتیبانی از این پیشرفت، در سال 1983 یک کوره قوس DC با توان 1.2 MW ساخت. از آن زمان، این طرح مفهومی در تعدادی از زمینه ها بکار رفته است.

اولین کاربرد صنعتی کوره قوس DC برای ذوب تصفیه‌ای زمانی به انجام رسید که شرکت میدلبورگ یک کوره AC موجود در Palmiet Ferrochrome (اکنون شرکت Mogale Alloys) در Krugersdorp را به کوره قوس 12 DC MW با طراحی ASEA در سال 1984 تبدیل کرد.

ذوب تصفیه‌ای کرومیت

مینتک تحقیق در مورد روش‌های ذوب جایگزین برای تولید فروآلیاژها را از اواسط تا اواخر دهه 1970 آغاز کرد [4]. صنعت رو به رشد فروآلیاژها در آفریقای جنوبی با این مشکل روبرو شد که چگونه با مقدار قابل‌توجهی از مواد معدنی ریز (<6mm) که از سنگ معدن کرومیت شکننده محلی ایجاد می‌گردد، مقابله شود. در سال 1976، مطالعات مربوط به استفاده احتمالی از ذوب پلاسما (تکنولوژی انتقال قوس DC) آغاز شد، با توانایی بالقوه آن در استفاده مستقیم از مواد خوراک ریز بدون آگلومراسیون پرهزینه تحریک شد. یک مزیت دیگر این بود که برخلاف کوره قوس غوطه‌ور معمولی، پارامترهای متالورژیکی و الکتریکی فرآیند ذوب مستقل هستند [5].

در سال 1979، شرکت میدلبورگ، از مینتک خواست تا در آزمایش‌های مربوط به ذوب پلاسما در واحد تترونیک در انگلستان شرکت کند. پس از آن، مینتک متعهد شد خودش به تحقیق در مورد تکنولوژی پلاسما، و نشان دادن مزایای آن به صنعت، به‌ویژه توانایی ذوب مواد ریز دانه بپردازد. تجهیزات برای این منظور در بخش‌های پایلوت شرکت مینتک نصب شد و در ابتدا بر پایه منبع تغذیه 100 kVA، و بعد بر روی 3.2 MVA دیگر بود. اولین فروکروم در سال 1979 در یک کوره قوس DC مقیاس کم تولید شد. نصب کوره‌های آزمایشی بزرگ در بخش پایلوت پیرومتالورژی شرمت مینتک، بخش 1، گسترش ساختمان اولیه را می‌طلبید و در سال 1982 افتتاح رسمی نه تنها نشانه اتمام عملیات ساختمانی بلکه همچنین افتتاح کوره بزرگتر 3.2 MVA بود. واحد آزمایشی (پایلوت) کوره قوس الکتریکی 1 تن در ساعت در سال 1984 راه‌اندازی شد.

در نتیجه کار آزمایشی موفقیت‌آمیز اولیه، مینتک و میدلبورگ یک برنامه بلندمدت تحقیق‌وتوسعه برای توسعه این تکنولوژی بصورت تجاری را به عهده گرفتند. بر اساس کار آزمایشی در کوره‌های 0.5–0.3 MW با قطر 2–1 متر، کوره قوس منتقل‌شده اولیه با مقیاس صنعتی 16 MVA (12 MW) در کارخانه Krugersdorp (Palmiet Ferrochrome) شرکت میدلبورگ در اواخر سال 1983 نصب شد، سپس در سال 1988 به 40 MVA (33 MW~) ارتقا یافت. یک کوره 10 MW دیگر بعداً در همان محل (برای شرکت Mogale Alloys) ساخته شد.

کرومیت به همراه برخی از انواع کربن برای تولید فروکروم که با خروجی مقداری سرباره و گاز CO همراه است ذوب می‌شود. کوره قوس DC با پیکربندی قوس باز، حمام باز کار می‌کند، بنابراین هیچ میزان شارژ کوره انباشته شده‌ای وجود ندارد که از طریق آن گازهای واکنش نیاز به خروج داشته باشند. فقط یک حمام مذاب وجود دارد که روی آن مواد ریز ریخته می‌شوند و تقریباً بلافاصله در حمام مذاب همگون می‌شوند، ذوب کردن و حل شدن در فاز سرباره که در آن واکنش‌ها رخ می‌دهند. این کوره نیازی به کک ندارد، زیرا هیچ شارژ کوره‌ای بر روی حمام نیست، بنابراین به تخلخلی که در غیر این صورت لازم باشد، احتیاج ندارد. این مزیت بسیار مهمی است، به این دلیل که استفاده از مواد احیاکننده ارزان قیمت را امکان‌پذیر نموده و از این طریق از هزینه زیاد و کمیابی نسبی کک اجتناب می‌شود.

توان تأمین‌شده برای کوره به میزان زیادی مستقل از ترکیب سرباره است، زیرا قوس الکتریکی باز وجود دارد که امکان تنظیم مقدار توان ورودی به کوره را مستقل از مقاومت الکتریکی سرباره می‌دهد. این موضوع انعطاف‌پذیری اضافی و درجه آزادی اضافی تغییر در ترکیب محدود نشده سرباره توسط خواص الکتریکی را فراهم می‌سازد، بطوری که اکتیویته شیمیایی فلزات مهم را می‌توان برای دستیابی به بازیابی بیشتر کروم تغییر داد. افزایش معمول در بازیابی کروم می‌تواند از حدود 85 درصد در کوره AC تا حدود 95 درصد در کوره قوس DC باشد – یک افزایش بسیار چشمگیر. علاوه بر این، کوره قوس DC مصرف الکترود کمتری دارد. فرآیند قوس DC امکان می‌دهد تا از نرمه‌های کرومیت آگلومره نشده و ذغال سنگ ارزانتر غیر کک سازی استفاده شود. این تکنولوژی کوره به عنوان یکی از گزینه‌های کمترین هزینه برای تولید فروکروم لحاظ می‌شود.

بر پایه عملیات موفق کوره قوس DC برای ذوب تصفیه‌ای فروکروم در کارخانه Krugersdorp شرکت میدلبورگ فروکروم یک کوره قوس DC با توان 44 MW (62 MVA)، بزرگترین از این نوع را در میدلبورگ در سال 1997 ساخت. این کار در سال 2009 با یک کوره 60 MW دیگر در میدلبورگ، اکنون بزرگترین کوره قوس DC در آفریقای جنوبی، دنبال شد [6]. کوره 44 MW متعاقباً به 60 MW ارتقا یافت.

ذوب تصفیه‌ای ایلمنیت

ایلمنیت برای تولید سرباره تیتانیا (عمدتاً برای تولید رنگدانه) و چدن خام ذوب تصفیه‌ای می شود. ایلمنیت از ماسه‌های ساحلی در آفریقای جنوبی برای استفاده مستقیم برای تولید رنگدانه یا روتیل مصنوعی بسیار کم عیار است. در عوض، برای تولید سرباره

تیتانیای مناسب برای تولید رنگدانه های TiO_2 ذوب تصفیه‌ای می‌شود. واکنش اصلی مربوطه به صورت ساده شده زیر نشان داده می‌شود:

$$FeO.TiO_2 + C = TiO_2 + Fe + CO \qquad (1)$$

هدایت الکتریکی زیاد سرباره‌های تیتانیا و کنترل دقیق مورد نیاز ترکیب سرباره بطور موثری استفاده از تکنولوژی قوس غوطه-ور معمولی را برای ذوب ایلمنیت رد می‌کند. Richards Bay Minerals (RBM) از تکنولوژی فرآیندی استفاده می‌نماید که در ابتدا توسط شرکت Quebec Iron & Titanium (QIT Fer et Titane) از سورل، کانادا با استفاده از کوره‌های مستطیلی شش الکترودی خطی در حالت حمام آزاد با عمل قوس باز توسعه یافته است.

جایگزین دیگر این فرآیند، بر پایه تکنولوژی کوره قوس الکتریکی DC تک الکترود توخالی، توسعه یافته توسط شرکت مینتک و Anglo American Corporation برای پروژه Namakwa Sands است. مشکلی که باید حل می‌شد یافتن تجهیزات جایگزین برای تولید سرباره بسیار رسانا بود. بدلیل اینکه سرباره بسیار رسانا است، بدست آوردن گرمایش مقاومتی کافی در سرباره مذاب امکان‌پذیر نیست و بنابراین استفاده از قوس باز ضروری است. (این دلیل بسیار متفاوتی برای استفاده از کوره قوس DC جهت نیاز به آن برای ذوب تصفیه ای نرمه‌های کرومیت است.)

مرحله اول کار آزمایشی، در سال 1990، شامل چهار آزمایش دسته‌ای 15 kg با توان 30 kW بود، و نشان داد که این فرآیند امکان‌پذیر است و خنک کردن آستر مورد نیاز می‌باشد. مرحله دوم، در سال 1991، شامل ذوب تصفیه‌ای دو تن ایلمنیت، با تغذیه پیوسته با 50 kg/h، در سطح توان 100 kW بود. این شیوه سرباره‌ای طبق مشخصات و فلزی با غلظت بالای Ti تولید کرد. مرحله سوم، همچنین در سال 1991، شاهد ذوب تصفیه‌ای 35 تن ایلمنیت، با تغذیه پیوسته با سرعت 300 kg/h، در سطح توان 500 kW (تا 1 MW)، با تولید سرباره و فلز طبق گرید بود. مرحله چهارم، در سال 1995، 200 تن ایلمنیت را با سرعت 1 t/h و 1.5 MW فرآوری کرد و در درجه اول درگیر تدوین شیوه راه‌اندازی کوره، کنترل فرآیند و آموزش اپراتور بود.

پس از کار آزمایشی پایلوت پلنت با توان 0.5 MW در کوره‌ای به قطر 1.8 متر، اولین کوره قوس DC با توان 25 MW در Namakwa Sands در سال 1994 و پس از آن کوره قوس DC با توان 35 MW در سال 1998 ساخته شد. کوره اول (25 MW) در سال 1995 تولید سرباره ایلمنیت و چدن خام را آغاز کرد و کوره دوم (35 MW) در سال 1999 به تولید رسید [7].

بر اساس این موفقیت، بدون نیاز به کار آزمایشی بیشتر در مینتک، دو کوره دیگر DC با توان 36 MW برای ذوب تصفیه‌ای ایلمنیت برای شرکت Ticor SA، در نزدیکی Empangeni ساخته شده، و در سال 2003 راه‌اندازی شدند.

یک کوره 36 MW دیگر توسط شرکت Bateman ساخته و در سال 2009 برای شرکت CYMG در چین راه‌اندازی شد.

ذوب تصفیه‌ای لاتریت نیکل

لاتریت‌ها و سایر کانه‌های اکسیدی نیکل بخش بسیار مهمی از ذخایر جهانی نیکل را تشکیل می‌دهند. در تولید معمولی فرونیکل از این کانه‌ها، مواد بسیار ریزی (نرمه) تولید می‌شود که به راحتی نمی‌توان مستقیماً در کوره‌های AC سه الکترودی یا شش الکترودی خطی موجود انطباق داد. تکنولوژی کوره قوس DC امکان می‌دهد تا ذرات کانه با اندازه کمتر از 1 mm بطور مستقیم فرآوری شوند، در نتیجه بازیابی کلی نیکل را بدون نیاز به روش گران آگلومره کردن بهبود می‌بخشد. بدلیل رطوبت زیاد لاتریت‌ها، کانه‌ها قبل از ذوب تصفیه‌ای باید خشک و تکلیس شوند. صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی با پیش–احیای کانه ها حاصل می-شود.

مینتک از سال 1993 مشغول تولید فرونیکل تصفیه نشده از نیکل حاوی لاتریت در کوره‌های قوس DC بوده است. در این فرآیند، مواد لاتریتی به همراه یک ماده احیاکننده کربنی، به منطقه مرکزی حمام مذاب کوره قوس DC استوانه‌ای تغذیه می‌شوند. طیف ترکیباتی گسترده‌ای از لاتریت‌های نیکل را می‌توان از این طریق ذوب تصفیه‌ای کرد. عملکرد انعطاف‌پذیر کوره قوس DC

(مخصوصاً وابستگی کمتر آن به خواص الکتریکی سرباره، بدلیل عملیات با قوس باز، علاوه بر قابلیت کار در دمای بهینه سرباره، بدلیل نحوه عملیات حمام باز) امکان فرآوری موفقیت‌آمیز کانه ها با نسبت SiO_2/MgO بین 1.2 و 3.0 و همچنین کانه‌های حاوی تا 30 درصد جرمی آهن را فراهم می‌سازد (که تمایل به پفکی‌سازی سرباره در کوره الکترود غوطه‌ور معمولی دارد). می‌توان یک لایه منجمد را بین حمام مذاب و لایه نسوز، به منظور به حداقل رساندن فرسایش نسوز (مخصوصاً در محتوی SiO_2 بالا) حفظ کرد. ذوب تصفیه‌ای لاتریت نیکل برای تولید فرونیکل از سال 1993 تا 2006 با استفاده از طیف وسیعی از مواد خوراک در شرکت مینتک مورد آزمایش قرار گرفت [8].

اولین کاربرد تجاری فرآیند FeNi DC یک کوره قوس DC 12 MW در اورسک در اورال جنوبی روسیه بود که در سپتامبر 2011 راه‌اندازی شد [9].

حال

شرکت کازکروم

کازکروم (یک تولیدکننده فروکروم در قزاقستان) در سال 2007 قرارداد کار آزمایشی ذوب تصفیه‌ای با مینتک را بست. بر این اساس و سایر ورودی‌های طراحی ارائه شده توسط مینتک در سال 2009، شرکت SMS چهار کوره قوس DC با توان 72 MW را در Aktobe، قزاقستان برای راه‌اندازی در سال 2013 ساخت. هرکدام از این کوره‌ها دارای تعویض‌کننده آنلاین خودکار الکترود برای الکترودهای گرافیتی قطر 75 cm و یک سقف آویزان می‌باشد.

کونیامبو نیکل

بزرگترین کاربرد تکنولوژی ذوب تصفیه‌ای کوره DC، پروژه Koniambo Nickel در کالدونیای جدید است – سرمایه‌گذاری مشترک بر روی زمین بکر (گرین فیلد) بین شرکت Société Minière du Sud Pacifique (SMSP) و شرکت Glencore Xstrata. این فرآیند بر اساس کانه آسیاب شده، بسترهای سیال و دو کوره قوس الکتریکی DC دو الکترودی با توان 80 MW با پیشگرم‌کننده‌های سیکلونی است. هر الکترود گرافیتی با قطر 71 cm دارای منبع تغذیه (ترانسفورمر و یکسوکننده) جداگانه MW 40 می‌باشد. کار آزمایشی ذوب تصفیه‌ای این پروژه در اواخر دهه 1990 در مینتک انجام شد. هدف کارخانه ذوب تصفیه‌ای کونیامبو، که حدود 800 نفر را بکار می‌گیرد تولید 60 kt/a نیکل به صورت FeNi از یکی از بزرگترین و پرعیارترین ذخایر نیکل لاتریت در جهان است. راه‌اندازی کارخانه ذوب تصفیه‌ای در سال 2012 آغاز شد و اولین فلز از کوره در آوریل 2013 خارج شد [10].

فهرست کوره‌های قوس DC مورد استفاده برای کاربردهای ذوب تصفیه‌ای در **جدول I** آورده شده است.

جدول I. واحدهای نصب شده کوره DC

فرآیند	سال	کوره ها
فولاد		> 80 DC furnaces, تا 175 MW
FeCr	1985	10MW, 30MW, 60MW, 60MW, (4 x 72MW)
TiO2	1994	25MW, 30MW, 35MW, 36MW, 36MW
Co	2001	40MW
غبار فولاد ضد زنگ	2004	32MW
بازیافت باطری	2008	2.5MW
FeNi	2011	12MW, (2 x 80MW)

آینده

کوره‌های قوس بسیار بزرگ DC در حال حاضر در صنعت فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال، در سال 2007، شرکت توکیو استیل، ژاپن، بزرگترین کوره قوس الکتریکی جهان (EAF) را به دانیلی سفارش داد. این کوره از ظرفیت فولاد مذاب 420 تن برخوردار است و یک کوره قوس الکتریکی DC دو کاتدی است و دارای چهار الکترود پایین (آند) است. منبع تغذیه شامل 8 ترانسفورمر MVA 32 می‌باشد که در مجموع MVA 256 را تشکیل می‌دهند. توان عملیاتی کوره MW 175 می‌باشد. دانیلی

ادعا می‌کند که این کوره بر محدودیت‌های توان ورودی EAF غلبه می‌کند و مصرف الکترود گرافیتی را در مقایسه با کوره‌های AC و کوره‌های DC تک کاتدی کاهش می‌دهد و اختلالات بر روی شبکه برق را بدلیل اثر دو قوس به حداقل می‌رسد.

شکل 4. کوره قوس DC دو الکترودی با توان 175 MW شرکت توکیو استیل.

بزرگترین کوره DC مورد استفاده در صنعت فولاد (175 MW) نشان داده شده در **شکل4**، به میزان قابل‌ملاحظه‌ای بزرگتر از بزرگترین کوره DC ذوب تصفیه‌ای (اکنون 80 MW) است. شاید صنعت فولاد مسیر گسترش آتی ظرفیت را در جای دیگری هدایت کند.

طراحی نظری کوره‌های بسیار بزرگ

اقتصاد مقیاس فشار بی‌امانی را به سمت کوره‌های بزرگتر در صنعت فروآلیاژ ایجاد می‌کند. اما، نوع AC کوره قوس غوطه‌ور چنانکه اکنون بطور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرد دارای محدودیت‌های اساسی خاصی است و بنابراین تبدیل به سایر اشکال کوره محتمل است. پس از غلبه بر این "مانع AC"، افزایش مقیاس احتمالاً شامل الکترودهای بزرگتر و الکترودهای بیشتری خواهد بود. این می‌تواند در کوره‌های DC قوس باز یا کوره‌های قوس غوطه‌ور استفاده شود. قابلیت افزایش مقیاس الکترودهای سودربرگ تنها پس از غلبه بر این مانع AC و آزمودن کوره‌های بزرگتر در عمل مشخص خواهد شد.

بارکر و بارکزا و همکاران [11،12] بیان کردند که چگونه انرژی DC می‌تواند بر برخی از محدودیت‌های متحمل‌شده در کوره‌های قوس غوطه‌ور AC مورد استفاده در تولید فروآلیاژ، یعنی ظرفیت انتقال جریان الکترودها، و اثر متقابل در کنترل الکترودها غلبه کرد.

محدوده جریان I (بر حسب kA) منتقل شده توسط یک الکترود سودربرگ با قطر d (بر حسب m) توسط معادله (2) ارائه شده است.

$$I = 55\, d^{1.5} \qquad (2)$$

الکترودهای گرافیتی می‌توانند تقریباً دو برابر جریان الکترودهای سودربرگ با قطر یکسان را منتقل کنند.

یک الکترود سودربرگ بزرگتر به دو دلیل اصلی استعداد دارد بیشتر از یک الکترود کوچکتر مشکل ایجاد کند: نسبت استحکام به وزن با بزرگ‌تر شدن الکترود رو به وخامت می‌رود و اثر پوسته‌ای (تمایل جریان متناوب برای ماندن در سطح بیرونی هادی) توزیع جریان عبوری از الکترود را منحرف می‌کند. اثر پوسته‌ای فقط AC را شامل می‌شود، نه DC. در 50 Hz، عمق پوسته برای الکترودهای سودربرگ حدود 35 cm و برای الکترودهای گرافیتی حدود 15 cm است. انتظار می‌رود الکترودهای بزرگ در کوره DC بهتر رفتار کنند.

احتمالاً بزرگترین چالش برای اپراتور کوره فروآلیاژ با الکترود سودربرگ، موازنه سرعت‌های پخت و لغزش الکترودها، به صورتی که برای حفظ طول الکترود لازم است، می‌باشد. الکترودهای از قبل پخته‌شده و گرافیتی این محدودیت را ندارند، زیرا می‌توان مطابق نیاز آنها را بیشتر یا کمتر لغزاند.

چون ضریب توان بطور معمول با افزایش اندازه کوره AC کاهش می‌یابد، احتمالاً اثر متقابل یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌ها در ساخت کوره‌های AC بزرگتر است. القای الکترومغناطیسی فقط با جریان متناوب، راکتانس ایجاد می‌کند. بنابراین، با توان نوع

DC، هیچ محدودیتی از طرف راکتانس وجود ندارد. بطور خاص، با یک کوره DC چند الکترودی، هر الکترود بصورت جداگانه رفتار می‌کند – یعنی اثر متقابل وجود ندارد.

به علت اینکه ولتاژ روی الکترودهای مجاور در کوره DC چند الکترودی مشابه است، و الکترودها از نظر عملیاتی تاثیر متقابل بر یکدیگر ندارند، در صورت بروز نیاز می‌توانند به صورت نظری نزدیکتر به هم نصب شوند. همچنین شایان ذکر است که برخلاف وزش قوس به طرف بیرون در کوره AC، جهت وزش قوس در کوره DC چند الکترودی به سمت داخل است.

از آنجا که ماهیت تولید برق در پاسخ به چالش‌های زیست‌محیطی تغییر می‌یابد و از انرژی تجدیدپذیر بیشتری استفاده می‌شود، احتمالاً قابلیت تغییر بار (انرژی) کوره مزایای اقتصادی قابل‌توجهی به همراه خواهد داشت و بنابراین ممکن است این روش به یک روش معمول تبدیل شود با وجود عوامل زحمت‌زائی که بر عملیات کارخانه تحمیل می‌کند. همچنین به نظر می‌رسد کوره‌های بزرگتر ممکن است در هنگام کار با افت توان و قطع برق برای مدت زمان طولانی‌تری بهتر از کوره‌های موجود باشند و کوره‌های DC بتوانند مزایای قابل‌توجهی را در هنگام نوسان آسان و سریع بار ارائه دهند.

بارکر [11] یک طرح نظری کوره 6 الکترودی را با الکترودهای چیده شده در یک دایره پیشنهاد داد. هر الکترود با استفاده از مدول منبع تغذیه خودش با استفاده از توان DC تغذیه می‌شود. بارکر پیشنهاد می‌کند که شاید در آینده بتوان به الکترودهای سودربرگ با قطر 3.0 m (تنها حدود 50 درصد بزرگتر از بزرگترین الکترودهایی که اکنون در حال استفاده هستند) اندیشید، که قادر به انتقال جریان بیش از 250 kA باشند. آنگاه یک کوره بزرگ قوس الکتریکی DC با 6 الکترود می‌تواند توان کل بیش از 200 MW داشته باشد.

پرسش‌هائی باقی‌مانده است که چقدر جریان را می‌توان از پایین کوره حذف کرد، و چه مدت می‌توان چنین اتصالاتی را در حال کار نگهداشت.

نتیجه‌گیری

کوره‌های قوس DC ویژگی‌های شگرفی دارند که طی سی سال گذشته در عملیات صنعتی به اثبات رسیده است. آنها انطباق‌پذیری خوبی با مواد خوراک ریزدانه دارند (بدلیل حمام باز). آنها به کک یا ذغال‌سنگ احتیاج ندارند (هیچ تخلخل شارژی لازم نیست). کوره‌های قوس DC می‌توانند مواد خوراک را با طیف گسترده‌ای از ترکیب فرآوری کنند (بدلیل درجه آزادی اضافی که از طریق یک قوس باز تأمین می‌شود)؛ این امکان انتخاب ترکیب شیمیائی را برای بهره‌مندی متالورژیکی فراهم می‌کند. این کوره‌ها از نظر هندسی ساده و ظریف هستند و از این طریق می‌توان فرسایش ناهموار روی دیواره‌های جانبی را کاهش داده و به تقلیل هزینه منتج شد.

اما، برخی اشکالات هم وجود دارد. بازدهی حرارتی با خروج گاز خروجی از کوره کاهش می‌یابد (مگر اینکه مقداری از این انرژی بازیابی شود). عدم وجود شارژ کوره امکان گرفتن مواد فرار را فراهم نمی‌آورد.

کوره‌های قوس الکتریکی DC اکسیری برای همه مشکلات متالورژیکی نیستند، اما بسیار مناسب برای تعدادی از فرآیندهای ذوب تصفیه‌ای احیائی هستند که در آنها با موفقیت در تعدادی از زمینه‌های صنعتی بکار گرفته شده‌اند و کاربردهای بسیار بعدی پیش‌بینی می‌شوند.

منابع:

1. Humphry Davy, “VII. Additional Experiments on Galvanic Electricity”, *Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts (Nicholson’s Journal)*, London, Vol.IV, October 1800, 326- 328.
2. Sir Humphry Davy, *Elements of Chemical Philosophy: Part 1 Vol.1* (London: J. Johnson and Co., St Paul’s Church Yard, 1812), p.85 and Plate III, Fig.18. https://archive.org/details/elementschemica00davygoog
3. English patents, No. 4208 of 1878 and No. 2110 of 1879.
4. R.T. Jones and T.R. Curr, “Pyrometallurgy at Mintek”, *Southern African Pyrometallurgy 2006*, Edited by R.T. Jones, SAIMM, Johannesburg, 5-8 March 2006, pp.127-150. http://www.mintek.co.za/Pyromet/Files/2006JonesMintek.pdf

5. R.T. Jones, T.R. Curr, and N.A. Barcza, “Developments in Plasma Furnace Technology”, *High-Intensity Pyrometallurgy*, The Institution of Mining and Metallurgy, 4 February 1993, London.
http://www.mintek.co.za/Pyromet/Files/PlasmaDev.pdf
6. D. Sager, D. Grant, R. Stadler, and T. Schreiter, “Low cost ferroalloy extraction in DC-arc furnace at Middelburg Ferrochrome”, (Infacon 12, Helsinki, 6-9 June 2010), *SAIMM Journal*, Vol.110, No.12, December 2010, pp.717-724.
http://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXII/803-Sager.pdf http://www.saimm.co.za/Journal/v110n12p717.pdf
7. M. Gous, “An overview of the Namakwa Sands ilmenite smelting operations”, *Southern African Pyrometallurgy 2006*, Edited by R.T. Jones, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 5-8 March 2006, pp.189-201.
http://www.pyrometallurgy.co.za/Pyro2006/Papers/189_Namakwa.pdf
8. H. Lagendijk and R.T. Jones, “Production of ferronickel from nickel laterites in a DC-arc furnace”, *Nickel-Cobalt 97*, 36th Annual Conference of Metallurgists, Sudbury, Canada, 17-20 August 1997, pp. 151-162.
http://www.mintek.co.za/Pyromet/Laterite/Laterite.htm
9. C.P. Naude and M.D. Shapiro, “Implementation of the first commercial scale DC smelter for ferronickel production from low grade laterite ores—technology building blocks and lessons learned”, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol.110, no.12, December 2010. pp.725–732. http://www.saimm.co.za/Journal/v110n12p725.pdf
10. Mining Journal, “Xstrata's Koniambo produces first nickel”, *Mining Journal*, 11 April 2013. http://www.mining-journal.com/exploration--and--development/xstratas-koniambo-producesfirst-nickel
11. I.J. Barker, “Some considerations on future developments in ferro-alloy furnaces”, *Southern African Pyrometallurgy 2011*, Edited by R.T. Jones & P. den Hoed, SAIMM, Johannesburg, 6-9 March 2011, pp.1-13.
http://www.pyrometallurgy.co.za/Pyro2011/Papers/001-Barker.pdf
12. N.A. Barcza, I.J. Barker, M.S. Rennie, and P.J. Brereton-Stiles, “The application and scaleup of AC and DC smelting furnaces for ferro-alloys”, *60th Electric Furnace Conference Proceedings*, Vol. 60, Warrendale, PA: Iron & Steel Society, 2002. pp. 425-437. http://www.mintek.co.za/Pyromet/Files/2002Barcza.pdf