نسل نوین تکنولوژی های ریخته گری

energyenergy.ir

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول : انتخاب کوره مناسب ۷
۱-۱. ریخته گری چدن ۸
۱-۲. ریخته گری فولاد ۱۰
فصل دوم : تکنولوژی‌های جدید کاهش مصرف انرژی ۱۲
در کوره‌های رایج صنایع ریخته گری ۱۲
۲-۱. کوره‌های کوپل ۱۲
۲-۱-۱. استفاده از هوای دمشی پیشگرم شده ۱۲
۲-۱-۲.استفاده از هوای دمشی غنی از اکسیژن ۱۳
۲-۱-۳.استفاده از هوای دمشی ثانویه ۱۳
۲-۱-۴.کوره‌های کوپل فاقد کک ۱۴
۲-۲.کوره‌های قوس الکتریکی ۱۴
۲-۲-۱. کوره‌های قوس الکتریک مدرن ۱۴
۲-۲-۲. فرضیه کاهش مصرف انرژی با طراحی کوره قوس الکتریکی ۱۵
۲-۲-۲-۱. پفکی کردن سرباره ۱۶
۲-۲-۲-۲. استفاده از SVC (Static Var Compensator) ۱۶
۲-۲-۳. کوره‌های قوس مستقیم ۱۷
۲-۳.کوره‌های القایی ۱۸
۲-۴.کوره‌های دوار ۱۸
فصل سوم : تکنولوژی جدید در صنعت ریخته‌گری ۲۰
۳-۲. کاربرد کامپیوتر در صنعت ریخته‌گری ۲۱
۳-۳. فرآیند نیمه جامد ۲۳
۳-۴. تکنیکهای تولید ساختار غیردندریتی در حالت نیمه جامد ۲۶
۳-۴-۱. همزدن مکانیکی ۲۶
۳-۴-۲. همزدن با استفاده از روش‌های مغناطیسی (MHD) ۲۷
۳-۴-۳. روش سطح شیبدار خنک کننده ۲۷
۳-۴-۴. ریخته گری با دمای فوق ذوب پایین ۲۸
۳-۴-۵. رئوکست جدید(NRC) ۲۸
۳-۴-۶. روش گلوله‌های نسوز ۲۹
۳-۵. ریخته‌گری انجمادی ۳۰

۳-۶.ریخته گری کف زا ۳۰
۳-۷. تختال نازک ۳۱
۳-۸. فرآیند ریخته‌گری تسمه به روش مستقیم ۳۳
۳-۹. فرآیندهای احیا مستقیم و احیای مذاب ۳۳
۳-۹-۱. فرآیند احیای مذاب(SR) ۳۳
۳-۹-۲. فرآیند احیا مستقیم ۳۷
فصل چهارم : تکنولوژی‌های ذوب نوین ۳۹
۴-۱.ذوب با اشعه الکترونی (EBM) ۳۹
۴-۲. هیترهای شناور ۴۰
۴-۳. گرمایش مادون قرمز (IR) ۴۰
۴-۴.ذوب توسط امواج ماکروویو ۴۱
۴-۵.گرمایش پلاسما ۴۲
۴-۶.کوره‌های خورشیدی ۴۲

energyenergy.ir

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول۱-۱. انتخاب فنی کوره برای ریخته گری چدن ۹
جدول۳-۱. طبقه بندی فولادهای ریخته شده به روش ریخته‌گری تختال نازک ۳۲
جدول۳-۲. مشخصات مربوط به یک واحد تولیدی با روش کورکس واقع در آفریقای جنوبی ۳۴
جدول۳-۳. مقایسه مشخصات پنج روش تجاری اخیر با روش احیا مستقیم ۳۸

energyenergy.ir

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل۳-۱. تغییرات روشهای تولید آهن و فولاد از گذشته تا آینده ۲۱

شکل۳-۲. دندریت نسبتا نامنظم ۲۴

شکل۳-۳. شماتیک فرآیندهای مختلف جهت تولید قطعات به روش نیمه جامد ۲۶

شکل۳-۴. شماتیک روش سطح شیبدار خنک کننده ۲۸

شکل۳-۵. شماتیک فرآیند NRC ۲۹

شکل۳-۶. روش گلوله‌های نسوز جهت تولید مخلوط نیمه جامد ۳۰

شکل۴-۱. شمایی از فرآیند ذوب با اشعه الکترونی ۴۰

شکل۴-۲. شمایی از فرآیند ذوب با استفاده از تابش مادون قرمز ۴۱

شکل۴-۳. شمایی از فرآیند گرمایش با استفاده از پلاسما ۴۲

energyenergy.ir

چکیده

با توجه به این که فرآیند ذوب بالاترین سهم مصرف انرژی را در کارخانه‌های ریخته‌گری چدن و فولاد دارا می‌باشد، بنابراین انتخاب نوع کوره در صنایع ریخته گری از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در ادامه درباره انتخاب کوره‌های مناسب ریخته گری چدن و فولاد توضیح داده شده است. در واقع هدف این بخش، راهنمایی کارخانه‌های در دست احداث، برای انتخاب مناسب‌ترین نوع کوره با توجه به شرایط موجود می‌باشد. علاوه بر این تکنولوژی‌های جدیدی که برای کاهش مصرف انرژی در این کوره‌ها به کار رفته، نیز توضیح داده شده است. لازم به ذکر است که بعضی از این تکنولوژی ها مستلزم ایجاد تغییرات کلی در ساختار کوره‌ها می‌باشد. بنابراین، این تکنولوژی ها برای کارخانه‌های در دست احداث توصیه می‌شود. در نهایت، تکنولوژی‌های نوین در صنایع ریخته‌گری شامل روش‌های جدید ریخته‌گری و همچنین روش‌های ذوب نوین آورده شده اند. شایان ذکر است که تعدادی از این تکنولوژی‌ها در دست تحقیق می‌باشند و با توجه به کمبود ذخایر انرژی و آلودگی روزافزون محیط زیست، در آینده بسیار مورد توجه خواهند بود.

energyenergy.ir

فصل اول
انتخاب کوره مناسب

کارخانه‌های ریخته گری معمولاً موارد زیر را برای انتخاب تکنولوژی ذوب مناسب در نظر می‌گیرند:

- فضای موجود (ارتفاع و مساحت)
- نوع و تنوع آلیاژهایی که باید ذوب شوند
- نوسانات تقاضا در طول عملیات
- کیفیت فلز
- مقدار سرباره
- انتشار گازها و ملاحظات زیست محیطی
- تعمیر و نگهداری
- سرمایه مورد نیاز
- هزینه‌های عملیات
- دوام کوره

از آنجا که ارجحیت این فاکتورها برای هر کارخانه متفاوت می‌باشد، در نتیجه تکنولوژی مناسب برای آن ها متفاوت بوده و بازده انرژی بالا تنها معیار انتخاب تجهیزات ذوب نمی باشد. علیرغم این که تجهیزات با راندمان بالا مصرف انرژی کمتری دارند، اما در بسیاری از موارد هزینه سرمایه گذاری پایین، عملیات ساده و تعمیر و نگهداری ساده‌تر تجهیزات با راندمان پایین، منجر به انتخاب کوره‌های با راندمان پایین توسط سرمایه‌گذاران صنعت ریخته گری می‌شود [۱].

امروزه با توجه به افزایش روزافزون هزینه‌های انرژی، کمبود منابع انرژی و محدودیت‌های زیست محیطی، اهمیت انتخاب کوره‌های با راندمان بالا افزایش یافته است. در نتیجه با اعطای تسهیلات مالی به سرمایه گذاران این بخش، می‌توان شرایطی را فراهم نمود که تجهیزات با راندمان بالا در کارخانجات در دست احداث مورد استفاده قرار گیرند. لازم به ذکر است که با توجه به کاهش قابل ملاحظه هزینه‌های انرژی در این شرایط، استفاده از این کوره‌ها از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر است.

نکته حائز اهمیت برای کارخانجات ریخته گری در دست احداث، انتخاب بهترین کوره با توجه به ویژگی‌های

کارخانه مورد نظر است [۲].

در ادامه درباره کوره‌های مناسب برای ذوب در صنایع ریخته گری چدن و فولاد، توضیح داده شده است.

ریخته گری چدن

کوره‌های القایی[۱]، دوار[۲] و کوپل[۳] برای ذوب چدن مناسب هستند. برای کارخانه‌های تولید چدن، توصیه‌های کلی زیر را در مورد انتخاب کوره می‌توان ارائه داد :

- تولید پیوسته[۴] : کوره‌های کوپل مناسب تر هستند.
- تولید ناپیوسته[۵] : کوره‌های الکتریکی یا دوار مناسب تر هستند.
- انعطاف پذیری در برابر نوع فلزات شارژ و میزان تمیزی آن ها : کوره‌های کوپل بهتر هستند.
- انعطاف پذیری در برابر تغییر آلیاژ : کوره‌های القایی و دوار مناسب تر هستند.

- ملاحظات محیطی :

✓ کوره‌های کوپل تنها در صورتی بهتر عمل می‌کنند که دودهای ناشی از سوختن سوخت در آن ها به خوبی تخلیه شوند. هم چنین کوره‌های کوپل بدون کک نسبت به کوره‌های با هوای دمشی گرم و با هوای دمشی سرد از نظر محیطی عملکرد بهتری دارند.

✓ در کوره‌های القایی میزان CO، SO_2، NO_X و دی اکسین[۶] کمتر است ولی باید در نظر داشته باشیم که برای تولید الکتریسیته مصرفی در این کوره‌ها (در نیروگاه ها) مقدار زیادی آلاینده بوجود آمده است.

- قابلیت دسترسی به مواد خام : هنگامی که مواد خام نامرغوب در اختیار داریم کوره‌های کوپل بهتر هستند.

کلیه این معیارها باید به صورت همزمان در نظر گرفته شوند. بر اساس معیارهای گفته شده، جایگزینی کوره‌های کوپل با کوره‌های القایی یا دوار بسته به شرایط می‌تواند راهکار مناسبی باشد، زیرا سبب کاهش آلاینده هایی مانند CO و SO_2 شده و مقدار سرباره را نیز کاهش می‌دهند. کوره‌های القایی میزان انتشار NO_X را کاهش داده و خطر کمتری در مورد تشکیل دی اکسین در آن ها وجود دارد. میزان آلاینده‌های غیر مستقیم که در نتیجه استفاده از کوره‌های القایی تولید می‌شود بستگی به ساختار و نحوه عملکرد نیروگاه تولید کننده الکتریسیته دارد. توجه به این امر نیز ضروری است که جایگزینی کوره‌های القایی با کوره‌های کوپل مصرف الکتریسیته را به

[1] Induction furnace
[2] Rotary furnace
[3] Cupola furnace
[4] Continuous production
[5] Batch production
[6] dioxin

شدت افزایش می‌دهد. در کارخانه‌های ریخته‌گری کوچک استفاده از کوره‌های القایی یا دوار بر استفاده از کوره‌های کوپل ارجحیت دارد. به عنوان مثال اغلب کارخانه‌های ریخته‌گری اتریشی که ظرفیت‌های کم یا متوسطی دارند کوره‌های کوپل خود را با کوره‌های القایی تعویض کرده اند به طوری که در این کشور در حال حاضر فقط سه کارخانه از کوره کوپل استفاده می‌کنند [۲،۱].

جدول۱-۱ خلاصه ای از ملاحظات تکنیکی را برای انتخاب نوع کوره در صنایع ریخته گری چدن ارائه می‌دهد.

در این جدول، ++ نشان دهنده آن است که کوره مورد نظر از نظر فنی برای شرایط موجود بهتر است و + بیانگر آن است که شرایط فنی برای استفاده در این شرایط را دارد، (+) نیز برای حالت هایی است که کوره مورد نظر فقط در برخی موارد می‌تواند به کار رود و - حاکی از آن است که این کوره در شرایط موجود قابل استفاده نیست.

جدول۱-۱. انتخاب فنی کوره برای ریخته گری چدن [۲]

<table dir="rtl">
<tr><td>چدن چکش خوار</td><td colspan="2">چدن گرده ای</td><td>چدن خاکستری و گرده ای</td><td colspan="3">ریخته گری چدن خاکستری</td><td colspan="2">ملاک ها</td></tr>
<tr><td>قطعات مکانیکی</td><td colspan="2">قطعات مکانیکی</td><td>لوله، لوازم خانگی</td><td>قطعات مکانیکی</td><td colspan="2">قطعات مکانیکی</td><td>لوله، لوازم خانگی</td><td>وزنه‌های تعادل</td><td>نوع محصول تولیدی</td></tr>
<tr><td>متوسط تا زیاد</td><td>متوسط تا زیاد</td><td>کم</td><td>تمامی ظرفیت ها</td><td>متوسط تا زیاد</td><td>کم</td><td>متوسط تا زیاد</td><td>تمامی ظرفیت ها</td><td>متوسط تا زیاد</td><td>ظرفیت تولید</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>(+)</td><td></td><td colspan="3">++</td><td>++</td><td>++</td><td rowspan="3">کوپل هوای دمشی سرد</td></tr>
<tr><td colspan="2">+</td><td>-</td><td></td><td colspan="2">++</td><td>-</td><td>++</td><td>+</td><td>هوای دمشی گرم</td></tr>
<tr><td></td><td>+</td><td>-</td><td>+</td><td></td><td>+</td><td>-</td><td></td><td></td><td>بدون کک</td></tr>
<tr><td>++</td><td>++</td><td>++</td><td>+</td><td>++</td><td>++</td><td>++</td><td>+</td><td>+</td><td colspan="2">القایی</td></tr>
<tr><td>++</td><td></td><td>++</td><td>(+)</td><td>++</td><td>+</td><td>++</td><td></td><td>(+)</td><td colspan="2">کوره دوار</td></tr>
</table>

هنگام انتخاب و نصب یک کوره جدید، اطلاعات مندرج در جدول فوق همراه با در نظر گرفتن ملاحظات مکانی و موقعیت کارخانه مورد نظر می‌تواند به کار برده شود. در شرایطی که هر سه کوره از لحاظ فنی دارای شرایط یکسانی باشند توصیه می‌شود که در صورت امکان از کوره‌های القایی و دوار که الودگی‌های محیطی کمتری دارند

استفاده شود.

ریخته گری فولاد

امروزه برای ذوب فولاد از کوره‌های القایی و کوره‌های قوس[1] استفاده می‌شود. برای کارخانه‌های ریخته‌گری فولاد، توصیه‌های کلی زیر را در مورد انتخاب کوره می‌توان ارائه داد:

- ظرفیت بالا : کوره‌های قوس مناسب تر هستند.
- ظرفیت پایین : کوره‌های القایی مناسب تر هستند.
- انعطاف پذیری در برابر میزان تمیزی قراضه ها : کوره‌های قوس بهتر هستند. در واقع کوره‌های قوس قادر به ذوب فولاد با گرید پایین تر هستند.
- پیچیدگی عملیات: کوره‌های القایی نسبت به کوره‌های قوس عملیات ساده تری دارند.
- هزینه‌های اولیه و هزینه‌های عملیاتی: با توجه به پیچیده تر بودن کوره‌های قوس نسبت به کوره‌های القایی، هزینه سرمایه گذاری و عملیات این کوره‌ها بسیار بیشتر از کوره‌های القایی می‌باشد.
- ملاحظات محیطی: آلایندگی کوره‌های القایی کمتر از کوره‌های قوس می‌باشد. کوره‌های قوس احتیاج به یک سیستم پیچیده و مناسب برای گازهای خروجی دارند.

در کل می‌توان گفت که ساختمان کوره‌های قوس بسیار پیچیده‌تر از کوره‌های القایی می‌باشد و عملیات و کنترل آن ها نیز بسیار پیچیده بوده و مستلزم استفاده از تجهیزات کنترلی دقیق است. هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه عملیات کوره‌های قوس با توجه به ساختار پیچیده آن ها بسیار بیشتر از کوره‌های القایی می‌باشد اما در عوض، در کوره‌های قوس نسبت به کوره‌های القایی می‌توان به کیفیت بالاتری برای فولاد تولیدی رسید [۳].

لازم به ذکر است که کوره‌های قوس بیشتر در صنایع فولادسازی استفاده می‌شوند و در صنایع ریخته گری فولاد بیشتر از کوره‌های القایی استفاده می‌شود. امروزه، کوره‌های القایی فرکانس متوسط و متغیر در صنایع ریخته گری بسیار مورد توجه هستند و عموماً در کارخانه‌هایی که قصد نصب کوره‌های جدید دارند از این نوع کوره‌ها استفاده می‌شود. مزایا و معایب کوره‌های القایی فرکانس شبکه و فرکانس متغیر در ادامه آورده شده است.

برای این که کوره‌های القایی فرکانس شبکه مصرف انرژی بهینه ای داشته باشند، باید همواره یک سوم ظرفیت کوره پر از مذاب باشد. زیرا زمان گرم شدن مجدد کوره‌ها در آن ها بسیار زیاد می‌باشد و در واقع شروع به کار کوره‌های فرکانس شبکه با شارژ ماده سرد، بسیار آهسته است. هزینه سرمایه گذاری اولیه کوره‌های فرکانس متوسط بیشتر از کوره‌های فرکانس شبکه می‌باشد. کار با این کوره‌ها ساده بوده و سرعت ذوب آن زیاد می‌باشد. این کوره ها را می‌توان بدون نیاز به مذاب اولیه از حالت سرد بکار انداخت. این کوره ها بیشتر جهت تهیه چدن ها و فولادهای مخصوص در مقادیر کم به کار می‌روند. استفاده از کوره‌های القایی با فرکانس متغیر دارای مزایای هر دو کوره القائی

[1] Arc furnace

با فرکانس شبکه و متوسط می‌باشد. استفاده از این کوره ها برای کارگاه‌های ریخته گری کوچک و متوسط مناسب می‌باشد [۲].

energyenergy.ir

فصل دوم
تکنولوژی‌های جدید کاهش مصرف انرژی در کوره‌های رایج صنایع ریخته گری

همان طور که قبلاً گفته شد کوره‌های القایی، قوس، کوپل و دوار برای ریخته گری چدن و فولاد مناسب هستند. در ادامه راهکارهایی که باعث کاهش مصرف انرژی این کوره‌ها می‌شود، آورده شده اند.

کوره‌های کوپل

کوره‌های کوپل، کوره‌های استوانه‌ای شکلی هستند که برای ذوب چدن به کار می‌روند. این کوره‌ها در عمل شبیه به کوره بلند می‌باشند. حدود ۶۰٪ از کل صنایع ریخته گری چدن، از کوره‌های کوپل برای ذوب استفاده می‌کنند. راندمان کوره‌های کوپل بین ۴۰٪ تا ۷۰٪ می‌باشد.

تکنولوژی‌های زیر در کوره‌های کوپل جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند تا مصرف انرژی این کوره‌ها را کاهش دهند [۱،۲،۴].

۲-۱-۱. استفاده از هوای دمشی پیشگرم شده[1]

دمای گازهای خروجی[2] کوره کوپل حدود ^{o}C ۸۰۰ می‌باشد، بنابراین با استفاده از گرمای محسوس این گازها و همچنین گرمای حاصل از احتراق محتوای CO این گازها می‌توان هوای دمشی[3] را تا دمای ^{o}C ۴۰۰ پیشگرم نمود.

استفاده از هوای دمشی پیشگرم تا دمای ^{o}C ۳۰۰ و بالاتر، مزایای زیر را به دنبال دارد:

- افزایش راندمان کوره
- افزایش دمای مذاب خروجی[4]
- افزایش سرعت ذوب و در نتیجه افزایش ظرفیت کوره
- افزایش امکان استفاده از قراضه با توجه به افزایش سرعت سوختن کربن
- کاهش هدر رفت Si و Mn در مذاب و در نتیجه ارزش بالاتر مذاب
- کاهش نسبت سولفور به آهن و در نتیجه بهبود کیفیت مذاب
- کاهش دمای گازهای خروجی و در نتیجه کاهش هزینه‌های کلکتور دود

[1] Air Blast Preheating
[2] Exhaust gas
[3] Blast air
[4] Tapping temperature

۲-۱-۲. استفاده از هوای دمشی غنی از اکسیژن[1]

با توجه به این که حدود ۷۹٪ از هوای ورودی به کوره (برای احتراق کک) نیتروژن و ۲۱٪ آن اکسیژن می‌باشد، بنابراین نیتروژن ورودی به کوره بسیاری از گرمای کوره را جذب کرده و از طریق دودکش خارج می‌کند. استفاده از جریان هوای غنی از اکسیژن، باعث کاهش تلفات حرارتی کوره شده و در نتیجه دمای مذاب خروجی و همچنین سرعت ذوب کوره افزایش می‌یابد.

مزایای غنی سازی اکسیژن عبارتند از:

- افزایش دمای مذاب خروجی
- افزایش سرعت ذوب و در نتیجه افزایش ظرفیت ذوب
- کاهش مقدار هوای ورودی به کوره و صرفه جویی در مصرف انرژی
- کاهش نسبت کک و بهبود راندمان حرارتی
- افزایش امکان استفاده از قراضه و کاهش هزینه مواد اولیه
- افزایش مقدار Si و Mn در مذاب و در نتیجه ارزش بالاتر مذاب
- کاهش نسبت سولفور به آهن مذاب و در نتیجه بهبود کیفیت مذاب

۲-۱-۳. استفاده از هوای دمشی ثانویه[2]

مقداری از کک سوخته شده در کوره‌های کوپل در اثر احتراق ناقص تبدیل به CO می‌شود. هوای دمشی ثانویه برای احتراق CO تولید شده، استفاده می‌شود.

مزایای استفاده از هوای دمشی ثانویه عبارتند از:

- افزایش درجه حرارت تخلیه مذاب و راندمان حرارتی کوره
- کاهش کک مصرفی و افزایش نرخ ذوب در صورت نیاز

داده‌های حاصل از عملکرد کوره‌هایی که از این تکنولوژی بهره می‌برند، نشان می‌دهد که با استفاده از این سیستم دمای تخلیه مذاب به ازای یک مقدار کک مصرفی مشخص در حدود ۴۵ تا ۵۰ درجه سانتی گراد افزایش می‌یابد. همچنین آمار نشان می‌دهد که توسط این روش می‌توان مصرف سوخت را تا ۳۲ درصد کاهش و نرخ ذوب را تا ۲۳ درصد افزایش داد.

از این تکنولوژی اخیراً در کشورهای مختلف (به ویژه فرانسه) برای کوره‌های کوپل با هوای دمشی سرد استفاده می‌شود، هرچند که ممکن است بتوان آن را برای کوره‌های قدیمی نیز با ایجاد تغییراتی در ساختار کوره به کاربرد ولی در کوره‌های با هوای دمشی گرم استفاده از این روش توصیه نمی‌شود.

[1] Oxygen enrichment
[2] Secondary air blasting

مزیت دیگر استفاده از این روش علاوه بر منافع اقتصادی ناشی از کاهش مصرف سوخت، افـزایش کیفیـت چـدن (به دلیل کاهش میزان گوگرد موجود در چدن) می‌باشد.

۲-۱-۴. کوره‌های کوپل فاقد کک[1]

در این نوع کوره کوپل، به جای کک از سوخت هایی همچون گازطبیعی، پروپان، سوخت دیزلی و یا زغال‌سـنگ برای ذوب استفاده می‌شود. اگرچه این تکنولوژی حدود ۳۰ سال قبل توسعه یافته امـا تعـداد کمـی از کارخانـه‌هـای ریخته گری از این تکنولوژی استفاده می‌کنند. در این کوره‌ها از نسوزهای کروی استفاده مـی‌شـود کـه نقـش مبـدل حرارتی را دارند و در زیر آن ها مشعل ها قرار گرفته انـد. گازهـای داغ از ایـن مشـعل هـا در دمـای بـالا وارد شـبکه نسوزها می‌شود و مواد ورودی را پیشگرم می‌کند. مذاب بعد از عبور از این بستر سوپرهیت می‌شود. حذف کک از این نوع کوره‌ها باعث کاهش محتوای گاز مونوکسید کربن در گازهای خروجی تا میزان ۱٪ شده که با توجه بـه محتـوای مونوکسید کربن کوره‌های کوپل کک سوز (در حدود ۱۲٪ تا ۲۰٪) بسیار کم بوده و این مسئله باعث افزایش راندمان کوره می‌شود. همچنین استفاده از کوره‌های کوپل بدون کک، محتوای سـولفور مـذاب و در نتیجـه تولیـد سـرباره را کاهش می‌دهد.

دمای تخلیه مذاب در کوره‌های کوپل بدون کک، کمتر از کـوره‌هـای کوپـل کـک سـوز و در حـدود ^{o}C ۱۴۰۰ می باشد. این نوع کوره کوپل در آلمان، اسپانیا، ژاپن، اتریش و کره موجود است. از لحاظ راندمان انـرژی، یـک کـوره کوپل معمولی (بدون پیشگرمکن هوای احتراق) با ۱۲٪ مصرف کک و دمای تخلیـه ای برابـر ^{o}C ۱۴۵۰ رانـدمانی در حدود ۴۰٪ دارد. این در حالی است که راندمان کوره کوپل گاز سوز با مصـرف Nm^3/ton ۵۰ و دمـای خروجـی ^{o}C ۱۳۸۰ تقریباً ۷۲٪ می‌باشد.

کوره‌های قوس الکتریکی

در زیر مواردی برای بهبود عملکرد کوره‌ی قوس الکتریکی آورده شده است:

۲-۲-۱. کوره‌های قوس الکتریک مدرن

در سالهای اخیر بکارگیری لانسهای تزریق اکسیژن و کربن ، دمش گاز خنثی از کف ، سوزاندن گـاز خروجـی از سطح ، استفاده از شارژ گرم و ... تلاشهایی است که برای بهبود وضعیت کوره‌های قوس الکتریکی انجام شده است.

این تلاش‌ها منجر به ایجاد انواع تکنولـوژی‌هـا نظیـر کـوره‌هـای دو محفظـه‌ای ، کـوره‌هـای شـافت ، کـوره دو مرحلـه‌ای، روشـهای EOF وK-ES ، فرآینـد conarc و comlet ، consteel و کـوره‌هـای DC(, Danarc contiarc) گردیده است.

شبیه سازی فرآیندهای مختلف درکوره‌های قوس الکتریک نظیر هماهنگی بین واحـدهای مختلـف ، جریانهـای گاز در کوره ، توزیع دما وتنش در الکترودها، شبیه‌سازی جریان سیال و مخلوط شدن در فرآیند دمـش از کـف، هـم

[1] Cokeless cupola furnace

پای سایر پیشرفت‌های ابزاری توانسته جایگاه مناسبی برای این کوره‌ها در صنعت فراهم نماید.

۲-۲-۲. فرضیه کاهش مصرف انرژی با طراحی کوره قوس الکتریکی

فولادسازی قوس الکتریک همواره بدنبال رسیدن به سه دستاورد به شرح زیر بوده است: کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش آلودگی محیط‌زیست. برای رسیدن به این اهداف و سایر اهداف بعضی از شرکت‌های پیشرو در این زمینه بخشی از کارآمدترین فناوری‌های کوره قوس الکتریک کنونی خود را با بخشی از فناوری‌های جدید ترکیب کرده تا فرضیه کوانتومی کوره قوس الکتریک Simetal را خلق کند .

این طرح یک فرآیند شارژ قراضه نو، سیستم کارآمد پیش‌گرمایی، طرح جدید نوسانی برای پوسته پایین‌تر و سیستم بهینه تخلیه با سیفون انتهایی دارد. یک کوره مرجع با وزن تخلیه یکصد تن که در هر بار تخلیه فاصله زمانی آن ۳۳ دقیقه است و ۱/۳۵ تن فولاد خام تولید می‌کند. مصرف انرژی الکتریکی آن۲۸۰kwh در هر تن است که بسیار کمتر از کوره‌های قوس الکتریک قدیمی بوده و با مصرف پایین‌تر الکترود و اکسیژن، ۲۰ درصد از هزینه تولید فولاد کم خواهدشد .سیستم کوانتومی در اطراف کوره بلند ساخته می‌شود که برخلاف کوره قوس الکتریک سنتی ضرورتی ندارد که سقف را بالا زده و الکترودها را برای شارژ کنار بزنیم. همچنین قراضه توسط گازهای خروجی از فرآیند ذوب پیش‌گرم می‌شود که بشدت مصرف انرژی را کاهش می‌دهد.

یک قیف قراضه را از یک ایستگاه شارژ در انبار قراضه به بارگیر انتقال می‌دهد که دیگر به جرثقیل و سبد نیازی وجود ندارد. یک آسانسور قراضه را به سیستم حامل انتقال می‌دهد که انگشتی‌هایی دارد که با فاصله مساوی روی کوره قرار گرفته‌اند. گاز خروجی از ذوب که در زیر قراردارد از فضاهای بین انگشتی‌ها گذشته و قراضه را پیش‌گرم می‌کند. در صورت نیاز می‌توان فرآیند شارژ را کاملا اتوماتیک کرد. شکل ذوزنقه‌ای بارگیر و سیستم حامل قراضه، توزیع قراضه را آسان‌تر کرده و توزیع گاز خروجی را بهبود بخشیده و انتقال حرارت را بهینه می‌سازد. پس از آنکه قراضه گرم شد، انگشتی‌های سیستم حامل باز شده و قراضه به حمام مذاب ریخته می‌شود که حداکثر ظرفیت آن ۷۰ تن است. انگشتی‌ها پس از آن برای شارژ مرحله بعدی قراضه بسته می‌شود. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده که در تخیله آن سرباره وجود ندارد. وقتی برق کوره برقرار شود شارژ، تخلیه و پر شدن مجدد لوله تخلیه مذاب به‌طور خودکار انجام می‌شوند. این کار موجب کاهش زیاد زمان تخلیه شده و بهره‌وری آن افزایش پیدا می‌کند. سیستم همزن از زیر آرگون، انتقال گرما از حمام مذاب به قراضه پیش‌گرم شده و هموژنیزه شدن مذاب را سرعت می‌بخشد. برق‌رسانی مداوم به حمام مذاب در حال بهره‌برداری، بهره‌وری را افزایش داده و و مانع مشکلات شبکه مانند لرزش[1] می‌شود.

جداره کوره را براحتی می‌توان حمل و نقل کرد. تزریق کننده‌های اکسیژن و زغال فقط روی سقف نصب شده‌اند که لوله‌گذاری و نصب لازم روی جداره کوره را کاهش می‌دهد. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده که

[1] . Flicker

هیچ‌گونه هوایی وارد آن نمی‌شود و سیستم گرد و غبار زدایی دارد که ۳۰ درصد از میزان آلودگی محیط را کم می‌کند.

تکنولوژی‌های زیر در کوره‌های قوس جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند، تا مصرف انرژی این کوره‌ها را کاهش دهند.

الف-پفکی کردن سرباره[1]

از مهمترین تحولاتی که در زمینه بهبود فرآیند ذوب در کوره‌های قوس الکتریکی تا به حال اجرا شده، ایجاد سرباره پفکی در طول فرآیند ذوب است. اجرای این طرح علاوه بر کاهش انرژی مصرفی مذاب، در موارد دیگری نظیر کاهش صدای قوس، افزایش راندمان انتقال حرارت، تسهیل واکنشهای مذاب و سر باره، کاهش خوردگی نسوز و .... هم بسیار مؤثر است.

امروزه پفکی کردن سرباره، در کارخانه‌های تولید کننده فولاد به کار برده می‌شود که شامل تزریق همزمان اکسیژن و کربن (به شکل پودر زغال سنگ) در داخل سرباره، در پایان ذوب است. سرباره پفکی بوسیله واکنش حباب‌های CO تشکیل می‌شود. گاز CO از اکسید شدن کربن در فلز بوسیله تزریق اکسیژن و نیز کاهش اکسید آهن (FeO) حاصل می‌شود.

ایجاد سرباره پفکی، انتقال حرارت به واحدهای شارژ را بیشتر می‌کند و از مواد نسوز داخل کوره محافظت می‌کند. بدلیل پایداری بالاتر و اثرات تشعشعی کمتر، کف آلود کردن سرباره ها سبب کاهش مصرف انرژی، آلودگی محیط، الکترود مصرفی و میزان سروصدا شده و بهره‌وری را افزایش می‌دهد [۲].

ب-استفاده از SVC (Static Var Compensator)

استفاده از این تجهیز دارای مزایای بسیاری می‌باشد که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است [۵]:

- با بکارگیری این تجهیز می‌توان حداکثر توان تحویلی به کوره را به دلیل خنثی کردن اثر امپدانس معادل شبکه و افت ولتاژ ناشی از آن، به میزان ۱۵٪ افزایش داد. این افزایش توان تحویلی به کوره منجر به کاهش مدت زمان ذوب به میزان ۱۳٪گردیده، که این به معنای تولید سالیانه بیشتر و در نتیجه سود بیشتر می‌باشد. یکی از پارامترهای اساسی در میزان مصرف الکترود، مدت زمان دوره کامل ذوب است که در اثر کاهش این مدت زمان، میزان مصرف الکترود نیز کاهش می‌یابد.
- نصب SVC نه تنها منجر به افزایش حداکثر توان تحویلی به کوره می‌شود، بلکه این حداکثر توان، در طول قوس کمتری، نسبت به حالت بدون جبران ساز کوره اتفاق می‌افتد. کوتاه بودن طول قوس به معنای پایداری بیشتر آن بوده که در نتیجه آن علاوه بر کاهش میزان فلیکر و هارمونیک تولیدی توسط قوس، میزان تلفات انرژی کوره ناشی از ناپایداری قوس نیز کاهش می‌یابد.

[1] Foamy slag practice

- معمولا از راکتورهای سری در طرف اولیه ترانس کوره برای کاهش میزان فلیکر و کاهش ضریب توان کوره به منظور افزایش پایداری قوس و همچنین کاهش جریان کوره به منظور کاهش مصرف الکترود استفاده می‌شود. دستیابی به مزایای فوق به قیمت کاهش حداکثر توان تحویلی به کوره صورت می‌گردد. کاربرد توام SVC و راکتورهای سری، ضمن دستیابی به مزایای فوق مشکل کاهش حداکثر توان تحویلی به کوره را نیز حل خواهد کرد.

۲-۲-۳. کوره‌های قوس مستقیم[1]

کوره‌های قوس مستقیم یکی از پیشرفت‌های اساسی تکنولوژی در حیطه کوره‌های قوسی می‌باشد. این نوع کوره عمدتا به خاطر مشکلات در عملکرد کوره‌های قوسی AC مورد توجه قرار گرفته است که این مشکلات عبارتند از کم بودن ضریب توان، نوسانات در محدوده بزرگ، اثر لرزش بر روی شبکه و همچنین نوسانات شدید ولتاژ .

به طور کلی امروزه کوره‌های قوسی مستقیم از لحاظ اقتصادی و مصرف انرژی مورد تایید قرار گرفته است. در این نوع کوره‌ها بر خلاف کوره‌های AC تنها یک الکترود دارد، همچنین می‌تواند یک، دو یا سه الکترود در کف کوره که به عنوان آند عمل می‌کند، تعبیه شود. در بعضی از موارد نیز بوته، خود رسانا بوده و در این حالت مذاب به عنوان آند عمل می‌کند.

هزینه راه‌اندازی کوره‌های قوس الکتریک DC اخیر حدود ۸۰٪ بیشتر از کوره‌های AC که به سیستم SVC نیاز ندارند می‌باشند.همچنین اگر بر روی کوره‌های AC سیستم SVC نصب شود، هزینه آن تنها ۱۰٪ از هزینه راه‌اندازی کوره DC کمتر می‌شود. البته باید توجه داشت که کوره‌های DC نسبت به کوره‌های AC دارای مزیت‌های بسیار می‌باشند.این مزایا عبارتند از:

۱- پایداری بهتر قوس الکتریکی در جریان DC
۲- کاهش مصرف الکترود به میزان ۵۰٪
۳- کاهش مصرف انرژی بین ۵ تا ۷٪
۴- کاهش مصرف هزینه نسوز به میزان ۲۰٪
۵- کاهش فلیکر به وسیله کنترل بهتر توان راکتیو تا ۲۰٪
۶- حرارت همگن در ذوب با هم زدن یکنواخت
۷- امکان شارژ DRI بیشتر
۸- هزینه سرویس و نگه‌داری کمتر به دلیل تعداد المان‌های مکانیکی کمتر
۹- عدم نیاز به سیستم SVC
۱۰-کاهش نقاط داغ و تشعشع در دیواره‌ها

[1] . DC Electic Arc Furnace

با توجه به مزایای ذکر شده برای کوره‌های DC، این نوع کوره‌ها دارای آینده امیدوار کننده‌ای برای توسعه هر چه بیشتر ریخته‌گری در سطح کشور می‌باشد[۲] .

کوره‌های القایی[1]

در ابتدا کوره‌های القایی مستقیماً از شبکه قدرت تغذیه می‌شدند که به نوبه خود گام موفقی در استفاده از توان الکتریکی جهت عملیات حرارتی به حساب می‌آمد. از آنجایی که تلفات فوکو و هیسترزیس با فرکانس نسبت مستقیم دارند و این که ابعاد کویل کوره با بالا رفتن فرکانس کاهش می‌یابد، مهندسین به فکر تغذیه کوره در فرکانسهای بالاتر از فرکانس شبکه قدرت افتادند.

کوره‌های القایی فرکانس متوسط (۲۵۰ HZ) در مقایسه با کوره‌های فرکانس شبکه (۵۰ HZ) ظرفیت ذوب بالاتری دارند. به طوری که دانسیته توان کوره‌های فرکانس متوسط بالای ۱۰۰۰ kwh/ton گزارش شده در حالی‌که دانسیته توان کوره‌های فرکانس شبکه در حدود ۳۰۰ kwh/ton است. این ویژگی امکان استفاده از بوته‌های کوچکتر را فراهم می‌کند که باعث کاهش تلفات حرارتی خواهد شد. بازده حرارتی کوره‌های القایی فرکانس متوسط در حدود ۱۰ درصد بیشتر از کوره‌های القایی فرکانس شبکه است. به علاوه، برای این که کوره‌های القایی فرکانس شبکه مصرف بهینه‌ای داشته باشند، باید مذاب موجود در بوته آن‌ها در حدود دو سوم ظرفیت کل بوته باشد و نیاز به یک واحد مخصوص برای راه اندازی شارژهای سرد دارد. در مقابل، کوره‌های فرکانس متوسط می‌توانند به راحتی با شارژهای سرد راه اندازی شوند و درپایان هر شیفت کاری یا در پایان هر ذوب تخلیه شوند.

لازم به ذکر است که کوره‌های با فرکانس متغیر، دارای مزایای هر دو کوره القائی با فرکانس شبکه و متوسط می‌باشند. استفاده از این کوره ها برای کارگاه‌های ریخته گری کوچک و متوسط مناسب می‌باشد. لازم به ذکر است که کوره‌های القایی فرکانس متوسط و متغیر عموماً در کارخانه هایی که قصد نصب کوره‌های جدید را دارند، استفاده می‌شود [۲].

کوره‌های دوار

در صنایع ریخته گری با ظرفیت کم و متوسط، کوره‌های دوار جایگزین‌های مناسبی برای کوره‌های کوپل یا القایی هستند. کوره‌های دوار سوخت/هوا که برای ذوب چدن، سرب، برنج و آلومینیوم استفاده می‌شدند دیگر استفاده نمی شوند زیرا نرخ ذوب پایینی داشته و کنترل دما و کیفیت در آن ها سخت بود. اما امروزه نسل جدیدی از کوره‌های دوار ارائه شده اند که کاملاً اتوماتیک بوده و دارای مکانیزم واژگونی[2] می‌باشند. در مقایسه با کوره‌های دوار قدیمی، کوره‌های دوار جدید از اکسیژن (به جای هوا) برای احتراق سوخت استفاده می‌کنند.

[1] Induction furnaces
[2] Tilting mechanism

با استفاده از اکسیژن به جای هوا در مشعل‌های اکسی[1] می‌توان دمای شعله مشعل را افـزایش داد. ایـن توانـایی باعث افزایش بازده انتقال حرارت در ذوب و کاهش مصرف انرژی می‌شود. اگر ورود هوای تغذیـه بوسـیله موانـع ورود هوا مسدود شود، NO_x نمی تواند هنگام اکسید شدن نیتروژن اتمسفر تشکیل شود. علاوه بر آن، کل جریان موجـود در دودکش مشعل‌های اکسی بدلیل عدم حضور ترکیبات نیتروژن کوچکتر می‌شود. که این ویژگی سبب می‌شود کـه امکان استفاده از سیستم‌های غبارگیر[2] کوچکتر فراهم شود.

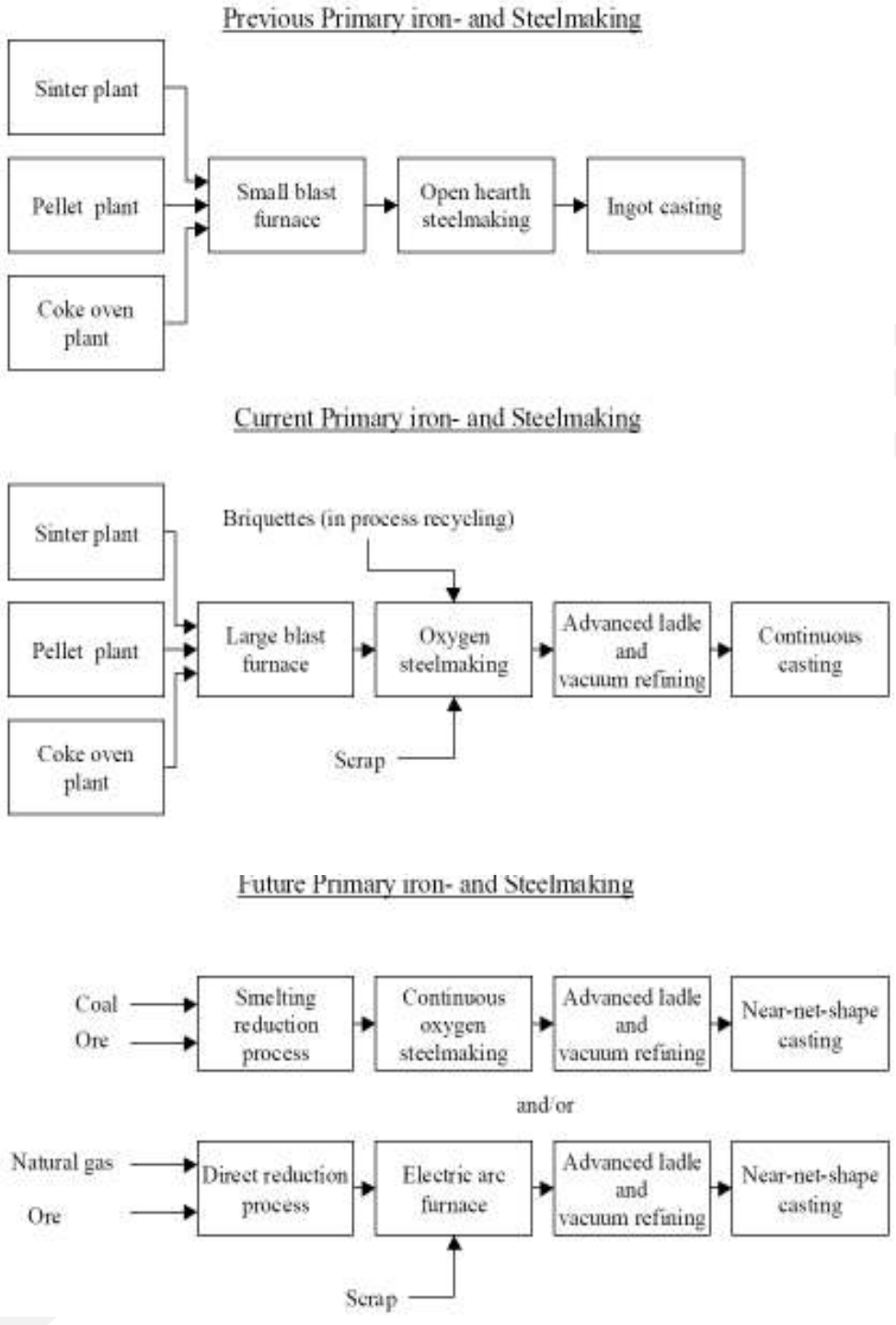
بنابر مطالب فوق می‌توان گفت که این تکنولوژی علاوه بر آن که دمای احتراق را بالاتر مـی‌بـرد، سـبب کـاهش انرژی مصرفی و کاهش انتشار NO_x و CO_2 می‌شود. ولی باید توجه کرد که تولید و ذخیره سازی اکسیژن از لحـاظ ایمنی دارای خطرات قابل توجهی است. تولید اکسیژن از روش تقطیـر برودتـی[3] یـا روش جـذب سـطحی[4]، نیـاز بـه مصرف الکتریسیته دارد. به عنوان مثال انرژی مصرفی با استفاده از تکنیک جـذب سـطحی kWh/Nm^3 ۰/۳۸-۰/۳۵ است [۲].

[1] Oxyburner
[2] dedusting
[3] Cryogenic distillation
[4] Adsorption

فصل سوم
تکنولوژی جدید در صنعت ریخته‌گری

امروزه کارخانه‌های ذوب و ریخته‌گری در صورت عدم استفاده از تکنولوژی روز محکوم به فنا هستند. در نتیجه بیشتر کارخانه‌های اروپایی، آمریکای شمالی، ژاپن و کره جنوبی بدلیل مشکلات فراوان تکنولوژی موجود، در تلاش برای تعویض تجهیزات ذوب و ریخته‌گری خود شده‌اند و با سفارش خرید خطوط جدید ذوب و قوس الکتریکی در حال بهینه سازی خطوط تولیدی خود هستند. در سال ۲۰۰۵ وزارت انرژی آمریکا به کلیه فولاد سازان کشور هشدار لازم را اعلام کرده است و در ضمن توصیه کرده که کارخانه‌های فولاد جهت بهینه سازی خطوط خود حداکثر تا سه سال آینده اقدام کنند. این موضوع سبب شد تا تعداد زیادی از شرکت‌های فولاد ساز آمریکا و همچنین جهان از جمله میتال[1] و نوکور[2] خطوط ذوب و ریخته‌گری خود را امحاء نموده و اقدام به تهیه خطوط جدید بخصوص از شرکت‌های اروپایی نمایند. علت این امر کاهش قابل توجه هزینه تولید با استفاده از تکنولوژی جدید می‌باشد. این تکنولوژی رویای فولاد سازان را در ایجاد ظرفیت‌های ذوب ۲۰۰ تن در زمان ۳۵ دقیقه تحقق بخشیده است. در شکل۳-۱ تاریخچه ای از تغییرات روشهای تولید آهن و فولاد از گذشته تا آینده ارائه شده است.

[1] . Mittal
[2] . Nucor



تغییرات روشهای تولید آهن و فولاد از گذشته تا آینده[۶]

در ادامه به بررسی و ارائه تکنولوژیهای نوین پرداخته می‌شود.

کاربرد کامپیوتر در صنعت ریخته‌گری

توسعه چشمگیری در بخش‌های مختلف صنعت ریخته گری به وقوع پیوسته که مهمترین آنها، پیدایش مواد نـو

و پیشرفت‌ها در زمینه روش‌های ذوب، تکنیک‌های قالب‌گیری، تجهیزات تمیزکاری قطعات ریختگی و عملیات حرارتی بوده است.

یکی از مهم‌ترین زمینه‌های توسعه علم و فناوری در ریخته‌گری، کاربرد کامپیوتر و روش‌های عددی برای حل مسائل مکانیک سیالات و ترمودینامیک در جریان حرکت مذاب در راهگاه‌ها و قالب و انجماد مذاب در قطعه است.

این توسعه به ویژه موجب گردیده تا طراحان بتوانند از طریق طراحی روش‌های تولید به وسیله کامپیوتر قبل از اقدام به ساخت مدل و ریختن فلز مذاب در قالب، به مشخصات ساخت و تولید قطعه دست یافته و از قابل تولید بودن قطعه اطمینان حاصل نمایند.

این پیشرفت باعث شده تا طراحان بتوانند قبل از صرف وقت و هزینه‌های زائد نسبت به اصلاح طرح‌های خود اقدام نموده و روش‌های بهینه تولید قطعه ریختگی مورد نظر خود را به دست آورند.

نتیجه عملی استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری در طراحی فرآیندهای تولید، دستیابی سریع به قطعه‌ای ارزان‌تر است. امروزه طول زمان ساخت یک محصول از ماه‌ها و سال‌ها به روزها و هفته‌ها کاهش یافته است.

این تحول از طریق توسعه فناوری کامپیوتری و پیشرفت در روش‌های شبیه‌سازی عددی تحقق یافته است.

نوآوری‌های بسیار در این حوزه موجب گردیده تا مهندسان و طراحان بتوانند محصولاتی را تولید کنند که دارای پیچیدگی‌های بالاتر و زمینه‌های کاربردی بیشتر می‌باشند. تولید محصول با سرعت بالاتر با صرف هزینه‌های کمتر، تنها با سرمایه گذاری در خرید کامپیوتر و نرم افزار بوده است.

در رابطه با کاربرد کامپیوتر در ساخت محصول مزایای زیر را می‌توان مورد تاکید قرار داد:

بهینه سازی طرح و وزن قطعات، بهبود در کارایی و کیفیت محصول، کاهش زمان ساخت و پذیرش محصول و کاهش هزینه‌های تولید قطعه. حقیقت آن است که در جهان معاصر قدرت کامپیوترها به تدریج افزایش یافته و در مقابل قیمت آنها کاهش می‌یابد و از طرف دیگر استفاده از آن برای کاربران آسان تر می‌شود. از این جهت کاربرد این ابزار در بسیاری از فناوری‌های ساخت و تولید با جاذبه‌های بسیاری همراه گشته است. بعلاوه نرم افزارها دارای انتخاب‌های بسیار به همراه بانک‌های اطلاعاتی قوی‌تر شده اند، به گونه ای که محاسبات بسیار پیچیده ریاضی به همراه تحلیل‌های سخت مهندسی را می‌توان به سهولت و درحداقل زمان ممکن با کامپیوتر انجام داد.

امروزه کاربرد کامپیوتر در شبیه سازی بسیار گسترده شده به گونه ای که حتی کارگاه‌های کوچک در آینده نه چندان دور از این تکنولوژی استفاده خواهند کرد. واقعه ای که حتی آنان در رویاهای خود نیز تحقق آن را باور نمی‌کردند.

یکی از پیچیده‌ترین صنایع و فرآیندهای تولید که دانش بسیاری را در خود جای داده است، ریخته‌گری است. موضوعات حوزه‌های دانش و فناوری در این صنعت بسیار متنوع است:

به دلیل وجود فرآیندهای پیچیده‌ای مانند راهگاه گذاری، تغذیه گذاری، انجماد مذاب در قالب، حرکت فرآیندهای تولید به کمک کامپیوتر و ساخت ابزارهای مورد نیاز در ریخته گری، این صنعت در گذشته بیش از آنچه

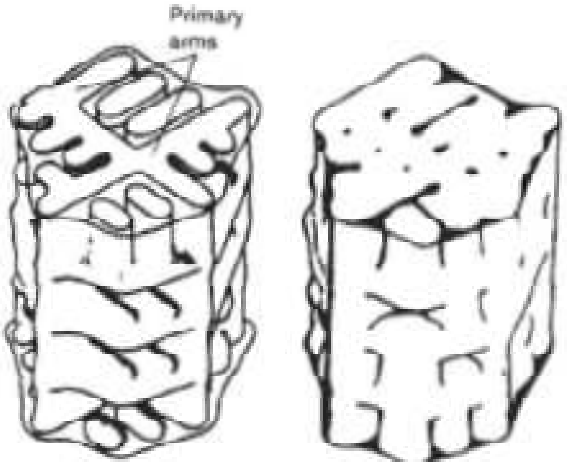
که به حوزه‌های دانش بشری مرتبط باشد در زمره هنرهای استادکاران و مهندسان قرار داشت.

اما امروزه با توسعه کامپیوترهای با حافظه بالا، قوی و سریع به همراه توسعه کدهای بهینه کامپیوتری در حوزه مدلسازی و شبیه‌سازی فرآیندهای تولید، این صنعت در گروه فرآیندهای مدرن علوم و فناوری قرار گرفته که دیگر برخلاف گذشته حدس و گمان جای خود را به اطلاعات علمی داده است. مهندسان و تکنولوژیست‌های عصر ریخته‌گری مدرن، روزانه موفق به حل بسیاری از مسایل پیچیده مهندسی می‌گردند، نظیر: بهینه‌سازی سیستم‌های راهگاهی و تغذیه‌گذاری، طراحی برای محصولاتی که به سهولت قابل تولید یا مونتاژ باشند، شبیه‌سازی فرآیندهای تولید بر اساس تغییرات آماری ، آنالیز پارامتریک تولید، آنالیز عمر خستگی قطعه و .... اگرچه در حال حاضر برای دستیابی به نرم افزارهایی که بتوانند دارای حداکثر توانمندی و کارایی بوده و همه نیازهای طراحان، مهندسان و تکنولوژیست‌های ریخته گری را برآورده سازند کارهای تحقیقاتی دیگری مورد نیاز است، اما امروزه استفاده از کامپیوتر و نرم افزارهای شبیه سازی بهبودهای اساسی در صنعت ریخته‌گری به وجود آورده است.

فرآیند نیمه جامد

فرآیندهای نیمه جامد، از جمله روش‌های نوین تولید مواد هستند که دارای عمری در حدود 30 سال می‌باشند. این روش‌ها مشتمل بر شکل‌دهی مخلوطی نیمه‌جامد- نیمه‌مذاب با استفاده از روش‌های ریخته‌گری و فرم‌دهی مکانیکی می‌باشند. نکته کلیدی این فرآیندهای ساخت مواد، ایجاد ساختاری غیردندریتی در مخلوط نیمه جامد است.

انجماد دندریتی معمول‌ترین نوع انجماد در قطعات ریختگی است. در این فرآیند، از روی هر یک از جوانه‌های موجود در مذاب، یک شاخه ستونی جوانه زده و در جهات جلو و پهنا رشد می‌نماید و سپس بازوهای ثانویه‌ای از آن منشعب می‌شوند. این پدیده ادامه میابد تا نهایتا بازوها به هم پیوسته و یک شبکه کریستالی موسوم به دانه به وجود آید. در شرایط ایده آل که عمل مذاب رسانی بطور کامل انجام می‌شود، دانه حاصله کاملا یکنواخت خواهد بود. اما تحت شرایط کارگاهی، اغلب انجماد دندریتی منجر به عدم مذاب رسانی کامل و به تبع آن ایجاد عیوب انقباضی در بین بازوهای دندریتی می‌شود.در شکل۳-۲ نمونه‌ای از دندریت نامنظم آورده شده است[۷].



دندریت نسبتا نامنظم[۷]

از طرفی هنگامی که رشد دندریتی در حجم زیادی از ماده، بطور مداوم انجام گیرد، ساختار بدست آمده به شدت انیزوتروپ خواهد بود. در این حالت جدایش میکروسکوپی مغزه‌بندی در اثر وجود اختلاف غلظت بین مرکز و سطح خارجی بازوهای دندریتی اتفاق می‌افتد. این امر در موارد حاد خود می‌تواند منجر به تشکیل فاز ثانویه در بین بازوهای دندریتی شود[۸].

فرآیند ریخته‌گری و شکل‌دهی در حالت نیمه جامد در چند دهه اخیر به عنوان یک روش موفق و قابل اعتماد جهت ساختن قطعاتی با ابعاد نزدیک به نهایی و ریزساختار یکنواخت مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مزایای مهم این فرآیند، دمای پایین فرآیند و کاهش مصرف انرژی گرمایی، رفتار ویسکوز مواد هنگام سیلان به قالب، کاهش میزان حلالیت گاز و حفرات گازی، کاهش انقباض حین انجماد، افزایش عمر قالب و بهبود خواص مکانیکی می‌باشند [۹]و[۱۰].

فرآیند نیمه جامد، تکنولوژی نسبتا جدیدی است. مطالعه بر روی این فرآیند، برای اولین بار در سال 1971 و در راستای تز دکترای اسپنسر[۱] و تحت نظارت فلمینگ[۲] در دانشگاه MIT آغاز گردید. در طی آن تحقیق، اسپنسر به این نتیجه رسید که برش و شکستن دندریتهای موجود در یک آلیاژ نیمه جامد، منجر به بروز رفتار تیکسوتروپیک (کاهش ویسکوزیته در اثر اعمال تنش برشی) در یک آلیاژ نیمه جامد می‌شود.

از سال 1971 تا کنون، تحقیقات زیادی بر روی روشهای تولید قطعات با استفاده از فرآیند نیمه جامد انجام گرفته است. عمده این تحقیقات بر مبنای نحوه ایجاد ساختار هم محور و غیر دندریتی در حالت نیمه جامد بوده است[۱۱].

امروزه فرآیند نیمه جامد به عنوان یک روش کاملا علمی و در عین حال با صرفه اقتصادی مطرح است بطوریکه

1 . Spenser
2 . Fleming

قطعات حاصله از این روش، امکان برخورداری از خواص مکانیکی مطلوب، اشکال پیچیده و همچنین ابعاد دقیق را دارا می‌باشند.

ماده اولیه مصرفی فرآیند و نیز روش تهیه آن به علاوه نحوه شکل دهی این مواد، مهمترین مشخصات کلیدی به منظور شناخت روش نیمه جامد هستند. ماده اولیه مصرفی این فرآیندها متفاوت از ماده اولیه سایر روش‌های معمول می‌باشد، چرا که بر خلاف روش‌های ریخته‌گری معمولی(که از مذاب به عنوان ماده اولیه استفاده می‌کنند) و روشهای فورج و نورد(که ماده شروع کننده دارای حالت جامد است) ،ماده اولیه مصرفی فرآیند نیمه جامد، دوغاب فلزی نیمه جامد- نیمه مذاب می‌باشد؛ به بیان بهتر در این فرآیندها، مخلوطی متشکل از ذرات جامد غیر دندریتی پخش شده در فاز مذاب فلزی به عنوان ماده شروع کننده فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۲].

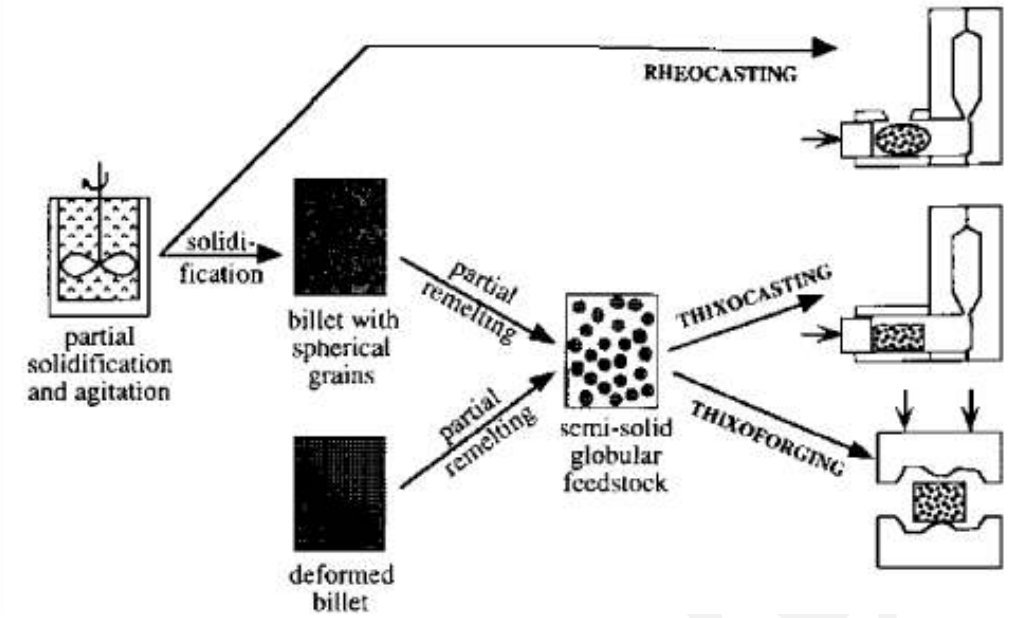
به منظور تهیه دوغاب نیمه جامد، بطور کلی دو روش اصلی وجود دارد که عبارتند از:

۱)روش رئوکست[1]: در این روش ساختار نیمه جامد مستقیما از فاز مذاب و با کاهش دما بدست می‌آید و سپس دوغاب حاصله به درون قالب هدایت می‌شود.

۲)روش تیکسوفرمینگ: در این روش ابتدا آلیاژ نیمه جامد بصورت شمش ریخته شده و سپس تا دمای نیمه جامد، حرارت داده می‌شود، در مرحله بعدی تحت فرآیندهای خاصی که در ادامه ذکر خواهد شد به ساختار جامد غیر دندریتی پراکنده شده در مذاب فلزی تبدیل شده و نهایتا دوغاب حاصله یا در قالب تزریق شده[2] و یا تحت فرآیند شکل دهی[3] قرار می‌گیرد.

روش رئوکستینگ که در واقع فرآیند تولید مخلوطهای نیمه جامد غیردندریتی بوسیله یک روش برشی در هنگام انجماد می‌باشد، یکی از روش‌های تولید در تحقیقات اولیه است ولیکن این روش به صورت تجاری در نیامد. دلیل این امر کیفیت پایین مخلوطهای نیمه جامد تولید شده بوسیله این روش است. البته برخی پارامترها مانند مصرف انرژی کمتر یک از مزایای روش رئوکست است. در شکل۳-۳ شماتیک فرآیندهای مختلف جهت تولید قطعات به روش نیمه جامد دیده می‌شود[۱۲].

1 . Rheocast
2 . Thixocasting
3 . Thixoforming



شماتیک فرآیندهای مختلف جهت تولید قطعات به روش نیمه جامد [۲۳]

تکنیکهای تولید ساختار غیردندریتی در حالت نیمه جامد

همانطور که پیشتر اشاره شد، روش‌های ریخته‌گری نیمه جامد، به دو دسته عمده رئوکست و تیکسوفرمینگ قابل دسته‌بندی هستند. در هر یک از آنها به منظور تهیه ساختار نیمه جامد غیردندریتی می‌بایستی فرآیند خاصی انجام پذیرد، در این قسمت از تحقیق به بررسی انواع متدهای ایجاد ساختار غیر دندریتی در حالت نیمه جامد خواهیم پرداخت.

۳-۳-۱. همزدن مکانیکی

تکنیک همزدن مکانیکی که برای اولین بار در دانشگاه MIT مورد استفاده قرار گرفت، قدیمی‌ترین روش تبدیل ساختار دندریتی در حالت نیمه جامد می‌باشد.

مکانیزم کاری این روش بدین ترتیب است که چرخش یک سری پره متصل به یک شفت دوار در دوغاب مذاب منجر به اعمال نیروی برشی و به تبع آن شکستن دندریتهای جامد می‌شود. مشخص شده است که در این روش دما، مدت زمان و سرعت همزدن بر مورفولوژی و اندازه گلبول‌ها در حالت نیمه جامد موثر است.

سرعت بالای کار، قیمت تمام شده پایین‌تر، اتوماسیون و سهولت فرآیند مهمترین مزایای روش مداوم همزدن مکانیکی هستند[۱۴].

۳-۳-۲. همزدن با استفاده از روش‌های مغناطیسی (MHD[1])

روش همزدن مغناطیسی توسط آلوماکس[2] به منظور غلبه بر مشکلات ناشی از حضور همزن مکانیکی در دوغاب ابداع شد؛ این روش امروزه به عنوان پرکاربردترین و سودمندترین روش مصرفی در فرآیندهای نیمه جامد مطرح است. اساس کار این روش به مانند چرخش مذاب در کوره‌های القایی می‌باشد. در این روش، برش موضعی بوسیله میدانهای دورانی الکترومغناطیسی در درون یک قالب ریخته‌گری پیوسته ایجاد شده و بیلت با ساختار غیردندریتی به صورت پیوسته تولید می‌شود.

۳-۳-۳. روش سطح شیبدار خنک کننده[3]

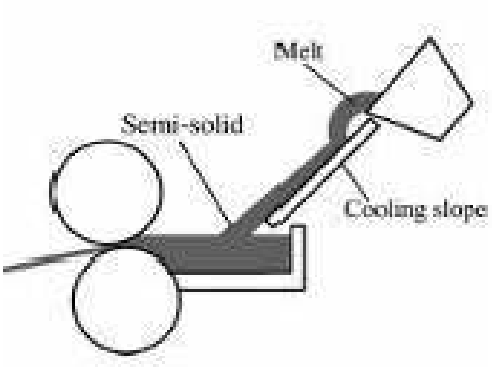
این روش یکی از جدیدترین تکنیک‌های تولید قطعات از طریق فرآیند نیمه جامد بوده و به منظور تولید شمش‌های تیکسوفرم شده کاربرد دارد[۱۰]. در این روش مذابی با دمای فوق ذوب جزیی تهیه شده و سپس این مذاب از طریق یک سطح شیبدار خنک کننده به سمت قالب روانه می‌شود؛ در اثر این امر، جوانه‌های جامدی تشکیل شده و این جوانه ها بنا به برش ناشی از حرکت بر روی سطح شیبدار، شکسته شده و به حالت غیر دندریتی در می‌آیند، نهایتا مذاب در انتهای سطح شیبدار تبدیل به دوغاب نیمه جامد با ذرات جامد کروی شده،وارد قالب می‌شود و سریعا منجمد می‌شود. زاویه سطح خنک کننده، طول تماس، دمای بارریزی و جنس قالب از عوامل مهم در روش سطح شیبدار هستند[۱۰].

با تغییر زاویه دو پارامتر اصلی تغییر می‌کند:

- میزان تنش برشی و تلاطم ایجاد شده در مخلوط نیمه جامد که هر چه زاویه بیشتر باشد میزان تنش برشی اعمال بیشتر بوده و برای ایجاد ساختار کروی مفید تر می‌باشد .
- مدت زمان اعمال تنش برشی که، هر چه زاویه کمتر باشد زمان حرکت مذاب نیمه جامد روی سطح بیشتر بوده بنابراین احتمال حصول ساختاری با درصد کرویت بالاتر و توزیع یکنواخت، بیشتر است[۱۳].

طول سطح شیبدار نیز بر مدت زمان اعمال تنش تاثیر گذار است . در نتیجه برای تعیین شرایط بهینه سطح شیبدار از نظر میزان و مدت زمان اعمال تنش برشی ، باید تاثیر متقابل زاویه و طول سطح شیبدار در نظر گرفته شود. دمای بارریزی نیز دارای یک حد بهینه است که با توجه به طول سطح شیبدار و نیز قدرت خنک کنندگی سطح تغییر می‌کند. در شکل۳-۴ شماتیکی از روش سطح شیبدار خنک کننده آورده شده است[۱۰].

1 . Magnetohydrodynamic Stirring
2 . Alumax
3 . Cooling Slope Method



شماتیک روش سطح شیبدار خنک کننده [۱۰]

۳-۳-۴. ریخته گری با دمای فوق ذوب پایین

این روش که تحقیق بر روی آن اخیرا توسعه یافته است، عبارت است از فرآیندی دو مرحله‌ای که در قدم اول آن مذابی با درجه حرارت نزدیک دمای لیکوئیدوس به درون قالبی با قابلیت هدایت حرارتی بالا ریخته میشود، در اثر این امر آلیاژ دارای ساختاری تقریبا هم محور می‌شود. این آلیاژ سپس تا منطقه دمایی نیمه جامد حرارت داده شده و نهایتا تحت فرآیند تیکسوفرمینگ قرار می‌گیرد. همچنین طی ابداعات جدیدی این روش تحت فرآیند رئوکست نیز مورد بهره‌وری قرار گرفته است. بدین منظور آلیاژ با فوق ذوب بسیار کم به قالب اکستروژن ریخته شده و طی اعمال تنش برشی، سرد شده و به قالب اکسترود می‌گردد.

در اثر استفاده از فرآیند ریخته‌گری با دمای فوق ذوب پایین، ساختار آلیاژ دارای دانه‌های ریز و کروی با یکنواختی بالای ساختاری و شیمیایی می‌شود. سادگی و ارزانی فرآیند از دیگر مزایای این روش هستند. درحالیکه مشکلاتی چون سختی کنترل‌های دمایی و ساختاری بر سر راه این روش وجود دارد[۱۱].

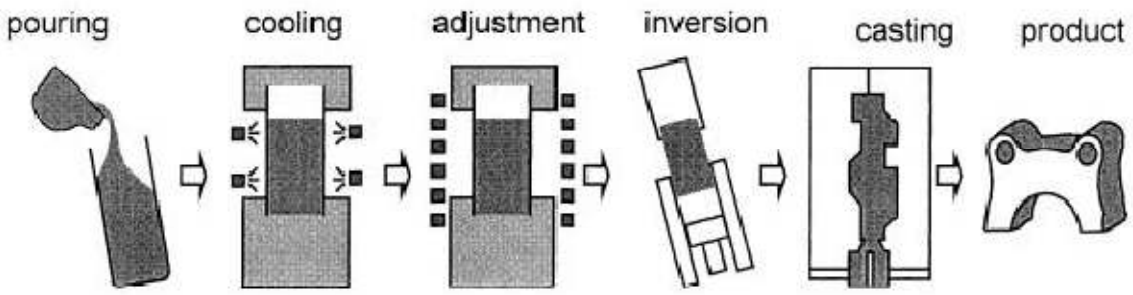
۳-۳-۵. رئوکست جدید(NRC[1])

روش جدید رئوکست معروف به NRC به وسیله شرکت ژاپنی صنایعUBE اختراع شد. با استفاده از این روش می‌توان مستقیما از مذاب به ساختار نیمه جامد دست یافت. ریزساختار ریختگی ، ریز و عاری از عیوب و همگن است که این ، خواص مکانیکی خصوصا مقاومت در برابر بارهای دوره ای را اصلاح می‌کند . در این روش مذاب با دمای فوق ذوب جزیی، در یک ظرف بوته مانند فولادی که بر روی یک چرخ دوار مستقر است ، ریخته شده و با استفاده از سرد کننده کنترل شده ای تا دمای نیمه جامد سرد شده و در این دما نگهداری می‌شود تا ساختار گلبولی لازم برای شکل‌دهی نیمه‌جامد تشکیل شود . به این وسیله اسکلت پایداری از فاز جامد بعد از تنها چند دقیقه بعد از پر شدن بوته تشکیل می‌شود سپس برای همگن شدن دمایی ، لقمه‌ی استوانه‌ای شبه جامد، قبل از آنکه به محفظه افقی ماشین تزریق منتقل شود، به وسیله‌ی روش القایی حرارت دیده ؛ و نهایتا تزریق انجام شده و

1 . New RheoCasting

لقمه شکل و ابعاد نهایی خود را پیدا می‌کند.

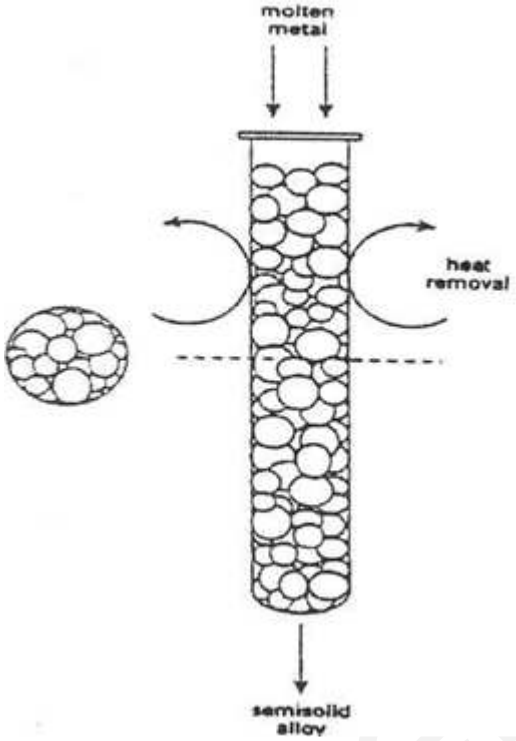
آلیاژهای ریختگی از جمله مواردی است که تا به حال با استفاده از روش NRC تولید شده، روشی که دارای مزایای پایین بودن هزینه و نیز قابلیت استفاده برای گستره وسیعی آلیاژها می‌باشد. درشکل۳-۵ شماتیکی از فرآیند NRC آمده است.



شماتیک فرآیندNRC [۱۵]

۳-۳-۶. روش گلوله‌های نسوز

مذاب با اعمال فشار و یا نیروی وزن از میان گلوله هایی مقاوم در برابر تنش و حرارت با اندازه‌های متفاوت عبور داده می‌شود . در اثر انتقال حرارت از دیواره محفظه و گلوله ها تشکیل می‌شود ولی در اثر جریان مذاب این دندریت‌ها شکسته شده و محصول نهایی مخلوط نیمه جامد خواهد بود . البته باید توجه داشت که فضای بین گلوله ها باید قابل مقایسه با اندازه دندریت‌ها حاصل از انجماد باشد . از مزایای این روش ، جلوگیری از اثرات مضر همزن و ایجاد و ورود اکسید به مذاب می‌باشد . البته می‌توان از فیلترهای ریخته‌گری نیز به جای گلوله‌های نسوز استفاده کرد که البته احتمال بسته شدن راه عبور مذاب در این حالت بیشتر است.در شکل۳-۶ نمایی از روش گلوله‌های نسوز جهت تولید مخلوط نیمه جاممد آمده است[۱۶].



روش گلوله‌های نسوز جهت تولید مخلوط نیمه جامد[۱۶]

ریخته‌گری انجمادی

این روش نوین ریخته‌گری از یک قالب غیر قابل نفوذ پرشونده با دوغاب استفاده می‌شود. بعد از انجماد دوغاب (توسط دستگاه Freeze dryer که با کاهش فشار عمل تصعید انجام می‌شود) مایعات در دمای مناسب، توسط خشک کردن انجمادی زدوده می‌شود. این روش ایجاد دوغاب‌های غلیظ و ترکیبات شیمیایی نوین را شامل شده و سبب می‌شود که انجماد سریع و قبل از ته‌نشین شدن انجام گردد.

دراین روش از استفاده چسب زیاد، فشار و افزودنی‌های سمی خودداری می‌شود و به نوعی با ریخته‌گری تزریقی، ژله‌ای و انعقاد مستقیم مقایسه می‌شود. استفاده از ابزارآلات ساده، دوغاب‌هایی با پایه آب و شکل‌پذیری عالی و امکانات تکمیل کننده ریخته‌گری انجمادی را به یک تکنیک با ارزش، و سازگار با محیط تبدیل کرده است.

ریخته گری کف زا[1]

دوغابهایی که به طور گسترده در اندازه ذرات شرکت کننده و افزودنی‌های آلی متفاوتاند، ممکن است به صورت ساختاری باز[2] یا بسته[3] تشکیل گردند. جزءاصلی سرامیک به همراه حلال، پلیمر و واکنش دهنده‌هایی که حباب‌های گازی به وجود می‌آورند با یکدیگر مخلوط می‌شوند و ریخته‌گری انجام می‌گیرد. قالب فومی به دست آمده

[1] . Foam Casting
[2] . Open-Cell
[3] . Closed-Cell

سپس خشک شده و پخته می‌شود تا یک محصول سرامیکی متخلخل تولید گردد. این سیستم و پیشرفت آن توسط Saggio و scott تشریح و خلاصه شده است. دراین روش از مواد کف زا[1] استفاده می‌شود. این مواد ایجاد کف و حباب می‌کنند که این حباب‌ها بعد از ریخته‌گری هم، در قطعه وجود دارند و موجب ایجاد تخلخل می‌گردند؛مانند گازها.

این روش برای ساخت سنسورها و کاتالیست‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. سنسورها با جذب گاز و رطوبت در تخلخل‌هایشان هدایتشان تغییر می‌کند. هر چه ماده متخلخل تر باشد سطح تماس با محیط اطراف آن بیشتر است؛ پس در سنسورها هر چه سطح تماس بیشتر شود حساسیت بیشتر است و در کاتالیست‌ها واکنش پذیری بیشتر می‌شود.

تختال نازک

اولین کارخانه ریخته‌گری تختال نازک[2] در سال ۱۹۸۹ در شرکت نوکر[3] در ایالات متحده امریکا بر اساس تکنولوژی رشد یافته شرکت SMS آلمان تأسیس گردید که این تکنولوژی را با نام تولید تسمه فشاری می‌شناسند. این تکنولوژی به طور کامل در بیش از ۳۰ کارخانه به کار گرفته شد که با تکیه بر آن سالیانه در حدود ۵۰ میلیون تن تختال نازک تولید می‌شود. همچنین شرکت‌های آلپین وست[4] استرالیا و دانیلی[5] ایتالیا نیز تکنولوژی‌های ریخته‌گری تختال نازک خود را گسترش دادند. تکنولوژی شرکت وست آلپین را در حال حاضر با نام ریخته‌گری پیوسته تختال نازک و تکنولوژی نورد یا به اختصار CONROLL می‌شناسند و این شرکت تختال هایی با ضخامت ۱۲۵ میلیمتر و بالاتر تولید می‌کند. اما تکنولوژی شرکت دانیلی نیز به نورد پیوسته تختال‌های نازک نرم معروف بوده و تختال هایی با ضخامت‌هایی بین ۷۰ تا ۹۰ میلیمتر تولید می‌کند [۱۷].

آخرین نوآوری‌های ارائه شده در این تکنولوژی‌های ریخته‌گری تختال نازک عبارتند از :

- ✓ طراحی قالب
- ✓ دستگاه قالب گیری هیدرولیک لرزشی
- ✓ استفاده از ترمزهای الکترومغناطیس
- ✓ استفاده از descaler فشار بالا و راهنمای جانبی غلطکی(لبه خم کن) در فرآیند نورد
- ✓ کاهش مرکزی مایع دینامیک
- ✓ قالب گیری پودری
- ✓ سیستم خنک کننده آبی اسپری

[1] . Foaming Agent
[2] . Thin slab
[3] . Nucor
[4] . Alpine Vest
[5] . Danieli

سرعت ریخته‌گری برای تختال با ضخامت ۵۵/۵۰ میلیمتر، ۶ متر بر دقیقه بوده که در واحدهای ریخته‌گری تختال نازک متوسط رایج می‌باشد. در ابتدا در طی روش تولید تختال نازک فقط نوع تجاری فولادهای ساده کربنی ریخته می‌شد. هرچند اخیراً، فروشندگان تجهیزات ادعا می‌کنند که تقریباً تمامی انواع فولادها، شامل فولادهای کم کربن، پرکربن و کربن متوسط، انواع فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا مورد استفاده برای خطوط لوله و همچنین فولادهایی برای استفاده در صنایع خودرو سازی از قبیل انواع بدون عناصر درون شبکه ای را می‌توان در این سیستم، ریخته‌گری نمود. انواع فولادهایی که می‌توانند توسط روش‌های ریخته‌گری تختال نازک تولید گردند، در جدول۳-۱ قابل مشاهده است.

جدول۳-۱. طبقه بندی فولادهای ریخته شده به روش ریخته‌گری تختال نازک[۱۷]

شماره فولاد	نوع فولاد
A	انواع فولادهایی که پیش از این با روش تختال نازک ریخته می‌شدند
۱	فولادهای غیر آلیاژی برای استفاده در لوله‌های تحت فرآیند جوشکاری و لوله کشی ساختمان
۲	فولادهای کم کربن و فوق کم کربن در کیفیت‌های DD و EDD
۳	فولادهای میکروآلیاژی با استحکام بالاتر برای شکل دهی سرد و نورد سرد
۴	فولادهای HSLA با افزایش مقاومت در برابر خوردگی اتمسفری
۵	فولادهای سیلیسی برای کاربردهای الکتریکی
۶	فولادهای پرکربن و کربن متوسط
۷	انواع فولادهای EDD برای محصولات بدون روکش مورد استفاده در صنایع خودرو
۸	فولادهای آلیاژی برای استفاده در فرآیندهای عملیات حرارتی
۹	فولادهای ضدزنگ فریتی
۱۰	فولادهای خطوط لوله API-5L
۱۱	فولادهای IF
۱۲	ورق‌های فولادی فوق کم کربن برای محصولات بدون روکش مورد استفاده در صنایع خودرو
۱۳	فولادهای دوفازی و TRIP
۱۴	فولادهای خطوط لوله بالاتر از X-80
۱۵	فولادهای نوع پریتکتیک

- **مزیت‌های مهم در تکنولوژی ریخته‌گری تختال نازک**

در مقایسه با دیگر فرآیندهای متداول ریخته‌گری پیوسته برای تولید کلاف‌های نورد گرم، تکنولوژی تختال نازک انرژی کمتری مصرف می‌نماید.

ریخته‌گری تختال نازک در مقایسه با روش‌های متداول ریخته‌گری نورد گرم، راندمان تولید را برای محصولات نورد گرم تخت افزایش می‌دهد.

از دیگر مزایای بالقوه ی سیستم ریخته‌گری تختال نازک می‌توان به کاهش در هزینه‌های کلی، کاهش در نیروی انسانی، کاهش فضای مورد نیاز و کاهش در هزینه فرآیند اشاره نمود.

فرآیند ریخته‌گری تسمه به روش مستقیم[1]

در سال ۱۹۹۹ شرکت NUCOR/BHP/IHI یک واحد صنعتی با ظرفیت تولید ۰/۵ میلیون تن درسال در NUCOR ایالات متحده تأسیس نمود و روش تولید خود را با " فرآیند ریخته‌گری تسمه" ارتقاء داد. همچنین شرکت Thyssen Krupp Steel/Usinor/VAI نیز فرآیندهای خود را به عنوان فرآیند تسمه اروپایی توسعه بخشید. در این فرآیند، فولاد مذاب بین دو غلطک چرخان مقابل هم که دو صفحه سرامیکی به سمت سطوح جانبی این غلطک‌ها فشار وارد می‌کنند، ریخته می‌شود. در این هنگام پوسته فولادی بر روی سطح غلطک‌ها شکل می‌گیرد. معمولاً محدوده سرعت این ریخته‌گری بین ۴۰ تا ۱۳۰ متر بر دقیقه بوده که به ضخامت تسمه و اندازه غلطک ریخته‌گری بستگی دارد.

فرآیندهای احیا مستقیم[2] و احیای مذاب[3]

۳-۸-۱. فرآیند احیای مذاب(SR)

نخستین فرآیند تجاری احیای مذاب فرآیند کورکس[4] بود که به وسیله دو واحد فولادسازی JSW استیل و Essar استیل مورد بهره‌برداری قرار گرفت. دیگر کارخانه‌هایی که با این روش کار می‌کنند در کشورهای چین و آفریقای جنوبی قرار دارند [۱۸].

مشخصات مربوط به یک واحد تولیدی با روش کورکس واقع در آفریقای جنوبی در جدول۳-۲ ارائه شده است. در حقیقت واحد کورکس دارای دو مرحله فرآیند است که در آن سنگ‌آهن به یک استوانه قائم واقع در قسمت فوقانی محفظه گازی[5] شارژ می‌شود. گدازنده که در آن زغال‌سنگ نرم شده به وسیله اکسیژن سوخته و منتج به ایجاد گاز احیا می‌شود و نهایتا موجب گرم شدن مذاب می‌شود.

چدن احیای مستقیم تولید شده در داخل استوانه به داخل محفظه گازی ریخته و در آنجا ذوب شده است. چدن مذاب در فواصل معین به صورت چدن مذاب با ترکیب مشابه با آنچه که در کوره بلند تولید می‌شود، تخلیه

[1] . Debbie Sheridan Casting
[2] . Direct Reduction
[3] . Smelting Reduction
[4] . Corex
[5] . Gasifier

می‌شود.

روش کورکس نخستین فرآیند احیای ذوب موفقیت‌آمیز است اما برای موفقیت تجاری آن باید بـه بهینـه‌سـازی گازهای خروجی با دمای بالا و گرمازایی بالا توجه کرد. این گازها می‌توانند برای برخی از کاربردها از قبیل تولید برق یک پالایشگاه و برای تولید آهن اسفنجی مورد استفاده قرار گیرند.

جدول۳-۲. مشخصات مربوط به یک واحد تولیدی با روش کورکس واقع در آفریقای جنوبی[۱۸]

	Unit	Using lump ore	Using pellets
Melting capacity	t HM*/hour	45	53
Specific melting capacity	t HM/m^3 per day	3.0	3.4
Coal consumption	kg/t HM	1080	1000
C_{fix}-consumption	kg/t HM	615	570
O_2-consumption	Nm^3/t HM	540	500
Slag quantity	kg/t HM	450	300
Hot metal composition			
Carbon	%	4.5	4.5
Silicon	%	0.3	0.3
Sulphur	%	0.05	0.05
Phosphorous	%	0.15	0.15
Export gas			
Quantity	Nm^3/t HM	1750	1710
Net calorific value	MJ/t HM	7.5	7.5
Composition			
CO	%	45	45
CO_2	%	32	32
H_2	%	16	16
Dust	mg/Nm^3	<5	<5
Emission			
Dust	g/t HM	39-139	39-139
SO_2	g/t HM	26-333	26-333
NO_x	g/t HM	21-33	21-33
Energy consumption	GJ/t HM	17	17

* HM: hot metal

اخیرا شرکت پوسکو[1] کره‌جنوبی از یک تغییر ظرفیت تجاری برای روش کورکس استفاده کرده اسـت، کـه ایـن امر امکان استفاده از سنگ‌های معدنی ریزتر را فراهم می‌آورد. این روش فینکس[2] نامیده شده که کانی‌هـای ریزتـر از میان یک جریان از سیال بستر رآکتور عبور می‌کند و گاز احیائ تولیده شـده در محفظـه گـازی ذوب نیـز در جهـت مخالف این جریان از داخل رآکتور عبور داده می‌شود.

1. Posco
2. Finex

مزیت این روش این است که نیازی به گندله‌سازی کانی‌های ریز نیست، اما هر دو فرآیند نیازمند طبقه‌بندی دقیق زغال‌سنگ مورد استفاده هستند.

به طور معمول این تکنولوژی برای احیای ذوب کوره بلندهای مجتمع‌های فولادسازی یا در رابطه با چدن مذاب با مقدار کم (۰/۵ تا ۰/۸ میلیون تن در سال) که نیازمند فرآیندهای تکمیلی تولید هستند، مورد استفاده قرارمی‌گیرد. به عنوان مثال در یک واحد فولادسازی با کوره قوس الکتریکی، شارژ چدن مذاب هم منتج به افزایش بهره‌وری می‌شود و هم موجب کاهش مصرف برق می‌شود.

افزایش بهره‌برداری از واحد با نام تکنولوژی HIsmelt در کووینانا استرالیا توسط نیل گودمن ارائه شد. اساس این فرآیند، یک پاتیل احیای ذوب عمودی به همراه یک بوته با آستر دیرگداز و همچنین پانل‌های خنک‌کننده آبی در پیرامون آن است. سنگ‌آهن نرم و پودر زغال‌سنگ به داخلی مجاری جانبی شارژ می‌شوند و مشعل دمشی گرم با اکسیژن کافی حرارت لازم را ایجاد می‌کند. فلز به صورت مداوم به داخل سیفون کوره اولیه تخلیه می‌شود. تمامی تجهیزات فرعی مثل کوره دمش حرارت همانند کوره بلندهای سنتی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

مصرف زغال‌سنگ یک واحد صنعتی با این روش بالغ بر ۷۰۰ کیلوگرم به ازای تولید هر تن چدن مذاب است (البته برای فرآیند خشک و در فرآیند تر به ۷۵۰ کیلوگرم به ازای تولید هر تن چدن مذاب می‌رسد). میزان کربن در چدن مذاب این کوره مشابه با کوره بلندی با آهن ۴ درصد است اما بنابر گزارشات میزان عناصر فسفر و سیلیسم در سرباره بسیار کمتر است. جداسازی مناسب سرباره و مذاب از نکات حیاتی این روش بوده و برای رسیدن به این هدف کار با بهینه‌سازی شکل لوله‌ها انجام می‌شود به طوری دو مجرای دمنده برای دمش هوا و نیتروژن به بهترین شکل تعبیه شده‌اند.

در حال حاضر انتشار گاز CO_2 در این کوره مشابه با کوره‌بلندهای سنتی، یعنی 1.7 تا 1.9 تن CO_2 به ازای هر تن چدن مذاب است اما یک پروژه دیگر نیز وجود دارد که با استفاده از روش بستر سیال کریکوفر[1] موجب احیای اولیه سنگ‌آهن به FeO می‌شود که این امر موجب کاهش انتشار گاز از 0.9 تا 1.1 تن CO_2 به ازای تولید هر تن چدن مذاب می‌شود و این امکان را فراهم می‌سازد تا از زغال‌سنگ‌هایی با کیفیت پایین استفاده کرد.

علاوه بر آن، در اتحادیه اروپا از پروژه فولادسازی با CO_2 فوق‌العاده پایین حمایت شده و کنورتور سیکلونی نیز در جهت احیای اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد و جذب‌کننده CO_2 موجب کاهش ۹۰ درصدی انتشار آن خواهد شد. یک واحد آزمایشی در رابطه با این روش نیز در کشور هلند راه‌اندازی خواهد شد.

روش‌های جایگزین کورکس عبارتند از:

- کورکس آهن احیای کمکی: که در آن از گاز خروجی برای زدایش گرد و غبار استفاده می‌شود و بعد از حذف CO_2 برای احیای بیشتر سنگ‌آهن در یک کوره استوانه‌ای جداگانه آهن اسفنجی و گدازنده تولید خواهد شد و همچنین منتج به مصرف زغال‌سنگ و O_2 کمتری نیز می‌شود.

[1] . Circofer

- فاینمت[1] : یکی دیگر از روش‌های زیربنایی در این زمینه توسط پوسکوی کره‌جنوبی ابداع شده است که جایگزین محفظه‌های احیای قائم کورکس شده، دارای یک آبشیب[2] متشکل از ۳ یا ۴ رآکتور بستر سیال است که قادرند پودر سنگ‌آهن را برای فرآیند می‌شود. در این روش گاز CO_2 از گاز خروجی بدون گرد و غبار جدا شده که در نهایت در محفظه احیای کورکس بازیافت می‌شود و بدین معنی است که گاز کمتری در محفظه گازی تغییر دهند. این روش با نام فاینمت شناخته می‌شود و یک واحد تجاری با ظرفیت ۱/۵ میلیون تن در سال در آوریل سال ۲۰۰۷ به بهره‌برداری رسید.

- کوره استوانه‌ای قائم : شرکت پوسکو در سال ۲۰۰۳ میلادی واحد کورکس را با جایگزین کردن یک کوره استوانه‌ای قائم ارتقا دادند که در آن احیا به وسیله یک آبشیب متشکل از ۴ بستر سیال صورت می‌پذیرفت که این امکان را میسر ساخت تا به جای استفاده از گندله یا مصرف سنگ‌آهن دانه درشت به طور مستقیم از سنگ‌آهن نرمه استفاده کند. نکات کلیدی در بهره‌برداری این روش عبارتند از: حذف گاز CO_2 از گازهای خروجی به جهت امکان‌پذیر کردن بازیافت گازهای فعال در داخل بسترهای سیال، ذرات ریز و آهن اسفنجی گرم برای تولید چدن فشرده مذاب قبل از تغذیه آن به محفظه گازی مخزن گدازش و در آخر تراکم ذرات زغال‌سنگ نرمه به صورت بریکت برای تغذیه به محفظه گازی مذاب هستند. بخشی از گاز خروجی باقی‌مانده به منظور تولید الکتریسیته برای واحد تولید اکسیژن مورد استفاده قرار می‌گیرد که اکسیژن مورد نیاز برای محفظه گازی و مذاب را تامین می‌کند. ترکیب چدن مذاب تولید شده مشابه با چدن کوره بلندهای سنتی (به عنوان مثال ۴/۵ درصد کربن و ۰/۰۳ درصد سیلیسیم) است، هرچند مقدار سیلسیم تا حدی بالاتر است (۰/۸ در مقابل ۰/۵ برای کوره بلندهای سنتی) انتشار غبارهای حاوی SO_x و NO_x و گاز CO_2 نیز به‌طور کلی در مقایسه با کوره بلندهای سنتی کاهش یافته است.

-IT mark 3 : تکنولوژی نوین دیگر فرآیند IT mark 3 است. دمای بهره‌برداری در این فرآیند بوته‌ای گردان برای ذوب لحظه‌ای آهن اسفنجی تولید شده کافی است از این رو امکان جداسازی ناخالصی‌ها از فلز به صورت سرباره را فراهم می‌سازد. این امر همچنین امکان استفاده از سنگ‌آهن نرمه با عیار پایین‌تر را در مقایسه با دیگر فرآیندهای احیای مستقیم که در آنها باید از سنگ‌آهن با عیار بالا استفاده کرد، فراهم می‌آورد چون ناخالصی‌ها نمی‌توانند جدا شوند، به همان صورت به کوره ذوب (به عنوان مثال کوره قوس الکتریک) شارژ می‌شوند که منتج به افزایش مصرف انرژی می‌شود. از خنک کردن و مخلوط کردن یکباره نیز برای شکستن سرباره از چدن استفاده می‌شود که به صورت تکه‌های فلزی با قطر ۲ تا ۲۵ میلیمتر متشکل از چدن با چگالی بالا به وسیله جداکننده‌های مغناطیسی بازیافت می‌شوند.

سنگ‌آهن و زغال‌سنگ نرم به صورت گندله آگلومره می‌شوند و به صورت تک لایه به بوته گردان پیوسته تغذیه می‌شوند. احیای کامل و ذوب در ۸ تا ۱۰ دقیقه صورت می‌پذیرد. نکته کلیدی برای این فرآیند تولید یک گندله

[1] . Finmet
[2] . Cascade

مناسب برای عملیات احیا است.

میزان ترکیب سنگ‌آهن به زغال‌سنگ در این فرآیند ۱/۵ به ۰/۵ است. آنالیز معمولی فلز تولید شده به این روش نشان می‌دهد که دارای ۲/۵ تا ۳ درصد کربن، ۰/۰۵ تا ۰/۰۷ درصد سیلیسم و ۹۶ تا ۹۷ درصد آهن است.

یک واحد آزمایشی با ظرفیت سالانه ۲۵ کیلو تن در سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ در کشور ژاپن بهره‌برداری شده است و نخستین واحد تجاری تولیدی به این روش در اواخر سال ۲۰۰۹ در ایالت مینیسوتا آمریکا به عنوان یک مینی‌میل به بهره‌برداری رسید. این واحد دارای یک بوته با قطر خارجی ۶۰ متر با یک سکو با پهنای ۸ متر است و ظرفیت آن ۰/۹ میلیون تن در سال است.

سنگ‌آهن نرمه یا برگشتی کارخانه‌های فولادسازی با زغال‌سنگ و گندله (یا بریکت به صورت برگشتی) مخلوط می‌شوند و به صورت تک لایه به داخل کوره بوته‌ای گردان شارژ می‌شوند.

آهن اسفنجی خروجی از قسمت دورتر کوره بوته‌ای گردان به صورت مستقیم به کوره ذوب شارژ می‌شود که از این کوره نیز فلز در دمایی در حدود ۱۵۵۰ درجه سانتیگراد تخلیه می‌شود و معمولا دارای یک آنالیز ترکیبی ۳ تا ۴/۵ درصد کربن، ۰/۳ تا ۰/۵ درصد سیلیسیم، ۰/۲ تا یک درصد منگنز و کمتر از ۰/۰۵ درصد گوگرد و فسفر است.

- Fastmet :چناچه در فرآیند IT mark 3 آهن اسفنجی به صورت گرم به کوره ذوب انتقال پیدا نکند این فرآیند با نام Fastmet شناخته می‌شود و مورد استفاد برای برگشتی‌های واحد آماده‌سازی[1] در دو کارخانه در ژاپن، به نام نیپون استیل و کوبه استیل قرار می‌گیرد.

ادعا می‌شود که میزان انتشار گاز CO_2 در فرآیند Fastmet در حدود 668.1 تن گاز به ازای تولید هر تن چدن مذاب بوده که در مقایسه با 1.766 تن برای فرآیند ITMk3 و 2.194 تن CO_2 به ازای تولید هر تن چدن مذاب در کوره بلندهای کوچک کمتر است.

۳-۸-۲. فرآیند احیا مستقیم

فرآیند احیا مستقیم براساس سوخت مصرفی به صورت زیر تقسیم بندی می‌شوند:

- فرآیندهای احیای مستقیم بر پایه زغال‌سنگ: زغال‌سنگ و سنگ معدن نرم در داخل یک کوره دوار مورب ریخته می‌شوند یا به جای آن از یک بستر گردان استفاده می‌کنند که در آن یک لایه از مواد اولیه (معمولا ذرات ریز سنگ‌آهن مخلوط شده با ذرات ریز زغال‌سنگ به صورت آگلومره) در داخل یک بستر افقی با پهنای چند متری تخلیه می‌شوند و پیرامون بوته مدور شکل می‌گیرند.
- فرآیندهای احیای مستقیم بر پایه گازی: در این روش از یک رآکتور عمودی که با کلوخه سنگ‌آهن یا آگلومره شارژ شده، استفاده می‌شود و از وسط آن گاز طبیعی محتوی هیدروژن و مونواکسید کربن عبور داده می‌شود.

[1] . Treat Plant Reverts

- اخیرا از انواع مختلفی از گازهای جایگزین از قبیل گاز کورکس[1] و گاز تولید شده ناشی از تبخیر زغال‌سنگ، به کارگرفته می‌شود که یک مزیت مشخص برای کشورهایی است که دارای منابع محدود گاز طبیعی بوده اما از ذخایر مناسب زغال‌سنگ بهره می‌برند.

چندین روش تجاری در ۵۰ سال اخیر برای روش احیای مستقیم استفاده می‌شود. سه روش از مهمترین آنها شامل میدرکس[2]، هیل[3](I, II و III) و فیور[4] می‌باشد. پنج تکنولوژی جدید کاربردی در سالهای اخیر شامل: FASTMET, IRON CARBIDE, CIRCORED, INMETCO , وFINMET می‌باشد.

در جدول۳-۳ مشخصات مربوط به این پنج روش تجاری به طور خلاصه با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول۳-۳. مقایسه مشخصات پنج روش تجاری اخیر با روش احیا مستقیم

Process	MIDREX	HyL III	IRON CARBIDE	FASTMET/ INMETCO	FINMET	CIRCORED
Status	Industrial	Industrial	Industrial	Industrial	Industrial*1	Industrial*1
Type of reactor	Shaft	Shaft	Fluid bed	Rotary hearth	Fluid bed	Fluid bed
Iron source	Pellet/ Lump ore	Pellet/ Lump ore	Fines: 0.1-1 mm	Fines/ Concentrates	Fines 0.1-12 mm	Fines 0.1-1.0 mm
Type of fuel	Natural gas	Natural gas	Natural gas	Coal/Natural gas	Natural gas	Natural gas
Utilities	-	Steam	Steam	-	Steam	Steam
Peripheral facilities	Reformer	Reformer CO_2-removal	Reformer	-	Reformer CO_2-Removal	Reformer CO_2-Removal
Typical plant capacity (kt/a)	1000	1000	320	450	500	500
Energy Input (GJ/t product)	10.5	11.3	12.6	12.6	12.5	14
Product	DRI/HBI	DRI	Fe_3C-powder	DRI/HBI	HBI	HBI
Product metallisation (%)	>92	>92	Fe_3C >90%	>92	>92	>92
Product C-content (%)	1-2	1-2	<6.0	<0.2	0.5-1.5	0

*1 under construction (Status: end of 1998)

1 . Corex
2 . Midrex
3 . Hyl
4 . Fior

فصل چهارم
تکنولوژی‌های ذوب نوین

چندین تکنولوژی جدید برای ذوب در ریخته گری در دست تحقیق بوده که با توجه به اهمیت روزافزون انرژی و کمبود ذخایر انرژی فسیلی، این تکنولوژی ها بسیار مورد توجه هستند. هر یک از این تکنولوژی ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. در ادامه به توضیح این تکنولوژی ها و بررسی مزایا و معایب آن ها پرداخته شده است [۱،۱۹].

ذوب با اشعه الکترونی[1] (EBM)

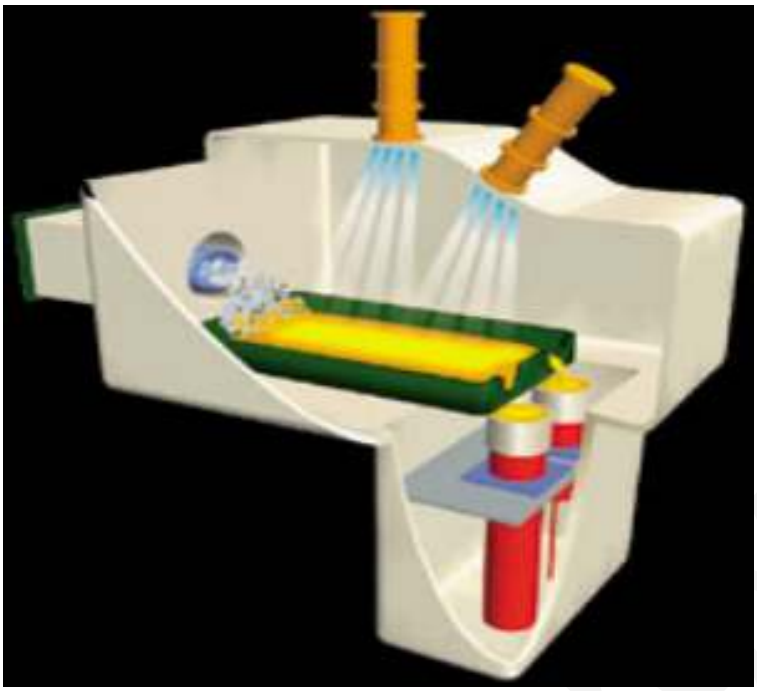
این کوره‌ها از دستگاهی به نام تفنگ الکترونی[2] (که اشعه‌های الکترونی ساطع می‌کند) برای ذوب استفاده می‌کنند. در این فرآیند قطعات فلز متراکم توسط اشعه‌های پرتوان الکترونی، به صورت لایه به لایه از پودر فلز ساخته می‌شود. بدین ترتیب که هر لایه به صورت جداگانه و دقیقاً به شکل هندسه مورد نظر ذوب می‌شود. تکنولوژی ذوب با اشعه‌های الکترونی با به کاربردن انرژی بالا، ظرفیت بالایی در ذوب و تولید محصولات ایجاد می‌کند.

قطعه فلزی تحت دمای بسیار بالا و در خلأ ساخته می‌شود که در نتیجه آن تنش هایی که معمولاً در هنگام ساخت قطعات ایجاد می‌شود، در قطعات ساخته شده بدین روش ایجاد نخواهد شد. قطعات ساخته شده بدین روش نسبت به سایر قطعات ریخته گری از ویژگی‌های بهتری برخوردار بوده و مشابه قطعات شکل پذیر، قابلیت چکش‌خواری دارند.

این روش در سال ۱۹۰۷ برای ذوب فلزات با دمای ذوب بالا مانند تنگستن و تانتالیوم[3] معرفی شد. این تکنولوژی تنها تکنولوژی است که امکان مانیتور کردن کیفیت مذاب را در طی عملیات دارد، که این قابلیت منجر به افزایش کیفیت محصول و کاهش ضایعات می‌شود. امروزه این کوره در مقیاس آزمایشگاهی استفاده می‌شود و امکان‌سنجی استفاده از آن در مقیاس صنعتی در دست تحقیق می‌باشد. یکی از معایب این روش، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالای آن می‌باشد. به علاوه قرار گیری مواد اولیه در این روش باید بسیار دقیق باشد.

شمایی از ذوب با اشعه الکترونی در شکل۴-۱ آورده شده است.

[1] Electron beam melting (EBM)
[2] Electron gun
3 tungsten and tantalum



شمایی از فرآیند ذوب با اشعه الکترونی [۱]

هیترهای شناور[1]

در حال حاضر هیترهای شناور را می‌توان برای ذوب روی به کار گرفت، اما این هیترها هنوز قابلیت ذوب فلزات با دمای ذوب بالاتر از روی را دارا نیستند. پوشش سرامیکی محافظ این هیترها باعث کاهش راندمان ذوب می‌شود. تحقیقات زیادی برای استفاده از این هیترها در صنایع ریخته گری در حال انجام است. برای این کارسعی شده که فلاکس حرارتی این هیترها را افزایش دهند تا قابلیت ذوب فلزات با دمای ذوب بالا را نیز دارا شوند.

گرمایش مادون قرمز[2] (IR)

گرمایش مادون قرمز، یک روش سریع برای گرمایش بیلت هاست. در این تکنولوژی از لامپ‌های هالوژن تنگستن استفاده می‌شود که می‌توانند در دمای معمولی روشن شده و در عرض کمتر از یک ثانیه به ماکزیمم توان خود برسند. این گرمکن ها می‌توانند فلاکس حرارتی به بزرگی ۲۰ تا ۴۰ W/cm^2 را برآورده کنند. لامپ‌های مادون قرمز می‌توانند در کمتر از یک ثانیه خاموش شده و همچنین می‌توانند انرژی الکتریکی را با راندمان بزرگتر از ۹۰٪ به انرژی تابشی تبدیل کنند. این روش منجر به صرفه جویی قابل ملاحظه ای در زمان و هزینه انرژی مصرفی می‌شود. همچنین مقدار ضایعات در این روش به علت توزیع دمای یکنواخت توسط گرمایش مادون قرمز، کاهش می‌یابد.

[1] Immersion heater
[2] Infrared heating

شمایی از ذوب با تابش مادون قرمز در شکل۴-۲ آورده شده است.

شمایی از فرآیند ذوب با استفاده از تابش مادون قرمز [۱]

ذوب توسط امواج ماکروویو[1]

این فرآیند ابتدا برای ذوب اورانیوم معرفی شد، اما امروزه برای فلزات زیادی استفاده می‌شود. نفوذ امواج ماکروویو به داخل فلز ذوب شونده بسیار زیاد است، در حالی که در روش‌های قبلی گرما ابتدا به سطح خارجی و سپس به سطح داخلی فلز منتقل می‌شود. بنابراین سرعت انتقال حرارت در این روش بسیار بیشتر از روش‌های سنتی است که این مسئله باعث صرفه جویی در زمان و انرژی مصرفی می‌شود.

اگرچه تصور می‌شود که فلز امواج ماکروویو را بازتاب دهد، اما در واقع فلزات در دمایی برابر با سه چهارم دمای ذوب خود شروع به جذب امواج ماکروویو می‌نماید.

در این روش، شارژ فلزی ابتدا وارد یک بوته سرامیکی درباز می‌شود. این بوته در یک محفظه عایق قرار دارد که کاملاً آن را می‌پوشاند. دیواره‌های گرم شده این بوته، محتوای فلز بوته را با استفاده از انتقال حرارت تشعشعی، هدایتی و جابجایی گرم می‌کنند. محفظه عایق اطراف این بوته باعث افزایش راندمان انرژی سیستم ماکروویو می‌شود. این روش می‌تواند هزینه‌های ذوب را تا ۳۰٪ کاهش دهد.

از معایب این روش، این است که فلزات در دماهای معمولی امواج ماکروویو را جذب نمی کنند. به علاوه برای ذوب توسط امواج ماکروویو نیاز به تابش امواج با طول موج حدود ۲/۳۵ میکرون می‌باشد که بسیار گران است.

[1] Microwave Melting

گرمایش پلاسما[1]

پلاسما به مجموع گازهای ذرات شارژ شده الکتریکی، مانند الکترون ها و پروتون ها گفته می‌شود. این ذرات حاوی انرژی بالایی هستند. وقتی جریان یونیزه شده پلاسما با سطح فلز تماس پیدا کند، انرژی آزاد می‌کند و فلز ذوب می‌شود.

ثابت شده است که فرآیند ذوب پلاسما از لحاظ انرژی مؤثرتر از روش‌های قدیمی بوده و می‌تواند درجه حرارت را بسیار سریع تر بالا ببرد. با توجه به این انتقال حرارت سریع، فرآیند ذوب نیز بسیار سریع خواهد بود.

عملیات ذوب در کوره‌های پلاسمای ذوب آلومینیوم، تقریباً ۶۰٪ سریعتر از سرعت ذوب در ذوب کننده‌های متداول می‌باشد.

شمایی از گرمایش پلاسما در شکل۴-۳ آورده شده است.

شمایی از فرآیند گرمایش با استفاده از پلاسما

کوره‌های خورشیدی[2]

اولین کوره خورشیدی در قرن هجدهم در فرانسه ساخته شد. متداولترین سیستم یک کوره خورشیدی متشکل

[1] Plasma heating
[2] Solar furnace

از دو آینه تخت و کروی می‌باشد. نور خورشید به آینه تخت رسیده و توسط این آینه به آینه کروی بازتابیده می‌شود. در واقع انرژی خورشید از طریق این آینه ها به یک گیرنده[1] می‌رسد. این گیرنده انرژی خورشیدی را ذخیره کرده و به تجهیز مورد نظر انتقال می‌دهد. طبق قوانین اپتیک هر گاه یک دسته پرتوی موازی محور آینه با آن برخورد نماید، در محل کانون متمرکز می‌شوند و به این ترتیب انرژی حرارتی گسترده خورشید در یک نقطه جمع می‌شود که این نقطه به دماهای بالایی می‌رسد. این تکنولوژی می‌تواند گرمایی به بزرگی ۱۰۰۰ kWh را تأمین کند. امروزه پروژه‌های متعددی در زمینه کوره‌های خورشیدی در سراسر جهان در حال طراحی و اجراء می‌باشد.

یکی از جنبه‌های مهم سیستم‌های خورشیدی این است که کاملاً اتوماتیک بوده و نیاز به اپراتور ندارند. اگرچه کوره‌های خورشیدی برای ذوب فلزات در زمینه راندمان انرژی بسیار ایده آل هستند، اما بسیار پر هزینه بوده و همچنین فقط در روزهای آفتابی قادر به کار هستند. همچنین کوره‌های خورشیدی نیاز به زمینی با مساحت بالا دارند.

[1] Receiver

مراجع

[1] BCS Incorporated, "Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry", Prepared for ITP Metal Casting, November 2005.

[2] EIPPCB ,"Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry", May 2005.

[3] BCS Incorporated, "Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry", Prepared for ITP Metal Casting, November 2005.

[4] The Energy conservation Center Japan, "Seminar On Energy Conservation In Iron Casting Industry", 1998.

م. هجری ، م.پرنیانی ، ح. مختاری، تاثیر جبران ساز ایستای توان راکتیو (SVC) در مشخصه‌های کاری کوره‌های قوس الکتریکی".

[6] New alternative ironmaking technology

[7] Rheo-processing of an Alloy Specifically Designed for Semi-Solid Metal Processing Based on The Al–Mg–Si System, Materials Science and Engineering A476 (2008) 341–349

[8] G.J.Davies, Solification & Casting

. مرضیه مرادی، بشیر حیدریان، صالح آشوری، محمود نیلی احمدآبادی- بررسی ریزساختارنیمه جامد آلیاژ- اولین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی ایران و انجمن علمی ریخته گران ایران - ۱۳۸۷

. مرتضی مرادیان، غلامحسین اکبری- بررسی تاثیر پارامترهای ریخته گری بر ریزساختار شمش AL-A356 تولید شده در حالت نیمه جامد با استفاده از سطح شیبدار- دومین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی ایران و انجمن علمی ریخته گران ایران - ۱۳۸۸

[11] Z.Fan,`Semisolid Metal Processing`,International Materials Reviews, 47,2,2002, 1-37.

[12] H.V. Atkinson, Modelling the semisolid processing of metallic alloys, Progress inMaterials Science 50 (2005) 341–412

[13] K. Sukumaran, B.C. Pai, M. Chakraborty, The effect of isothermal mechanical stirring on an Al–Si alloy in the semisolid condition", Materials Science and Engineering A369(2004) 275–283

[14] Coal and Industrial Furnaces – Department of Coal Publications, Government of India

گزارش امکان سنجی مقدماتی طرح ریخته گری قطعات چدنی و فولادی، وزارت صنایع و معادن، شهریور ۱۳۸۶

[16] E. Orgis, 2002, Development of Al-Si-Mg Alloys for Semi-Solid Processing and Silicon Spheroidization Treatment (SST) for Al-Si Cast Alloys" Ph. D. Thesis

[17] Office of Industries U.S. International Trade Commission

[18] Prospects for Caol-based Direct Reduction Process, Haruyasu Michishita, Hidetoshi Tanaka, Kobelco Technology Review; NO. 29 DEC 2010.

[19] William A. Butler, "Melting and holding furnaces for die casting", 2006.