زمینه‌های نو برای تحقیق در فولاد

دکتر خطیب الاسلام صدرنژاد

دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

موضوعات جدید برای تحقیق در فولاد فراوان است. در این مقاله ضمن ارائه مروری اجمالی بر اوضاع صنعت فولاد در جهان بخصوص در سالهای اخیر، ضرورت آغاز فعالیتهای تحقیقاتی در مورد موضوعات نو مورد بررسی و دقت نظر قرارگرفته است. گسترش فعالیتهای تحقیقاتی مشترک صنعتی ـ دانشگاهی و صنعتی ـ صنعتی، به عنوان راه اساسی برای توسعه و تکامل صنعت فولاد، موردتشویق و توصیه واقع شده است. به علاوه تعداد قابل ملاحظه‌ای از عناوین مهم تحقیقاتی در ارتباط با فولاد در چهار زمینه عمده: الف ـ ذوب و تصفیه، ب ـ ریختن و نورد، ج ـ تعیین آنالیز و دما، د ـ مدیریت صنعتی و کنترل فرایند بطور تطبیقی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

نقش تحقیق و توسعه R & D در رشد صنعت فولاد

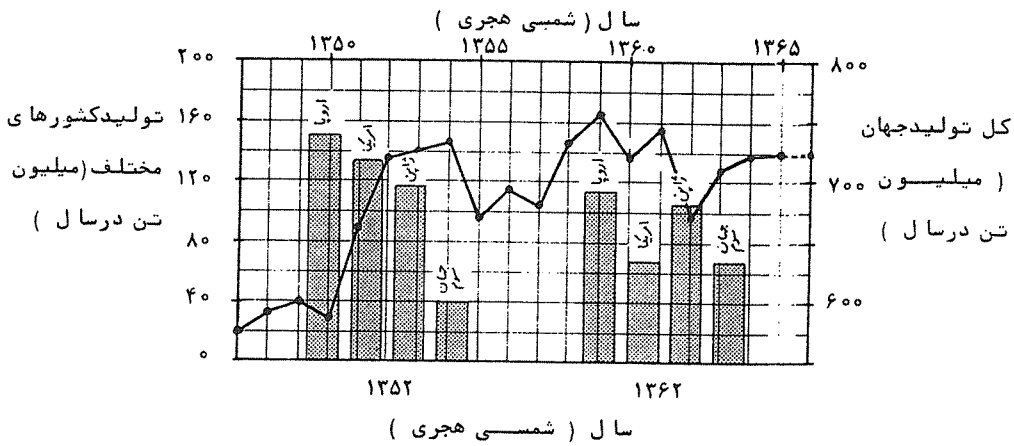
امروز مصرف فولاد دنیا، به بیش از ۴ برابر سالهای پس از جنگ جهانی دوم افزایش یافته است. در عین حال، ۱۰ سال است که مقدار تولید امریکا، ژاپن و بازار مشترک سیر نزولی و در عوض میزان تولید کشورهای جهان‌سوم سیرصعودی می‌پیماید (شکل ۱).[۱-۴] گرچه برای توجیه این تغییرات علل گوناگونی ذکر شده است[۴و۵] اما برای یافتن دلائل اصلی لازم است به سیاست تولید کنندگان غربی دائر بر جایگزینی "تناژسودده" به جای "تناژ بالا" توجه کرد.[۶] از طرف دیگر افزایش نسبت قیمت فولاد تولید شده در امریکا به فولاد بازارمشترک که در سالهای اخیر به رقم ۲/۵ برابر نزدیک شده است[۶]، بحث‌های مفصلی را در زمینه ضرورت سازماندهی مجدد در صنایع تولید فولاد موجب گردیده است.[۶-۹] بیشتر این بحث‌ها در خصوص ضرورت مدرنیزه کردن صنایع قدیمی تولید فولاد و یا جایگزین کردن روشهای موجود با شیوه‌های ابتکاری و نو دور می‌زند.[۵] به ویژه آن که صنعت امروز فولاد در دنیا، صنعتی قرن نوزدهمی است که به منظور به گردش در آوردن چرخهای آن تنها از برخی وسائل مدرن مدد گرفته شده است. برای مثال عمل ککپزی، فرآیند کوره بلند، تکنیک فولادسازی، عملیات ریختن و شکل‌دادن و حتی فرآیندهای احیاء و ذوب، همگی از ایده‌های بسیار قدیمی نشأت گرفته‌اند. این در حالی است که ما شاهد دگرگونیهای عظیمی در چهره ظاهری دنیا طی یکی دو دهه اخیر می‌باشیم. مثلا "کمیاب شدن برخی از انواع سوخت، افزایش قیمت انرژی، تغییر الگوی مصرف بخصوص در صنایع حمل و نقل، ورود مواد رقیب مانند پلی‌مرها و کامپوزیتها به بازار و تشدید ضوابط و مقررات مربوط به حفظ محیط زیست، همگی از موارد جدید اعمال فشار بر صنایع تولید فولاد به حساب می‌آیند.

در چنین شرایطی، لازم است برنامه‌ای وسیع و همه جانبه تحقیقاتی به منظور یافتن روشهای نوین تولید و شکل دادن فولاد منطبق با شرایط و نیازهای فعلی جهان، به مورد اجرا گذاشته شود.

همچنین ضروری است ایده‌های جدید در خصوص سازماندهی و مدیریت واحدهای تولید فولاد به دقت مورد مطالعه و امعان‌نظر قرار گیرند. برای مثال، ایدهٔ احداث واحدهای کوچک Mini - mill با ظرفیت‌های کمتر از حدود ۵۰۰٫۰۰۰ تن فولاد در سال به جای مجتمع‌های بزرگ Integrated mill با ظرفیت‌های بیشتر از حدود ۵۰۰٫۰۰۰ تن فولاد در سال توانسته است توجه زیادی را، در سالهای اخیر، به خود جلب کند.[۴] به طوری که برخی‌حتی از آنهم فراتر رفته و واحدهای ماوراء کوچک Micro - mill یا Nano - mill باظرفیت حدود ۸۰۰۰ تا ۱۰٫۰۰۰ تن درسال را توصیه کرده‌اند.[۱۰] چرا که خصوصیات نامطلوب مجتمع‌های بزرگ تولیدفولاد، از قبیل مواردی چون وجود فاصله زیاد بین کارکنان و مصرف کنندگان، عدم امکان هماهنگی با نوسانات بازار مصرف، کمبود ابتکار و نوآوری، وجودتجهیزات و ظرفیت‌های بی‌بازده و ازدست دادن مداوم‌نیروهای کیفی تخصصی، امکان‌رقابت را از این‌گونه واحدها عملا" سلب کرده است. در حالی که مدیریت‌های‌کوچک درعمل موفق‌تربوده و از محدودیت‌های کمتری معمولا" زیان دیده‌اند.[۶]

علاوه بر تلاش‌های زیادی که در حال حاضر برای دستیابی به تکنولوژی‌های نو و ابتکاری دارای بازدهی بیشتر و مصرف انرژی کمتر در جریان است، به دلیل وجود مشکلات و نابسامانی‌های مزمن فنی‌و اقتصادی در بسیاری از مجتمع‌های بزرگ تولید فولاد، بررسی‌های همه جانبه‌ای در خصوص تجدید سازماندهی این صنایع در دست اقدام می‌باشد. اهداف اساسی این بررسی‌ها، اعمال روشهای ابتکاری و نوین به منظور کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بازدهی و کیفیت محصول می‌باشد. به عنوان مثال، یک نمونه از نحوه اثر اعمال تکنولوژی‌مدرن بر هزینه‌های تولید مقاطع فولادی نیمه ساخته در جدول ۱ نمایش داده شده است.[۵] اطلاعات جدول نشان‌می‌دهد که بیشترین کاهش درهزینه‌ها مربوط به مصرف انرژی و نیروی کار به خصوص در مرحله ریختن شمش تا نورد پایانی مقاطع می‌باشد.

سرعت برق‌آسای تغییر تکنولوژی، امروز توانسته است تقریبا" تمام دست‌اندرکاران صنعت فولاد را غافلگیر کند. رشد تحقیقات علمی و صنعتی به منظور یافتن شیوه‌های‌نو و ابتکاری‌بدون شک کلید حل مشکلات اقتصادی‌آینده است.[۱۱] اما دراین‌خصوص لازم است به " تحقیقات مفید " بیش از " تحقیقات‌گران " بها داده‌شود. لذا چندی است که بر ضرورت انجام طرحهای مشترک تحقیقاتی به ویژه بین صنعت و دانشگاه‌سخن گفته می‌شود.[۱۲] در امریکا، برای مثال با خاتمه فعالیت لابراتوارهای تحقیق در فلزات متعلق به صنایعی از قبیل Union Carbide, U.S. Steel، Inco, Ford-Motor, Zenith, Kennecott, RCA تاسیس آزمایشگاههای تحقیقاتی جدید در نزدیکی دانشگاهها برای‌استفاده از نیروی فکری دانشگاهیان و طرح پروژه‌های مشترک صنعتی ـ دانشگاهی و گرفتن خدمات مشاوره‌ای از دانشگاهیان در حال گسترش است.[۱۲]



شکل ۱ ـ روند تولید فولاد در جهان.[۴] ـ ۱

جدول ۱ ــ مقایسه هزینه‌های مربوط به تولید فولاد از آماده‌سازی باطه تولید مقاطع نیمه ساخته[۵]

تکنولوژی	نوع هزینه	درصد هزینه ها		قیمت کل (دلار برتن)
		از ابتدا تا تولید فولاد	از ریخته‌گری تا پایان نورد	جمع
قدیمی	سرمایه گذاری	۵	۵	۱۰
	نیروی کار	۸	۲۳	۳۱
	انرژی	۵	۳	۸
	زغال سنگ	۱۴	—	۱۴
	جمع	۳۲	۳۱	۶۳×
جدید	سرمایه گذاری	۱۳	۱۲	۲۵
	نیروی کار	۵	۱۵	۲۰
	انرژی	۴	۲	۶
	زغال سنگ	۱۱	—	۱۱
	جمع	۳۳	۲۹	۶۲×

* مربوط به سال ۱۳۵۷.

× مابقی تا صددرصد مربوط به هزینه موادخام است.

راستای انجام فعالیتهای تحقیقاتی در حال‌حاضر در سه جهت قراردارد:

۱. افزایش بازدهی صنایع موجود با اعمال مدیریت‌های قوی‌تر.

۲. بهبود تکنولوژی موجود با کمک روشهای ابتکاری و زمینه‌های پیشرفته در سایر رشته‌ها.

۳. جایگزین کردن صنعت موجود بوسیله تکنولوژی‌های ابتکاری و مدرن.

اهداف عمده این فعالیتها به قرار زیر است:

۱. کاهش هزینه‌ها به‌خصوص هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری، انرژی، مواد اولیه و نیروی کار.

۲. افزایش کیفیت فولاد، بخصوص فولادهای مخصوص و تخت.

۳. پاسخگویی به نیازهای بازار مصرف مانند فولادهای استحکام بالا و میکروآلیاژی،

۴. حذف مشکلات جانبی صنعت فولاد مانند آلوده ساختن محیط زیست و مصرف برق.

سرعت انجام تحقیقات علمی و صنعتی R & D در زمینه فولاد آن چنان زیاد است که در خلال ۱۰ سال گذشته، توانسته است بیش از ۱۰۰ تغییر عمده در صنعت فولاد را پدید آورد. معهذا در مقایسه با بسیاری ازصنایع، باید اذعان داشت که صنعت تولید فولاد یکی از با ثبات‌ترین صنایع قرن حاضر به حساب می‌آید.[5] در عین حال با توجه به روند انجام تحقیقات در سالهای اخیر، به نظر می‌رسد تغییرات عمده‌ای در جهت تبدیل روشهای منقطع به فرآیندهای پیوسته در سالهای آتی در این صنعت اتفاق بیفتد. از این رو شاید بتوان قرن آینده را قرن "پیوستگی" فرآیندهای فولادی نامید. در اینجا ضمن ذکر برخی از زمینه‌های تحقیق در فولاد، به تاکید برموضوعاتی که در سالها و دهه‌های آتی بیشتر مورد توجه قرار خواهند گرفت، می‌پردازیم:

ذوب و تصفیه

۱ ـ گازی کردن زغال سنگ Coal Gasification

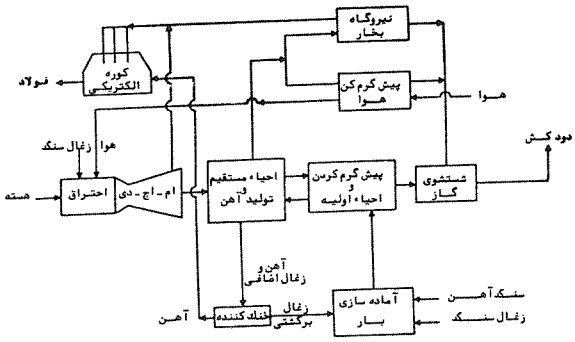
هدف این تحقیق، تولید گاز به منظور استفاده در واحدهای احیاء مستقیم است. گاز خروجی راکتور احیاء همراه با گازهای متصاعد شده از کوره بلند و کنورتر در یک نیروگاه حرارتی بازیابی شده و به کمک آن قسمتی از برق مورد نیاز کارخانه تامین می‌شود. در انجام این طرح از اصل استفاده مشترک ازانرژی‌های مصرفی و تولیدی در دو واحد همجوار تولید فولاد و تولید برق یاری گرفته می‌شود. علاوه بر زغال سنگ، از زائدات کشاورزی و زباله‌های شهری نیز می‌توان برای تولید گاز استفاده کرد. زغال حاصل می‌تواند به داخل کوره بلند تزریق شود.

هم اکنون تحقیقات وسیعی در این زمینه در اروپا و امریکا در جریان است[1,4] اما در کشور ما، به دلیل وجود منابع عظیم گاز طبیعی، ظاهرا" این موضوع در حال حاضر از اولویت چندانی برخوردار نیست. در صورتی که اگر قیمت‌های گاز و برق در سطح جهان تغییر کند، همین مسأله می‌تواند در زمره موضوعات تحقیقاتی دارای اولولیت به حساب آید. به علاوه این طرح درصورت موفقیت ممکن است قادر به حل قسمتی از مشکل کمبود کک متالورژیکی در کشورباشد. بدین ترتیب که با ایجاد امکان بازیابی حرارتی گاز خروجی کوره بلند، توجیه اقتصادی لازم برای افزایش ارزش حرارتی این گاز را در شرایط استفاده از سوخت‌های غیر مرغوب به جای کک فراهم ساخته و نتیجتا" نه تنها صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بلکه کاهش در هزینه‌های سرمایه‌گذاری را نیز به ارمغان خواهد آورد.

در شرایط کنونی که تردیدی در ضرورت احداث نیروگاههای برق در کشور ما وجود ندارد، احداث این نیروگاهها در جوار واحدهای احیاء مستقیم شاید بسیار ثمربخش باشد. چه آن که نه تنها گازهای خروجی راکتورهای احیاء مستقیم برای به کار انداختن توربین‌های گازی مناسب می‌باشند، بلکه استفاده از آنها سبب حذف ضرورت تصفیه و برگشت دادن گاز برای استفادهٔ مجدد در راکتورهای احیاء مستقیم خواهدشد. نتیجه‌منطقی این عمل صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و مصرف سوخت خواهد بود. به علاوه از فشار بی مورد واحدهای ذوب فولاد به شبکه سراسری برق کاسته خواهد شد.

۲. احیاء مستقیم توسط گاز ام ـ اچ ـ دی MHD

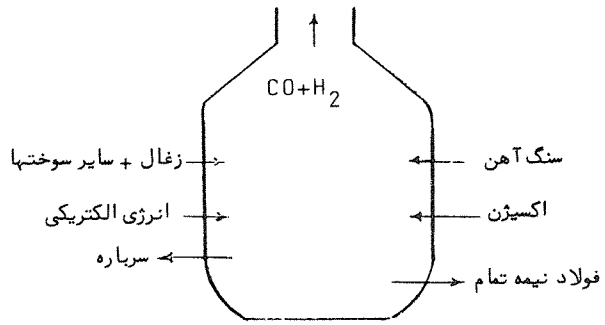
یکی از روشهای جالب در استفاده از انرژی مفید گازهای خروجی ژنراتور "هیدرو دینامیک مغناطیسی" Magneto-hydrodynamic یا MHD، هدایت این گازها به داخل رآکتورهای احیاء مستقیم برای تولید آهن اسفنجی می‌باشد (شکل ۲). از برق تولید شده در نیروگاه MHD می‌توان برای تبدیل آهن اسفنجی به فولاد در کوره‌های قوس الکتریکی استفاده نمود. بدیهی است انجام این عمل مستلزم اقتصادی شدن روش تولید برق از طریق حرکت سریع گازهای یونیزه شده بین قطبهای یک‌سری مغناطیس بوده و همجواری نیروگاه MHD و واحداحیاء مستقیم را ایجاب می‌کند.[5]



شکل ۲ ـ همجواری نیروگاه MHD و واحد تولید فولاد از طریق احیاء مستقیم براساس طرح پیشنهادی Jayaryan و Anderson از کالج ایالتی سن خوزه امریکا[5]

۳. فولادسازی مستقیم Direct Steelmaking

اثرات نامطلوب باطری‌های ککپزی ، تجهیزات زینترسازی ، کوره‌های بلند و کنورترهای اکسیژنی بر سلامت محیط‌زیست ازدیرباز مورد توجه قرار داشته است . در این راستا ابداع تکنولوژی‌های نو که بتوانند راه‌های حل دیگری برای تولید فولاد به دست دهند ، همواره مورد علاقه بوده است . روش فولادسازی مستقیم تاحدودی براین‌اساس قرار دارد . در این روش سنگ آهن ، سوخت کربنی و اکسیژن وارد کوره محتوی آهن مذاب شده و پس از ترکیب با یکدیگر به فولاد نیمه‌تمام Semi-Steel تبدیل می‌شوند . حرارت لازم برای ذوب سنگ معدن‌از طریق ترکیب شدن اکسیژن با سوخت اضافی و گاز CO تأمین می‌شود (شکل ۳) .

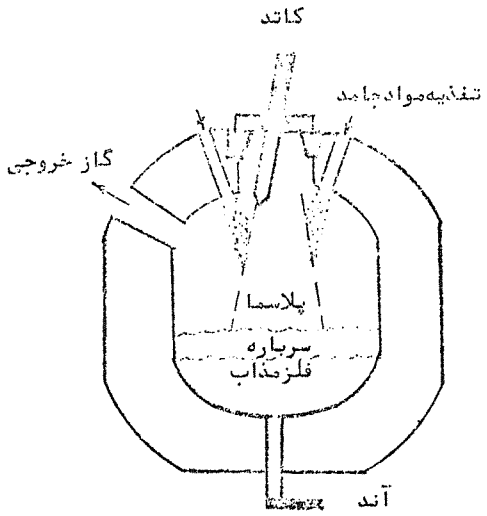


شکل ۳ ــ نمودار تصویری روش فولادسازی مستقیم

از محاسن این روش، حذف‌عملیات ککسازی، و ادغام فرآیندهای کوره بلند و کنورتر می‌باشد . بدین ترتیب ضمن تنزل آلودگی محیط، از مخارج سرمایه‌گذاری اولیه، نیروی کار و مصرف انرژی نیز کاسته خواهد شد . در عوض به دلیل توام بودن فرآیندهای احیاء ، ذوب و تصفیه ، این‌روش بامشکلات عدیده مربوط‌به پیچیده‌بودن سیستم مواجه می‌باشد . لذا این روش تاکنون نتوانسته است در مقیاس نیمه صنعتی و صنعتی‌با اقبال چندانی مواجه گردد . در اینجا لازم به ذکر است که بیشتر فرآیندهایی که در سالهای اخیر توفیق افزایش بازدهی عملیات را به دست‌آورده‌اند ، مستلزم جداسازی فرآیندها به جای ادغام آنها بوده‌اند . مثلا " در فولادسازی، انجام عملیات گوگردزدایی بین کوره بلند و کوره فولادسازی توانسته است با صرف هزینه‌های نسبتا " کم به افزایش بهره‌دهی سیستم منجر شود .

۴. فولادسازی بکمک قوس‌پلاسما Plasma Steelmaking

تحقیقات وسیعی در زمینه استفاده از پلاسما برای تولید مستقیم فولاد یا فولاد نیمه تمام Semi-Steel از سنگ آهن و نیز برای ذوب قراضه انجام گرفته است . اساس این روش بر تشکیل یک قوس پایدار بین دو الکترود با استفاده از گاز خنثی یا گازهای دیگر همچون متان یا هیدروژن‌وتزریق ذرات ریز سنگ معدن و زغال‌به داخل‌قوس استوار است . دمای فوق‌العاده زیاد پلاسما می‌تواند سبب ذوب و احیاء همزمان ذرات ریز و ایجاد فولاد مذاب نیمه تمام گردد شکل (۴). بهره‌گیری از این روش در ایجاد واحدهای کوچک تولیدفولاد Mini-mill که در نزدیکی بازارهای‌مصرف واقع شده‌اند ، امکان‌پذیر به نظر می‌رسد . این روش می‌تواند برای تولید مستقیم فولادهای آلیاژی ، ذوب ضایعات و ذوب پودر آهن اسفنجی در حداقل فضا ، بیشترین بازدهی تجهیزات و حداقل آلودگی محیط مورد استفاده واقع شود . [۲۲]



شکل ۴ ــ ذوب فولاد با قوس پلاسما

۵. کوره‌های قوسی با توان فوق بالا UHP

تکنولوژی این‌کوره‌ها امروز کاملا "تثبیت شده و در اغلب واحدهای جدید تولید فولاد به خصوص واحدهای کوچک Mini-mill ازآنها استفاده می‌شود . سقف و دیوار کوره‌ها با آب خنک‌شده و از مشعل‌های

سوخت و اکسیژن برای کمک بـه گرم‌کردن کوره استفاده می‌شود. جـا به حائی الکترودها معمولا" به طور اتوماتیک و با سرعت زیاد انجام می‌شود. معمولا" این کوره‌ها فقط برای ذوب موادجامد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالی که عمل تصفیه بعدا" در کوره‌های پاتیلی که تقریبا" همیشه همراه کوره‌های قوسی با توان فوق بالا هستند، انجام خواهد شد. از کوره‌های قوسی باتوان فوق بالا برای ذوب فولادهای کربنی، کم آلیاژ و آلیاژی می‌توان استفاده کرد.[5]

۶. تصفیه در کوره‌های پاتیلی Ladle Furnace

انجام برخی از جنبه‌های عمل تصفیه در شرایط اکسیدی کوره‌های فولادسازی اکسیژنی و قوس الکتریکی میسر نیست. برای مثال بهترین شرایط برای گوگردزدایی از فولاد وقتی حاصل می‌شود که اکسیژن موجود در فولاد به حداقل رسیده و محیط احیائی شود. از طرف دیگر انجام این عملیات بیرون کوره‌های فولادسازی، سبب صرفه‌جویی در وقت گرانبهای این کوره‌ها می‌گردد. انجام عملیات گوگردزدایی و تصفیه فولاد در پاتیل‌های حمل مذاب و کوره‌های الکتریکی پاتیلی در سالهای اخیر بسیار ثمربخش گزارش شده است.[16] به طوری که ستون فقرات فولادسازی در سالهای آتی را می‌توان متالورژی پاتیلی Ladle Metallurgy دانست.[13]

صنعت آینده دنیا، به فولادهای ماوراء تمیز Ultra-Clean Steel متکی‌است. خواص‌مکانیکی این فولادها نسبت به حضور عناصر ناخالصی بشدت حساسیت از خود نشان می‌دهند. به طوری که هیچیک از محصولات اکسیژن‌زدایی را نباید به همراه داشته باشند (جدول ۲). تولید چنین فولادهایی، ضرورت انجام عملیات تصفیه ثانویه در کوره‌های پاتیلی را به اثبات رسانده است. این کوره‌ها می‌توانند دمای فلز را توسط انرژی قوس الکتریکی افزایش داده و محیط مناسبی برای انجام عملیات بسیار ضروری زیر بوجود آورند.[16]

- افزایش عناصر آلیاژی و کنترل آنالیز نهایی
- اکسیژن زدایی و گوگردزادیی
- یکنواخت کردن دما و آنالیز مذاب
- غوطه‌ور کردن آخال‌ها و کنترل شکل سولفیدها
- گاززدایی تحت خلاء بمنظور خارج کردن هیدروژن
- فسفر زدایی

بنابراین ملاحظه می‌شود که متالورژی پاتیلی مشتمل بر " سوپر مارکتی" از اعمال گوناگون تصفیه، آلیاژسازی، گاززدایی و گرم‌کردن فلز مذاب می‌باشد که همگی در کوره‌های قوسی پاتیلی انجام می‌شوند.

فلز مذاب مورد استفاده در کوره‌های پاتیلی، از طریق کوره‌های قوس الکتریکی توان فوق‌بالا UHP و یا کنورترهای اکسیژنی عظیم‌الجثه می‌تواند تامین شود. بدین ترتیب با استفاده از کوره‌های پاتیلی، امکان ذوب بیشتر و سریعتر آهن اسفنجی و فولاد قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی و کنورترهای اکسیژنی فراهم می‌گردد. کـوره‌های پـاتیلـی همچنین امکان تحقق تکنولوژی فولادسازی مستقیم Direct Steelmaking را فراهم نموده است. بدین ترتیب که تبدیل فولاد نیمه ساخته به فولاد کامل با انجام فرآیندهای تصفیه، کربن‌زدایی تحت خلاء وگاززدایی توسط یکی از روشهای متداول مانند سیکلهای کوتاه RH در کوره‌های پاتیلی می‌تواند انجام گیرد.

۷. فرآیندهای خاص برای تصفیه فولاد:

ضرورت تصفیه فولاد از عناصر ناخالصی و آخال‌های معلق، سبب معرفی‌تعداد زیادی روشهای ویژه‌برای تصفیه فولاد شده است. تکنولوژی بسیاری از این روشها توسط فولادسازان برجسته دنیا در سالهای اخیر مورد استفاده قرارگرفته است. برخی از این روشها ذیلا" شرح داده می‌شوند:

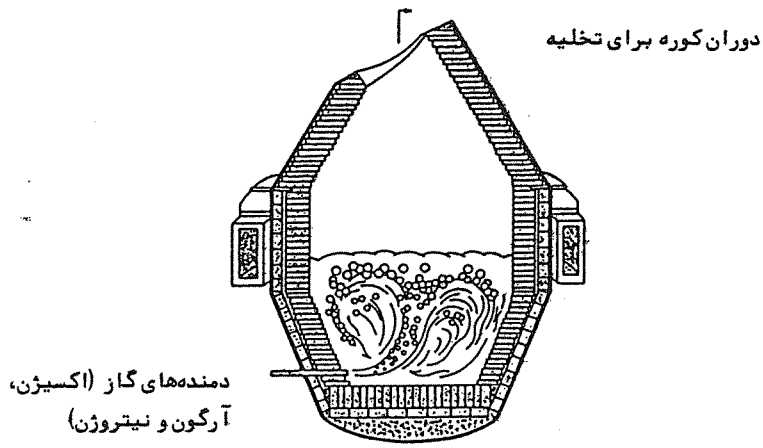
کربن‌زدایی با اکسیژن و آرگون
Argon Oxygen Decarburization (AOD)

در این روش با دمیدن مخلوط اکسیژن و آرگون به داخل کوره محتوی فولاد مذاب مطابق شکل ۵، بیشترین‌بهم خوردن فلز مذاب و سرباره حاصل می‌شود. به دلیل تماس زیاد فلز و سرباره، عمـــل گوگردزدایی نیز بخوبی انجام خواهد شد. اما آخال‌های سولفیدی معلق، پس از اتمام عملیات، باید در کوره دیگری به کمک دمش ملایم آرگون از فلز خارج شوند.[16]

جدول ۲ ــ پیش‌بینی میزان تمیزی مورد نیاز در فولاد مورد مصرف در سال ۱۳۷۵ هـ.ش.[13]

عنصر	C	S	P	O	N	H
حداکثر قابل قبول (ppm)	۶	۵	۱۴	۵*	۱۴	۱

* تمام اکسیژن موجود در فولاد مشتمل‌بر ذرات اکسیدی مانند Al_2O_3 را در بر می‌گیرد.



شکل ۵ . سیستم کربن‌زدایی با اکسیژن و آرگون AOD [۱۶]

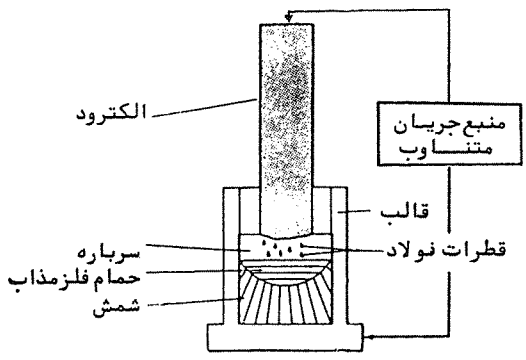
در حال حاضر ، استفاده از سیستم AOD در بسیاری از واحدهای تولید فولاد مورد استفاده می‌باشد . تحقیقات به منظور بهبود بازدهی عملیات ، کاهش هزینه‌ها و ابداع روشهای نو در این خصوص در جریان است .

ذوب القائی تحت خلاء Vacuum Induction Melting (VIM)

برای ذوب فولادهای بسیار مرغوب دارای حداقل آخال‌های غیرفلزی و گاز ، لازم است از کوره‌های القائی بدون هسته تحت خلاء استفاده‌نمود . تمام عملیات ذوب ، آلیاژسازی ، نمونه‌برداری ، اندازه‌گیری دما و ریخته‌گری این کوره‌ها تحت فشارهای بسیار کم و در غیاب هوا انجام می‌شود [۲۳] از میان تمام روشهای موجود ، بیشترین کنترل آنالیز شیمیائی و دمای فلز مذاب از طریق این فرآیند میسر می‌گردد . نه‌تنها تنظیم محتوای عناصر آلیاژی در فلز مذاب ، بلکه کنترل میزان عناصر جزئی محلول ، اعم از مطلوب یا نامطلوب توسط این روش به خوبی قابل انجام است . به علاوه تنظیم یکنواختی ترکیب شیمیائی فلز بدلیل بهم خوردن پیوسته فولاد و حفظ تمیزی و نظافت فولاد از طریق مجزا ساختن سیستم از محیط به سهولت عملی می‌شود . استفاده از کوره‌های VIM برای انجام مطالعات تحقیقاتی و یا تولید فولادهای با کیفیت عالی ضروری می‌باشد .

ذوب قوسی مجدد تحت خلاء و ذوب الکتریکی همراه با سرباره Vacuum Arc Remelting (VAR) Electro-Slag Remelting (ESR)

برای کنترل ساختار شمش‌های ریخته‌شده فولادی و تصفیه عناصر ناخالصی موجود در آنها ، از روشهای ذوب الکتریکی با جریان پیوسته تحت خلاء و یا ذوب الکتریکی مجدد با جریان متناوب همراه با سرباره استفاده می‌شود . فرآیند اول ، مبتنی بر ذوب الکترود فولادی ریخته‌شده در دمای زیاد حاصل از انتقال جریان برق و ایجاد قوس الکتریکی تحت خلاء (یا گاز خنثی) و انجماد کنترل شده آن پس از عبور از قالب مسی خنک شونده با آب ، به تصفیه فولاد منجر می‌شود . در روش دوم ، قطرات حاصل از ذوب الکترود فلزی قبل از پیوستن به حمام مذاب ، از درون سرباره‌ای که نقش محافظ و هدایت کننده الکتریسیته را دارد ،



شکل ۶ . فرآیند ذوب قوسی مجدد همراه با سرباره ESR [۲۴]

عبور کرده و سپس وارد حمام مذاب می‌گردد . (شکل ۶) [۲۴] اگر چه این روش امروز کاملا " شناخته‌شده بحساب می‌آید ، اما درزمینه ترمودینامیک و سینتیک واکنشهای انجام شده در درون و ما بین فازها ، تحقیقات علمی زیادی مورد نیاز می‌باشد .

ریختن و نورد

۱. *متالورژی پاتیل واسط* Tundish Metallurgy

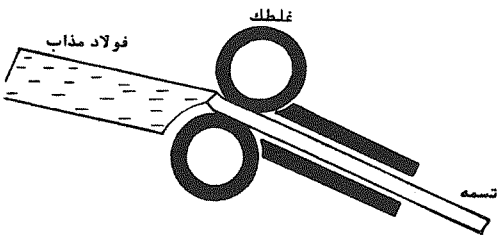
تکنولوژی فولادریزی نیاز به سرعتهای بیشتر و امکان ریختن انواع مشکل‌تر فولاد مانند فولادهای آلیاژی و پرآلیاژ دارد . برای رسیدن به این مقصود تنظیم دقیق آنالیز مذاب ، کنترل همگونی و ثبات دما و افزایش تمیزی فلز مذاب از طریق خارج ساختن آخالهای معلق ضروری می‌باشد . لذا به موازات پیشرفت فرآیند متالورژی پاتیلی ، توسعه عملیات کنترل در پاتیل واسط نیز لازم به نظر می‌رسد [۱۳ و ۱۸]

۲. ریخته‌گری پیوسته Continuous Casting

برای افزایش سرعت ، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود کیفیت فولاد از روش ریخته‌گری پیوسته استفاده می‌شود . اخیرا " استفاده از ریخته‌گری پیوسته افقی حتی برای فولادهای مخصوص نیز گزارش شده است [۱۹] استفاده از این روش در تولید انبوه لوحه Slab و قلمه Billet فولادهای کربنی ، کم آلیاژ و ضدزنگ می‌تواند سبب کاهش هزینه‌ها و حذف تجهیزات اضافی‌شود . برای بهبود کیفیت فولاد از روش بهم‌زدن الکترو مغناطیسی Electromagnetic Stirring می‌توان استفاده‌کرد. این عمل باعث جلوگیری از ایجاد ساختار ستونی‌شدید Highly Columnar در خلال انجماد پیوسته می‌شود . به علاوه سبب بهبود ساختار از طریق ریزشدن و هم اندازه‌شدن دانه‌ها ، بهبود کیفیت سطح و رفع نیاز به عملیات صافکاری بعدی ، کاهش محتوای آخالها و کاهش جدایش ماکروسکوپی Segregation در نمونه می‌گردد [۲۰] روش ریخته‌گری پیوسته افقی مورد علاقه اغلب فولادسازان بوده و مطمئنا " جای خود را بزودی در صنعت فولاد باز خواهد کرد .

۳. ریختن مستقیم صفحه Direct Casting of Sheet

از روش‌های ابتکاری و بسیار نو ، ریختن پیوسته فولاد به شکل لوحه نازک ، تسمه و ورق می‌باشد . اعمال این روش می‌تواند از طریق حذف گرمکن‌ها و تجهیزات نورد میانی به صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بهبودخواص فولاد نهایی منجر شود [۵ و ۱۳] بکارگیری این فرآیند مستلزم در اختیار داشتن فولادی بسیار تمیز بوده ، بهم‌زدن ملایم و پیوسته مذاب توام با اصلاح آنالیز آن را ، ولو در هنگام انتقال و ریخته‌گری



شکل ۷. ریختن مستقیم فولاد مذاب به شکل لوحه نازک ، تسمه و یا تسمه نازک [۲۰]

مثلا " با تزریق سیم ، ایجاب می‌کند . فعالیتهای تحقیقاتی در خصوص کشف محاسن و محدودیتهای این روش بخصوص در زمینه استفاده از سیستمهای نورد دو غلطکی ، یک غلطکی و بین نواری ، در دست انجام است (شکل ۷) . حدود ۳۰ پروژه مستقل تحقیقاتی در حال اجرا در این مورد در سطح جهان گزارش شده است [۲۱]

۴. *تولید تسمه از طریق متالورژی پودر*

اساس این روش مبتنی بر فشرده کردن پودر فلز برای تولید مقاطع فولادی است . اگر چه تحقیقات در این زمینه هنوز به نتیجه نهایی نرسیده است ، اما به نظر می‌رسد استفاده از پودر دارای محاسن فراوانی از قبیل حصول خواص مکانیکی عالی ، کاهش هزینه سرمایه‌گذاری ، حذف عملیات حرارت دادن ، کاهش بخشی از عملیات نورد و تنزل مصرف انرژی و نیروی کار باشد [۱۴] مشکل اصلی این روش هزینه بالای تولید پودر فلز است . اگر بتوان سنگ معدن را مستقیما " به پودر تبدیل کرد ، مثلا " از طریق تغلیظ و سپس احیاء مستقیم ، احتمال موفقیت این فرآیند افزایش خواهد یافت . در شرایط کشور ما ، ممکن است بتوان با استفاده از آهن اسفنجی ساخت داخل اقدام به تهیه مقاطع فولادی از طریق متالورژی پودر نمود .

تعیین ترکیب شیمیائی و دمای فلز مذاب

۱. سنسورهای حرارتی

اندازه‌گیری دمای فلز مذاب، به کمک ترموکوپلهای موجود به سادگی در هرزمان امکان‌پذیر است. لکن به دلیل ضرورت تعیین پیوسته درجه حرارت، موادی که بتوانند تحمل دماهای بالا را برای مدت طولانی بنمایند، به شدت مورد نیاز صنایع فولاد می‌باشند. به علاوه لازم است تحقیقاتی پیرامون نحوه پیوند سنسورهای حرارتی با تکنیک دیجیتال به‌منظور اعمال روشهای کنترل اتوماتیک در صنایع تولید فولاد صورت‌گیرد. بخصوص که با ورود سیستمهای بسیار سریع تجزیه و تحلیل اطلاعات ازقبیل میکروپروسور، مینی‌کامپیوتر، میکروکامپیوتر، سوپرمینی، سوپر مایکرو و حتی سوپر کامپیوتر، تحولات عظیمی در خصوص نحوه اعمال شیوه‌های کنترل‌خودکار بر فرآیندهای تولید فولاد، میسر گردیده است.[۲۵]

۲. اندازه‌گیری پتانسیل اکسیژن

اگر چه اندازه‌گیری پتانسیل اکسیژن فلز مذاب بوسیله سنسورهای اکسیژن Oxygen Sensors در هر لحظه امکان‌پذیر است،[۲۸] اماتعیین محتوای اکسیژن موجود در فولاد مذاب در صورتی که توسط آلومینیوم اکسیژن‌زدایی شده باشد، به آسانی میسر نیست. لذا کار تحقیقاتی به منظور ساختن وسیله‌ای برای شمردن تعداد آخال‌های موجود در فلز مذاب، هم اکنون در دانشگاه مکگیل McGill در حال انجام می‌باشد.[۲۶] بدیهی است تشدید فعالیتهای تحقیقاتی در این خصوص به دلیل نیاز روز افزون حتما" ضروری خواهد بود.

۳. تعیین آنالیز کامل فلز مذاب

امروزه فعالیتهای تحقیقاتی زیادی به منظور ابداع شیوه‌ای برای تعیین مستقیم آنالیز شیمیائی فلز مذاب در جریان است.[۲۶] اهمیت نتایج این فعالیتها، به خصوص با افزایش نیاز صنعت به فولادهای فوق تمیز (جدول ۲)، به خوبی آشکار می‌گردد. دستیابی به نتیجه مطلوب در این فعالیتها، بدون‌شک تحولات عظیمی را در صنعت ذوب و تصفیه فولاد به دنبال خواهد داشت.

مدیریت صنعتی و کنترل فرآیند

یکی از مشکلات عمده صنایع تولید فولاد، به خصوص مجتمع های بزرگ، مسأله مدیریت است. تجربه کشورهای صنعتی، نشان داده است که مدیریت‌های فنی در عمل موفق‌ترند.[۱۰] این نوع مدیریت‌ها بعضا" توانسته‌اند باابرقرار ساختن ارتباط نزدیک با رده‌های پائین، به خصوص مدیران تولید، نسبت به افزایش بازدهی عملیات، حذف ظرفیتهای غیر مفید و سازماندهی‌فعالیت‌های تحقیقاتی موفقیت‌های زیادی رانصیب واحدهای تحت اختیار خود نمایند.[۱۰] برعکس، واحدهایی که به شیوه مدیریت‌های اقتصادی یا سیاسی اداره می‌شوند، اغلب با مشکلات و تنگناهای شدید دست بگریبانند.[۲۷]

برای دستیابی به تولید بیشتر و کیفیت بهتر، اعمال شیوه‌کنترل آماری Statistical Process Control در سطح بسیار وسیع، ضروری بنظر می‌رسد. به علاوه لازم است از طریق معاینه مستمر، حفظ و نگهداری واحدها به طور مرتب مورد توجه قرار گیرد. همچنین ایجاد روحیه تفاهم و همکاری دوجانبه بین واحدها و در درون هر واحد، در شرایط حاضر اجتناب ناپذیر است. سازماندهی فعالیتهای تحقیقاتی مشترک بین واحدهای تولیدی و بین این واحدها و دانشگاه امروز از لوازم حتمی حصول توفیق در صنعت فولاد به حساب می‌آید.[۲۷]

از میان تمام عناصر لازم برای رشد صحیح و سریع صنعت فولاد، مورد آخر، یعنی اجرای پروژه‌های تحقیقاتی مشترک صنعت ـ صنعت و دانشگاه‌ـصنعت، موثرترین و دشوارترین عنصر تلقی می‌شود. بدون شک اجرای جدی و قاطع این مورد، نیاز به انقلابی فرهنگی در صنعت فولاد دارد. در شرایطی که صنایع فولاد کشورهای توسعه یافته ضرورت انجام چنین انقلابی را در خود احساس کرده‌اند، صنعت نوپای فولاد کشورما یقینا" نمی‌تواند خود را از آن مستغنی بداند.

شرایط کشور ما

از آنجا که بهترین راه برای کسب‌دانش فنی انجام تحقیقات علمی و صنعتی است، لذا به وضوح می‌توان انجام تحقیقات پیرامون موضوعات نو تحقیقاتی مطرح شده در این مقاله راحتی در شرایط خاص کشور مالازم دانست. البته‌عناوین تحقیقاتی دیگری مانند کاربرد انرژی‌های هسته‌ای در صنعت فولاد نیز وجود دارند که به دلیل محدودیتهای موجود، شاید کار در مورد آنها در شرایط حاضر میسر نباشد. اما سوژه‌هائی که در ارتباط مستقیم با مسایل مبتلا به حال و آینده صنعت‌فولاد در کشور هستند مانند ذوب و تصفیه، ریخته‌گری و نورد کنترل کیفیت و مدیریت فنی و اقتصادی، همگی دارای اهمیت خاص بوده و تحقیق در مورد آنها اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد. به خصوص که کار پژوهشی در زمینه فرآیندهای‌نو نه تنها می‌تواند به رشد استعدادها و قوای خلاقه محققین و دانش پژوهان منجر شود، بلکه ممکن است نتایج اقتصادی ثمربخشی را نیز به دنبال داشته باشد.

نیاز به تحقیق در مورد مدیریت صنعتی و کنترل فرآیند به ویژه باتوجه به شرایط خاص کشورما ، به منظور افزایش بازدهی صنایع تولید فولاد ، بسیار ضروری به نظر می‌رسد . همچنین در زمینه مسائل انسانی‌و اجتماعی واحدهای تولیدی، هنوز نکات مبهم فراوانی وجود دارد که باید روی آنها تحقیق و بررسی به عمل آید . به نظر می‌رسد تحقیق در خصوص روشهای کاهش وزن ، بهبود خواص مکانیکی و افزایش مرغوبیت در شرایط حاضر از اولویت بسزائی برخوردار است . چرا که تقلیل ذخائرطبیعی مواد ، ما را ناگزیر به سمت سیاست کاستن از وزن در مقابل حفظ خواص مطلوب ، سوق می‌دهد . به این دلیل ، انجام فعالیتهای تحقیقاتی در خصوص فولادهای ماوراء تمیز و فولادهای میکرو آلیاژی پر استحکام توصیه می‌گردد .

منابع

1. Mc Aloon: *I & SM,* Dec. 1986, 10–14.
2. Miller: *I & SM*, Dec. 1984, 28–31.
3. IISI – 15: *I & SM,* Dec. 1981, 36–38.
4. Unger: *Metallurgical Plant and Technology*, 2, 1985, 35–41.
5. Szekely: *Met. Trans. B*, 1980, 353–371.
6. Hageman: *I & SM*, Feb. 1985, 35–41.
7. Paxton: *Electric Furnace Proceedings,* 42 1984, 3–5.
8. Iverson. *Electric Furnace Proceedings,* 42,1984, 7–8.
9. Bradford: *Electric Furnace Proceedings,* 42, 1984, 9–12.
10. Mclean: *I & SM*,1, Feb. 1985, 17–21.
11. Queneau: *JOM*, Feb. 1985, 59–64.
12. Apelian: *JOM,* Feb. 1985, 65–68.
13. Koros: *I & SM,* Dec. 1986, 21–25.
14. Szekely: *I & SM,* Dec. 1979.
15. Ohnishi, et. al: *I & SM,* Feb. 1985, 29–34.
16. Fruehan: *Ladle Metallurgy Principles and Practices,* ISS AIME, 1985.
17. Fruehan: *JOM,* Mar. 1985, 50–54.
18. Yokoyama, et. al: *I & SM,* Sep. 1986, 35–40.
19. Machner, et. al: *I & SM,* April. 1986, 15–18.
20. Tzavaras and Brody: *JOM*, Mar. 1984, 31–37.
21. Upfron: *I & SM,* Dec. 1986, 1.
22. *I & SM,* May. 1984.
23. Schlatter: *Electric Furnace Steelmaking,* ISS AIME, 175–189, 1985.
24. Mitchell: *Electric Furnace Steelmaking,* ISS AIME, 191–236, 1985.
25. Esterling: *JOM*, Oct. 1984, 22–25.
26. Koros: *I & SM,* Dec. 1986, 21–25.
27. Miller: *I & SM,* Oct. 1984, 20–23.
28. Turkdogan and Fruehan: *CIM Quarterly,* II, 1972, 371–379.