



جلسه دوازدهم

سایر روش های تولید آهن و فولاد



مقدمه

- طی چند دهه اخیر تلاش های زیادی برای تولید آهن با روش های اقتصادی تر از کوره بلند صورت گرفته است. در کوره بلند آهن بصورت سنگ اکسیدی تبدیل به آهن مذاب با درصد بالایی ناخالصی بصورت کربن و سیلسیم و گوگرد و باقی مواد می شود.
- سپس آهن خام در پروسه های فولادسازی ناخالصیهای خود را از دست می دهد. باید در نظر داشت که پروسه های فوق در دمای بالا صورت می گیرند و مخارج و مشکلات کارکردن بصورت تصاعدی با دما افزایش می یابد. بدین ترتیب در کوره بلند فرایندهایی صورت می گیرد که باعث می شود که نیاز به پالایش وجود داشته باشد.
- اگر بتوان روشی ابداع کرد که طی آن مقدار ناخالصی ها آهن حداقل باشد و عامل احیایی به غیر از کک باشد (درکشورهایی که گاز ارزان است) صرفه جویی اقتصادی خوبی در تولیداتی که زیاد نیست می توان انجام داد
- یکی از این روش ها، روش احیا مستقیم با استفاده از گاز طبیعی هست. که آهن تولیدی آن به آهن اسفنجی معروف است.



شکل و مشخصات آهن اسفنجی

- شکل ظاهری آهن اسفنجی به صورت قطعات کروی (گندله) متخلخل که دارای ظاهری اسفنجی هست که به همین دلیل به آن آهن اسفنجی می گویند.
-

Min 90%	Fe
Max 0.01%	S
Max 0.1 %	P
Max 5.5%	SiO ₂
Max 1%	Al ₂ O ₃
Max 1.1%	CaO
Max 2.5%	MgO



واکنشهای احیا این روش در دمای پایین انجام می شود.

- مشکل احیا این روش سرعت پایین واکنشهای احیا میباشد. چون دردمای پایین واکنش شکستن گاز و تولید گازهای احیا کننده منواکسیدکربن خیلی کم صورت میگیرد.

- برای حل این مشکل محققان از یک رفرمرگازی یا محفظه شکست گاز استفاده میکنند .



- در فرمورگازی با شکستن گاز طبیعی، گازهای منواکسید کربن و هیدروژن تولید میشوند که با گرم کردن تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد میتواند واکنشهای احیا با سرعت مناسب صورت گیرد.
- اولین شرکتی که در زمینه تولید آهن اسفنجی فعالیت نمود شرکت **میدرکس** آمریکا بود که هم اکنون تولید با این روش و با نام این شرکت در اکثر نقاط جهان ادامه دارد و ۶۵ درصد سهم تولید آهن اسفنجی از این روش میباشد. گروه دیگری که در تولید آهن اسفنجی فعالیت داشته اند شرکت مکزیکی **HYL** بوده است



روش های احیا مستقیم

- مطابق تعریف احیا مستقیم به پروسه ای گفته می شود که در آن آهن فلزی در دمای پایین تر از دمای ذوب، احیا شود.
- برخی از فرآیندهای مهم احیا مستقیم عبارتند از:

۱- روش میدرکس

۲- روش HYL

۳- روش SL/RN



روش میدرکس

روش میدرکس

از نوع گندله پس از گندله سازی
گاز طبیعی شکسته شده بوسیله فرایند رفرمینگ
کوره شافت عمودی
حدود ۸۵۰ تا ۸۷۰ درجه سانتیگراد
از حدود سال ۱۹۷۵ میلادی

- سنگ آهن ورودی :
- عامل احیا کننده :
- نوع کوره احیا :
- درجه حرارت احیا :
- سابقه فرآیند :



رفورمر تولید گاز احیا

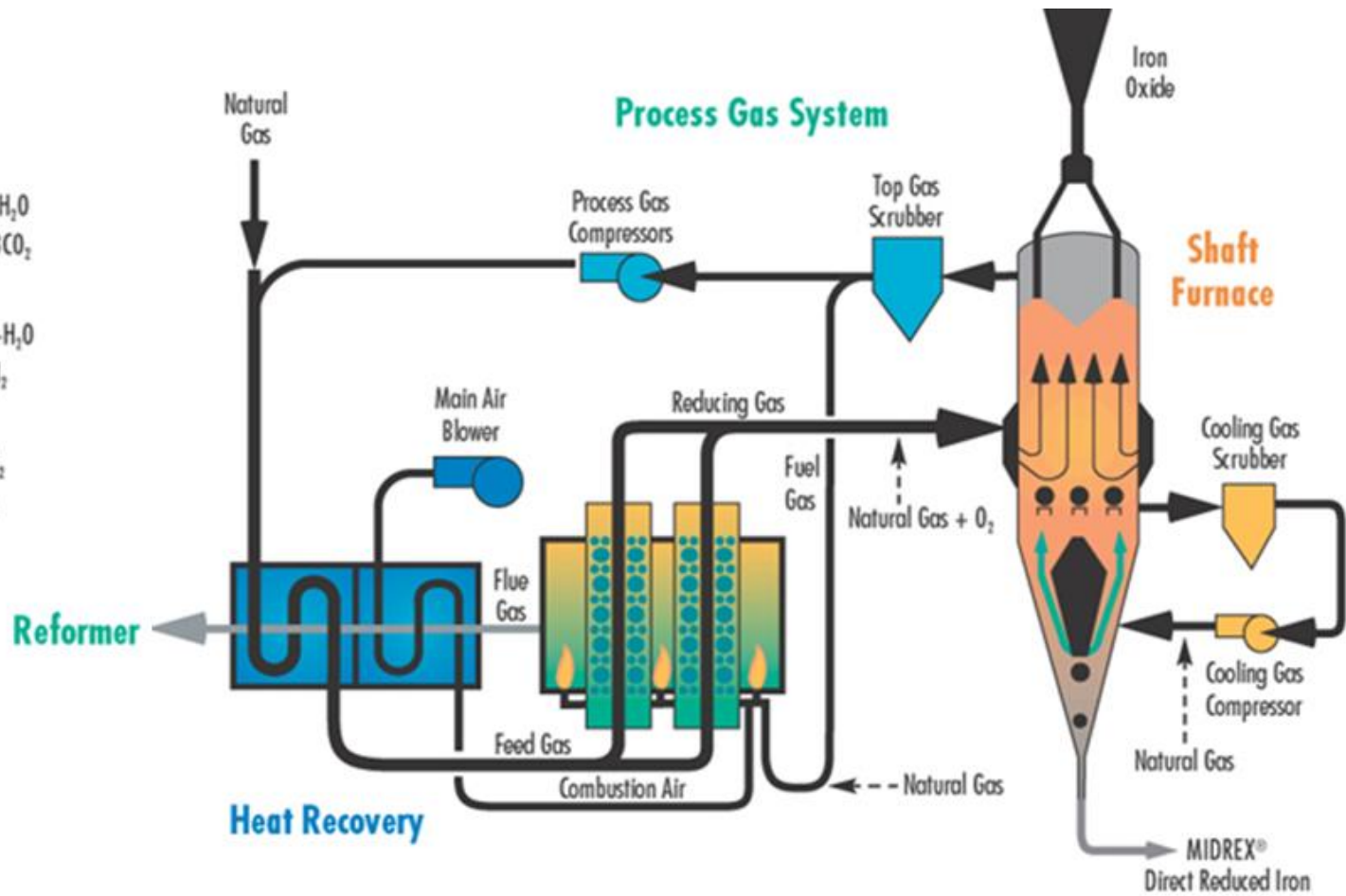
- رفورمرگازی در روش میدرکس مکعب مستطیلی به ابعاد $10 * 40 * 8$ متر میباشد .
- داخل محفظه لوله هایی از جنس استیل قرار گرفته است
- داخل لوله ها از کاتالیزور پر شده است. مخلوط گاز خروجی و گازطبیعی وارد لوله ها میشوند چون دمای لوله ها بالا است درون لوله واکنش تولید گاز احیا صورت میگیرد.
- گرم بودن لوله ها به علت مشعل هایی است که حرارت لازم جهت اکسایش متان را فراهم می آورند .
- گاز احیا که شامل H_2 و CO می باشد به سمت کوره میروند.



Reduction:
 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$
 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$

Carburization:
 $3\text{Fe} + \text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \text{H}_2\text{O}$
 $3\text{Fe} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + 2\text{H}_2$

Reforming:
 $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$
 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$



روش HYL

فرآیند اچ وای ال نسل چهارم

از نوع گندله پس از گندله سازی
گاز طبیعی شکسته شده بدون فرایند رفرمینگ
کوره شافت عمودی
حدود ۸۵۰ تا ۸۷۰ درجه سانتیگراد
از حدود سال ۲۰۰۳ میلادی

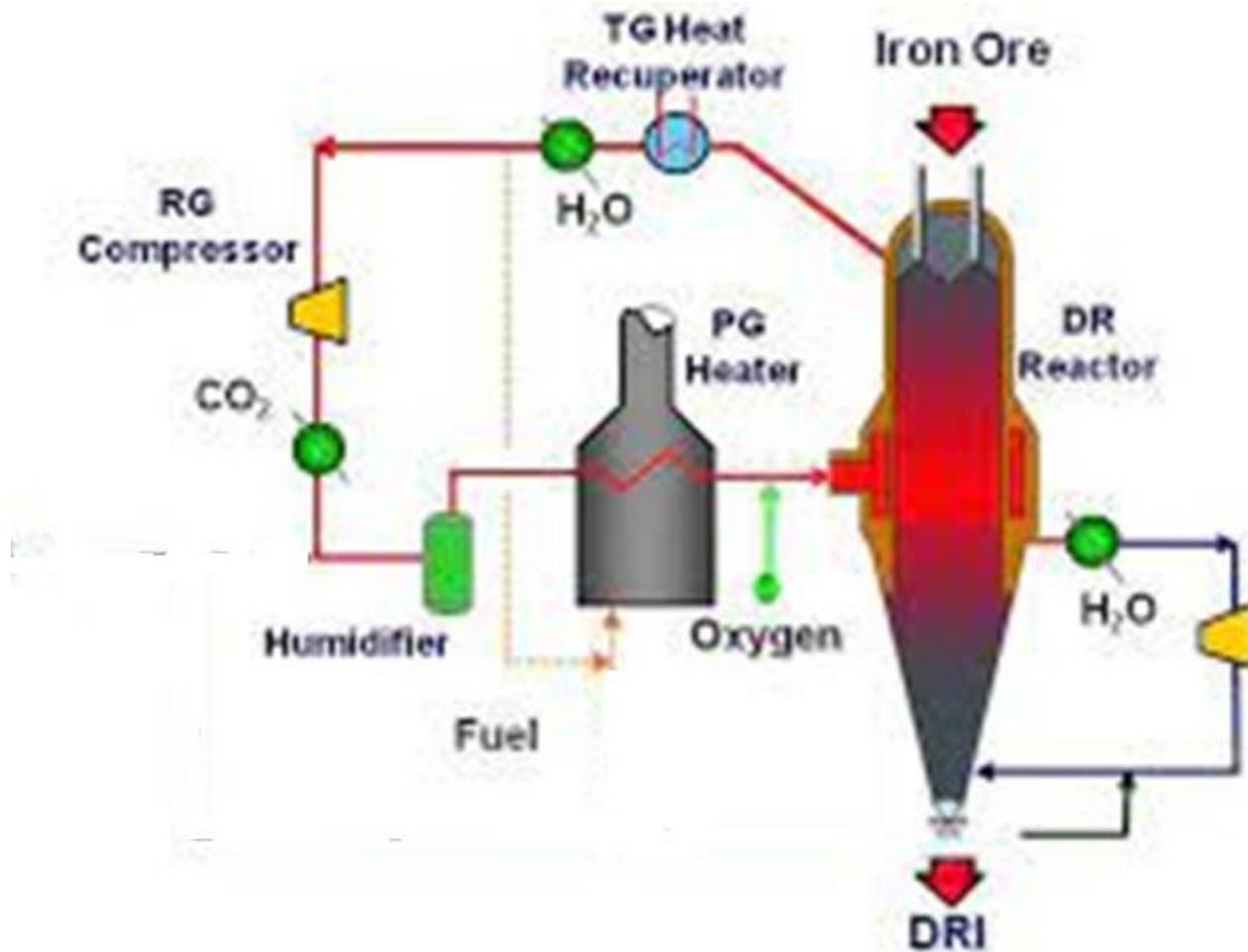
سنگ آهن ورودی :
عامل احیا کننده :
نوع کوره احیا :
درجه حرارت احیا :
سابقه فرآیند :

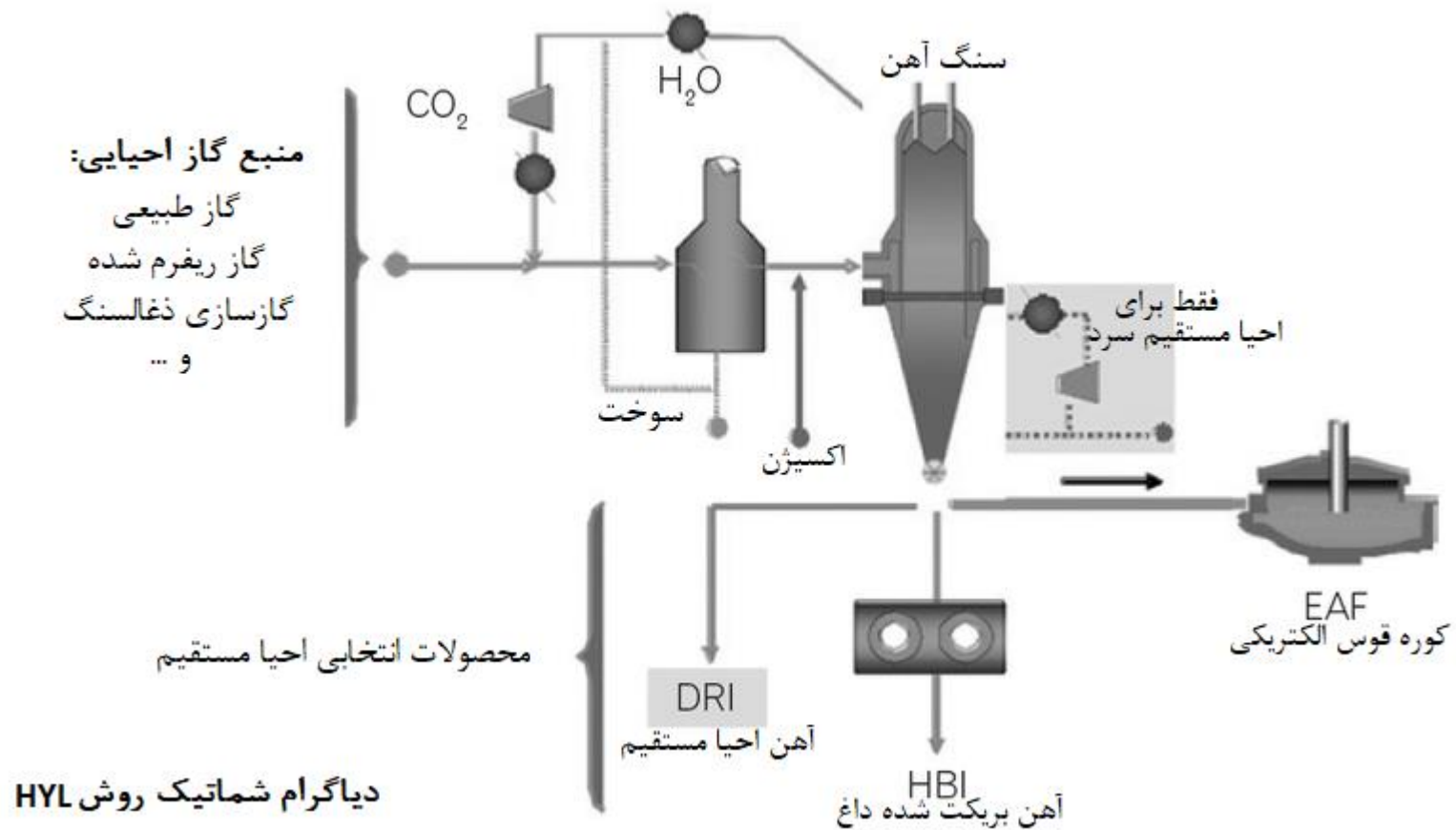


- در روشهای اچ وای ال ۱و۲و۳، گاز طبیعی بوسیله رفرمینگ شکسته شده و همانند روش میدرکس به داخل کوره احیا دمیده میشود. احیای مستقیم سنگهای آهن به روش اچ – وای – ال سه بر خلاف روشهای اچ- وای – ال یک و دو مداوم می باشد.
- در روش اچ وای ال ۴ عملیات رفرمینگ نیز حذف شده است
- در روش اچ وای ال ۴، **گندله به صورت مداوم از بالای کوره وارد کوره می گردد.**
- **از وسط کوره گاز پروسس (دی اکسید کربن) و اکسیژن جهت انجام واکنش به داخل کوره شارژ می شود.**
- عموماً گاز پروسس (دی اکسید کربن) از رکپراتور عبور کرده تا هم خشک شود و هم حرارت آن بالا رود.



اچ وای ال ۴





فرآیند SL/RN

فرآیند SL/RN -

بصورت کلوخه یا گندله
ذغال سنگ کک نشو
کوره دوار Rotary Kiln
حدود ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد
از حدود سال ۱۹۸۰ میلادی

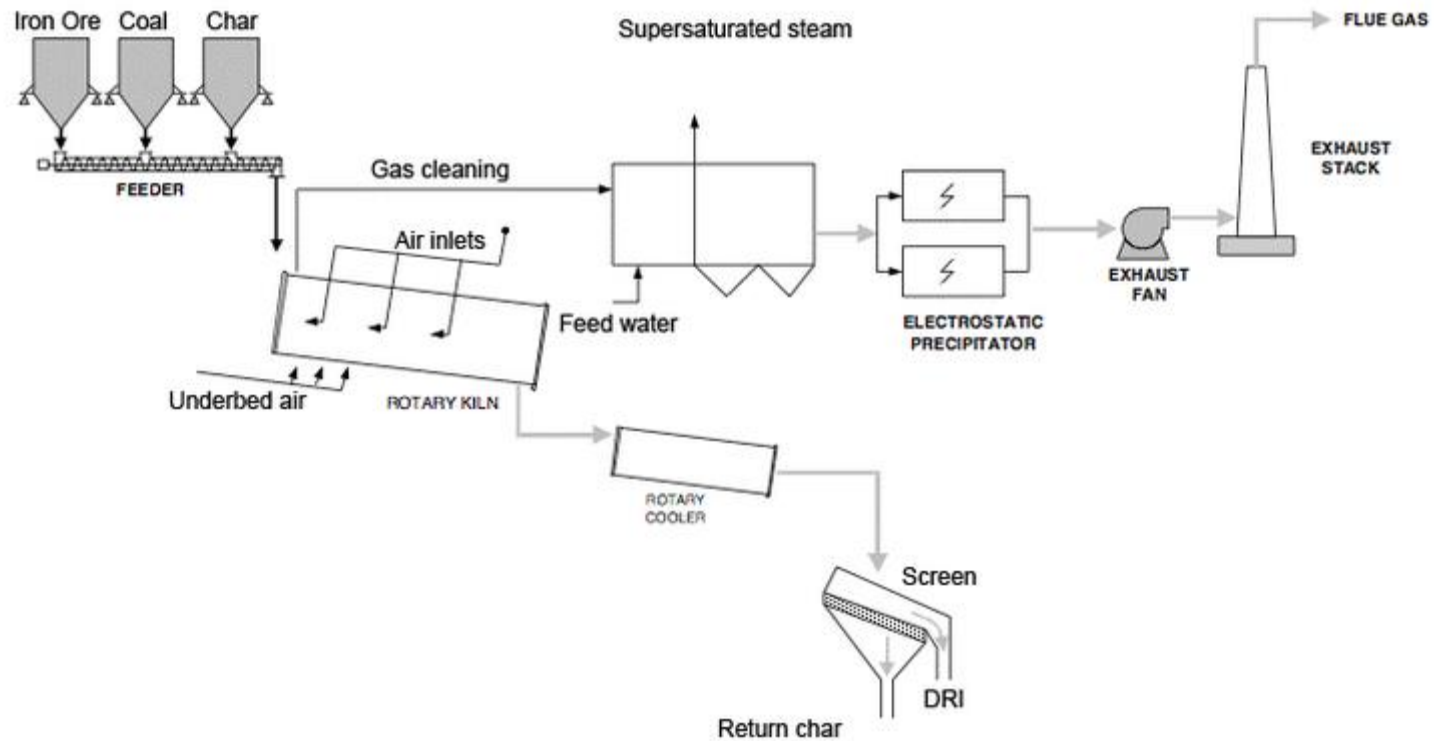
سنگ آهن ورودی :
عامل احیاکننده :
نوع کوره احیا :
درجه حرارت احیا :
سابقه فرآیند :



- همان طور که از شکل زیر پیداست در قسمت تغذیه کننده (ابتدای سمت چپ شماتیک) مواد اولیه مورد نیاز وارد خواهند شد. ترکیب این مواد اولیه ابتدا کانسنگ اولیه است که قرار است احیا شود. **این کانسنگ بصورت گندله یا کلوخه استفاده می شود.**
- سپس زغال سنگ کک نشو به همراه آهک و دولومیت به مواد اولیه اضافه خواهند شد. علت اضافه شدن آهک و دولومیت، حفظ ترکیب درصد گوگرد مورد نیاز است. پس از ترکیب شدن موارد بالا در قسمت تغذیه، مواد روانه کوره افقی جهت احیاسازی می شوند.
- **موارد مورد نظر در کوره دوار با شیب ۳ تا ۵ درجه، بصورت آرام حرکت کرده و ابتدا به مرحله پیش گرم می رسند. در این مرحله دمای مواد تا ۷۰۰ درجه سیلسیوس بالا رفته و با ادامه حرکت مواد در کوره دوار، به منطقه احیا (حدود ۱۰۰۰ درجه) می رسیم.**
- لازم به ذکر است در طول کوره دمنده های هوا برای ممکن ساختن فرایند سوختن زغال سنگ تعبیه شده است.



SL/RN Process Flowsheet



- پس از رسیدن به منطقه احیا، آنقدر گاز احیا کننده (CO) بر اثر سوختن زغال سنگ تولید شده است که اکنون قابلیت احیای کانسنگ در این مرحله بوجود می آید.
- پس از احیا سازی، آهن با خلوص ۹۲ درصد در دمایی نزدیک ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد از انتهای کوره خارج و روانه واحد خنک سازی می شوند.
- واحد خنک سازی، خود کوره ای با دمای ۱۰۰ تا ۱۳۰ درجه سلسیوس است که با خنک شدن مواد، نهایتاً به روش مغناطیسی محصول مورد نظر (آهن اسفنجی) را جداسازی کرد.



نمایی از SL/RN



مدیرعامل شرکت فولاد کویر دامغان با اعلام این که این مجموعه برای اولین بار در کشور موفق به تولید فولاد به روش احیای مستقیم و با بهره‌گیری از سیستم SL/RN که طی آن مستقیماً از سنگ آهن، آهن اسفنجی تولید می‌شود خبر داد و تأکید کرد که در این روش بحث کنسانتره‌سازی و گندله‌سازی مطرح نیست و به همین دلیل هزینه‌های

19 - 6th Chapter - چشمگیری کاهش می‌یابد.



• مزیت‌های استفاده از روش احیا با زغال **SL/RN**

- ۱- امکان استفاده از گندله سنگ آهن یا کلوخه آن و در بعضی موارد خود سنگ آهن
- ۲- امکان احداث نیروگاه ترمال و تولید برق با استفاده از گازهای خروجی این فرآیند
- ۳- مناسب برای سرمایه‌گذاری بخش خصوصی با توجه به مشکلات سرمایه‌گذاری کلان در بخش دولتی در سال‌های گذشته.
- ۴- مناسب جهت کشور ایران با توجه به پراکندگی معادن موجود و ظرفیت‌های پایین آن‌ها
- ۵- امکان استفاده از زغال سنگ کک‌نشو حرارتی در این فرآیند که ارزان و قابل دسترس است.



مقدمه ای بر تولید فولاد

- ۶۷ کشور جهان تولیدکننده فولاد هستند. به ترتیب چین، ژاپن، آمریکا، روسیه، هند، کره جنوبی، آلمان، اوکراین، برزیل و ترکیه، رتبه های اول تا دهم را به خود اختصاص می دهند. **ایران در رتبه ۱۷ جهان قرار دارد.**

- به طور کلی فولاد خام در ایران از دو روش زیر تولید می گردد:

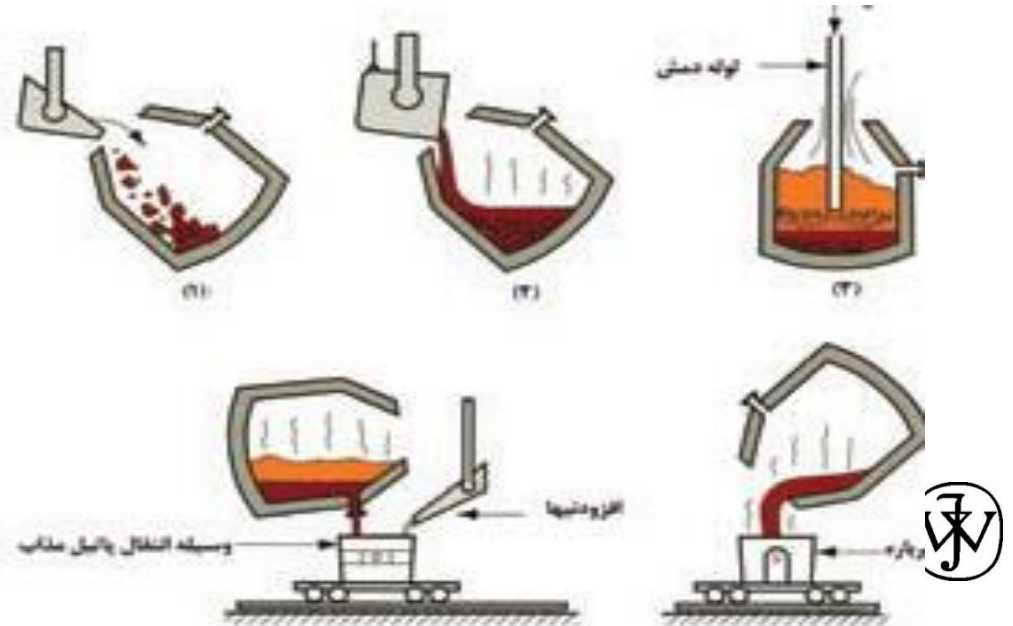
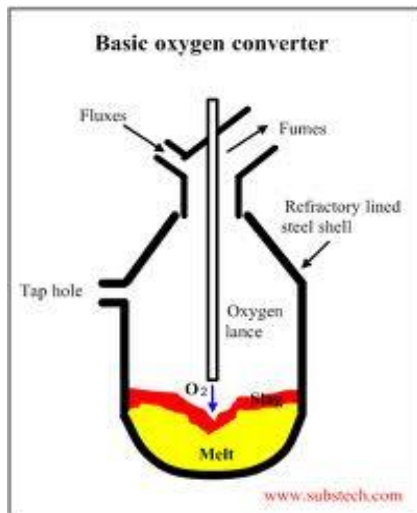
۱ - تهیه آهن خام یا چدن مذاب در کوره بلند و تولید فولاد در **کنورتر اکسیژنی LD**، نظیر ذوب آهن اصفهان.

۲ - ذوب آهن اسفنجی (تولید شده از کوره احیا مستقیم) و قراضه در کوره های الکتریکی از قبیل قوس الکتریکی (**EAF**) نظیر فولاد خوزستان یا القایی (**IMF**) نظیر مجتمع فولاد جنوب.



کنورتور اکسیژنی LD

- در روش‌هایی که از کنورتور استفاده می‌شود، آهن خام مذابی که از که فرایند کوره بلند به دست آمده است درون کنورتور ریخته می‌شود تا با استفاده از دمش گاز اکسیژن، کربن اضافی آن سوزانده شود. بدین ترتیب کربن فولاد به میزان مورد نظر خواهد رسید. سپس با اضافه کردن عناصر آلیاژی به آن استحکام فولاد افزایش خواهد یافت.
- تلاش برای دمش اکسیژن صنعتی از کف به درون کنورتور موفقیت آمیز نبود چون گرمای حاصله از سوختن عناصر منجر به خورده شدن نسوز کف و از بین رفتن لوله های کف میشد.
- تحقیقات توسط گووی در سال ۱۹۳۳ جواب داد که با این روش اکسیژن از قسمت فوقانی به وسیله لوله دمش (روش ال دی) به درون مذاب دمیده می شود.

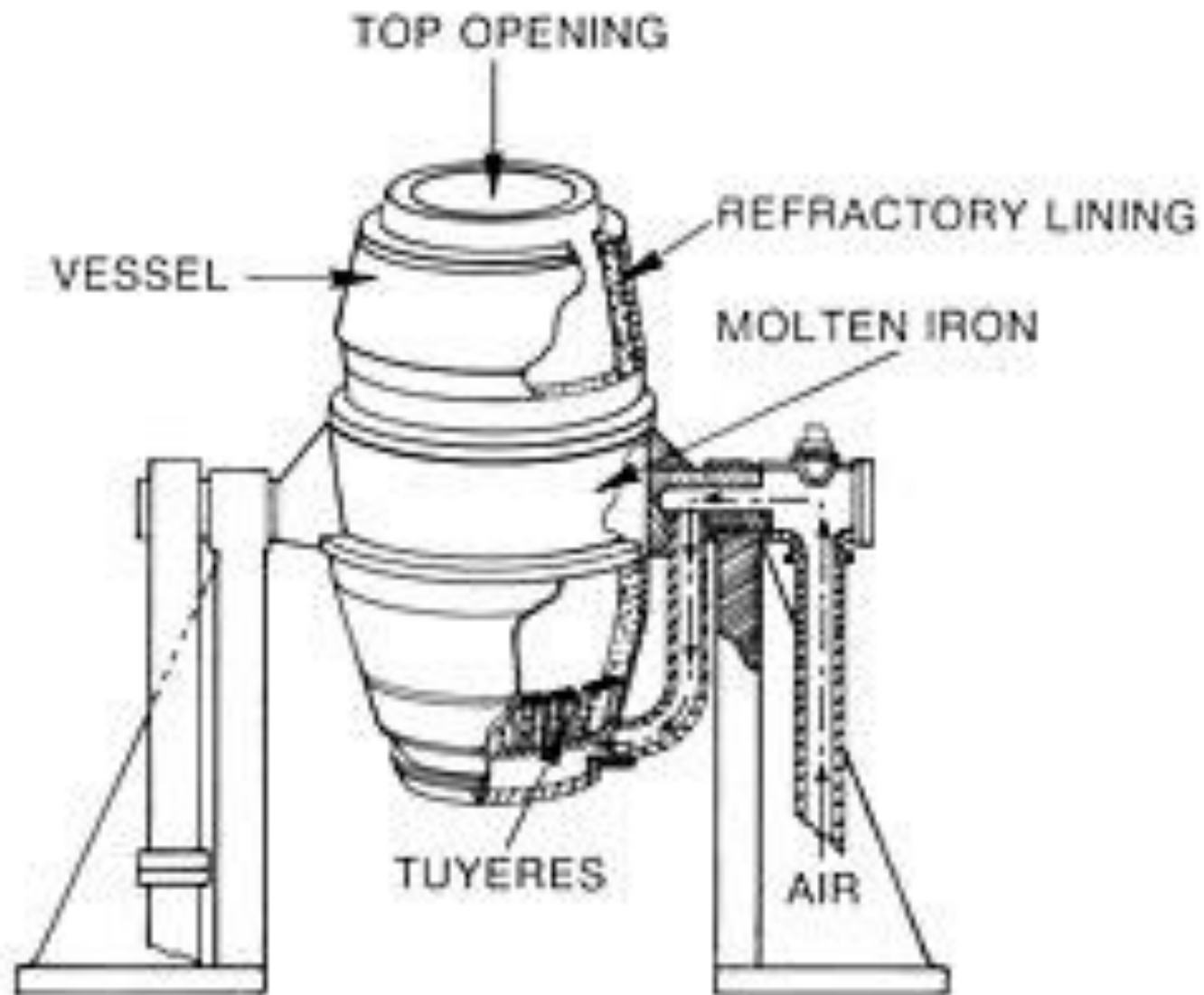


قبل از استفاده از کوره های LD – روش بسمر

روش بسمر :

کنورتینگ: معمولا به روشی کنورتینگ گفته می شود که در آن از حرارت خبری نیست و حرارت مورد نیاز به فولاد سازی در حین فولاد سازی با اکسید شدن عناصر موجود در سیستم تامین می شود . ابداع روش بسمر به ۵۰ سال پیش برمیگردد. سیستم به صورت کف دم است جداره کنورتر از جنس اسیدی و دارای طراحی خاص خود است . شکل زیر یک کنورتر بسمر را نشان می دهد .





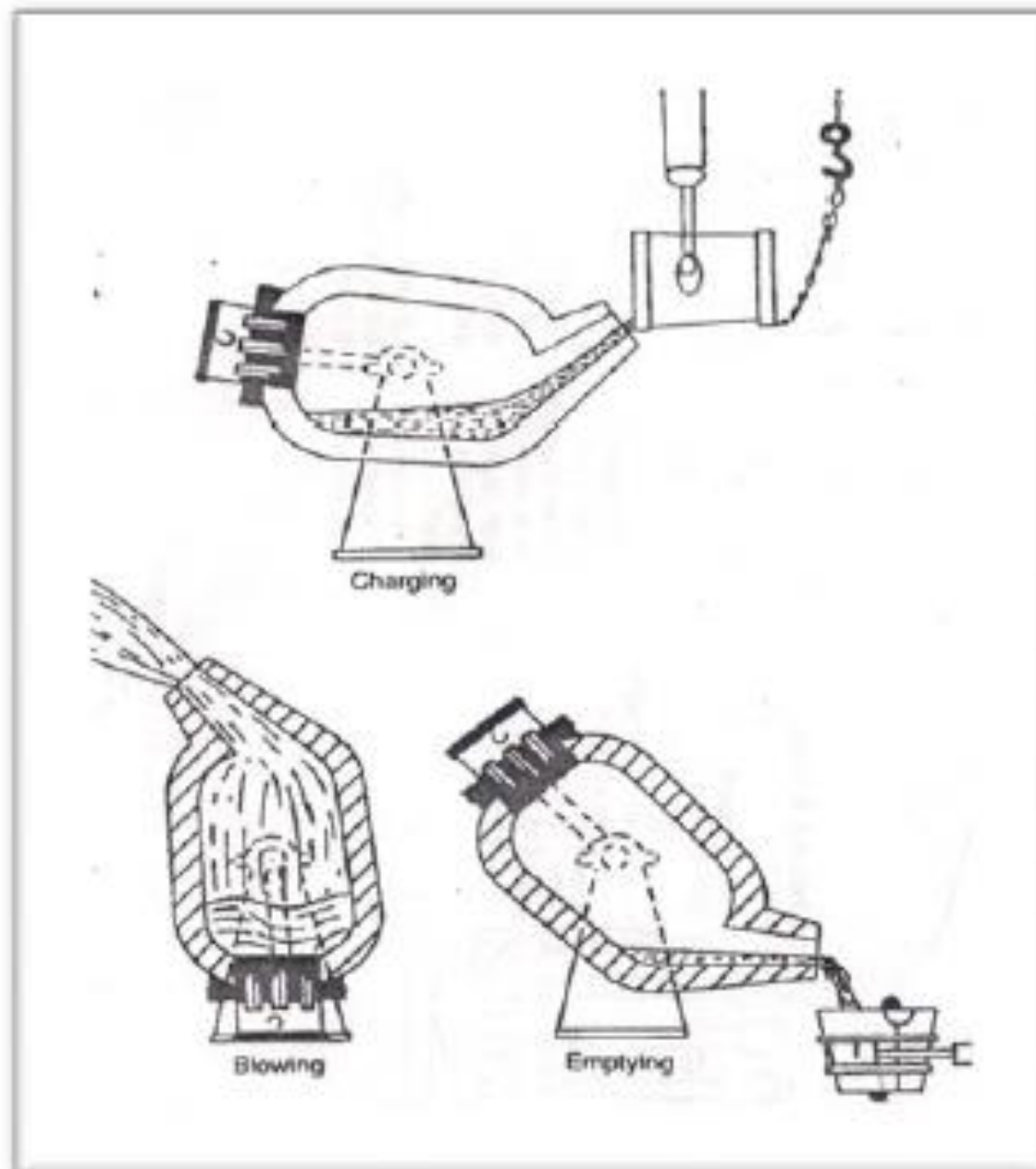
ساختمان روش بسمر

معمولا جداره فولادی mm ۲۰-۳۰ ضخامت دارد. جداره نسوز آنها ۸۰-۶۰ cm است. معمولا در قسمتی که به جداره فولادی نزدیک است از دانه های سیلیسی استفاده می شود. بعد سه ردیف آجر های سیلیسی چیده میشود. ضخامت نسوز کف کوره می تواند تا یک متر باشد. در کف کوره ۱۰۰ تا ۲۵۰ حفره جهت دمش هوا تعبیه شده است. از آنجاییکه عمر قسمت کف کوره بسیار کمتر از قسمت جداره است این کنورترها را طوری طراحی می کنند تا امکان تعویض کف کنورتر فراهم باشد. معمولا بعد از هر ۵۰ ذوب نسوز کف و بعد از هر ۱۵۰ تا ۲۰۰ بار ذوب گیری نسوز جداره ها تعویض می شود. قطر سوراخ های کف کنورتر ۱۵ تا ۲۰ میلی متر است.

معمولا فشار هوای ورودی ۱/۵ تا ۲/۵ اتمسفر است.

طراحی کنورتر به گونه ای است که می تواند در سه وضعیت شارژ، دمش گاز و تخلیه مذاب قرار بگیرد. شکل زیر سه وضعیت قرار گیری کنورتر را نشان میدهد.





مهم ترین مواد لازم برای کنورتر بسمر اسیدی

- چدن خام: چدن خام مصرفی کنورتر بسمر دارای ترکیب زیر است: $0.9 - 1.25$ درصد سیلیسیم، $0.5 - 0.8$ درصد منگنز. مقدار فسفر آن نباید بیشتر از 0.7 درصد باشد و مقدار گوگرد نیز نباید از 0.05 درصد تجاوز کند.



فرایند توماس یا بسمر بازی

به علت وجود معادن عظیم آهن با مقادیر زیاد فسفر در ممالک اروپایی، توسعه کنورتر بسمر با جداره بازی در این ممالک بسرعت پیشرفت کرده است. چدن خام مصرفی کنورتر بازی دارای ترکیب زیر است: ۳ تا ۳/۶ درصد کربن، ۰/۳ تا ۰/۶ درصد سیلیسیم، ۰/۸ تا ۱/۳ درصد منگنز، ۱/۸ تا ۲/۲ درصد فسفر و ۰/۰۵ تا ۰/۰۸ درصد گوگرد. درجه حرارت این نوع آهن خام به هنگام خروج از کوره بلند برابر ۱۲۰۰ تا ۱۲۲۰°C است.

جنس آجرهای نسوز آن دولومیت است



آجر نسوز کوره توماس

ترکیب دولومیت سوخته عبارت است از: $1/5$ تا 3 درصد SiO_2 ، $1/2$ تا $1/8$ درصد Fe_2O_3 ، $1/5$ تا 2 درصد Al_2O_3 ، 35 تا 36 درصد MgO و 55 تا 58 درصد CaO . خلل و فرج دولومیت سوخته 10 تا 12 درصد و وزن مخصوص آن برابر $2/9 - 2/7 \text{ g/cm}^3$ است. پس از سوزاندن، آسیاب و طبقه‌بندی کردن دولومیت به دانه‌های بین $0/2$ تا 10 میلی‌متر، آن را با قیر مخلوط می‌کنند. وزن قیر برابر 7 تا 9 درصد وزن دولومیت مصرفی است. پس از مخلوط کردن دولومیت آن را تا 80 درجه سانتیگراد گرم کرده و سپس تحت فشارهای بالا این ماده خمیری را به صورت آجر یا بلوک در می‌آورند. این بلوک‌ها برای ساختن دیواره کنورتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.



ویژگی فرایند توماس

فرایند بسمر بازی از نظر دید ظاهری، شرایط شیمی فیزیکی و نیز تکنولوژی فرق اساسی با فرایند بسمر اسیدی دارد. در این فرایند آهک (CaO) به مقدار ۱۲ تا ۱۵ درصد وزن چدن خام مصرفی، قبل از ریختن مذاب به داخل کنورتر بارگیری می‌شود. جداره بازی کنورتر امکان استفاده از یک سرباره بازی با قدرت بازی زیاد را ممکن می‌سازد و این سرباره به نوبه خود فسفر درون چدن خام را به حداقل می‌رساند. چون در این فرایند چدن خام با فسفر زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. قدرت بازی سرباره از تقسیم CaO به کل اکسیدهای اسیدی مانند SiO_2 و P_2O_5 به دست می‌آید. حاصل تقسیم $\% \text{CaO}$ به $(\% \text{SiO}_2 + \% \text{P}_2\text{O}_5)$ در سرباره‌های بازی باید بیشتر از عدد ۳/۰ باشد.



فولادسازی در کوره قوس الکتریک

- این کوره بر مبنای قوس الکتریک کار می کند. بدین صورت که جریان برق توسط الکترودهای گرافیتی (نقش مثبت) به شارژ وارد می شود.
- شارژ نقش بار منفی را دارد.

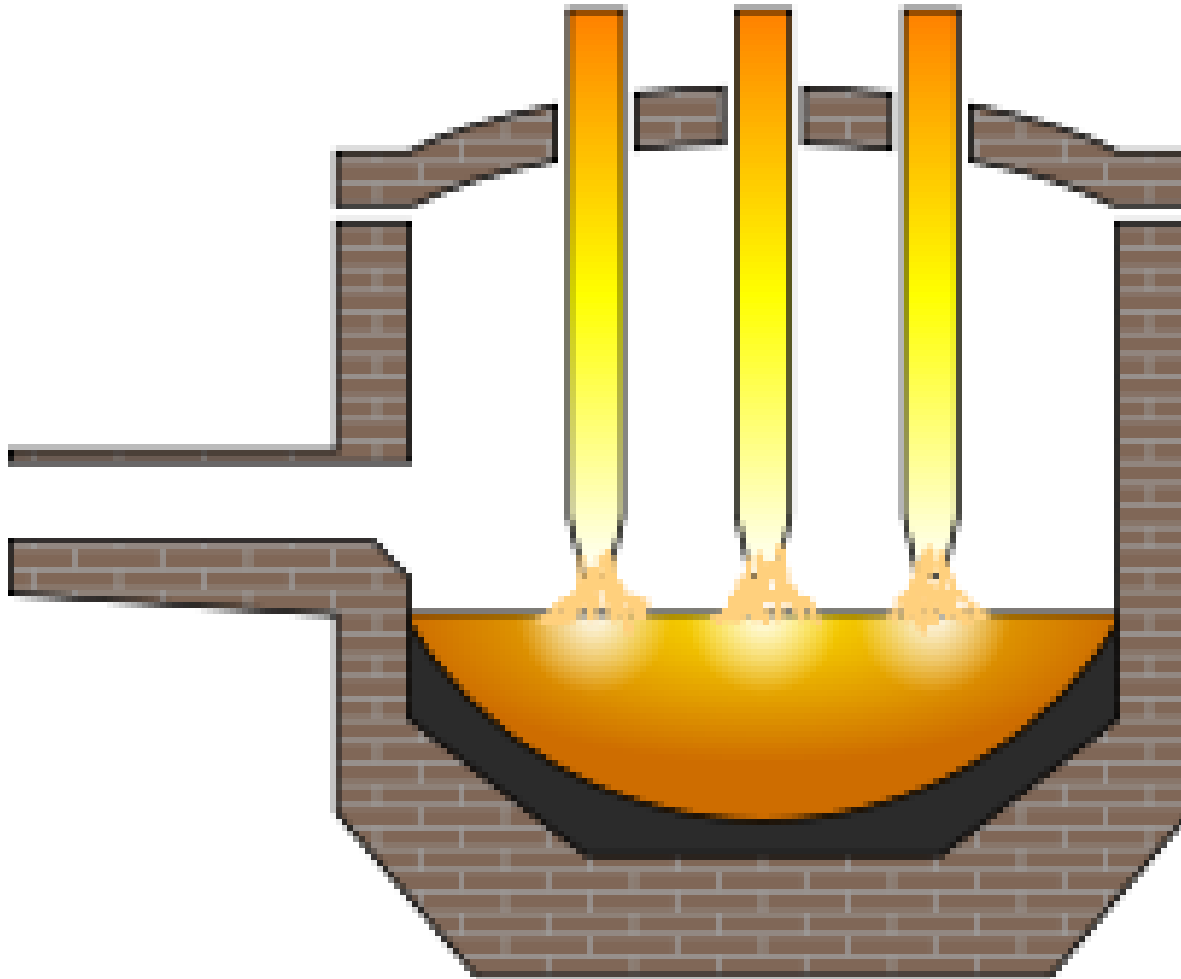
- با اتصال جریان برق شارژ الکترونها برقرار شده و چون آمپر بسیار بالاست همراه با نور و حرارت بسیار بالایی همراه میباشد. حرارت ایجاد شده موجب ذوب شدن مواد شارژ می گردد.
- کوره های قوس الکتریک را با قطر زیاد در نظر میگیرند تا ارتفاع مذاب کم باشد و تصفیه مذاب به راحتی صورت گیرد.

- در کوره های قدیمی کوره با چرخش ۱۵ درجه به عقب، سرباره از آن جدا شده و با چرخش ۴۵ درجه به جلورिخته گری مذاب در پاتیل انجام می شود.

- در کوره های جدید ریخته گری مذاب از کف می باشد تا از ناخالصی های کمتری برخوردار باشد.

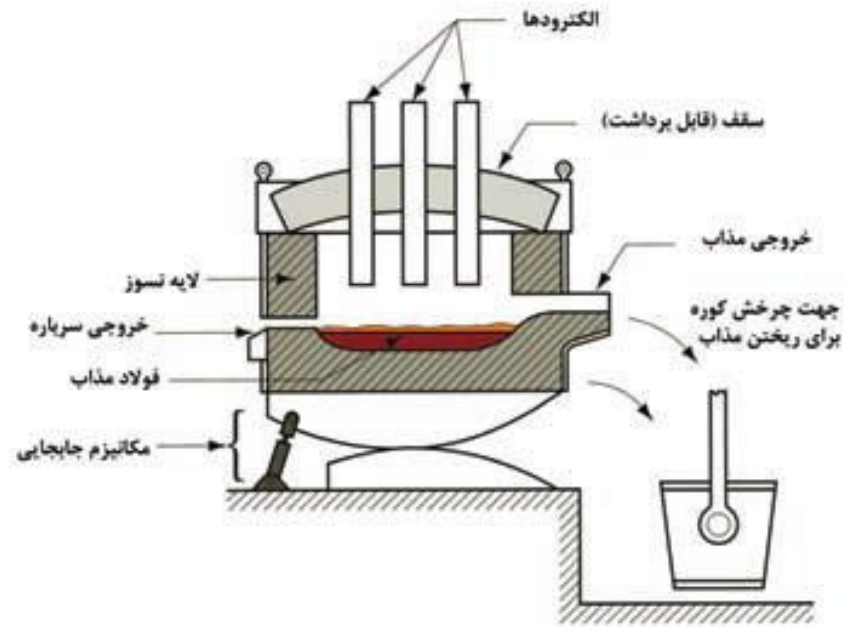


نمای کوره قوس الکتریکی



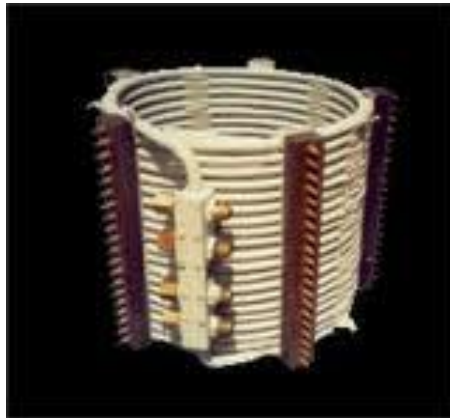
تصفیه مذاب در کوره قوس الکتریک

- نسوز کوره از معمولاً منیزیت بوده و خاصیت بازی داشته و در کاهش عناصر اسیدی مانند گوگرد و... نقش اساسی دارد.
- سطح مذاب توسط آهک پوشش داده می شود تا کاهش گوگرد مذاب از سطح رویی مذاب هم انجام شود
- با توجه به واکنشی که مذاب با دیواره نسوز دارد، خوردگی در تمامی جداره به طور یکنواخت روی میدهد.
- در بخش سرباره به علت اینکه انواع ترکیبات شیمیایی وجود داشته نسوز کوره می تواند نقش اسیدی و یا بازی را داشته باشد. در آنجایی که خوردگی جداره شدید می باشد، می بایست از آجر های ختشی استفاده شود.



کوره القایی

- در کوره های القایی از جریان القای مغناطیسی استفاده می شود و با پیچاندن یک کوئل در اطراف یک استوانه با اتصال جریان برق با فرکانس بالا میدان مغناطیسی قوی بوجود آمده است.
- این میدان مغناطیسی قوی موجب گرم شدن و در نهایت ذوب شدن شارژ می شود.
- این کوره ها برای ساخت فولادهای آلیاژی بهترین کوره می باشد .



کوره القایی

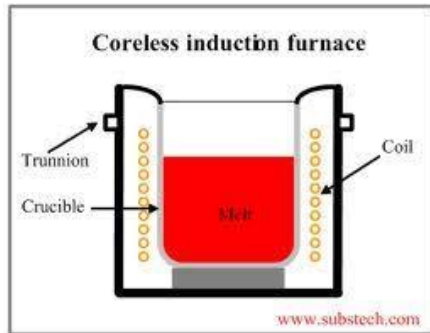
کوره های القایی به دو دسته تقسیم می شوند

۱- کوره القایی بدون هسته

۲- کوره القایی هسته دار

کوره القایی بدون هسته برای ذوب کردن کاربرد دارد و معمولاً از ظرفیت کمتری برخوردار می باشد.

کوره القایی بدون هسته شامل یک بوته دیر گداز میباشد که یک کوئل مسی با قابلیت هدایت زیاد بدور آن پیچیده شده است. این کوئل با آب خنک میشود. حلقه های این سیم پیچ با فیبر شیشه و پنبه نسوز عایق شده اند



کوره القایی هسته دار برای نگه داری مذاب استفاده می شود و معمولاً از ظرفیت بیشتری برخوردار است و آن کوره نگهدارنده و یا ذخیره هم می گویند. در این کوره سیم پیچ کوره بدور یک هسته آهن لایه لایه پیچیده شده است و بعد به بدنه کوره وصل میشود.



کوره های مورد استفاده قبل از کوره القایی و قوس الکتریک – زیمنس مارتین

محفظه کوره:

محفظه اغلب وانی شکل است (به غیر از کوره های القایی). عمق مذاب در کوره های وانی نسبت به کوره های دیگر تا اندازه ای کمتر است، این مسئله در موقع انجام فعل و انفعالات اهمیت زیادی دارد. چون فاصله نفوذ عناصر کوتاه تر می شود.

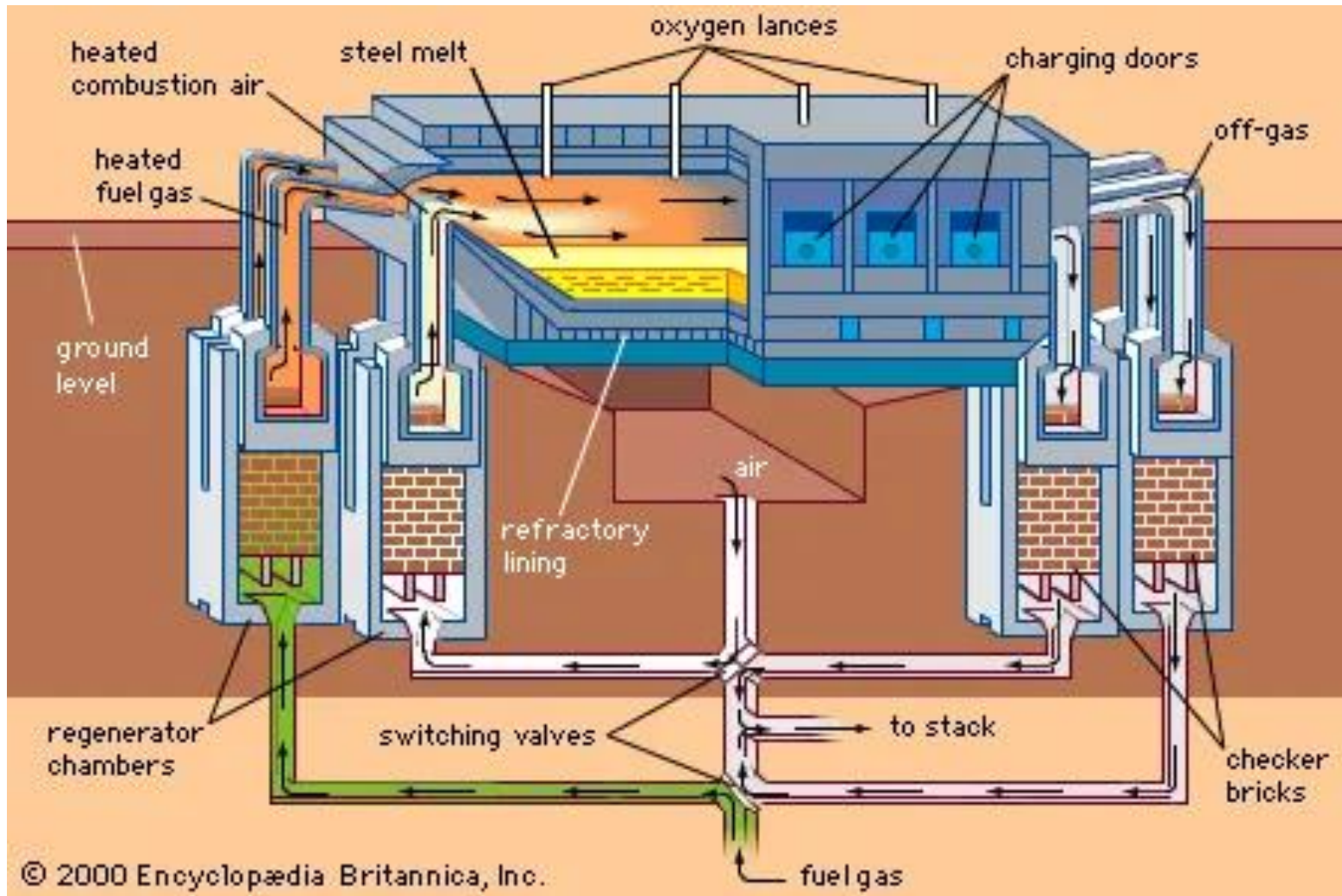


گرمادادن از خارج

در فولادسازی بسمر و توماس گرمای لازم برای انجام واکنش‌ها در اثر سوختن عناصر همراه آهن تأمین می‌شد. در این فرآیند برای انجام واکنش‌ها باید کوره‌ها را از خارج گرم کرد. دادن گرما در کوره زیمنس-مارتین به وسیله مشعل، در کوره‌های قوس الکتریکی به وسیله جرقه الکتریکی و در کوره‌های القایی به وسیله شار مغناطیسی صورت می‌گیرد.

برای گرم کردن کوره زیمنس-مارتین در قدیم از گازهای مختلف استفاده می‌شد. ولی امروزه راه‌های مختلفی برای گرم کردن آن وجود دارد، از جمله استفاده از گازهای خروجی کوره‌های کک‌سازی با مخلوطی از قیر و یا روغن، روغن خالص و مخلوطی از گازهای خروجی کوره بلند و گازهای زیرزمینی.





آجرهای نسوز کوره زیمنس مارتین

جداره درونی کوره می‌تواند بازی (سنگ‌های منیزیتی و یا دولومیتی) یا اسیدی (سیلیسی) باشد. فولادسازی نیز برحسب جنس جداره می‌تواند بازی یا اسیدی باشد. فرآیند اسیدی به تدریج اهمیت خود را از دست می‌دهد، چون در این فرآیند به قراضه با مقادیر کم گوگرد و فسفر نیاز است که پیدا کردن آن با مشکلاتی همراه است.

