

تاریخچه

در سال ۱۹۲۴ میلادی شرکت نورتروپ Northrup امتیاز ساخت اولین کوره القایی را به نام خود ثبت کرد که بعدها کاربرد گسترده‌ای در ذوب فلزات با نقطه ذوب بالا پیدا کرد. در سال ۱۹۲۹ شرکت تاما کاربرد یک کوره القایی با فرکانس ۵۰ هرتز را برای ذوب برنج گزارش کرد. در سالهای ۳۲-۱۹۳۱ دو نفر به نامهای ویلهلم فیشر و اسمارش تئوریهای خود را در مورد کوره‌های القایی بدون هسته ارائه کردند. بر اساس نظریه آنها کوره القایی بدون هسته را در صورتی که ظرفیت زیادی داشته باشد می‌توان با فرکانس شبکه طراحی کرد و به کار برد.

در سال ۱۹۳۸ مارس Marse گزارشی در مورد استفاده موفقیت آمیز از کوره القایی بدون هسته با فرکانس شبکه ارائه داد. پنج سال بعد در سال ۱۹۴۳ کوره القایی بدون هسته با بوته فولادی برای ذوب منیزیم ساخته شد. در سال ۱۹۵۰ برای اولین بار آلومینیم به راحتی در کوره القایی بدون هسته ذوب و در همان سال از فرکانس شبکه برای ذوب چدن و فولاد در مقیاس وسیع تری استفاده شد. پس از آن طی ۱۰ سال انواع و اقسام کوره‌های القایی با فرکانس شبکه مورد بهره برداری قرار گرفتند.

سال ۱۹۵۹ را می‌توان سال کوره‌های القایی بدون هسته برای فلزات غیر آهنی به شمار آورد زیرا که سه کوره واقعاً بزرگ با ظرفیت ۲۵ و ۳۰ تن برای ذوب برنز جهت تولید پروانه‌های کشتی در این سال نصب و راه‌اندازی شد.

علت استفاده از کوره‌های القایی

قابلیت تطابق این کوره‌ها با شرایط ریخته‌گری از نظر آنالیز، درجه حرارت، سرعت

کوره القایی

Induction Furnace

دکتر مهدی دیواندری^(۱)

مهندس وحید فتحی^(۲)

۱- دانشگاه علم و صنعت ایران

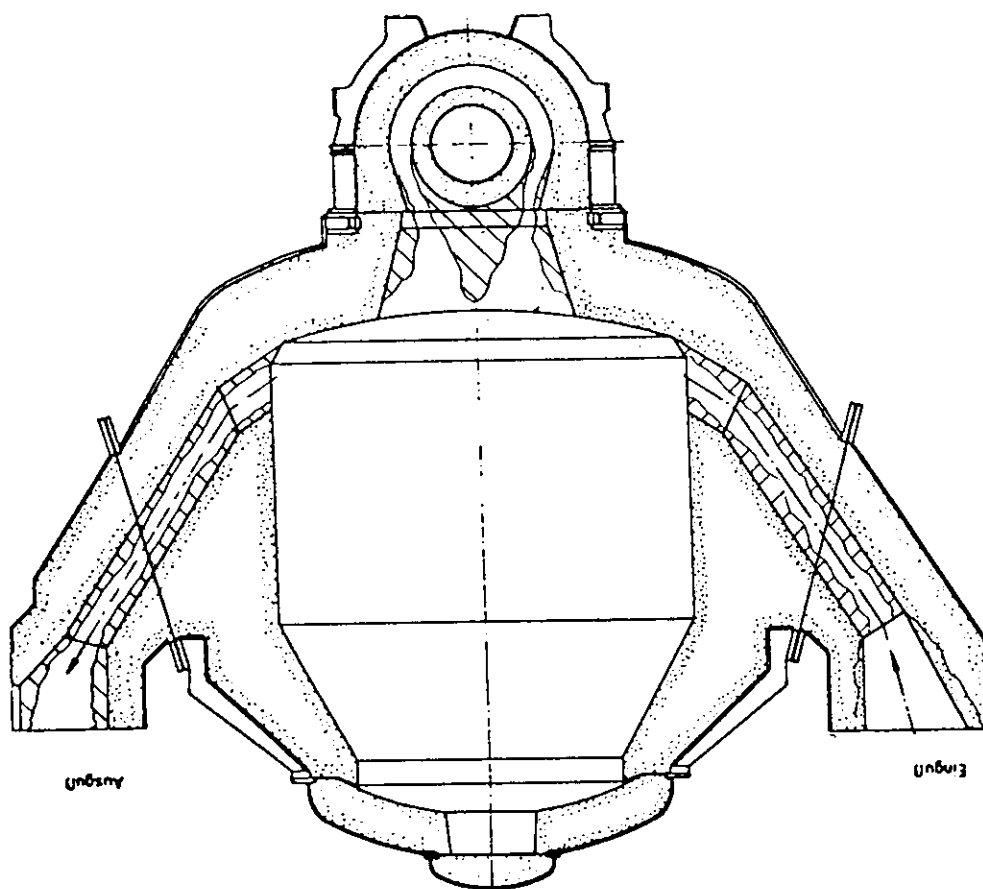
۲- جامعه ریخته‌گران ایران

و پیوستگی تولید، کاربرد این کوره‌ها را روز به روز افزایش داده است. در بسیاری از موارد کوره القایی از نظر تکنولوژی و حتی از نظر اقتصادی به دیگر انواع کوره‌ها ارجح است. بایستی توجه داشت که با وجود آن که ذوب توسط نیروی الکتریکی هزینه بالایی را در بردارد، ولی وجود قراضه‌های مرغوب و ارزان قیمت، تهیه انواع مذاب را در کوره‌های الکتریکی مقرون به صرفه کرده است. کاربرد این کوره جهت ذوب به خاطر عدم احتیاج به تجهیزات گران قیمت جهت غبار زدایی و شارژ که در دیگر انواع کوره‌ها ضروری هستند بسیار وسیع شده است و این امر به خصوص در کشورهایی که قوانین حفظ محیط زیست را به سختی رعایت می‌کنند بیشتر مورد توجه است. این کوره‌ها از نظر تئوری بالاترین راندمان حرارتی را دارند چرا که حرارت در همان جایی ایجاد می‌شود که باید مصرف شود. علاوه بر این به خاطر عدم تماس شارژ و مذاب، در حین عملیات ذوب و آلیاژ سازی، با محیط اطراف و مواد آلوده کننده بهترین محیط را برای ذوب و آلیاژ سازی و حفظ و نگهداری ذوب ایجاد می‌کنند.

انواع کوره‌های القایی

اصولاً کاربرد این نوع کوره‌ها شباهت زیادی به ترانسفورماتور دارد که سیم پیچ اولیه آن، کوئل کوره و سیم پیچ ثانویه بار کوره خواهد بود. تعداد دوره‌ها در کوئل کوره زیاد است در حالی که بار کوره عملاً یک حلقه با مدار کوتاه می‌باشد. به این ترتیب جریان متناوبی که از کوئل عبور می‌کند، جریانی به مراتب بزرگتر در بار کوره القا می‌نماید.

مقاومت بار کوره در مقابل عبور جریان



شکل ۱: کوره القایی با هسته

ذوب و در نتیجه احتمال اکسیداسیون شدید مذاب تقریباً منسوخ شده است.

کوره با هسته با کانال بسته عمودی یا افقی

این کوره‌ها در صنایع ذوب فلزات غیر آهنی و ذوب و نگهداری چدن به دلیل عدم وجود جذب گاز بسیار رایج و معمول هستند. (شکل ۱). در این کوره‌ها مذاب داخل کانال توسط جریان القایی گرم شده و سپس گرمای خود را به مذاب قسمت‌های دیگر و یا مواد شارژ منتقل می‌کند. در این نوع کوره اکسیداسیون مذاب بسیار کمتر و با توجه به پر بودن کانال می‌توان در تمام مراحل از حداکثر توان استفاده کرد. این

دار و بدون هسته تقسیم می‌شوند که در این میان دسته‌بندی‌های جزئی‌تری بر اساس سایر مشخصات مانند نوع کانال، فرکانس کوره و ظرفیت وجود دارد. در یک تقسیم‌بندی عمومی می‌توان کوره القایی را به شرح ذیل دسته‌بندی کرد:

۱- کوره‌های القایی با هسته

الف) کوره با کانال رو باز افقی
ب) کوره‌های با کانال بسته عمودی یا افقی

۲- کوره القایی بدون هسته

در میان کوره‌های فوق الذکر، کوره‌های با هسته با کانال رو باز به دلیل طولانی بودن زمان

القایی اثر گرمایی قابل توجهی ایجاد می‌کند. حسوزی القایی موجود در بار، مانند ترانسفورماتور، مخالف جریان وارد شده است؛ بنابراین بین این دو نیروی دافعه‌ای وجود دارد. چون کویل ثابت است پس بار مذاب حرکت خواهد کرد. این حرکت باعث به هم خوردن مذاب می‌شود. این پدیده از امتیازهای کوره القایی است. هر چه فرکانس جریان کمتر شود، عمل هم زدن مذاب شدیدتر می‌شود که این موضوع باعث یکنواخت شدن شرایط کار از جمله درجه حرارت و ترکیب مواد مذاب می‌شود. بنابراین آلیاژ سازی به نحو بهتری انجام خواهد پذیرفت.

کوره‌های القایی به دو نوع با هسته (کانال

هسته از نظر فرکانس کاری به دسته‌های زیر

تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- کوره‌های ذوب بدون هسته با فرکانس پایین:

(۱۰-۲۰ هرتز)

۲- کوره‌های القایی با فرکانس شبکه: در ایران

۵۰ هرتز و در آمریکا ۶۰ هرتز

۳- کوره‌های القایی بدون هسته با فرکانس سه

برابر شبکه: ۱۵۰ هرتز

۴- کوره‌های القایی با فرکانس بالاتر از ۱۰ کیلو

هرتز

لازم به ذکر است که این نوع کوره، شامل

یک بوت‌وی دیرگداز است که یک کویل مسی با

قابلیت هدایت زیاد دور آن پیچیده شده است.

این کویل با آب خنک می‌شود. حلقه‌های این

سیم پیچ با فیبر شیشه و پنبه نسوز (آزبست)

عایق شده‌اند. این لایه‌های عایق از اتصال کوتاه

شدن جریان برق جلوگیری می‌کنند.

به منظور صرفه جویی از هزینه‌ها کوره

القایی ممکن است به صورت نشان داده شده در

شکل ۳ مستقر شود که در آن سه بوت‌وی مذاب با

دو ترانسفورمر کار می‌کند. استفاده از یک

ترانسفورمر با دو بوت‌وی نیز بسیار متداول است.

آشنایی با قسمتهای تشکیل دهنده

کوره القایی

به منظور آشنایی با قسمتهای مختلف

کوره‌های القایی، لازم است که به صورت کلی و

مختصر به بخشهای مختلف آن اشاره شود.

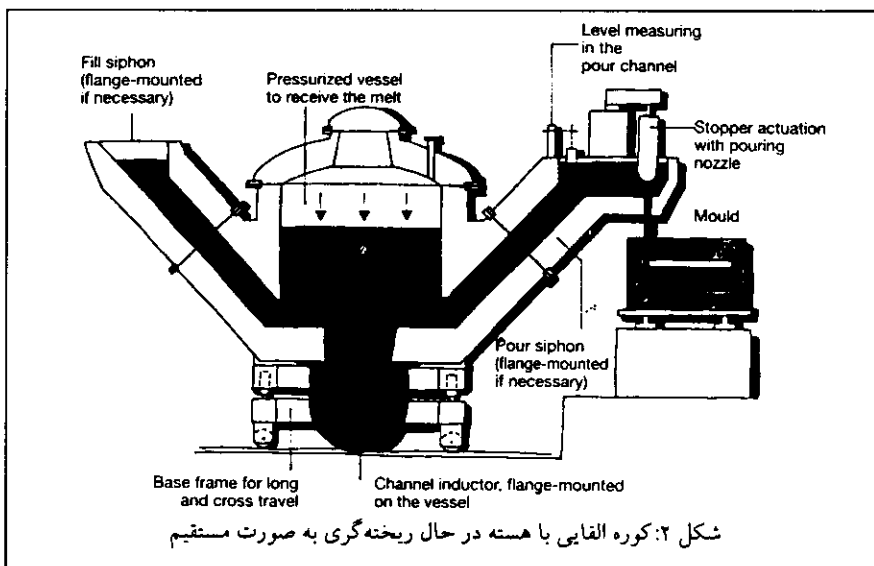
(شکل ۴).

کوره و تأسیسات مربوط به طور کلی از سه

بخش اصلی بدنه کوره، منبع انرژی و تأسیسات

خنک کننده تشکیل شده است. در این شکل

تأسیسات خنک کننده نمایش داده نشده است.



نیاز به ماندن مذاب در کانال ممکن است، بالا

رود. به ویژه در حالتی که کوره در طول شب و

آخر هفته، بدون بارریزی روشن باقی بماند. برای

کاهش هزینه‌ها می‌توان کوره را شب روشن کرد

و از توان کامل آن برای ذوب استفاده کرد و

روزهای توان کوره را پایین آورد و از آن به عنوان

واحد نگاه دارنده استفاده نمود.

کوره‌های القایی بدون هسته

در این کوره‌ها هسته آهنی وجود ندارد و

جریان مستقیماً روی شارژ القا می‌شود. این

کوره‌ها احتیاج به مذاب اولیه ندارند و می‌توان

از شارژ سرد شروع کرد و به خاطر تغییر شرایط

کار (تغییر ارتفاع مذاب و مواد شارژ داخل کوره)

جهت جبران پس فاز و یا پیش فاز، یک سری

خازن و چک (سلف) در مدار ثانویه کوره نیاز

است. این خازن‌ها و چک‌ها وظیفه جبران خاصیت

سلفی و خازنی مدار را با توجه به مقدار شارژ

کوره به عهده دارند. در کوره‌های جدید این عمل

با استفاده از مدارهای الکترونیکی به طور

اتوماتیک انجام می‌شود. کوره‌های القایی بدون

کوره‌ها از نظر راندمان حرارتی و مدت عمر

نسوز در بهترین شرایط هستند. با توجه به

مسائل اقتصادی و تکنولوژیکی این نوع کوره‌ها

عموماً با فرکانس شبکه (۵۰ سیکل در ثانیه) کار

می‌کنند. در کوره کانالی، اولیه یا سیم پیچ کوره به

دور یک هسته‌ی آهن لایه لایه که کانال را احاطه

کرده و به بدنه کوره وصل شده، پیچیده می‌شود.

کانال ممکن است به شکل U، V، W باشد که

به طراحی کوره و نوع آلیاژی که ذوب می‌شود،

بستگی خواهد داشت. برخی آلیاژها هنگام

ذوب شدن در کانال گیر می‌کنند. شکل کانال باید

طوری طراحی شود که با استفاده از وسیله‌ی

ساده نظیر میخ‌های مخصوص، بتوان گرفتگی را

رفع نمود. فلز مذاب در طول فرایند کار کوره در

داخل و اطراف کانال جریان دارد. به این ترتیب،

در اصل از کوره‌های القایی کانال دار به منزله‌ی

واحد تولید گرمای زیاد و نگاه دارنده‌ی مذاب

همراه با کوره‌های دیگر استفاده می‌شود. البته

بعضاً نیز مستقیماً به عنوان واحد ذوب جهت

ریخته‌گری عمل می‌نماید. (شکل ۲)

مخارج جاری کوره‌های کانال دار به علت

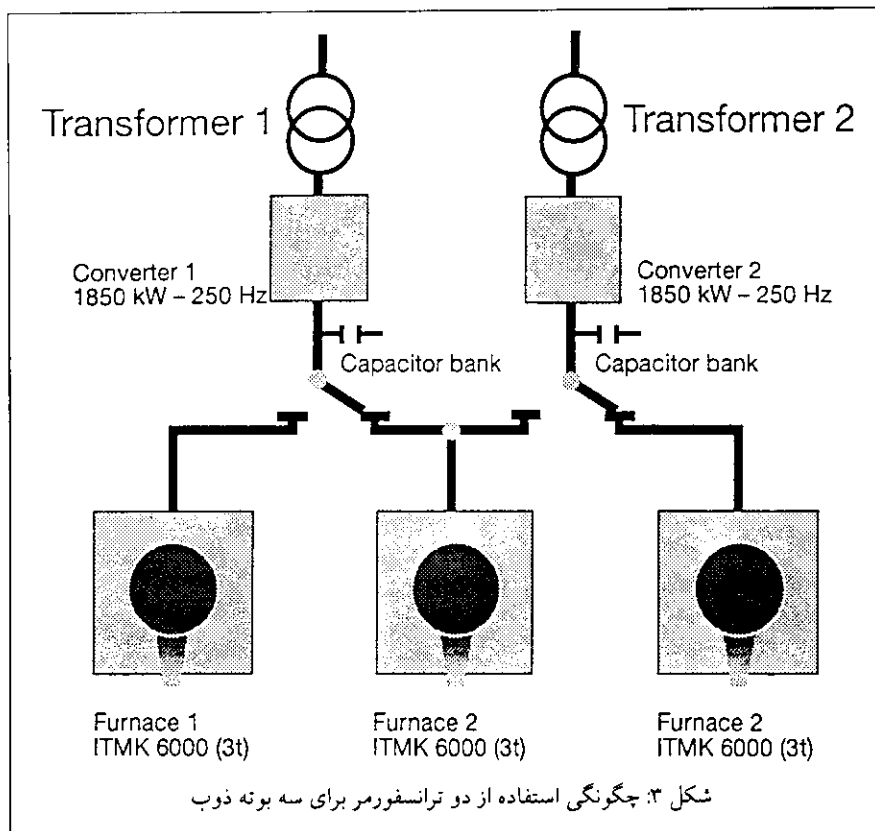
است و انرژی مورد نیاز جهت ذوب شارژ را تأمین می‌نماید.

واحد تأسیسات خنک کننده

مشکل از سیستمهای مبدل حرارتی و برجهای خنک کننده است که متناسب با نوع و ظرفیت کوره طراحی می‌گردد. وظیفه این سیستم کاهش درجه حرارت آب در گردش داخل کویل است که در اثر انتقال حرارت از مذاب داخل کوره دمای آن بالا می‌رود.

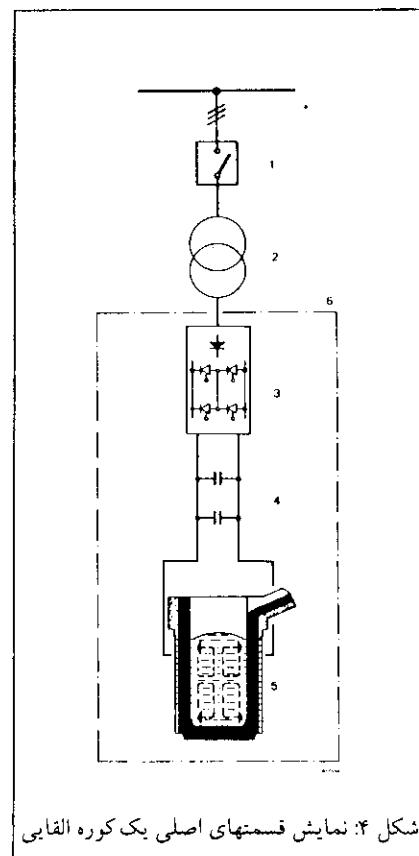
اصول حرارتی کوره القایی

اصول کار و ایجاد حرارت در کوره‌های القایی بر پایه قوانین الکترومغناطیس استوار است. به این ترتیب که، عبور جریان متناوب از یک حلقه سبب به وجود آمدن میدان مغناطیسی در داخل حلقه می‌شود و از طرف دیگر عبور شدت میدان مغناطیسی از یک قاب باعث به وجود آمدن جریان الکتریکی در آن قاب می‌گردد که به آن جریان القایی گفته می‌شود. با بهره‌گیری از اصول فوق کوره‌های القایی طراحی و ساخته شده است. فرآیند ذوب بدین ترتیب است که با عبور جریان متناوب از کویل مسی دور کوره، میدان مغناطیسی در داخل کویل به وجود می‌آید که این میدان مغناطیسی در اثر برخورد با سطح شارژ موجود در داخل کوره سبب به وجود آمدن جریان الکتریکی در شارژ می‌شود که به آن جریان القایی (جریان فوکو یا جریان ادی) می‌گویند. جریان الکتریکی القایی با عبور از شارژ کوره که دارای مقاومت الکتریکی می‌باشد، سبب ایجاد حرارت می‌شود. طبق قانون ژول مقدار حرارت از رابطه کلی $Q = KRI^2t$ قابل محاسبه است



بدنه کوره به طور کلی متشکل از بوته ذوب است و کویل مسی به صورت حلقوی و مارپیچ در اطراف آن قرار گرفته است. کویل مسی به حالت دو جداره ساخته می‌شود. از یکی از جداره‌ها الکتریسیته و از جداره دیگر آب جریان می‌یابد. دو سر کویل به منبع انرژی الکتریکی و سیستم تأسیسات خنک کننده و کویل متصل است. در داخل بوته لایه آز بست بر روی کویل قرار گرفته و بر روی آن لایه خاک نسوز کوبیده شده قرار می‌گیرد تا از نفوذ مذاب داخل کوره به سمت بدنه کویل جلوگیری نماید. بطور کلی دیواره و ته بوته از لایه خاک نسوز کوبیدنی تشکیل شده است.

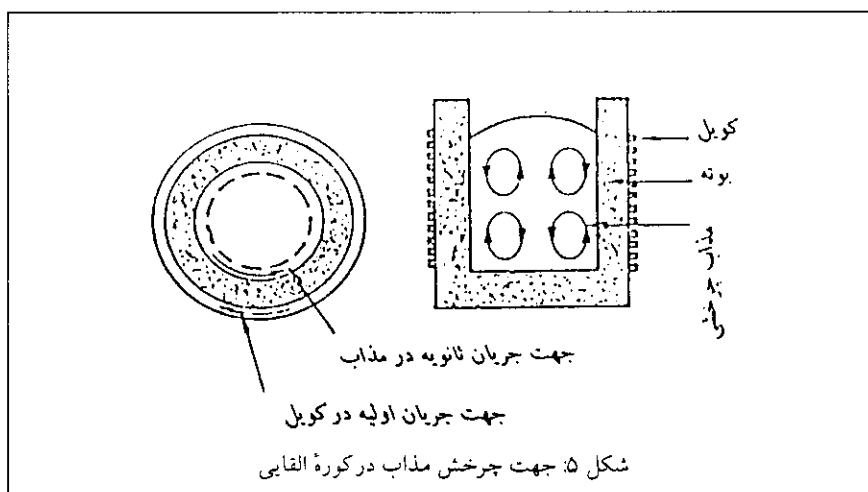
منبع انرژی که واحد تغذیه الکتریکی کوره‌های القایی می‌باشد، متشکل از تابلوهای مدار فرمان، ترانسفورماتور و خازنهای مختلف



عایق‌کاری شوند تا از احتمال بروز جرقه الکتریکی ناشی از اتصال کوتاه که منجر به تخریب و سوراخ شدن کویل می‌شود، جلوگیری به عمل آید. موادی که برای عایق‌کاری مورد مصرف قرار می‌گیرند، بایستی حداقل 250°C مقاومت داشته و مواد تشکیل دهنده آن تجزیه و یا سوخته نشوند. در صورت بروز این اشکال، کربن ناشی از سوختن مواد هیدروکربنی بر روی کویل رسوب می‌نماید و خود به عنوان هادی الکتریکی عمل نموده و به بروز جرقه الکتریکی کمک خواهد کرد. مواد مختلفی برای عایق‌کاری الکتریکی کویل کوره مورد استفاده قرار می‌گیرند که از آن جمله می‌توان از نوارهای شیشه‌ای، مواد پلاستیکی مرغوب، چسبهای پوششی اپوکسی و لایه‌های آز بست نام برد. سازندگان برخی از کوره‌ها توصیه می‌نمایند که حلقه‌های کویل با نوار شیشه‌ای و چسب اپوکسی نوار پیچی شوند که این مورد در کوره‌های ساخت شرکت یونکر بیشتر مشاهده می‌شود و در تعدادی از کوره‌ها با قرار دادن ورقه آز بست عایق الکتریکی بین حلقه‌ها، عملیات عایق‌کاری صورت می‌پذیرد.

خنک کردن کویل

همان گونه که بیان شد، مقطع کویل‌های مسی متشکل از دو جداری به هم چسبیده است. یک قسمت پروفیل توپر می‌باشد که




گرم و ذوب می‌شوند. این اختلاف درجه حرارت کاملاً با چشم هم قابل مشاهده است. در شکل ۵ جهت جریان القایی در کویل و در مذاب نشان داده شده است. از آن جایی که جهت میدان القایی در کویل عکس جهت میدان ایجاد شده در شارژ می‌باشد، این امر سبب چرخش و تلاطم مذاب در کوره می‌گردد. وجود تلاطم در مذاب به حل شدن مواد آلیاژی و کربن ده در مذاب کوره کمک می‌کند. میزان چرخش و تلاطم مذاب با افزایش فرکانس کوره کاهش می‌یابد، بطوری که شدت آن در کوره‌های القایی با فرکانس بالا به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. این نوع از کوره‌ها جهت ذوب فولاد مناسب است، زیرا کاهش تلاطم باعث کاهش میزان اکسیداسیون سطحی مذاب فولاد می‌گردد.

محافظان کویل کوره

عایق کاری الکتریکی

از آن جایی که جریان الکتریکی با ولتاژ بالا به کویل اعمال می‌شود، لذا به منظور جلوگیری از برقراری اتصال کوتاه بین حلقه‌های کویل، ضروری است که بدنه حلقه‌ها نسبت به هم

(R مقاومت شارژ، I میزان جریان، t زمان و Q حرارت). با گذشت زمان، درجه حرارت شارژ افزایش یافته و در نهایت به صورت مذاب درمی‌آید. با بیان دیگر کوره القایی را می‌توان به عنوان یک مبدل (ترانسفورمر) جریان در نظر گرفت که کویل کوره مدار اولیه و شارژ داخل کوره مدار ثانویه را تشکیل می‌دهد. لازم به ذکر است که شارژ داخل کوره مدار ثانویه را تشکیل می‌دهد. شارژ کوره بایستی هادی جریان الکتریسیته باشد که در غیر این صورت گرمایی ایجاد نخواهد شد. چنانچه شارژ مورد استفاده از خانواده فرو مغناطیس باشد، علاوه بر گرمای حاصل از جریان القایی، مقداری حرارت نیز در اثر هیستریزس ناشی از آهن ربا شدن شارژ حاصل می‌شود که در نتیجه نظم و تحرک الکترون‌ها است. مقدار این حرارت کمتر از حرارت جریان القایی است و در شارژهای غیر فرو مغناطیس این حرارت به وجود نمی‌آید. بدیهی است که دانسته میدان مغناطیسی به سمت مرکز کویل کاهش می‌یابد و بیشترین دانسیته در نزدیکی کویل متمرکز است. لذا قسمتهایی از فراضه شارژ که به دیواره کوره نزدیک‌تر هستند، سریع‌تر و با شدت بیشتری


<p>شکل ۴: شماتیک مقطع کویل ۱- محل عبور آب ۲- قسمت عبور جریان برق</p>
<p>شکل ۶: شماتیک مقطع کویل ۱- محل عبور آب ۲- قسمت عبور جریان برق</p>

جریان برق از آن عبور می‌کند و قسمت دیگر پروفیل تو خالی است که آب در داخل آن جریان دارد. در شکل ۶ مقطع یک کویل مسی نشان داده شده است. برای این که گرمای ناشی از عبور جریان الکتریکی در کویل به حداقل ممکن کاهش یابد، بایستی جنس کویل از مس خالص که دارای مقاومت الکتریکی ناچیز است، انتخاب شود. در این صورت نه تنها از گرم شدن کویل جلوگیری می‌شود، بلکه به مقدار قابل توجهی در مصرف انرژی الکتریکی صرفه‌جویی می‌شود. بدین ترتیب افزایش دمای کویل، ناشی از انتقال حرارت از مذاب داخل کوره است که با عبور جریان دائم آب از داخل کویل از بالا رفتن دمای کویل از حد مجاز تعیین شده ممانعت به عمل می‌آید. آب جاری داخل کویل در یک مسیر مدار بسته حرکت می‌کند و عمل خنک شدن آب در گردش توسط مبدل‌های حرارتی صورت می‌گیرد که خود با جریان آب خنک‌تری که در یک مسیر مدار باز جریان دارد، خنک می‌شود. به منظور کاهش میزان رسوب در جداره داخلی کویل مسی که در نتیجه پایین آمدن انتقال حرارت دیواره کویل را به همراه دارد، بهتر است که آب مدار بسته کویل از آب مقطر انتخاب شود. خنک نمودن کویل علاوه بر موارد ذکر شده، مانع از سوختن و یا تجزیه مواد عایق‌کاری کویل می‌شود.

اندود کاری سطح کویل

در تعدادی از کوره‌های القایی سطح کویل توسط ملات خمیری شکل اندود می‌شود. عمل اندود کاری ضمن حفاظت کویل در مقابل نفوذ مذاب و شوک‌های حرارتی، به عنوان یک صفحه

لغزش نیز بین کویل و جداره نسوز کوره عمل نموده و مانع از انتقال فشارهای ناشی از انبساط و انقباض جداره نسوز کوره به کویل می‌شود. جنس این لایه خمیری از خانواده سیمان نسوز یا مخلوط ۷۰٪ پودر سیلیس و ۳۰٪ چسب دیرگداز آلومینات کلسیم می‌باشد. ملات خمیری توسط ماله‌ای بر روی سطح کویل مالیده می‌شود و ضخامت آن بسته به نوع و ظرفیت کوره از ۳ تا ۹ میلیمتر متغیر است. برای یکنواخت نمودن لایه اندود حلقه‌های راهنما بالا و پایین کوره متناسب با ضخامت لایه اندود نصب می‌گردد. با حرکت یک میله و یا تسمه فولادی بر روی دو حلقه راهنما قسمت‌های ضخیم لایه تراشیده می‌شود و سطح اندود از نظر ضخامت و مسطح بودن به حالت یکنواخت درمی‌آید. خشک شدن لایه اندود بایستی به آرامی توسط جریان هوای طبیعی و با گرمای حاصل از لامپ‌های حرارتی که در داخل کوره قرار می‌گیرد، صورت پذیرد. از خشک نمودن سریع که منجر به بروز ترک‌های مختلف سطحی و عمقی می‌شود، بایستی پرهیز شود. این لایه پس از خشک شدن بستر مناسبی برای چسبانیدن ورق‌های میکا، آزبست و پارچه‌های آزبستی است و حفظ سلامتی آزبست را امکان پذیر می‌سازد.

عایق کاری حرارتی

به منظور جلوگیری از انتقال شدید حرارت از مذاب به کویل، محافظت آن در صورت نفوذ احتمالی مذاب و در نهایت جهت کاهش انتقال شوک‌های حرارتی ناشی از انبساط و انقباض جداره نسوز کوره به کویل، از ورقه‌های عایق حرارت استفاده می‌شود. این ورقه‌های عایق

حرارت بر روی سطح کویل و یا سطح اندود شده کویل نصب می‌شوند. این صفحات شامل ورقه‌های ایزومیکا، آزبست، پارچه‌های نسوز آزبستی، نمدهای پیش ساخته سرامیکی سخت شده با سیلیس کلونیدی و بالاخره آجرهای سیلیسی کام زیانه‌ای می‌باشند. استفاده از صفحات ایزومیکا و ورقه‌های آزبست و هر دو آنها با هم، در صنعت ریخته‌گری ایران از دیگر مواد عایق حرارت متداول‌تر است. ورقه‌های ایزومیکا غالباً در کوره‌هایی که کویل آنها نوار پیچی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضخامت ورق ایزومیکا ۰/۴ تا ۰/۶ میلیمتر می‌باشد. عموماً جهت حصول اطمینان بیشتر، بر روی ورق ایزومیکا یک لایه ورق آزبست نصب می‌شود. ورقه‌های آزبست دارای ضخامت ۲ و ۳ و ۴ میلیمتر است که متناسب با ظرفیت و مشخصات فنی کوره انتخاب و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کوره‌هایی که سطح کویل آنها توسط لایه نسوز اندودکاری شده است، می‌توان فقط از یک یا دو لایه آزبست استفاده نمود که متناسب با شرایط کوره و درجه حرارت مذاب و ظرفیت کوره تصمیم‌گیری می‌شود.

جداره دیرگداز

آخرین محافظ کویل در مقابل مذاب داخل بوت کوره، جداره دیرگداز است که در مقابل درجه حرارت و خوردگی مذاب مقاومت کافی دارد. جداره نسوز کوره می‌تواند به صورت بوت‌های پیش ساخته و یا مواد کوبیدنی با نقطه دیرگدازی بالا باشد. جداره نسوز بیشتر کوره‌های القایی با بهره‌گیری از مواد نسوز خشک و مقاوم در مقابل مذاب و به کارگیری

روش کوبیدن و متراکم نمودن ایجاد می‌گردد. جداره نسوز که از پشت با ورقهای آزیست و از جلو با مذاب در تماس است، بایستی از نظر کیفیت مواد و ضخامت، متناسب با ظرفیت کوره، درجه حرارت کوره و نوع مذاب کوره انتخاب گردد. به طور کلی مواد مورد استفاده در جداره کوره‌های القایی بایستی دارای مشخصات کلی به شرح ذیل باشند:

- مواد نسوز بایستی به راحتی قابل نصب باشند و پس از کوبیدن از دانسیته‌ی بالا و یکنواختی برخوردار باشد و حداقل جدایش در دانه‌بندی و لایه لایه شدن پس از کوبیدن را دارا باشد.

- مواد نسوز دانه بندی شده بایستی از زمان زیتتر نسبتاً کوتاه برخوردار باشد و به فوق گداز خیلی بالا نیاز نداشته باشد.

- مواد نسوز جداره کوره بایستی در مقابل درجه حرارت مذاب مقاومت مطلوبی داشته باشد و در شرایط خاص که درجه حرارت مذاب به صورت ناخواسته و یا به دلیل نیاز، از میزان عادی تجاوز نماید، مقاومت کافی داشته باشد.

- جداره نسوز بایستی حداقل تغییرات ابعادی در اثر انقباض و انبساط را داشته باشد و در مقابل عوامل خوردنده مذاب و سرباره و ضخیم شدن جداره (build up) مقاومت مطلوبی داشته باشد.

- ظرفیت حرارتی مواد دیرگداز جداره بایستی در حداقل میزان ممکن باشد تا در مصرف انرژی هنگام ذوب گیری و شارژ متوالی و یا خاموش کردن کوره حداکثر صرفه جویی به عمل آید و حداقل انرژی صرف گرم کردن مجدد جداره گردد.

- جداره بایستی مقاومت خوبی هنگام ذوب مجدد مذاب منجمد شده از خود نشان داده و تخریب نشود.

- هدایت حرارتی جداره باید بسیار پایین باشد تا از اتلاف انرژی و انتقال حرارت به کویل جلوگیری شود.

- مشخصات هدایت حرارتی جداره نسوز باید به گونه‌ای باشد که شیب تند حرارتی بین مذاب و کویل ایجاد گردد که در صورت نفوذ احتمالی مذاب به داخل جداره قبل از رسیدن به کویل منجمد شده و متوقف گردد.

- جداره کوره بایستی مقاومت مطلوبی در مقابل نیروهای مکانیکی ناشی از شارژ قراضه، عملیات سرباره گیری و تخلیه مذاب داشته باشد.

- جداره کوره بایستی دارای قابلیت تخریب خوبی باشد که در هنگام تخریب جهت تعویض جداره به کویل کوره آسیب وارد نشود.

مشخصات فیزیکی جداره دیرگداز

در اکثر کوره‌های القایی بدون هسته، جداره نسوز از مواد خرد و دانه‌بندی شده‌ای تشکیل یافته است که حاوی مقداری مواد کمکی جهت اتصال دانه‌ها به یکدیگر می‌باشد. یکی از مشخصه‌های مهم جداره دیرگداز، مقاومت آن در مقابل شوکهای حرارتی است. میزان مقاومت در مقابل شوک حرارتی از رابطه:

$$R = \frac{K\sigma}{E\alpha}$$

قابل محاسبه است که در این رابطه، K هدایت حرارتی و σ استحکام کششی و E مدول الاستیسیته و α ضریب گرمایی

جداره دیرگداز است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، افزایش هدایت حرارتی سبب افزایش مقاومت در مقابل شوک حرارتی می‌گردد، ولی از طرف دیگر باعث اتلاف انرژی حرارتی شده و امکان انجماد مذاب نفوذ یافته از جداره به سمت کویل را کاهش می‌دهد. بنابراین هدایت حرارتی بایستی در حد بهینه باشد که هر دو خواسته بالا را به طور نسبی و همزمان برآورده سازد. فلزات آهنی به دلیل نقطه ذوب بالا به مواد نسوز با درجه دیرگدازی بالا نیاز دارند که این امر سبب ایجاد محدودیت در انتخاب مواد دیرگداز می‌شود.

با توجه به موارد عنوان شده و قیمت مواد نسوز، می‌توان از مواد سیلیسی (SiO_2)، آلومینا (Al_2O_3)، ترکیبات شاموتی نظیر مولایت ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)، منیزیا (MgO)، زیرکون، ($\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$)، زیرکونیا (ZrO_2) و کاربید سیلیسیم (SiC) جهت جداره کوره‌های القایی استفاده نمود. کاربید سیلیسیم به دلیل بالا بودن قیمت و قابلیت هدایت حرارتی بالا برای این منظور مناسب نمی‌باشد و بیشتر برای ساخت بوت‌های آماده استفاده می‌شود، در بین موارد ذکر شده، اکسیدهای ساده نسبت به اکسیدهای ترکیبی ارجحیت بیشتری دارند. بنابراین از سه نوع مواد دیرگداز سیلیسی، آلومینایی و منیزیتی، به دلیل دارا بودن مجموعه مشخصات قابل قبول بیشتر از دیگر مواد نسوز در جداره کوره‌های القایی استفاده می‌شود. مشخصات فیزیکی و کاربردی این سه نوع ماده دیرگداز در جدول ۱ قابل ملاحظه است.

جدول ۱: مقایسه مشخصات سه نوع خاک نسوز سیلیسی، آلومینایی و منیزی

منیزی	آلومینایی	سیلیسی	مشخصات فیزیکی
۲۸۰۰	۲۰۵۰	۱۷۲۳	نقطه ذوب (سانتیگراد)
-۷۳۲	-۷۵۸	-۵۹۴	انرژی آزاد در ۱۴۵۰°C (Kj/mol)
۴	۲/۶	۱/۷	هدایت حرارتی صفر تا ۱۲۰۰°C (W/m/C)
۱۳/۸	۸/۲	۱۲/۲	ضریب انبساط صفر تا ۱۲۰۰°C ($\times ۱۰^{-۶}$)
۳۴۵	۴۸۰	۷۱۵	مقاومت شوک حرارتی $R = \frac{K\sigma}{E\alpha}$
۵-۱۵	۵-۱۰	۱۰	مقایسه نسبی قیمت

منابع:

- ۱- سایت اینترنتی شرکت اینداکتو ترم
- ۲- داریوش سلیمی "کوره القایی بدون هسته" مجله ریخته‌گری شماره بهار و تابستان ۱۳۷۵
3. J. Blackburn. Induction Furnace Principles. 1971 Vol.6.
4. H.J. Leyshon-Introduction to Electric Furnaces. Conf. on Electric Melting & Holding Furnaces in Iron Foundry Industry. 1967.
5. J. B. Ingall Mains & Medium Frequency Induction Furnaces. Proceeding of SCARATA . 17th Annual Conf. 1971 Vol. 8.
- ۶- کوره القایی، اصول و مبانی انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان "مرکز نوآوری‌های صنعتی" اردیبهشت ۱۳۶۰
7. Proceeding of 12th International ABB Conference on Induction Furnaces. (1991)