

کوره قوس الکتریکی از سه گروه از تجهیزات مجزا تشکیل می‌شود: بدنه کوره (Vessel)، تجهیزات مکانیکی، و تجهیزات الکتریکی. فرآیندهای متالورژیکی فولادسازی در درون Vessel انجام می‌شود؛ و به همین دلیل قسمت اصلی کوره محسوب می‌شود. Vessel شامل سه قسمت Lower shell، Upper shell و Roof می‌شود. ناحیه داخلی Vessel، Reaction chamber نامیده می‌شود.

Lower shell از ورق فولادی و از اتصال یک سطح Cylindrical شکل بر روی یک سطح Spherical، ساخته می‌شود. قسمت داخلی سطوح Cylindrical و Spherical شکل، نسوزکاری شده و به ترتیب دیواره (Wall) و کف (Hearth) کوره را می‌سازد. Lower shell ننگه دارنده فولاد و سرباره مذاب می‌باشد. Lower shell متحمل بارهای استاتیک و دینامیک متعددی است. بارهای استاتیک شامل وزن خودش، وزن مواد نسوز استفاده شده در دیواره و کف کوره، وزن فولاد و سرباره مذاب و همچنین وزن Upper shell (که بر روی Lower shell قرار می‌گیرد)، وزن Roof و بارهای دینامیک نیز در خلال شارژ قراضه به آن وارد می‌شود. Lower shell از جوش دادن ورق‌های فولادی به ضخامت ۲۵-۴۰ mm (بسته به ظرفیت کوره) به هم ساخته می‌شود. معمولاً برای افزایش مقاومت Lower shell در برابر تنش‌های مکانیکی و حرارت که منجر به دفرمه شدن آن می‌شود؛ Stiffenerهای افقی و عمودی در سطح خارجی Lower shell جوش داده می‌شود. دهانه درب سرباره کوره در Lower shell قرار دارد. درب سرباره برای چند کار مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از اندازه‌گیری دمای ذوب، گرفتن نمونه از ذوب، ورود لنس اکسیژن درون کوره. قسمت پایین درب سرباره معمولاً الکتروود (گرافیتی یا آبگرد) قرار می‌گیرد و جوه دیگر آن نیز پنل‌های آبگرد.

مجرای تخلیه مذاب (Taphole) در کف Lower shell (کف کوره) قرار دارد. کوره‌های مدرن امروزی غالباً مجهز به سیستم تخلیه از کف غیر مرکزی (EBT: Eccentric bottom tapping) هستند. از جمله مزایای این سیستم به حداقل رساندن مقدار ورود سرباره از کوره به درون پاتیل در هنگام تخلیه ذوب و کاهش تلفات حرارتی فولاد مذاب موقع تخلیه است. در هنگام تخلیه ذوب از کوره‌های با مجرای تخلیه EBT، ارتفاع مذاب بالای مجرای تخلیه می‌بایست از یک مقدار مینیمم، بیشتر باشد؛ در غیر این صورت ایجاد جریان گردابی باعث ورود سرباره به پاتیل مذاب می‌گردد. بیشترین ارتفاع فولاد مذاب درون کوره (عمق حمام مذاب) بستگی به قطر کوره داشته و معمولاً بین ۱.۰-۱.۷ m می‌باشد. معمولاً توصیه می‌شود که برای جلوگیری از ورود سرباره به پاتیل مذاب هنگام تخلیه ذوب، عمق حمام مذاب بالای مجرای تخلیه باید حدود ۲.۵ برابر قطر مجرای تخلیه باشد.

کوره برای سرباره‌گیری و تخلیه فولاد مذاب، تیلت می‌شود. برای سرباره‌گیری به سمت پاتیل سرباره (Backward tilt) و برای تخلیه به طرف پاتیل مذاب (Forward tilt) می‌گردد. ماکزیمم زاویه تیلت در کوره‌های تخلیه از کف بین ۱۵-۲۰ درجه است. یکی از پارامترهای مهم در کوره‌های تخلیه از کف، سرعت برگشت کوره از تخلیه (برگشت

از حالت تیلت) است. سریع بودن سرعت برگشت از تیلت، مانع ورود سرباره درون پاتیل مذاب می‌شود. معمولاً ماکزیمم سرعت Forward tilt حدود ۱ درجه بر ثانیه و سرعت Tilt back کوره‌های مدرن می‌تواند بین ۳-۴ درجه بر ثانیه باشد (سرعت‌های بک تیلت بیشتر باعث وارد شدن تنش‌های بی‌مورد به استراکچر کوره می‌شود). معمولاً زاویه بک تیلت کوره برای سرباره‌گیری می‌تواند تا ۱۴ درجه هم برسد.

Upper shell یک فریم Cylindrical شکل می‌باشد که قطر آن برابر قطر کوره (قطر خارجی) می‌باشد. سطح جانبی Upper shell با پنل‌های آبگرد (Water-cooled panels) پوشیده می‌شود. خود فریم Upper shell هم که پنل‌های آبگرد بر روی آن نصب می‌شوند، آبگرد می‌باشد.

مجموعه Lower shell و Upper shell بر روی یک استراکچر (فریم) فولادی نصب می‌شود. دو ضلع این فریم، Rockerها هستند. راکرها، Cradle (گهواره‌ای) شکل هستند و بر روی Pedestal قرار می‌گیرند و بر روی آنها حرکت می‌کنند. (برای جلوگیری از لغزیدن راکر بر روی پدستال هر دو به شکل دندانه‌دار ساخته می‌شوند) حرکت راکر بر روی پدستال، امکان تیلت و بک تیلت شدن کوره را فراهم می‌کند. پدستال‌ها بر روی فونداسیون بتنی که مجموعه کوره بر روی آنها قرار می‌گیرد، نصب می‌شوند.

Roof یا درپوش کوره، حالت Dome (گنبدی) شکل دارد، با مقطع دایره‌ای شکل به قطری برابر با قطر Upper shell. در مرکز درپوش، قطعه دیرگدازی به اسم Centerpiece (یا دلتا) قرار می‌گیرد. دلتا دارای سه سوراخ برای ورود الکترودها به درون کوره می‌باشد. ۸۵٪ درپوش، آبگرد می‌باشد که شامل پنل‌های آبگرد، رینگ درپوش و رینگ دلتا می‌باشد. رینگ دلتا دور آن قرار می‌گیرد و کار آن خنک کردن دلتا است. درپوش معمولاً از چهار نقطه به یک فریم فولادی مستطیل شکل (که به آن Suspension beam می‌گویند) متصل و معلق است. این فریم فولادی به حالت Cantilever (یک سر درگیر) به استراکچر لیفت کننده درپوش متصل می‌باشد. برای شارژ قراضه (و یا تعمیرات نسوز) درپوش باید قابلیت بلند شدن (Lift) و چرخیدن (Swing) از روی Upper shell به سمت مجرای تخلیه را داشته باشد. درپوش معمولاً به اندازه ۲۰۰-۴۰۰ mm لیفت می‌شود و به اندازه ۱۰۰-۸۰ درجه به سمت تخلیه می‌چرخد (Swing). برای لیفت و سوینگ درپوش از جک‌های هیدرولیک استفاده می‌شود. برای حرکت سوینگ درپوش معمولاً از Thrust bearing استفاده می‌شود. مدت زمان لیفت و سوینگ درپوش کوره معمولاً بین ۲۰-۳۰ ثانیه طول می‌کشد. سرعت سوینگ درپوش معمولاً حدود ۴-۵ درجه بر ثانیه می‌باشد.

قطر سوراخ‌های دلتا معمولاً ۲۰-۴۰ mm بیشتر از قطر الکترودها می‌باشد. دوتا سوراخ دیگر هم در درپوش وجود دارد که Fourth hole و Fifth hole نامیده می‌شوند. از طریق Fourth hole گازها (Off-gas) و غبار (Dust) تولید شده درون کوره در خلال فرآیند فولادسازی، به وسیله سیستم مکش کوره، مکش می‌شود. گازها از طریق ابو که بر روی

Fourth hole نصب می گردد، مکش می شود. البو هم از پنل های آبگرد ساخته می شود. از طریق Fifth hole مواد (شارژ فلزی مثل آهن اسفنجی و مواد سرباره ساز مثل آهک و دولومیت و...) درون کوره شارژ می گردد. از جمله مزیت های پنل های آبگرد این است که امکان ورود مقادیر خیلی زیاد گرما درون کوره را بدون اینکه منجر به ایجاد صدمه (اعوجاج و دفرمه شدن) در استراکچر فلزی بدنه کوره شود را فراهم می کند. همچنین در صورت ایجاد نشتی در این پنل ها امکان تعویض هر کدام به صورت جداگانه وجود دارد که همین قابلیت باعث کاهش زمان توقف (Downtime) کوره می شود. پارامترهایی که تاثیر بسزایی در عمر پنل های آبگرد دارند عبارتند از: مقدار و کیفیت آب ورودی به پنل ها، دبی و ولوسیتی آب، متریالی که پنل ها با آن ساخته می شود و قطر لوله های سازنده پنل. پنل های آبگرد باید تحمل بارهای زیاد مکانیکی و حرارتی را داشته باشد. بیشترین بار مکانیکی در زمان شارژ قراضه درون کوره اتفاق می افتد. قطعات قراضه می تواند با پنل ها آبگرد شل برخورد کرده و باعث ایجاد ترک و شکستگی در آن ها شود. ضخامت لوله هایی که در ساخت پنل های آبگرد استفاده می شود باید به قدری باشد که تحمل این بارها را داشته باشد. از طرفی دیگر ضخامت لوله ها نباید خیلی زیاد باشد تا بیشترین مقدار انتقال حرارت به آب اتفاق بیفتد. بنابراین ضخامت لوله ها یک مقدار بهینه ای باید داشته باشد که این مقدار بهینه معمولاً بین ۸-۱۰ mm است. پنل های آبگرد معمولاً از فولاد گرید A (مثل A516) که در ساخت لوله های بویلر نیز استفاده می شود، ساخته می شود. این گریدهای فولادی علاوه بر قیمت مناسب، ضریب انتقال حرارت خوبی ( $50 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) مقاومت بالایی در برابر تنش حرارتی و خستگی ناشی از سیکل های حرارتی دارند. در قسمت هایی از کوره که در معرض حرارت های خیلی بالا قرار دارد، ممکن است از پنل های آبگرد مسی استفاده شود. ضریب انتقال حرارت مس  $383 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  است که تقریباً بیش از هفت برابر ضریب انتقال حرارت فولاد گرید A می باشد؛ و بنابراین پنل های مسی می توانند گرمای بیشتری را به آب جاری درون لوله ها منتقل کنند. به همین جهت برای کاهش مصرف انرژی در کوره، پنل های مسی تنها باید در مناطقی از کوره مورد استفاده قرار بگیرند که در معرض حرارت های بسیار زیاد می باشد (مثلاً قسمت های نزدیک به سطح مذاب).

قطر لوله هایی که برای ساخت پنل های آبگرد مورد استفاده قرار می گیرد، معمولاً بین ۷۰-۹۰ mm است. در انتخاب قطر مناسب لوله برای ساخت پنل های آبگرد مسی، هزینه ساخت نیز معمولاً در نظر گرفته می شود. در نواحی ای از کوره که در معرض حرارت زیاد می باشد، ممکن است پنل های مسی با لوله های با قطر کمتر که سرعت (Velocity) جریان آب در آن ها بیشتر است مورد استفاده قرار بگیرد جهت جلوگیری از تشکیل بخار درون لوله های پنل ها. عمر پنل های آبگرد اساساً وابسته به مقدار سیکل های حرارتی است که این پنل ها در معرض آن قرار دارند. در هنگام شارژ قراضه درون کوره، قطعات قراضه سرد ممکن است با پنل ها در تماس قرار بگیرند (همچنین در هنگام باز شدن سقف کوره پنل های آبگرد در معرض تماس با هوای محیط قرار می گیرند). بعد از ذوب شدن قراضه درون کوره و

تشکیل حمام مذاب با سطح یکنواخت (مرحله Refining)، پنل‌های آبگرد می‌تواند در معرض حرارت شدید تشعشعی (ناشی از قوس) قرار بگیرد. بنابراین، مقدار سیکل‌های حرارتی وارده به پنل‌های آبگرد می‌تواند زیاد باشد. بهترین راه‌حل برای این مشکل، ماکزیمم کردن مقدار خنک‌شوندگی پنل‌ها و در عین حال مینیمم کردن عبور مستقیم شار حرارتی به آنهاست. در عمل ثابت شده است که بهترین روش برای انجام این کار، چسبیدن یک لایه سرباره به جداره داخلی پنل‌های آبگرد می‌باشد. سرباره با ضریب انتقال حرارت  $0.12-0.13 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  یک عایق حرارتی بسیار خوب است. به طور کلی ضخامت لایه سرباره‌ای که به پنل‌های آبگرد مسی می‌چسبد، به دلیل قابلیت انتقال حرارت بالای این پنل‌ها، بیشتر است. همچنین به منظور بیشتر کردن چسبندگی سرباره به پنل‌های آبگرد، انکراهایی به سطح داخلی آن‌ها جوش داده می‌شود.

سرعت (Velocity) جریان آب در پنل‌های آبگرد باید بین  $1.2-2.5 \text{ ms}^{-1}$  باشد. این محدوده سرعت، احتمال تشکیل بخار در لوله‌ها را به کمترین مقدار می‌رساند. تشکیل بخار درون لوله‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی (تا ۱۰ برابر) انتقال حرارت پانل را کاهش داده که این مسئله باعث گرم شدن بیش از حد و ایجاد ترک در قسمتی از پنل شود که حباب در آن حبس شده است.

معمولاً اختلاف دمای آب ورودی و خروجی به مدار پنل‌های آبگرد بین  $8-17^\circ\text{C}$  است که برای پنل‌های آبگرد درپوش می‌تواند به  $28^\circ\text{C}$  نیز برسد.

مبنای طراحی سیستم خنک‌کننده بدنه کوره، قانون کپلر است. مطابق این قانون شار حرارتی‌ای رسیده از یک منبع به یک نقطه دلخواه، با توان و زاویه ورود شار نسبت مستقیم و با مجذور فاصله منبع تا آن نقطه نسبت عکس دارد. در کوره قوس الکتریکی، سه الکتروود، منابع تولید کننده شار تشعشعی هستند که به پنل‌های آبگرد شل وارد می‌شوند؛ بنابراین این شار ورودی در هر نقطه برابر است با مجموع شار تشعشعی ورودی از قوس هر سه فاز. که این شار ورودی با توان Arc، قطر PCD و ارتفاع قوس که زیر پوشش سرباره نیست، نسبت مستقیم دارد.

از دیگر تجهیزات کوره قوس الکتریکی، Conducting arms و Columns (ستون‌ها) هستند که با زاویه  $90^\circ$  درجه به هم متصل می‌شوند. Arm‌ها که از وظیفه انتقال جریان ثانویه به الکتروودها را به عهده دارند. این بازوها معمولاً از مس ساخته می‌شوند و از داخل آبگرد هستند. کار Column‌ها، بالا پایین کردن الکتروودها برای کنترل طول قوس مناسب در کوره است. سطح مقطع این ستون‌ها، دایره‌ای یا مستطیلی شکل است. حرکت این ستون‌ها توسط موتور وینچ و یا جک‌های هیدرولیکی انجام شود. عملکرد این موتور وینچ یا جک‌ها، تحت فرمان، سیستم نرم‌افزاری Electrode regulation می‌باشد که بر اساس پارامترهای برقی، به طور اتوماتیک الکتروودها (فازها) را جهت تنظیم طول قوس مناسب در کوره، بالا/پایین می‌برد. سرعت حرکت بالا/پایین الکتروودها (فازها) در حالت اتوماتیک (تحت کنترل

سیستم Electrode regulation معمولاً می‌تواند تا حدود ده برابر سرعت حرکت آن‌ها به صورت دستی باشد (فرمان توسط اپراتور کوره).

به یک سر Armها، Clamp و به سر دیگر آن Water-cooled cable متصل است. کار کلمپ، اتصال الکتروود به Arm و نگه داشتن الکتروود است. ضریب اصطکاک بین فلز و الکتروود گرافیتی خیلی کم و در حدود ۰.۱۵ است؛ بنابراین نیروی کلمپینگ لازم برای نگه داشتن الکتروود باید حدود ۶-۷ برابر بیشتر از وزن الکتروود باشد. به عنوان یک معیار سر انگشتی، نیروی کلمپینگ (بر حسب نیوتن) لازم برای نگه داشتن الکتروود باید حدود ۸۵۰ برابر مجذور قطر الکتروود (به اینچ) باشد. کلمپ‌ها با توجه به اینکه در معرض حرارت‌های بسیار بالا ناشی از خروج جریان گاز و غبار و نیز در معرض جریان‌های گردابی هستند که در الکتروود القا می‌شود؛ برای جلوگیری از انبساط حرارتی آن‌ها، با آب خنک می‌شوند.

Water-cooled cableها جریان را از خروجی‌های ترانسفورماتور کوره به Armها منتقل می‌کنند. این کابل‌ها انعطاف‌پذیر (به شکل U) می‌باشد تا با حرکت بالا/پایین فازها و سوئیچ در پوش دچار آسیب نشوند. انتقال جریان از خروجی ترانس به Arm هر فاز معمولاً توسط ۲-۴ واترکولد کیبل انجام می‌گیرد. واترکولد کیبل‌ها از چندین رشته سیم مسی ساخته و به هر دو سر آن‌ها ترمینال‌های مسی متصل می‌شود.

واترکولد کیبل‌ها دارای پوشش لاستیکی می‌باشند و در ترمینال‌ها با نوارهای Stainless نامومگنتیک محکم و سیل می‌شوند. واترکولد کیبل‌ها از داخل آبگرد می‌باشند.

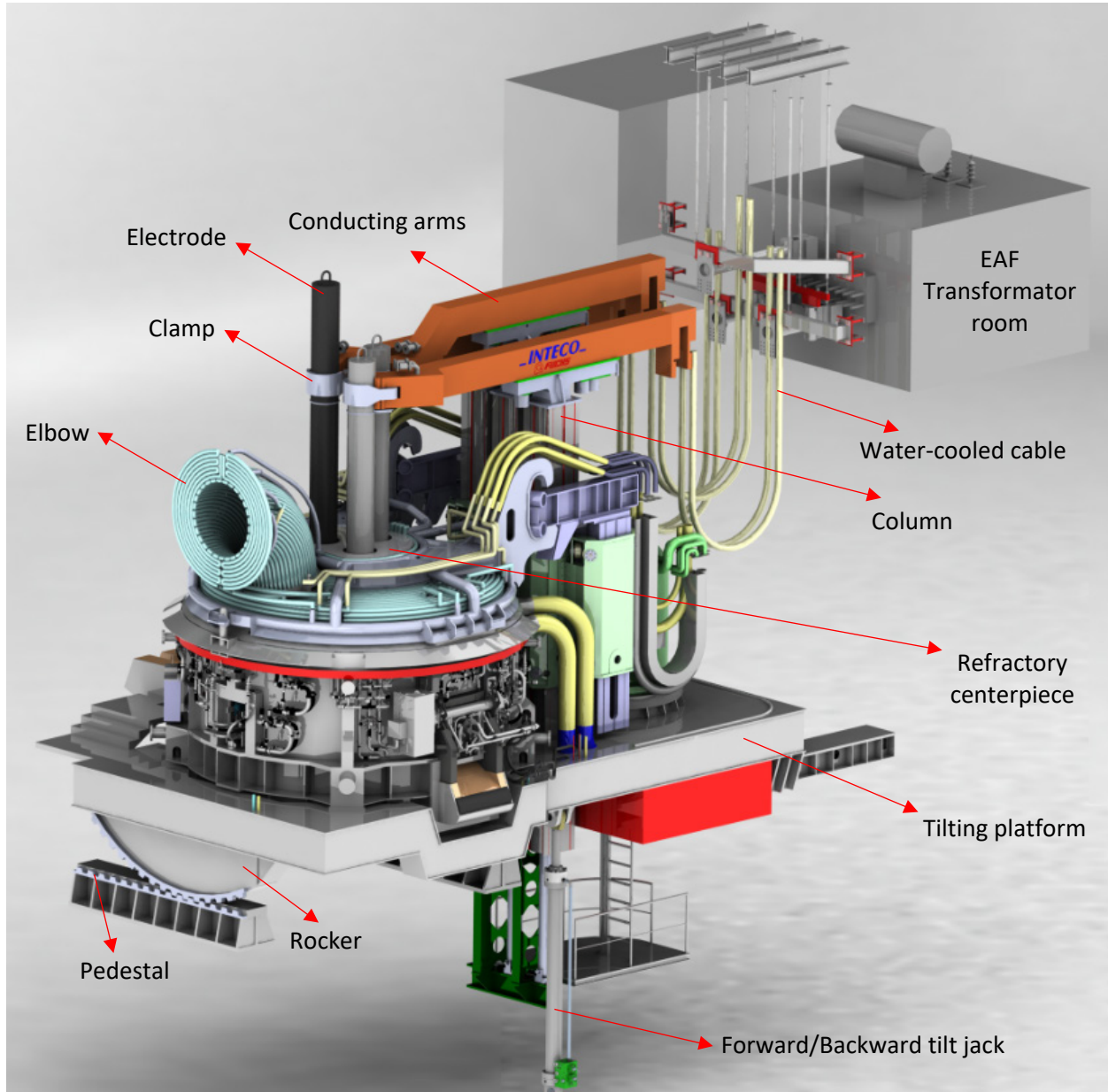
برای ذوب هر تن قراضه، حدوداً به ۴۰۰ kWh انرژی الکتریکی نیاز هست، بنابراین برای ذوب ۱۰۰ تن قراضه، MWh ۴۰ انرژی الکتریکی مورد نیاز می‌باشد. برای یک کارگاه تولید فولاد با هدف تولید ۱ میلیون تن فولاد مذاب در سال، ضروریست که نرخ تولید بیش از ۱۰۰ ton/h باشد. برای رسیدن به این نرخ تولید، متوسط توان ورودی به کوره باید MW ۸۰ باشد. کارگاه‌های ذوب معمولاً به توان بین ۲۰۰-۲۰ MW نیاز دارند. دسترسی به این توان‌های بالا فقط از طریق خطوط انتقال برق ولتاژ بالا (که محدوده ولتاژ بین ۵۰۰-۱۰۰ kV) امکان‌پذیر است. در کارخانه‌های تولید فولاد، ترانسفورماتورها از نوع کاهنده می‌باشند. ترانسفورماتور ابتدایی (معمولاً دو ترانس موازی) برق دریافتی از شبکه با ولتاژ ۲۳۰ kV را به ۳۳ kV تبدیل می‌کند و ترانسفورماتور دوم (ترانس کوره قوس الکتریکی)، برق ۳۳ kV دریافتی به سطح ولتاژ V (۶۰۰-۱۰۰ ولت) می‌رساند. ترانسفورماتور کوره دارای تجهیزاتی به اسم Tap changer است که امکان انتخاب حالت مختلف از شدت جریان و ولتاژ را بسته به مراحل ذوب (Refining, Melting, Bore in) فراهم می‌کند. اساس کار تپ جنجر تغییر در تعداد دورهای سیم‌پیچ اولیه ترانس می‌باشد.

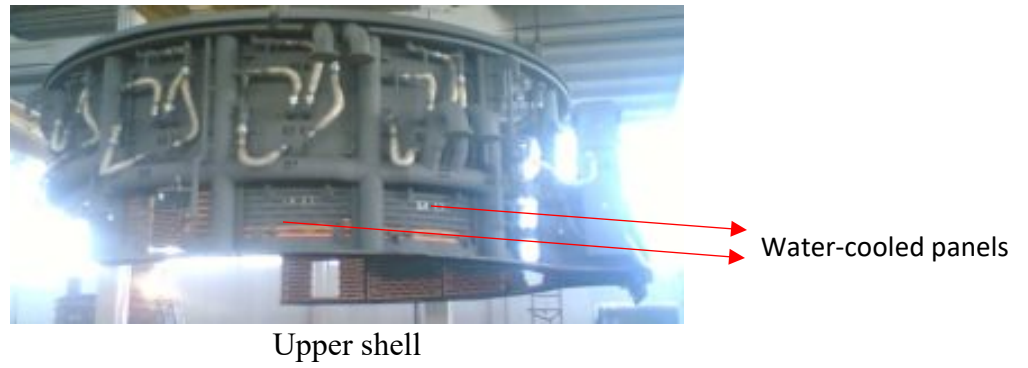
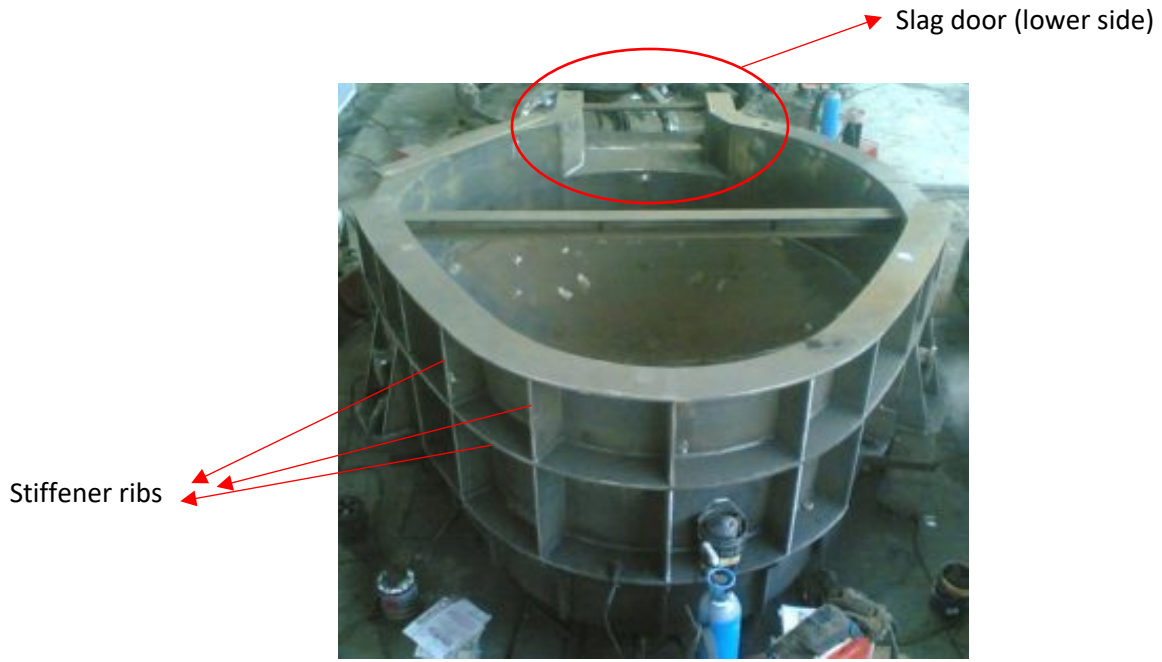
سیستم مکش Off-gas کوره متشکل از یک فن، داکت‌های آبگرد هدایت جریان گاز، و Baghouse می‌باشد. فن، نیروی مکشی لازم برای ایجاد فشار نسبی منفی در کوره و خارج کردن Off-gas و Dust از درون کوره را ایجاد می‌کند. Baghouse ذرات جامد (Dust) همراه جریان Off-gas را فیلتر می‌کند. ایجاد فشار منفی برای دو منظور ایجاد می‌گردد، اول تضمین یک محیط کار ایمن و دوم به حداقل رساندن اتلاف انرژی. وقتی که فشار نسبی درون کوره بیشتر از صفر شود، گازهای درون کوره به خارج از آن، یعنی فضای محل کار، منتشر می‌شود. این گازها عمدتاً شامل CO، CO<sub>2</sub> و N<sub>2</sub> می‌باشد.

طراحی سیستم مکش Off-gas کوره، بر اساس موازنه جرم و انرژی کوره قوس الکتریکی انجام می‌شود تا مشخص گردد مقدار و گرمای گاز خروجی از کوره چقدر است. پارامترهای متعددی روی این موازنه اثر گذارند مثل وزن شارژ فلزی، ترکیب شارژ (مقدار روغن همراه قراضه، مقدار مواد قابل احتراق موجود در قراضه، و مقدار رطوبت همراه مواد)، توان ورودی به کوره، زمان Power-on و TTT، منافذ باز بدنه کوره و مقدار هوایی که از طریق آن‌ها درون کوره مکش می‌شود، مقدار اکسیژن، مقدار کک، مقدار آهک، دولومیت و... برای کنترل انتشار فیوم، می‌بایست فشار نسبی درون کوره در یک محدوده منفی مشخص کنترل شود. این محدوده معمولاً بین ۱۲- تا ۲۴- پاسکال می‌باشد. کار کردن سیستم مکش با فشار منفی زیاد می‌تواند مصرف برق کوره را تا حدود ۴۵ kWh/ton افزایش و کار کردن کوره با فشار مثبت، می‌تواند مصرف برق کوره را تا حدود ۲۰-۱۰ kWh/ton کاهش دهد. منافذ و محل‌های اصلی مکش هوای محیط درون کوره عبارتند از درب سرباره، فاصله بین رینگ درپوش و لبه شل، گپ بین الکترودها و دلتا و... کاهش این منافذ، باعث بهبود عملکرد کوره و سیستم مکش (Off-gas و Dust) کوره می‌شود. منافذی که در نواحی بالاتر Vessel قرار دارند، اثر منفی کمتری نسبت به منافذ که در ناحیه‌های بالاتر هستند، دارند. دلیل این مسئله این است که فشار منفی در کوره یکنواخت نبوده و در نواحی پایین‌تر کوره شدیدتر است. نرخ مکش هوا از طریق این منافذ به درون کوره، مطابق اصل برنولی با مجذور اختلاف فشار درون کوره و فشار محیط نسبت مستقیم دارد. در مرحله ذوب قراضه، مقدار هوای مکش شده از طریق منافذ، به نسبت مرحله تصفیه (که ذوب قراضه انجام و شارژ آهن اسفنجی و تزریق اکسیژن صورت می‌گیرد)، خیلی کمتر است زیرا قطعات قراضه به عنوان مانع در برابر مکش هوا درون کوره عمل می‌کنند. بین البو و داکت مکش فاصله‌ای وجود دارد به اسم Slip-gap. از طریق اسلیپ گپ هوا به درون داکت مکش شده که هم باعث سرد شدن Off-gas می‌گردد و هم باعث انجام واکنش سوختن CO به CO<sub>2</sub>. (علاوه بر این اسلیپ گپ امکان تیلت کوره و سوینگ درپوش را فراهم می‌کند).

با سرد شدن گاز حجم آن کمتر می‌شود، در نتیجه مکش مقدار بیشتری گاز ممکن می‌شود. همچنین گاز CO<sub>2</sub> به نسبت CO اثرات مخرب زیست‌محیطی کمتری دارد. تنظیم عرض Slip-gap، بسیار مهم است. در صورت باز بودن بیش از حد، هوای زیادی از طریق آن درون داکت مکش شده و باعث سرد شدن بیش از حد Off-gas و انجام نشدن

واکنش سوختن CO می‌گردد. در صورتی که عرض Slip-gap کم باشد، مقدار هوای کافی جهت سوختن به درون داکت مکش نمی‌شود. معمولاً عرض اسلیپ گپ به وسیله یک داکت کشویی قابل تنظیم است و مقدار آن در حدود ۸-۱۲ cm است.





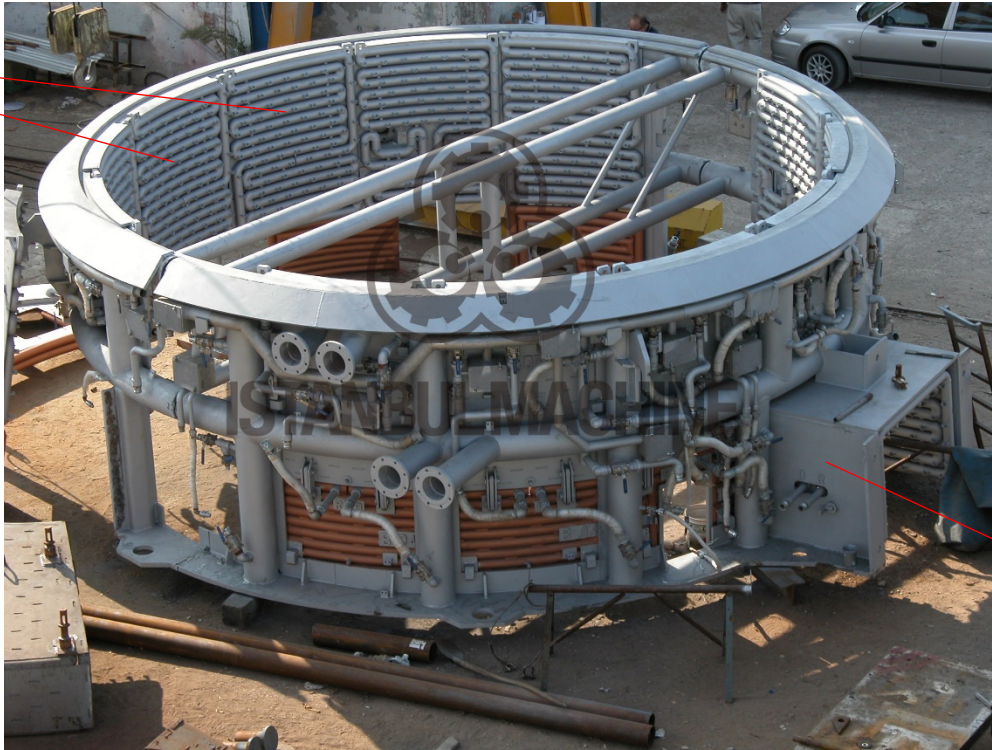


Roof



Water-cooled panels of roof

Water-cooled panels of upper shell



Slag door (upper side)