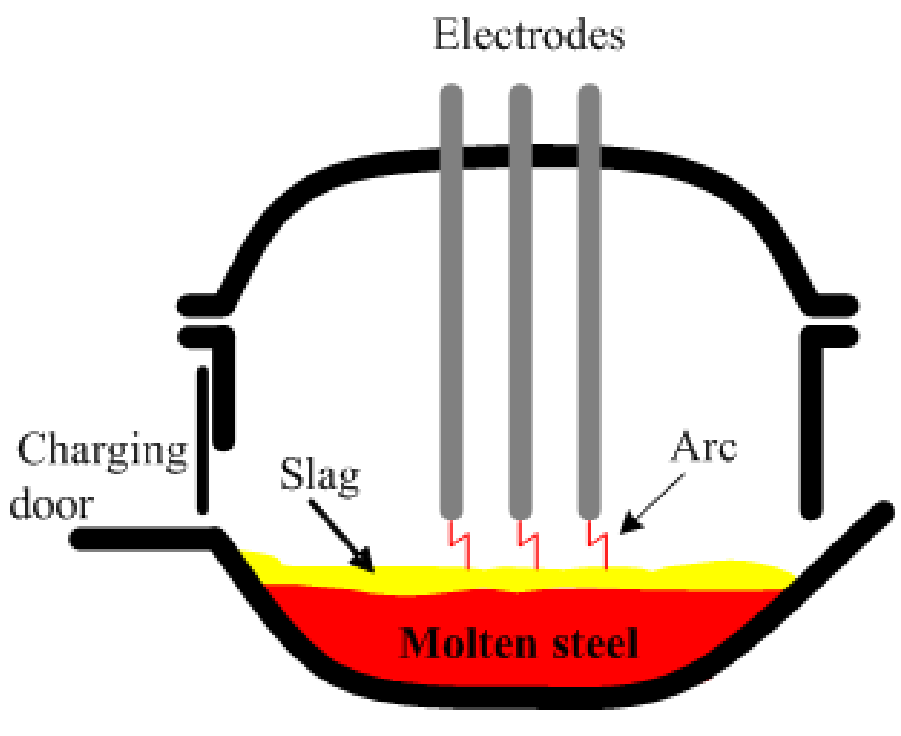
فصل ششم

فولادسازی کوره الکتریکی

ویژگی های ساختمانی



- کوره شامل یک بدنه فولادی است که با مواد دیرگداز مناسب پوشش داده شده و روی یک دستگاه گردان نصب گردیده است.
- سه الکترود از سقف وارد شده و توسط نگهدارنده‌ها محافظت می‌گردند.
- حرکت الکترودها معمولاً به صورت خودکار کنترل می‌شود.
- کلاهک و دودکش ممکن است برای بارگیری بچرخد.
- حرارت توسط منطقه‌ای بین الکترودها و بار تولید می‌شود.

اجاق

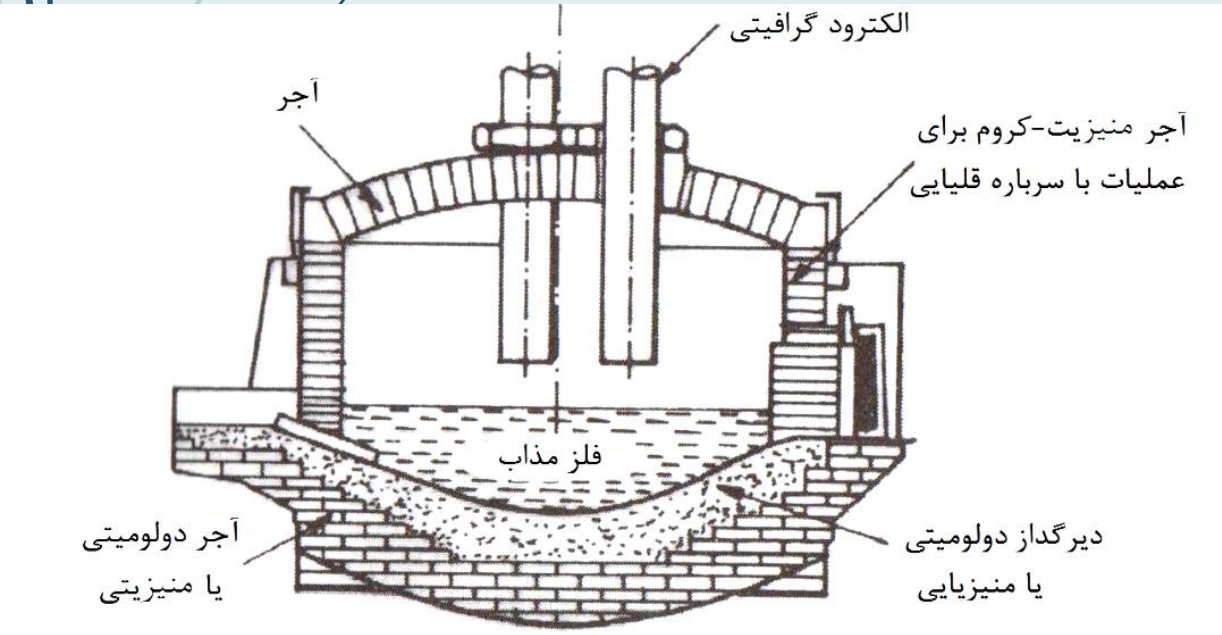
اجاق به عنوان یک ظرف برای سرباره و فلز عمل می‌کند.

اجاق باید در برابر دمای بالا، خوردگی سرباره و فلز مذاب و نیز تنش‌های مکانیکی و حرارتی مقاوم باشد.

پوشش اجاق

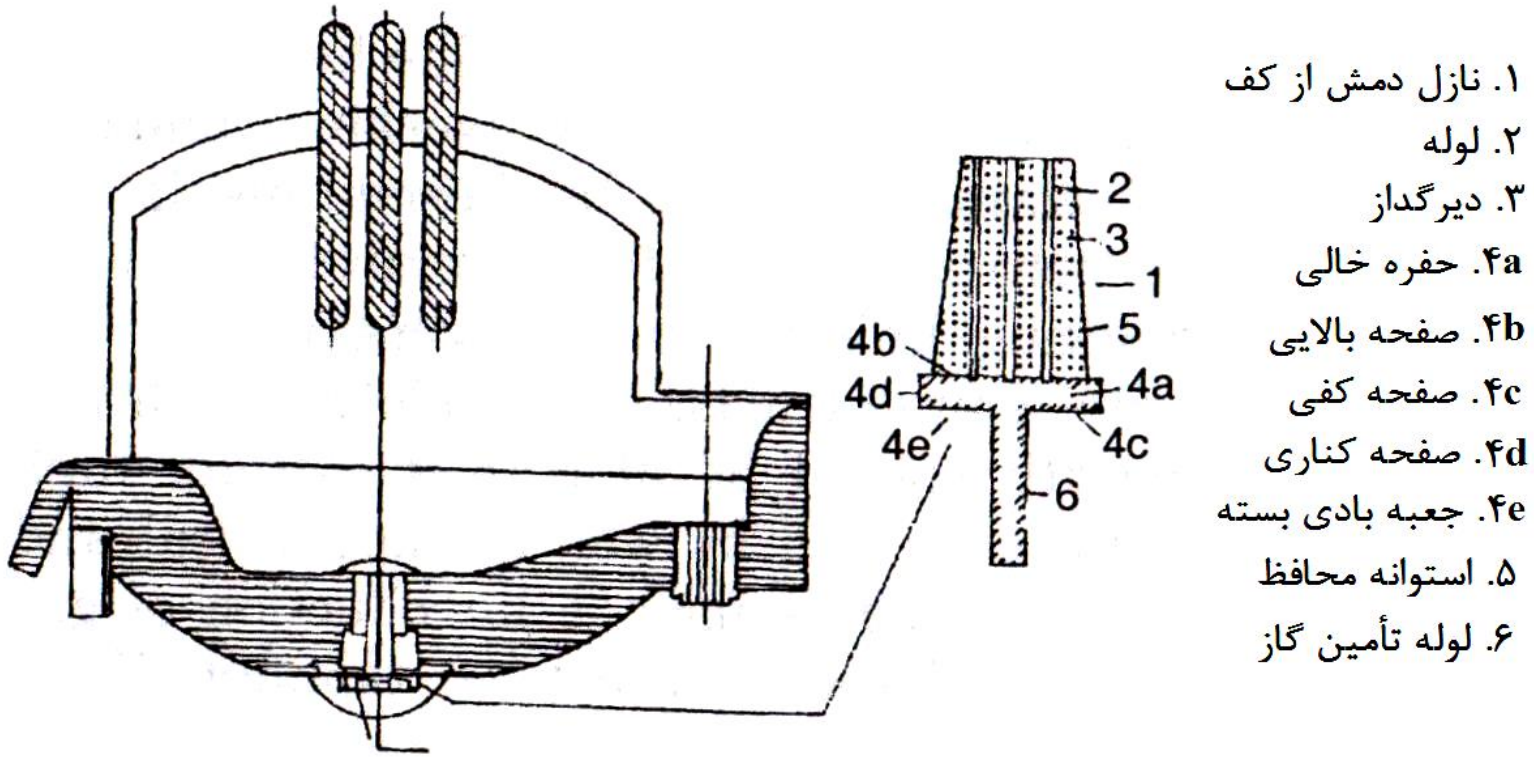
پوشش پشتی (پشت بند): بصورت تعدادی لایه از آجرهای دیرگداز منیزیتی

پوشش کاری: برای ایجاد یک سطح یکپارچه و بدون درز از دولومیت فشرده یا منیزیت فشرده



اجاق

- پیشرفت‌های اخیر در این زمینه شامل ابداع همزدن گازی از کف و سیستم تخلیه خارج از مرکز کف (EBT) برای تخلیه از کوره بوده است.
- در سیستم تخلیه خارج از مرکز کف، یک مجرای تخلیه مذاب در کف بصورت خارج از مرکز تعبیه می‌شود.



دیواره‌های کناری

در معرض شدید شوک حرارتی، رفتار خورنده سرباره و بکارگیری نامناسب مکانیکی در طی بارگیری و غیره قرار دارند.

نقاط گرم شکل گرفته در دیواره در معرض شرایط شدیدتری هستند.

- فاکتورهای اصلی مؤثر که روی شکل گیری نقاط گرم:

الف) تابش از شعله های قوس

ب) موقعیت قوس و فوران

ج) حرارت بازتابیده شده از سطح حمام

د) استمرار اعمال توان

و) فقدان سرپوش محافظ در برابر بازتاب توسط قراضه بارگیری شده و غیره

راه‌های مهار کردن نقاط گرم:

۱- متعادل کردن توان قوس در الکترود مرکزی از طریق افزودن یک مقاومت القایی

۲- عملکرد کوره تحت فشار مثبت و محافظت در برابر بخار و دود قوس

۳- عملیات با طول قوس کوتاه‌تر

۴- هدایت شعله های قوس دور از دیواره

راه مؤثرتر، بکارگیری یک پوشش دیرگداز اضافی با رسانایی بالا و آبگرد است.

سقف

- معمولاً از آجرهای سیلیکایی ساخته شده است.
- از آجرهای آلومینا بالا (۷۰٪ آلومینا) و آجرهای قلیایی نیز گاهی استفاده می‌شود.
- سه ورودی دایروی برای ورود الکترودها فراهم شده است.
- اصولاً از الکترودهای گرافیتی در کوره قوس الکتریکی استفاده می‌شود.
- سه مکانیزم اساسی برای فرسایش الکترود وجود دارد:

۱-سایش در نوک الکترود به سبب اجرای قوس الکتریکی

۲-اکسیداسیون کناره های الکترود کوره و شکستگی های مکانیکی به سبب سقوط قراضه

۳-شکست مکانیکی اتصالات الکترود و نوک حرارتی.

ذوب فولاد

- مراحل فرآیند در عملیات کوره قوس الکتریکی قلیایی عبارتند از:

الف) بارگیری

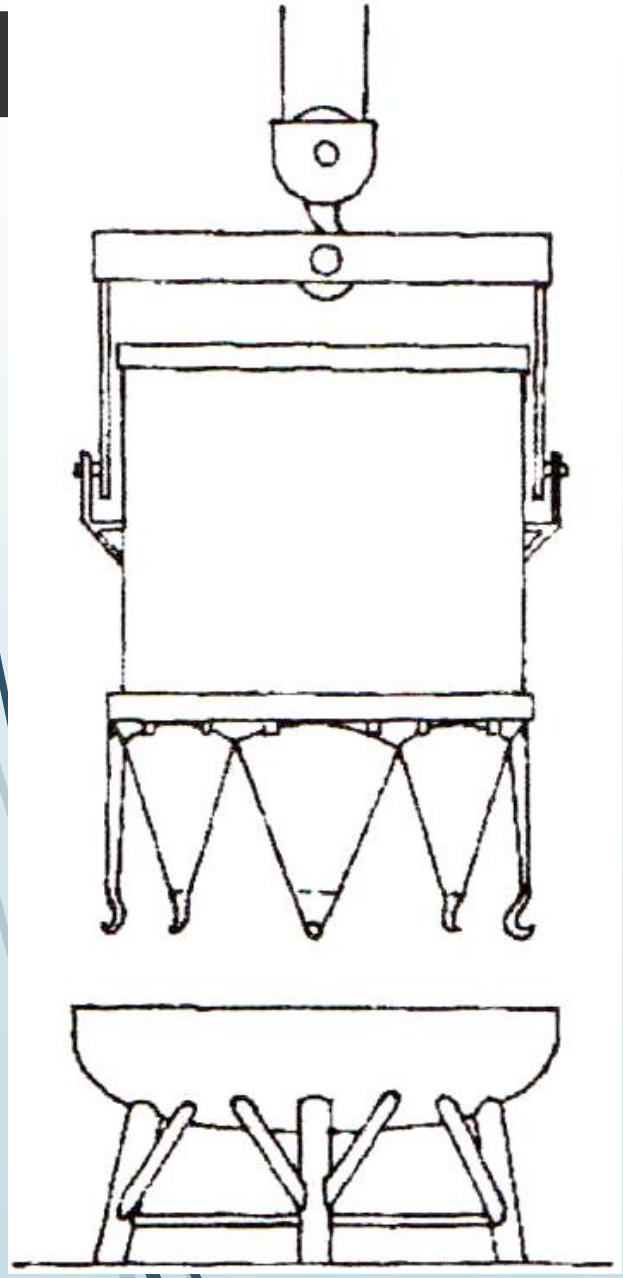
ب) ذوب

ج) تصفیه

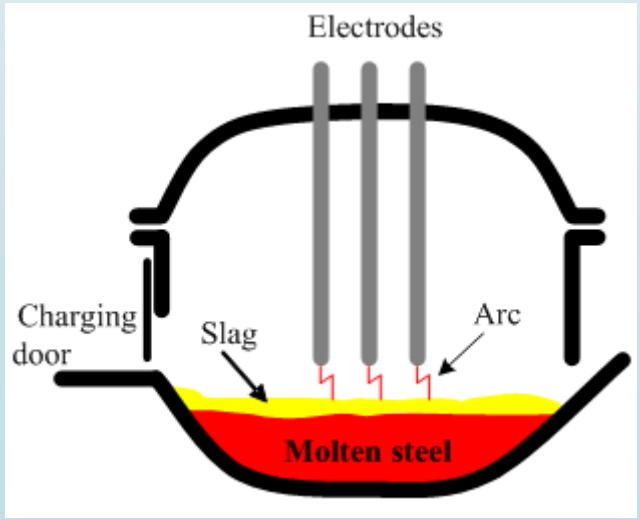
د) تکمیل کاری

- تصفیه معمولاً تحت تاثیر یک سرباره اکسید کننده انجام می‌شود که باعث فسفر زدایی خوب می‌شود.
- اما گوگردزدایی نیاز به یک سرباره احیاء کننده ثانویه پس از خروج کامل سرباره اکسید کننده دارد.

بارگیری



- ابتدا الکترودها بالا رفته و سپس سقف می‌چرخد.
- در این زمان یک سبد از نوع تخلیه از کف بار فلزی را حمل کرده و از طریق دهانه باز به درون کوره می‌ریزد.
- بار شامل قراضه مذاب فولادی، آهک/ سنگ آهک و کک است.
- بارگیری از درب نیز در کوره های کوچک انجام می‌گیرد.



بارگیری

- برای داشتن ذوب آرام، نسبت قراضه مذاب سنگین و سبک معمولاً با دقت کنترل می‌شود.
- ابتدا قراضه سبک و بالای آن (زیر الکترودها) قراضه مذاب سنگین بارگیری می‌گردد.
- مابقی قراضه سبک به بالای سطح تماس آهک/سنگ آهک با قوس بارگیری می‌شود.
- قسمتی از خاکه آهن مورد نیاز برای اکسیداسیون ممکن است همراه با اولین بخش از بار قراضه به کوره بارگیری شود. مابقی خاکه آهن به مرور و با بیل به حمام اضافه می‌گردند.
- درضمن عناصر آلیاژی مانند نیکل یا مس ممکن است با قراضه بارگیری شوند.
- عناصر آلیاژی مستعد اکسیداسیون معمولاً بعد از ذوب اضافه می‌گردند.
- عناصر آلیاژی نسبتاً دیرگداز نیز مستقیماً به ناحیه منطقه قوس وارد می شوند.

ذوب

- به محض ایجاد قوس، ذوب از زیر الکترودها آغاز می‌گردد.
- الکترودها سوراخی در بار فلزی ایجاد می‌کنند و یک حوضچه مذاب در کف شکل می‌گیرد.
- زمانیکه بار در زیر الکترودها بطور کامل ذوب می‌شود قوس پایدار خواهد شد.
- درحین مرحله ذوب سیلیسیوم، منگنز، کربن، فسفر و غیره در درجه‌های مختلف اکسید شده و سرباره اولیه شکل می‌گیرد.
- با انحلال تدریجی آهک در سرباره، بازیسیته آن افزایش می‌یابد.
- پایداری قوس مهم است و این پایداری با بکارگیری الکترودهای توخالی، الکترودهای مغزدار و بارورسازی قوس حاصل می‌شود.

تصفیه و تکمیل کاری

- در پایان مرحله ذوب، یک سرباره قلیایی شکل می‌گیرد.
- سرباره حاوی اکسیدهای مختلفی مانند FeO، CaO، MnO، SiO_2، Al_2O_3 و غیره است.
- تصفیه تحت تاثیر این سرباره اکسید کننده انجام می‌شود.
- فلورسپار (CaF_2) برای حفظ سیالیت کافی سرباره اضافه می‌گردد.
- فسفرزدایی نیز توسط سرباره اکسیدکننده قلیایی به صورت مطلوب انجام می‌شود.
- برای حفظ بازیسیته به صورت دوره‌ای آهک اضافه می‌شود.
- در این مرحله عمل سرریز سرباره انجام می‌شود و قسمت زیادی از فسفر که در طی مرحله ذوب اکسید شده بود با سرباره اول خارج می‌شود.
- در ضمن برای ادامه واکنش های تصفیه، آهک و خاکه آهن جدید بارگیری می‌شود.

تصفیه و تکمیل کاری

- در پایان دوره اکسید کردن، سرباره خارج می‌گردد.
- در ادامه، حمام ابتدا با فروسیلیس و فرومنگنز و در انتها از طریق افزودن آلومینیوم اکسیژن زدایی می‌شود.
- گوگردزدایی توسط عواملی همچون مقدار بالای منگنز در فلز، دمای بالای حمام و سرباره احیاء کننده قلیایی مطلوب انجام خواهد شد.
- برای حصول فولاد با گوگرد کمتر و با توجه به اینکه اتلاف عناصر آلیاژی گرانقیمت نیز محتمل است، یک سرباره احیاء کننده ثانویه معمولاً پس از سرباره اکسید کننده اولیه ساخته می‌شود.

تصفیه و تکمیل کاری

ترکیب (CaC_2) طبق واکنش زیر با (FeO) موجود در سرباره واکنش می‌دهد:

$$(CaC_2)+2(FeO)=(CaO)+Fe+2\{CO\}$$

گوگرد زدایی به کمک سرباره احیاء کننده طبق واکنش‌های زیر انجام می‌شود:

$$(CaO)+[FeS]=(CaS)+(FeO)$$

$$2(FeO)+ (CaC_2)= (CaO)+Fe+2\{CO\}$$

تصفیه و تکمیل کاری

در فولادهای کم کربن که باید از ورود کربن بیشتر جلوگیری شود، با افزودن مناسب ذرات ریز فروسیلیس به سرباره یک سرباره احیاء کننده تولید می‌گردد.

سیلیسیوم با تشکیل سیلیکا به سمت سرباره رفته، توسط آهک شناور گشته و حمام را اکسیژن‌زدایی می‌کنند.

مقدار اکسیژن سرباره توسط افزودن دوره ای آلومینیوم پایین نگه‌داشته می‌شود.

همزدن القایی

- فولاد ذوب شده در کوره الکتریکی ممکن است توسط یک همزن القایی نصب شده در زیر کف بدنه کوره همزده شود.
- در واقع القاگر یک شار مغناطیسی متحرک در حین عملیات تولید می‌کند و شار مغناطیسی متحرک با میدان القاء شده در حمام واکنش داده و از این طریق همزدن حمام با شدت پایین را بهبود می‌بخشد.
- همزدن، همگنی بهتر حمام در فولادهای آلیاژی را ارتقاء داده و واکنش‌های فلز-سرباره را تقویت می‌کند.

توسعه در تکنولوژی EAF

اقدامات عملیاتی پیشرفته مانند:

-عملیات تحت عامل توان بالا

-تشکیل سرباره پفکی و

-استفاده از مشعل‌های اکسیژن-سوخت

منجر به کاهش مصرف توان والکترود می‌شوند.

پیشرفت ها در طرح کوره

الف) ترانسفورمرهای با توان فوق العاده بالا (UHP)

- آخرین پیشرفت در طرح ترانسفورمر، ترانسفورمر سه پایه است که تنظیم ولتاژ مستقل هر فاز را ممکن می‌سازد.
- این موضوع، توانایی کنترل مناطق گرم در کوره را توأم با حفظ ماکزیمم ورودی توان فراهم می‌کند.
- یک مورد اضافی هم به همراه ترانسفورمر هایUHP چشمک کنترل کننده در ورود خطوط توان است.
- البته بیشتر رایج است که خطوط توان با دیگر مصرف کننده ها به اشتراک گذاشته می‌شوند.

ب) طرح بدنه کوره

بدنه دو تکه:

ساختمان بدنه شامل دو قسمت جداشدنی: بخش زیرین حاوی اجاق و یک خروجی سرباره و بخش رویی شامل تعادل دیواره کناری بدنه

این دو بخش کاملاً از یکدیگر مستقل اند به طوری که بخش بالایی می‌تواند جدا شده و با یک بخش بالایی جدید پوشش داده شده تعویض گردد.

مزایای این حالت:

- ✓ عدم محدودیت زمانی برای تعمیرات کوره
- ✓ بهبود شرایط کاری و آسترکوبی واقعی و در نتیجه ایجاد امنیت و بازدهی کارامد

ظرفیت بار در کوره باید برای تحمل وزن بخشی از بدنه با پوشش جدید کافی باشد.

وزن کلی یک بدنه با پوشش کامل منجر به محدودیت کاربرد این طرح به حالت های نسبتا کوچکتر آن شده است.

ج) طراحی سیستم خنک کننده برای دیواره کناری و سقف

- استفاده از سیستم آبگرد برای قسمت های پوشش دیواره کناری بالا که در معرض بیشترین نرخ سایش هستند.
- مناطقی که با سیستم آبگرد خنک می‌شوند:
  - ✓ مناطق گرم (مانند نزدیک الکترودها)
  - ✓ مناطق تحت دمش اکسیژن و عملیات تزریق مواد افزودنی تحت فرسایش بیش از حد هستند.
- با این روش زمان تخلیه تا تخلیه به ۱۰-۵ دقیقه کاهش می‌یابد.

د)طرح جدید الکترود ها

الکترود های آبگرد:

- استفاده از بخش های آبگرد در بین نگهدارنده و الکترود گرافیتی است.
- فایده آن اینست که الکترودها سردتر بوده و در نتیجه تلفات گرافیت در اثر اکسایش در دمای بالا کاهش می‌یابد.

تزریق آرگون از طریق الکترود های تو خالی

- منجر به پایداری بیشتر و سریع تر قوس کوره با مقادیر بالاتر آزاد سازی راحت‌تر به خصوص در مرحله ذوب قراضه می‌شود.
- نرخ تولید کوره افزایش و مصرف الکترود کاهش می‌یابد.
- از مزایای متالورژیکی آن می‌توان به کاهش جذب هیدروژن و نیتروژن توسط فولاد اشاره کرد.

و) کنترل الکترونیکی و کامپیوتری

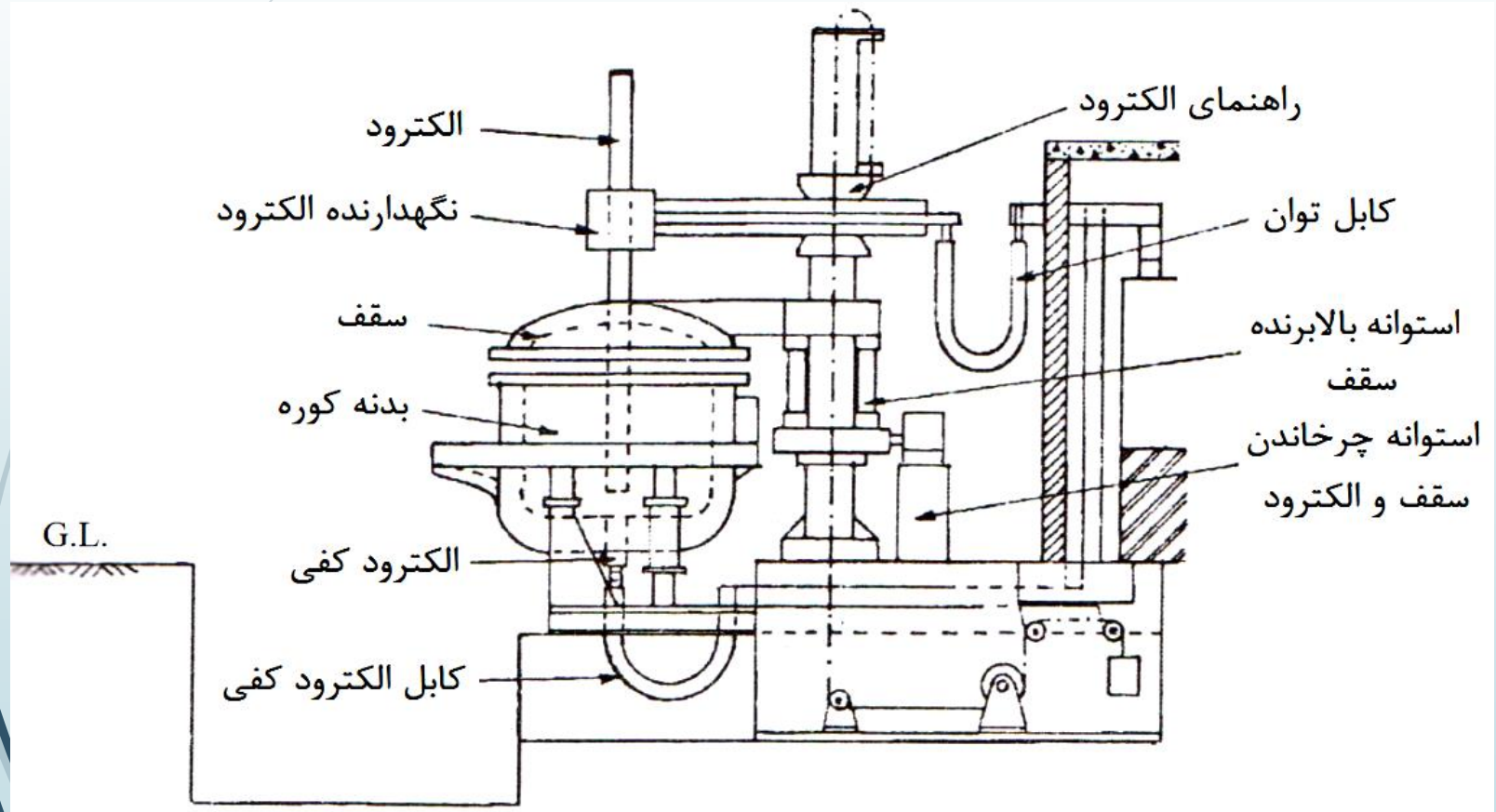
ممکن است تحت شرایط خاصی در کوره های قوسی، اختلالاتی در توزیع توان به نام چشمک ایجاد شود. در این شرایط ممکن است به دستگاه های اصلاح کننده گران قیمت به عنوان اقدامات محدود کننده عملکرد کوره و بهره وری نیاز باشد.

ه) کوره قوس الکتریکی DC

در این نوع کوره، قوس بین الکترود بالایی و الکترود هوا خنک پایینی برقرار می شود.

مزایا:

- ✓ مصرف الکترود کمتر
- ✓ کاهش هزینه
- ✓ بی صدا
- ✓ قوس پایدار
- ✓ همزدن در اثر تلاطم
- ✓ همگنی دما و مذاب
- ✓ عدم وجود نقاط گرم



تحولات در مشخصه های عملیاتی

مشعل‌های اکسیژن- سوخت و دمش اکسیژن

- برای تولید یک دمای شعله خیلی بالا استفاده می‌شود.
- ویژگی‌ها:
  - ✓ حرارت ورودی بالا
  - ✓ بازدهی بالا
  - ✓ طراحی جمع و جور
  - ✓ افزایش نرخ ذوب قراضه در نقاط سرد
- بر این اساس مشعل های اکسیژن- سوخت جهت حرارت دهی، ذوب قراضه جامد بین الکترودها و تصفیه بکار می‌روند.

مشعل‌های اکسیژن– سوخت و دمش اکسیژن

- رایج ترین روش تامین اکسیژن از طریق لوله مرکزی و تامین یک گاز احتراق از میان فضای بین دو لوله است.
- یک طرح نو، ادغام تعدادی دهانه سوخت و اکسیژن پیرامون آن از طریق یک افشانک مسی است. در این حالت رسانایی بالای مس، حرارت را به یک خنک کننده خارجی منتقل می‌کند. در ضمن این طرح شامل یک محفظه احتراق آب خنک است که دهانه جت را در برابر فولاد مذاب و پاشش محافظت می‌کند.
- نازل های LAVAL، نازل های فراصوت بهینه شده هستند. این عمل با افزایش فشار هوا در EAF، تلفات انرژی را کاهش می‌دهند.

عملیات سرباره پفکی

- در عملیات ذوب و در اثر شکل گیری یک سرباره پفکی عمیق ممکن است نوک الکترودها احاطه شده و قوس مخفی گردد.
- در این شرایط عملیات با عامل با توان بالاتر و افزایش بازدهی الکتریکی انجام می‌شود.
- مزایای عملیات با توان بالاتر:

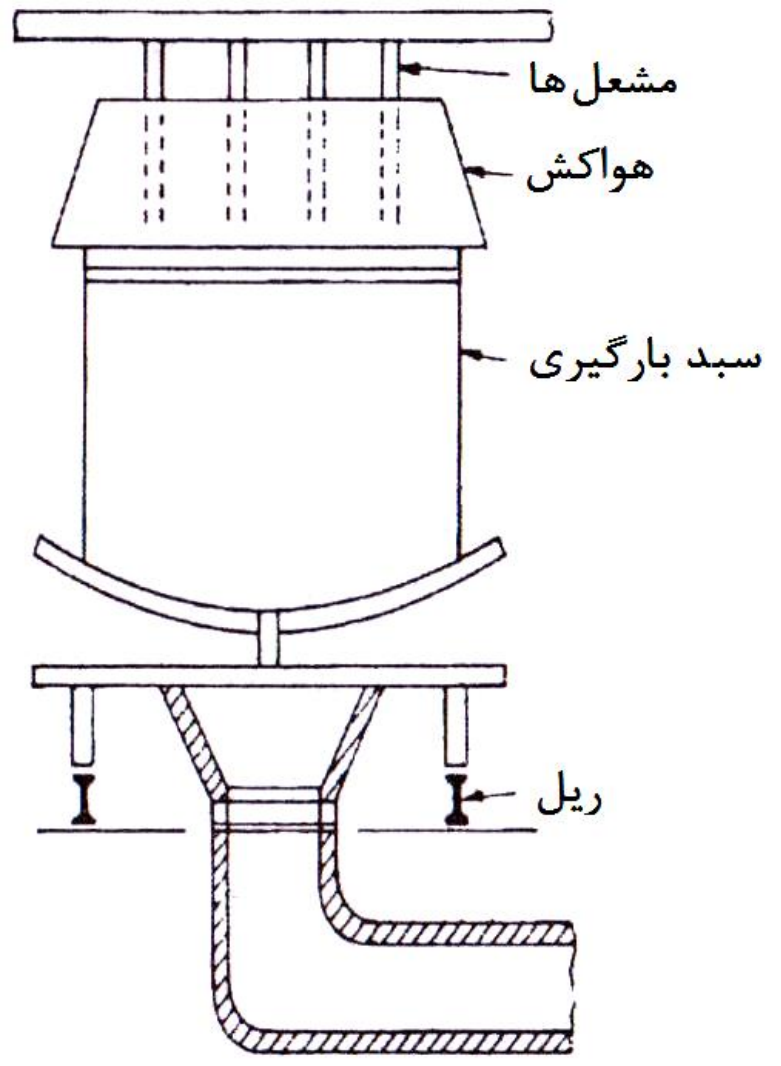
✓ یک دوره ذوب با زمان طولانی تر

✓ آسیب کوره ناشی از شعله‌ور شدن قوس به دلیل مدفون شدن قوس کاهش می‌یابد

✓ بازدهی حرارتی بهتر

پیشگرم کردن قراضه و بازیابی حرارت باطله

برای پیشگرم کردن قراضه، گازهای خروجی داغ کوره قوسی از میان قراضه در سبد بارگیری عبور داه می‌شود.



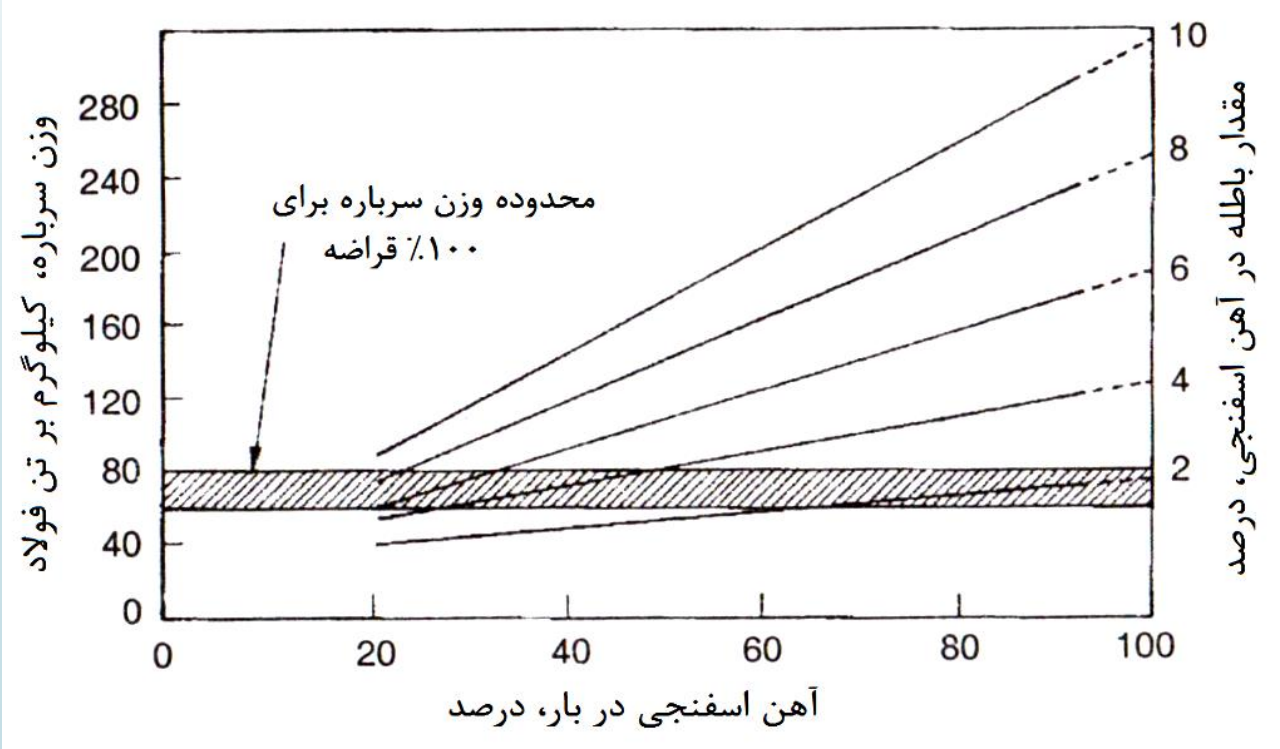
استفاده از آهن اسفنجی بعنوان بار

معمولا دو فرایند برای تولید آهن اسفنجی بر اساس نوع احیا کننده وجود دارد:

۱- آهن اسفنجی بر پایه زغال سنگ با استفاده از زغال سنگ بعنوان احیاءکننده

۲- آهن اسفنجی بر پایه گاز با استفاده از گاز طبیعی بعنوان احیاءکننده

آهن اسفنجی امروزه بصورت گسترده ای بعنوان یکی از مواد بار کوره قوس الکتریکی جایگزین قراضه استفاده می‌شود. معمولا زمانیکه بخشی ازقراضه با آهن اسفنجی جایگزین می‌شود حجم سرباره افزایش می‌یابد.

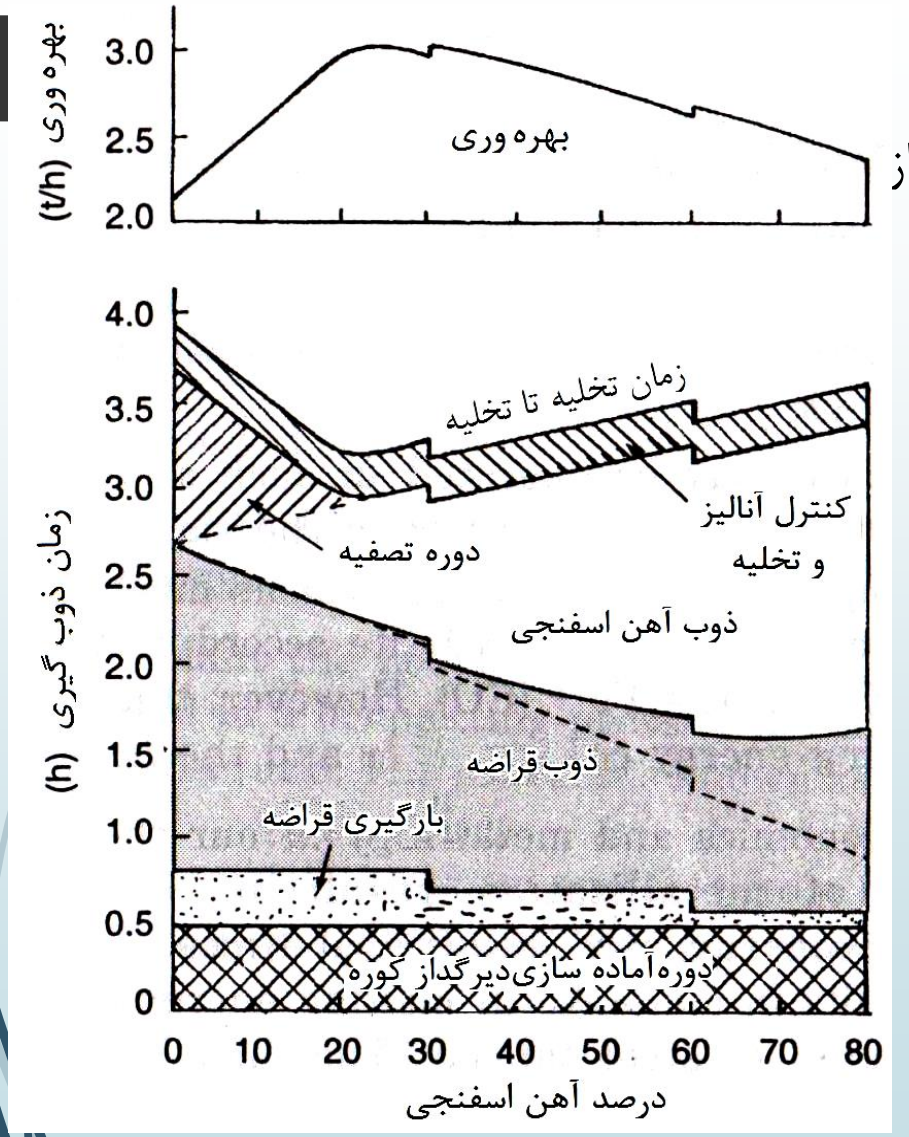


استفاده از آهن اسفنجی بعنوان بار

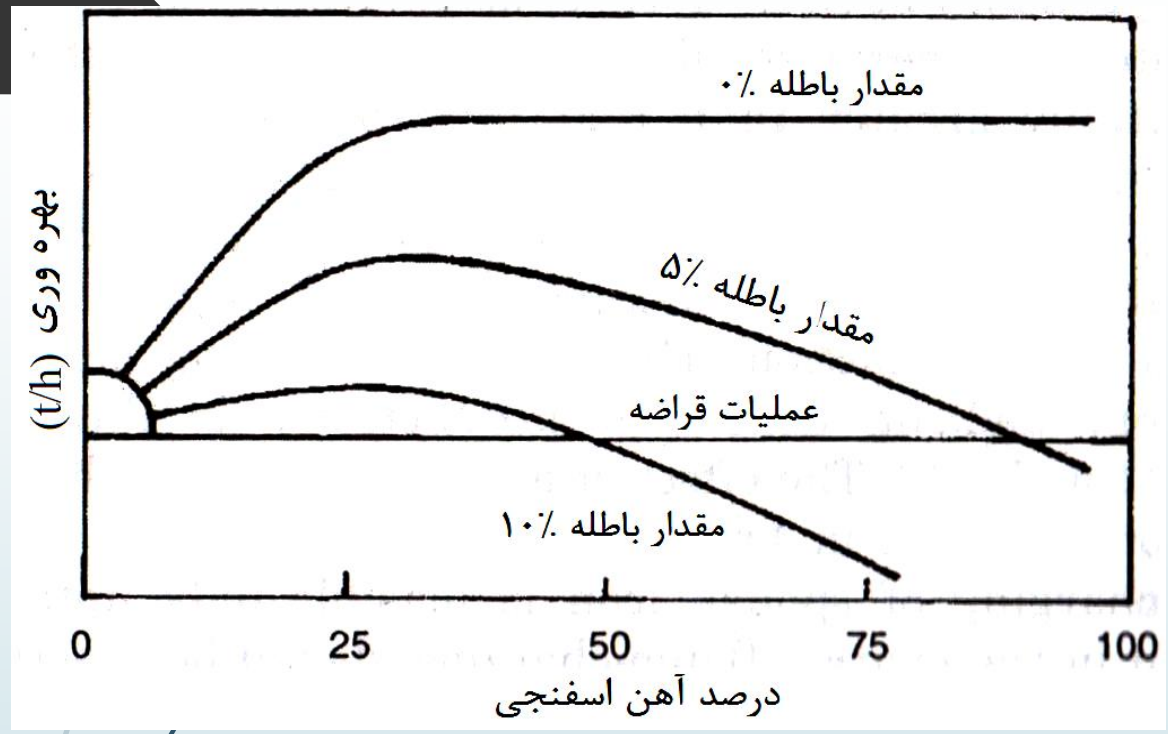
$$\text{درجه فلزی شدن} = \frac{\text{آهن آزاد}}{\text{کل آهن}}$$

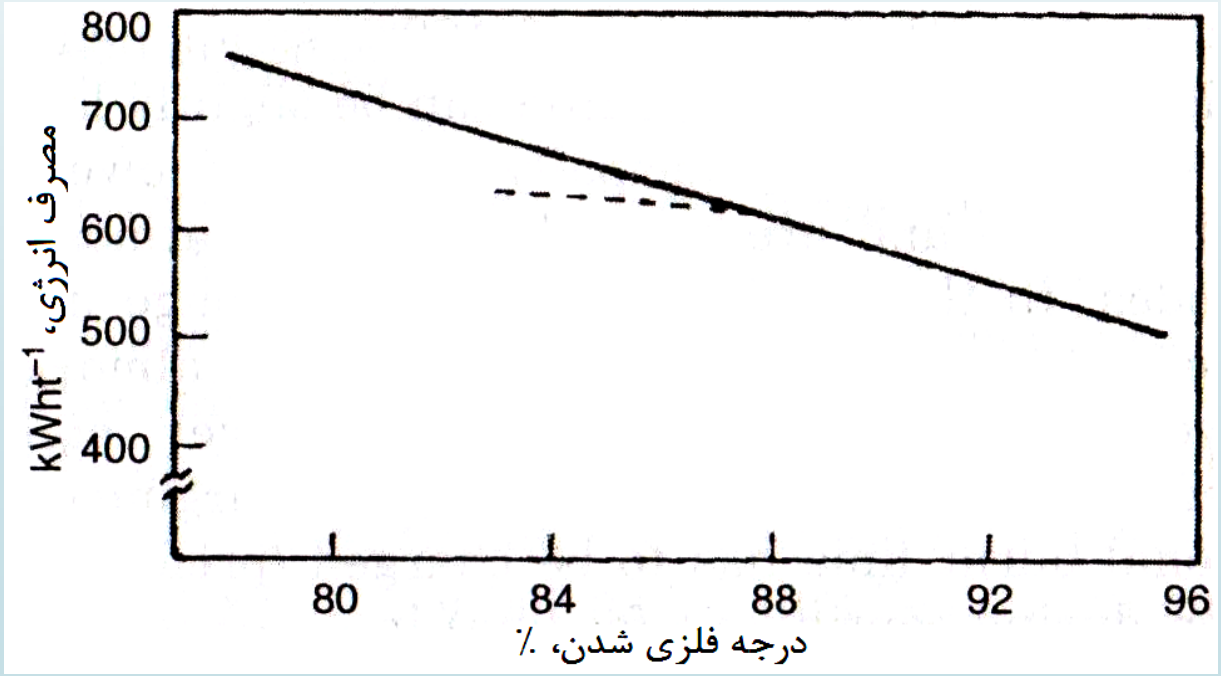
- درجه فلزی کمتر از ۹۲٪ زمان حرارت دهی را بطور قابل توجهی افزایش می‌دهد.
- در این شرایط مقدار باطله بهبود بهره‌وری را تضمین می‌کند.
- در واقع کاهش در درجات فلزی شدن منجر به افزایش مصرف توان و در نتیجه طولانی تر شدن زمان‌های حرارت‌دهی شود.

استفاده از آهن اسفنجی بعنوان بار



- توان ورودی مفید به کوره در اثر تغذیه پیوسته آهن اسفنجی خیلی بهتر از زمانی است که ۱۰۰٪ قراضه حرارت داده می‌شود.
- مصرف الکترود نیز در زمان استفاده از آهن اسفنجی کمتر از حالتی است که تماما قراضه بکار می‌رود.
- در حرارت دهی آهن اسفنجی با بارگیری پیوسته،دیرگداز کوره و عمر سقف می تواند تا حدودی بی تغییر باقی بماند. بنابراین پوشش کف و هجوم لایه سرباره قطعا در بارگیری تک باره آهن اسفنجی بیشتر است.


مقدار باطله ٪۰
مقدار باطله ٪۵
عملیات قراضه
مقدار باطله ٪۱۰
بهره وری (t/h)
0
25
50
75
100
درصد آهن اسفنجی


800
700
600
500
400
مصرف انرژی، $kWht^{-1}$
80
84
88
92
96
درجه فلزی شدن، ٪

فواید بارگیری پیوسته آهن اسفنجی در کوره قوس الکتریکی:

- ✓ زمان خاموشی کمتر
- ✓ تلفات حرارتی ناشی از بارهای برگشتی و تاخیرها حذف گردیده و بنابراین در زمان های حرارت دهی کوتاه تر، تلفات واحد حرارت دهی کاهش می‌یابد. در ضمن در حین فرایند ذوب سر و صدا نیز افت می‌کند.
- ✓ تلفات الکتریکی کمتر ناشی از تغذیه پیوسته، توان اضافی سودمند را برای ذوب ایجاد می‌کند.
- ✓ بعنوان یک دستاورد، می‌توان واکنش کربن با اکسیدهای آهن احیاءنشده درآهن اسفنجی و ایجاد یک جوشش خیلی قوی را نام برد که در مرحله بارگیری پیوسته رخ می‌دهد و شدیدا انتقال حرارت حمام و اختلاط سرباره – فلز را بهبود می‌بخشد.
- ✓ شیمی شناخته شده آهن اسفنجی و عاری بودن آن از ناخالصی‌های نامطلوب اجازه می‌دهد حین انجام فرایند بارگیری پیوسته و ذوب، تصفیه انجام می‌شود.

استفاده از چدن مذاب و کاربید آهن بعنوان مواد بار

در برخی از EAFهای اصلاح شده ممکن است قابلیت استفاده از چدن مذاب تا حدود ۸۰٪ فراهم شود.

جهت اکسیداسیون کربن، اکسیژن ممکن است از طریق دمنده های غوطه‌ور، تزریق کننده‌های محیطی و نازل‌های واقع در درب به داخل کوره تزریق شود.

فواید اصلاحات انجام شده:

- ✓ کاهش در مصرف انرژی الکتریکی
- ✓ حرارت قابل توجه و در دسترس در بار چدن
- ✓ زمان کمتر توان
- ✓ اکسیداسیون گرمازای کربن و دیگر عناصر
- ✓ کوتاه‌تر شدن زمان حرارت‌دهی که منجر به کاهش مصرف الکترود نیز می‌شود

- گزینه دیگر برای ماده بار در EAF کاربید آهن است که بیش از ٪۶ کربن به شکل Fe_3C دارد.
- کاربید آهن از طریق واکنش ذرات اکسید آهن با گاز فرآیند پیشگرم حاوی مخلوطی از CO، CO_2، متان، هیدروژن و بخارآب در محدوده دمایی ۵۵۰-۶۰۰°C و فشار حدود ۱/۸ اتمسفر تولید می‌شود.

$$2Fe_2O_3 + 5H_2 + 2CH_4 = 2Fe_3C + 9H_2O$$

- کاربید آهن بصورت پنوماتیکی با استفاده از نازل به زیر لایه سرباره به فولاد مذاب تزریق می‌گردد. بخاطر دمای ذوب بالا (۱۸۳۷°C)، کاربید آهن مستقیماً ذوب نمی‌شود.
- وقتی کربن در قالب کاربید آهن به حمام اضافه می‌گردد با اکسیژن می‌سوزد و مقدار زیادی حرارت آزاد می‌کند. این حرارت مقدار معادلی از توان الکتریکی را ذخیره می‌کند.
- در سرباره پفکی اضافه، عملیات آسانتر شده و غوطه‌وری قوس و بهبود بازدهی گرمایی اتفاق می‌افتد.