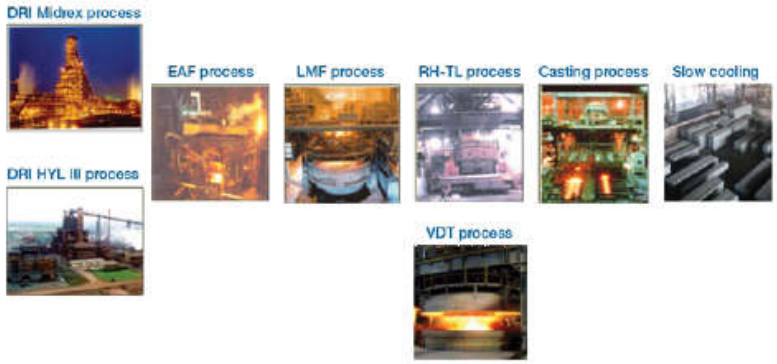
بهینه‌سازی تولید فولادهای API
از مسیر EAF و ریخته‌گری پیوسته معمولی[1]

ترجمه: محمدحسین نشاطی

بخش تولید فولاد کربنی تخت شرکت آرسلورمیتال لازارو کاردناس تولیدکننده اسلب معمولی با کوره قوس الکتریکی بر پایه 100 درصد آهن اسفنجی می‌باشد. از طریق بهبود پیوسته شیوه عملیات و تجهیزات در یک دهه گذشته، به یک تولیدکننده پیشتاز اسلب برای کاربردهای API تبدیل شده است. مسیر فولادسازی از طریق EAF + کوره متالورژی پاتیلی + گاززدای RH با دانش فنی خاص، میزان بسیار کم عناصر S، P، N، H و نیز عناصر باقیمانده کم را تضمین می‌کند. شیوه‌های تثبیت شده ریخته‌گری و تعمیرونگهداری ماشین آن کیفیت داخلی و خط مرکزی اسلب با تمیزی عالی فولاد که مورد نیاز کاربردهای API است را تضمین می-کنند. این مقاله تلاش‌های فنی پیوسته را به طور خلاصه بیان می‌کند.

کاملا معلوم شده است که بازار جهانی اسلب فولادی امروزه بسیار بیشتر خواهان فولادهای با کیفیت برای کاربردهای تخصصی است که نیاز به کنترل‌های سفت‌وسخت برای عناصری همانند فسفر، نیتروژن، هیدروژن، گوگرد و سایر عناصر ناخواسته (tramp elements) و همچنین نسبت Ti/N در بعضی موارد دارند. در مورد محصولات نیمه‌تمام در حالت ریخته‌گری شده، کیفیت سطحی و داخلی و همچنین شکل و ابعاد اسلب‌ها نیز باید الزامات بسیار سفت و سختی را تامین کنند. بخش تولید فولاد کربنی تخت شرکت آرسلورمیتال لازارو کاردناس از تولیدکنندگان اسلب معمولی با کوره قوس الکتریکی (EAF) بر پایه 100 درصد خوراک آهن اسفنجی (DRI) با تولید سالانه 5 میلیون تن می‌باشد. از طریق بهبود پیوسته شیوه عملیات و تجهیزات در یک دهه گذشته، به تدریج در زنجیره ارزش بالا رفته از یک تامین‌کننده اسلب پائین ترین کیفیت به یک تولیدکننده پیشتاز اسلب برای اسلب‌های ضخیم فولادهای API برای سخت‌ترین کاربردهای محیط زیستی و فولادهای پیشرفته پراستحکام (AHSS) از جمله نسل سوم، برای صنعت خودروی آمریکا از طریق سرمایه‌گذاری مشترک شرکت‌های آرسلورمیتال–نیپون استیل در کالورت ایالت آلاباما تبدیل شده است.



شکل 1– مسیر فرآیند تولید گریدهای فولادی API/فولادهای پراستحکام پیشرفته (AHSS)/ فولادهای پراستحکام کم آلیاژ (HSLA).

شکل 1 مسیر تولید عادی فولادهای API، AHSS و سایر فولادهای پراستحکام کم آلیاژی (HSLA) را نشان می‌دهد. کارگاه فولادسازی مستقیماً DRI را از واحدهای میدرکس و HYL دریافت می‌کند و به چهار EAF هر کدام با ظرفیت 250 تن شارژ می‌نماید. در حالت عادی، 270 تن DRI برای تولید یک ذوب 220 تن فولاد استفاده می‌شود. به دلیل پایین‌تر بودن

[1] - Optimization of Steelmaking Production for API Grades Through EAF and Conventional Caster Route, IRON & STEEL TECHNOLOGY, AUG 2019 .

درصد P، N، S و عناصر ناخواسته (Cu، Ni، Cr، V، Nb و غیره) در این ماده آهن‌دار جایگزین نسبت به قراضه فولادی، مشخصات شیمیایی فولاد از ابتدای مسیر تولید به درستی قابل کنترل است. در شرایط عادی، درصد S در DRI به میزان 0.002 درصد است، در حالی که درصد P در حدود 0.045 درصد و N می‌تواند به پائینی 8ppm باشد.

پس از ذوب کردن در EAF، فولاد مذاب در یک پاتیل 220 تن تخلیه شده و به یکی از سه کوره متالورژی پاتیلی (LMF) منتقل می‌شود و به دنبال آن عملیات گاززدایی در RH یا در تانک گاززدایی در خلاء (VTD) انجام می‌شود. سپس ذوب به یکی از دو دستگاه ریخته‌گری پیوسته اسلب معمولی دو رشته ای ارسال می‌شود. به منظور تضمین بهترین کیفیت خط مرکزی، دستگاه ریخته‌گری پیوسته شماره 2 تحت بازسازی عمده‌ای قرار گرفته تا به امکان کاهش سطح مقطع نرم دینامیک (DSR) مجهز شود. از آنجا که بیشتر گریدهای جدید با محتوای آلیاژ بیشتر و بیشتری طراحی می‌شوند، اسلب‌ها به ترک بسیار حساس‌تر شده‌اند. از این رو، برای یک تامین‌کننده اسلب، این کارخانه یک دستگاه خنک‌کننده آهسته اسلب نصب کرده است تا امکان انجام انواعی از شیوه‌های خنک‌سازی فراهم شود.

مسیر فولادسازی از طریق EAF+LMF+RH با دانش فنی ویژه میزان بسیار کم S، P، N، H و همچنین میزان کم عناصر باقیمانده (residual elements) را که به طور معمول برای تولید EAF با شارژ قراضه بسیار بالا می‌باشند، تضمین می‌کند. شیوه-های تثبیت شده ریخته‌گری و رویه‌های تعمیرونگهداری دستگاه کیفیت داخلی و کیفیت خط مرکزی با تمیزی عالی فولاد را که برای API ضروری است تضمین می‌کنند. این مقاله تلاش‌های فنی پیوسته از طریق بهبود فنی را به طور خلاصه بیان می‌کند. این روند ادامه خواهد یافت، زیرا بخش فولاد کربنی تخت لازارو کاردناس قراردادی را با شرکت پرایمتالز تکنولوجیز برای راه‌اندازی در سال 2020 یک کارخانه نورد گرم جدید با ظرفیت سالانه 2.5 میلیون تن امضا کرده است [1]. انتظار می‌رود این کارخانه فشار بیشتری بر عملیات فولادسازی برای تولید اسلب‌های با کیفیت برای تغذیه کارخانه نورد پیشرفته وارد کند. در ضمن، فولادسازی باید فولادهای با ارزش افزوده بیشتری را برای مصرف داخلی شرکت آرسلورمیتال (بخش فولاد کربنی تخت امریکاس) و بازار خارجی اسلب تولید کند.

جدول 1- عناصر باقیمانده در فولاد تولید شده با استفاده از 100 درصد آهن اسفنجی (DRI).

عنصر	٪
Cu	0.00800
Ni	0.01000
Cr	0.00900
Sn	0.00050
B	0.00020

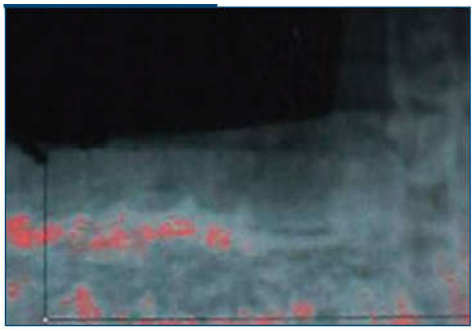
فولادسازی و ریخته‌گری

نحوه دستیابی به میزان بسیارکم عناصر ناخواسته- اثرات منفی عناصر ناخواسته مضر برای عملیات نورد و خواص نهایی محصولات تخت را نمی‌توان دست کم گرفت. عناصری همچون Cu، S، P، Cr و Ni می‌توانند از مواد قراضه وارد فولاد شوند، به همین دلیل بیشتر عملیات EAF با شارژ قراضه نمی توانند گریدهای فولادی بسیار دشوار را تولید نمایند. خوشبختانه، این عناصر باقیمانده در این کارخانه فولادسازی به دلیل استفاده از شارژ 100 درصد DRI کاملا تحت کنترل هستند. **جدول1** عناصر ناخواسته‌ای را که به طور معمول در تولید فولاد با استفاده از 100 درصد DRI بدست آمده نشان می‌دهد، که برای عملیات EAF با شارژ قراضه تقریباً غیرقابل تصور است.

همچنین برخی از این عناصر ناخواسته می‌توانند از فروآلیاژها یا مواد سرباره‌ساز مصنوعی نیز وارد شوند. هنگام موازنه باید به هزینه مواد اولیه و آلودگی عناصر ناخواسته دقت شود. به علت اینکه این عناصر پس از ظاهر شدن در فولاد قابل حذف نیستند، تنها راه برای کاهش آنها کاهش میزان ورودی آنها است. در هر صورت، در این کارخانه میزان عناصر ناخواسته در فولاد می‌تواند مطابق یا حتی بهتر از مورد کارخانه‌های یکپارچه فولاد با کوره بلند (BF) + کوره بازی اکسیژنی (BOF) باشد.

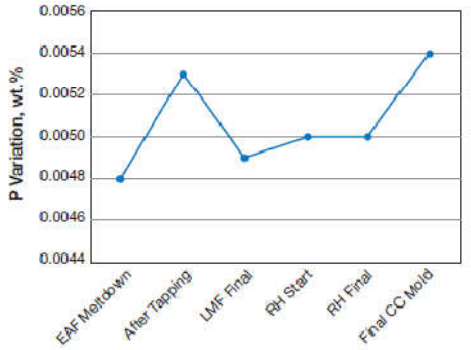
نحوه دستیابی به میزان بسیار کم P- اسلب‌های این کارخانه حاوی P کم برای دستیابی به خواص مکانیکی بهتر است. سه نکته کلیدی در این کارخانه برای حفظ این میزان بسیار کم P وجود دارد:

- کنترل صحیح کیفیت مواد اولیه برای فولادسازی الزامی است و از انتخاب سنگ آهن وارده به کارخانه گندله‌سازی شروع می‌شود. انتخاب مخلوط خوب از یک معدن محلی که حاوی P بسیار کم در سنگ آهن باشد اولین گام است. این دلیل اصلی برای تولید فولادهای API با 100 درصد DRI است. از نظر P در این مورد گزینه دیگری وجود ندارد.
- نکته دوم اجرای خوب سرباره پفکی با ترکیب شیمیایی و وضعیت مناسب اکسیداسیون سرباره در مراحل اولیه ذوب کردن است. دمای پایین و پتانسیل اکسیژن بالا، شرایط مناسبی برای فسفرزدائی بیشتر ایجاد می‌کند.
- نکته کلیدی سوم، جلوگیری از برگشت P از سرباره انتقالی به مذاب داخل پاتیل است. این مورد با نگهداری شرایط مناسب مجرای تخلیه کوره و با استفاده از دوربین تصویری سرباره برای به حداقل رساندن مقدار سرباره انتقالی حاصل می‌شود. هنگامی که زمان تخلیه حدود 6 دقیقه باشد، همانطورکه در **شکل2** نشان داده شده، انتقال سرباره حداقل است.



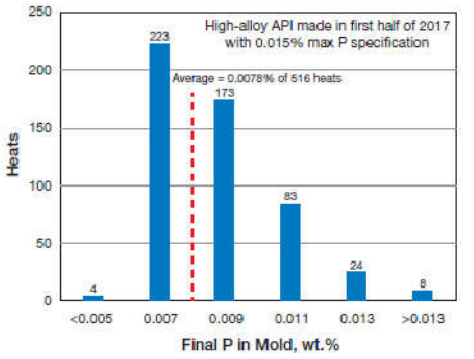
شکل 2- دوربین تصویری سرباره انتقالی (ناحیه قرمز) کمتری را با زمان تخلیه کندتر از 6 دقیقه نشان می دهد.

با افزودن فروآلیاژها که در گریدهای فولادی تازه توسعه یافته بیشتر و بیشتر می‌شوند، قابلیت آلودگی P به شدت افزایش پیدا می‌کند. هرگونه ورود P به فولاد پس از EAF به دلیل شرایط نامطلوب ترمودینامیکی، به سختی قابل حذف است. بنابراین، یک برنامه خرید و نظارت خوب برای آلیاژها برای اطمینان از وجود میزان این عناصر در محدوده مشخصات از تامین‌کنندگان مختلف ضروری است. در مورد گریدهای خیلی پرآلیاژی و بسیار دشوار، باید بهترین کیفیت مواد آلیاژی اضافه شوند. برای مثال استفاده از مقدار زیادی منگنز الکترولیتی برای اطمینان از دستیابی به بهترین خواص نهایی در محصولات.



شکل 3- نمونه ای از درصد P بر حسب مرحله فرآیند.

مثالی از تغییر P در سراسر فرآیند فولادسازی در **شکل3** آورده شده است. مقدار نهائی P در نمونه از قالب می‌تواند در گستره 50 تا 60ppm یا حتی در برخی از موارد در مقادیر کمتری تا حدود 40ppm باشد. **شکل4** نمودار هیستوگرام درصد P در گرید API پرآلیاژی ساخته شده در نیمه اول سال 2017 را نشان می‌دهد. میانگین P در این 516 ذوب 78ppm است. لازم به ذکر است که مشخصات مشتری برای حد بالایی فسفر 150ppm می‌باشد.



شکل 4- هیستوگرام P در یک گرید API پرآلیاژ.

نحوه دستیابی به میزان بسیار کم N- همانطورکه قبلاً نیز بیان شد، یکی از اصلی‌ترین مزیت‌های این کارگاه فولادسازی، استفاده از 100 درصد DRI با درصد C بالا (2.30-2.70 درصد) است. داشتن نیتروژن بسیار کم در هنگام ذوب کردن بسیار مهم است. مطالعه قبلی در کارگاه نشان داد که هرچه درصد C در DRI بیشتر باشد، میزان نیتروژن در فولاد مذاب در هنگام ذوب کردن کمتر است [2]. برای مثال، با 2.80 درصد C در DRI، مقدار نیتروژن در ذوب کردن به طور معمول فقط بین 10 و 20ppm بود. تشکیل CO هنگام استفاده از DRI پرکربن تولید شدید حباب CO در طی فرآیند و بدون نیاز به استفاده از مواد کربنی برای سرباره پفکی را تقویت می‌کند. این

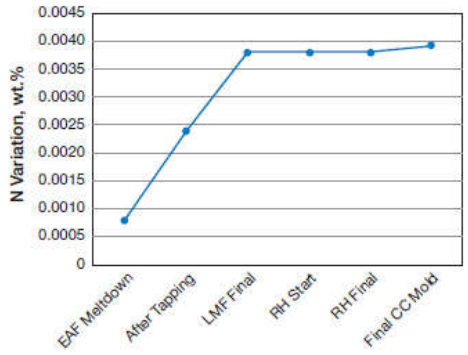
گاز CO به محافظت از حمام فلزی در برابر نفوذ هوا کمک می‌کند و مانعی بین فولاد و اتمسفر ایجاد می‌نماید. تشکیل شدید CO می‌تواند حتی قبل از برقراری پاور–آن EAF صورت گیرد، از جذب نیتروژن در مرحله اولیه عملیات EAF جلوگیری کند. در ضمن، حباب‌های CO می‌توانند نیتروژن را از حمام فولاد خارج نموده و در اتمسفر رها سازند.

اما، با شروع از EAF، باید مراقبت ویژه‌ای برای حفظ N در کمترین حد انجام شود. یکی از مراحل اصلی جلوگیری از برگشت N_2 در هنگام تخلیه است. در طی تخلیه EAF، مجرای تخلیه باید خوب نگهداری شود تا از جریان فشرده فولاد که می‌تواند به حداقل رساندن جذب N از اتمسفر کمک کند اطمینان حاصل گردد.

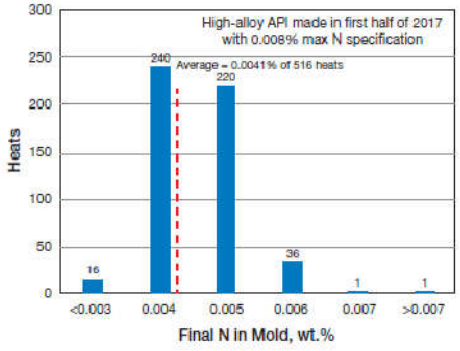
در LMF، تولید سریع سرباره بازی سیال [روان] می‌تواند جذب N را کاهش داده و همزمان گوگردزدایی بهتری به دست آید. برنامه نظارت بر کیفیت مواد آلیاژی که قبلا بیان شد نیز به پائین بودن N کمک خواهد کرد. دمش Ar برای تعدادی از اهداف در طی فرآوری LMF ضروری است. جریان بیش از حد Ar می‌تواند یک چشم باز ایجاد کند و فولاد مذاب را در معرض جذب N قرار دهد. به دلیل حلالیت خوب N در فولاد، حذف N با گاززدای RH یا VTD در میزان پایین N مشکل می‌شود.

برگشت N در دستگاه ریخته‌گری پیوسته نیز می‌تواند رخ دهد. با استفاده از شیوه تعویض پاتیل غوطه‌ور و طراحی خوب وسایل تاندیش، در معرض اتمسفر قرار گرفتن فولاد مذاب در این کارخانه به خوبی تحت کنترل است.

نمونه ای از تغییر N در طی فرآیند فولادسازی در **شکل5** آورده شده است. N نهایی در نمونه از قالب می‌تواند در محدوده 30 تا 40ppm یا حتی در برخی از موارد در مقادیر کمتری تا حدود 20ppm باشد. **شکل 6** نمودار هیستوگرام درصد N در گرید API پرآلیاژی ساخته شده در نیمه اول سال 2017 را نشان می‌دهد. میانگین N در این 516 گرم در 41ppm می باشد. لازم به ذکر است مشخصات مشتری برای حد بالائی نیتروژن 80 ppm می‌باشد.



شکل 5- نمونه ای از درصد N بر حسب مرحله فرآیند.



شکل 6- هیستوگرام N در یک گرید API پرآلیاژ.

نحوه دستیابی به میزان بسیار کم S – برای فولادهای API، چقرمگی شکست یک الزام قطعی است. مدت‌هاست که تشخیص داده شده است که وجود گوگرد، که رشته های طویل شده سولفید منگنز را تشکیل می دهد، برای چقرمگی بسیار مضر است. بسته به الزامات چقرمگی برای یک پروژه خاص، میزان گوگرد بر اساس آن محدود خواهد شد [3].

در فرآوری EAF، پتانسیل اکسیژن بالا برای حذف S نامطلوب است. بنابراین، بدیهی است راه حل تخلیه کوره با درصد کم S بر خوراک اولیه DRI متکی خواهد بود که در مقایسه با عملیات EAF با شارژ قراضه می‌تواند بهتر کنترل شود. کنترل درصد S در روانسازهای (فلاکس‌های) مورد استفاده عامل اصلی دیگری برای تقویت دستیابی به کمترین درصد S در فرآیند EAF است.

در مورد LMF، اکتیویته اکسیژن در ابتدای فرآیند برای دستیابی به بهترین شرایط برای حذف گوگرد باید کم باشد. از این رو، عملیات سرباره برای رسیدن به پتانسیل اکسیژن بسیار کم الزامی است. شاخص اکتیویته اکسیژن در سرباره FeO+MnO محتوی در آن است. هرچه درصد (FeO+MnO) در سرباره اولیه کمتر باشد، ظرفیت گوگرد Ls بیشتر می‌شود [4]. بنابراین، در فرآیند LMF با ورود پاتیل، سرباره بلافاصله با استفاده از ساچمه‌های Al، CaC_2، آلومینا یا CaF_2 مورد پالایش قرار می‌گیرد. **جدول2**

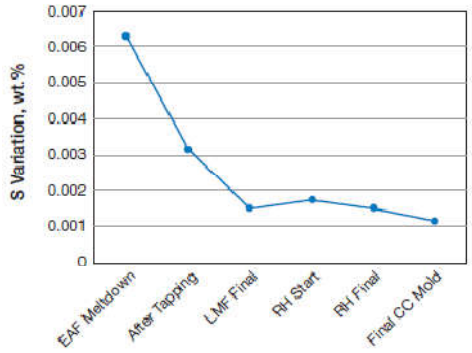
ترکیب سرباره معمول برای این فولادهای API را می‌دهد. این سیستم سرباره دارای ظرفیت گوگرد بسیار بالا و سیالیت خوبی به طور همزمان برای شرایط کینتیکی گوگردزدائی و جذب آخال است.

یک راه‌حل برای حذف سریع S، مخلوط کردن قوی سرباره و فولاد در مرحله اولیه گوگردزدائی است. در این کارخانه، گاز Ar با دو توپی متخلخل (پوروس پلاگ) با سرعت جریان 30 m^3/h در هر توپی برای دستیابی به اختلاط خوب و امولسیون‌سازی سرباره به داخل پاتیل دمیده می‌شود.

جدول 2- ترکیب شیمیایی سرباره کوره متالورژی پاتیلی (LMF) برای فولادهای API.

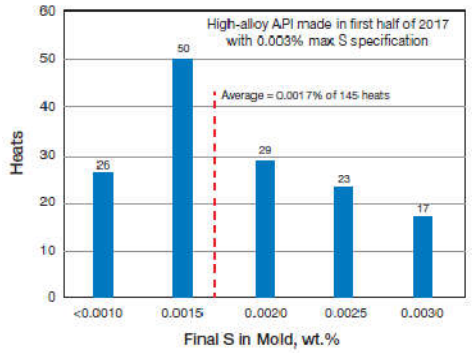
LF %CaO	LF %SiO_2	LF %MgO	LF %FeO	LF %MnO	LF %Al_2O_3
57.04	9.40	5.11	1.01	0.24	26.06
57.11	12.75	5.39	1.00	0.35	20.84
56.12	13.29	6.76	0.97	0.33	22.43

اما، کنترل سرعت جریان Ar پس از تنظیم ترکیب شیمیایی برای جلوگیری از اکسایش مجدد فولاد، بسیار مهم است. پس از آخرین افزودن فروآلیاژها در LMF، یک دمش شدید Ar برای مدت زمان کوتاهی باید حفظ شود تا اختلاط خوب و بهم پیوستن آخال‌ها را تقویت نماید. پس از تنظیم نهایی Al، سرعت جریان Ar در مرحله تزریق Ca به حداقل کاهش می‌یابد. انجام تزریق کلسیم چون گوگرد در فولاد کمتر از 0.005 درصد است برای اثر بهتر حذف گوگرد و حفظ ترکیب مناسب سرباره بسیار مهم است [4]. پس از تزریق کلسیم، 7-5 دقیقه شستشوی با Ar توسط دمش ملایم جهت حذف آخال برای دستیابی به بهترین میزان تمیزی فولاد انجام می‌شود.



شکل 7- نمونه ای از درصد S بر حسب مرحله فرآیند.

شکل7 نمونه‌ای از تغییر درصد S در طی فرآیند فولادسازی را ارائه می‌دهد. درصد S نهایی در نمونه از قالب می‌تواند در محدوده 10 تا 20ppm یا حتی در موارد زیادی زیر 10ppm باشد. **شکل8** نمودار هیستوگرام درصد S در گرید API پرآلیاژی ساخته شده در نیمه اول سال 2017 را نشان می‌دهد. میانگین درصد S در این 145 ذوب 17ppm است.



شکل 6- هیستوگرام S در یک گرید API پرآلیاژ.

نحوه دستیابی به میزان بسیار کم H- با فرآیند RH یا VTD، به راحتی می‌توان هیدروژن‌زدائی را تحت خلاء عمیق انجام داد. طبق محاسبات کینتیکی، تأثیر زمان خلاء بر بازدهی حذف هیدروژن بر اساس هیدروژن ورودی در فولاد در **شکل9** آورده شده است. برای تضمین الزام حداکثر هیدروژن 2.5ppm برای فولادهای API با ضخامت زیاد، حداقل 15 دقیقه در خلاء زیاد (0.1 torr >) به عنوان یک شیوه عمل استاندارد در واکنش به پیش‌بینی ورودی گاه به گاه 6 ppm H مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اما، هنوز هم ورودی بسیار کم H در فولاد برای داشتن انعطاف‌پذیری بیشتر در RH یا VTD مطلوب است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که یک راه خوب برای به حداقل رساندن هیدروژن در EAF، به حداقل‌رسانی مقدار سرباره انتقالی می‌باشد [5]. **شکل10** همبستگی بین زمان تخلیه، قطر مجرای تخلیه و H نهایی در فولاد را نشان می‌دهد. این شکل به روشنی مزیت استفاده از زمان تخلیه کوره کندتر از 6 دقیقه، را نشان می‌دهد. در تمام ذوب‌های مورد بررسی، H نهایی در تاندیش بسیار کم بود، به طور میانگین 1.2ppm در 24 ذوب یک گرید ویژه API، که به عنوان نمونه در **شکل11** نشان داده شده است.

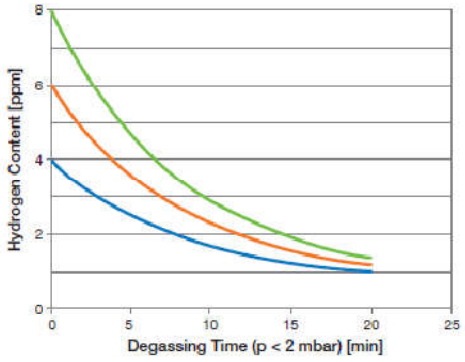
نحوه دستیابی به میزان بسیار کم آخال‌ها – فولادهای API همچنین نیاز به تمیزی فولاد عالی و اندازه آخال ریزتر برای دستیابی به بهترین عملکرد برای کاربردهای گاز ترش و قبولی از سخت‌ترین آزمایش های اولتراسونیک (UT) در منطقه جوشکاری، و همچنین اصلاح آخال با عملیات افزودن کلسیم به منظور کاهش رشته‌های MnS در اسلب‌های نورد شده و ایجاد آخال‌های مایع $CaO\text{-}Al_2O_3$ برای کاهش گرفتگی نازل در دستگاه ریخته‌گری پیوسته دارند. کاملا معلوم شده است که تمام مراحل از LMF تا دستگاه ریخته‌گری پیوسته برای ساختن فولاد فوق تمیز نه تنها در فولاد مذاب بلکه همچنین در اسلب ها به صورت ریخته‌گری شده نیز مهم هستند.

همانطورکه قبلاً بیان شد، در LMF، دمش ملایم Ar به مدت الزامی 5 تا 7 دقیقه در تمام فولادهای API بعد از عملیات افزودن کلسیم عملا انجام می‌شود. راهکار در اینجا کنترل دقیق سرعت جریان Ar در داخل پاتیل برای حصول اطمینان از این است که هیچ چشم بازی [در سطح مذاب] در هنگام حفظ همزنی با گاز وجود ندارد. بنابراین یک برنامه قوی تعمیرونگهداری توپی متخلخل (پوروس پلاگ) و لوله تغذیه Ar برای نتایج با ثبات مورد نیاز است.

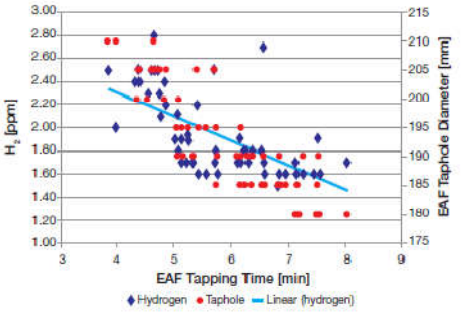
مرحله نهایی فرآیند RH/VTD برای تمیزی فولاد در فولادسازی مدرن اهمیت بیشتری کسب می‌کند و تصمیم گرفته شده که، برای کلیه فولادهای API، این مرحله قابل چشم پوشی نیست؛ حتی اگر H فولاد ورودی بتواند مشخصات را برآورده سازد.

در دستگاه ریخته گری پیوسته، راهکار جلوگیری از اکسیدشدن مجدد فولاد است. بنابراین، تعدادی از شیوه ها برای کوتاه کردن زمان اختلاط تاندیش در تعویض پاتیل، اجتناب تا حد امکان از مخلوط کردن فولاد/سرباره در تاندیش، پوشاندن چشم باز مذاب در اطراف لوله محافظ جریان ورودی از پاتیل و بهبود طراحی وسایل تاندیش به کار گرفته می‌شوند.

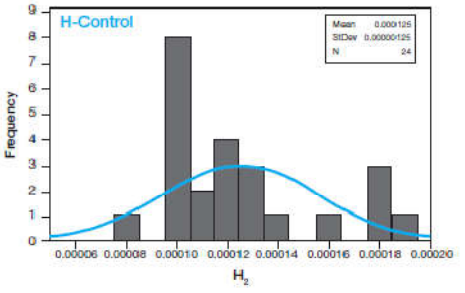
با استفاده از این شیوه‌ها در کلیه مراحل فرآیند، اکسیژن کل موجود در نمونه پین‌ها از قالب می‌تواند زیر 20ppm باشد که این یک کلاس جهانی برای فولادهای فرآوری‌شده با کلسیم است. در **شکل12** مثالی آورده شده، که تغییرات اکسیژن کل در آخرین ذوب یک توالی ریخته‌گری (سیکوئنس) از گرید API را نشان می‌دهد. آنالیز خودکار آخال نیز با استفاده از ASCAT [6] بر روی نمونه‌های شکلاتی شکل برداشته شده از قالب با 100 تن فولاد باقیمانده در پاتیل از همین ذوب انجام شد.



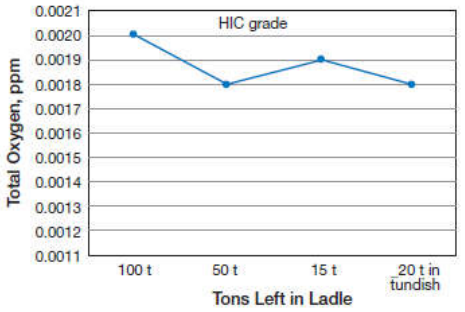
شکل 9– تأثیر زمان گاز زدائی و H اولیه بر حذف H.



شکل 10– زمان تخلیه، قطر مجرای تخلیه و H نهایی.



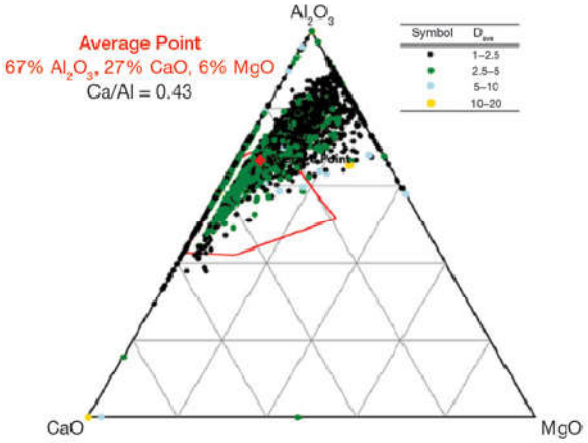
شکل 11– Hppm اندازه گیری شده با هیدریس در تاندیش.



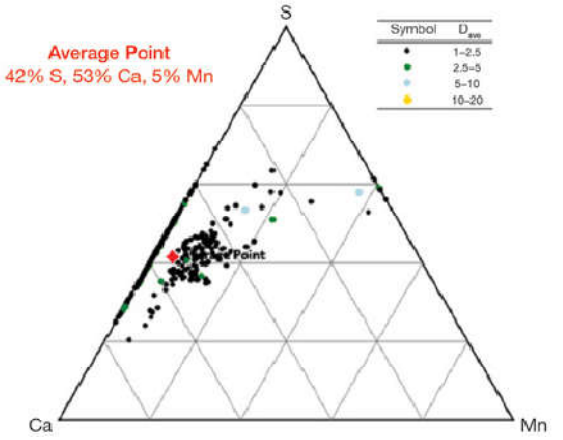
شکل 12– اکسیژن کل در پین نمونه از قالب.

شکل13 نمودار سه تائی $CaO\text{-}MgO\text{-}Al_2O_3$ آخال‌های اکسیدی با میانگین ترکیب شیمیائی نشان داده شده در گوشه بالا سمت چپ و الماس قرمز در نمودار سه تائی می‌باشد، که در داخل محدوده مایع است که توسط خط قرمز احاطه شده است. لازم به ذکر است که نقطه قرمز میانگین تمام آخال‌ها است و آخال‌ها در محدوده اندازه از 2.5 تا 5mm (نقاط سبز) به شدت در داخل خط

قرمز متمرکز شده‌اند. این نشان می‌دهد که اکثر آخال‌ها در این محدوده اندازه، مایع هستند به هدف فرآوری با کلسیم رسیده‌اند. **شکل14** نمودار سه تائی Ca-Mn-S آخال‌های سولفیدی را نشان می‌دهد. سولفیدها تقریباً همه CaS هستند، آنها نیز به هدف اصلاح آخال رسیده‌اند. تمیزی فولاد در فولاد مذاب تنها قدم اول است، در حالی که تجمع آخال‌ها/حباب‌های Ar در اسلب در حالت ریخته‌گری‌شده برای فولادهای API به همان اندازه مهم است. از این رو، کنترل جریان قالب از طریق سیستم کنترل جریان بهینه و شیوه‌های ریخته‌گری به کلید بهبود وضعیت بدون همزنی الکترومغناطیسی قالب (EMS) در این کارخانه تبدیل می‌شوند.



شکل 13– آنالیز آخال ASCAT در اکسیدها.



شکل 14– آنالیز آخال ASCAT در سولفیدها.

نحوه دستیابی به بهترین کیفیت خط مرکزی اسلب‌ها در حالت ریخته‌گری‌شده – بندهای DSR با کنترل خنک‌کننده ثانویه بهبودیافته برای دستگاه ریخته‌گری پیوسته شماره 2 ترکیب می شوند، که در نتیجه میزان صحیح کاهش ضخامت را در لحظه مناسب نقطه انجماد نهایی اسلب بسته به سرعت ریخته‌گری و فوق‌گداز اعمال می‌کند. این نه تنها امکان تخلخل خط مرکزی را کاهش می‌دهد، بلکه همچنین جدایش خط مرکزی و نیز رسوبات اندازه بزرگ همانند TiN، Nb (CN) و MnS را نیز تقلیل می‌دهد.

گرچه DSR می تواند از خط مرکزی اسلب با تغییرات سرعت مراقبت کند، اما هنوز هم ریخته‌گری اسلب ها با سرعت ثابت با فوق‌گداز نزدیک به ثابت مطلوب است. این امر نیاز به هماهنگی عالی بین کلیه مراحل فرآیند از واحدهای DRI گرفته تا دستگاه ریخته‌گری پیوسته و یک برنامه زمان‌بندی خوب کارگاه و سیستم مدیریت پاتیل دارد. با این تلاش‌های ترکیبی، می‌توان کیفیت خط مرکزی فولادهای API را تضمین کرد. در **جدول1** نمونه‌ای از کیفیت داخلی بدست آمده در اسلب تولید شده پس از ماکرو اچ کردن الکترولیتی نشان داده شده است، در حالی که **شکل15** مقادیر آماری بر اساس رتبه‌بندی خط مرکزی مانسمان–دماگ در نمونه‌های طولی یک گرید ویژه API را نشان می‌دهد.

خنک‌کاری و جابجایی آرام اسلب

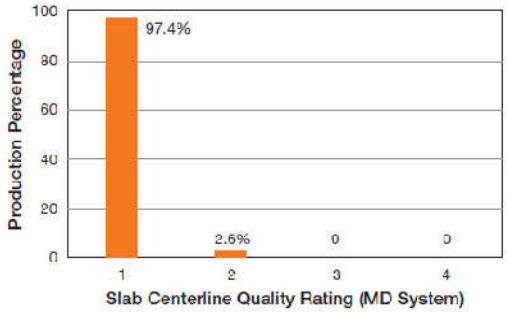
یکدستی اسلب‌ها باید به اندازه کافی قوی باشد تا امکان قرار گرفتن بار سنگین بر اسلب زیر پشته و انتقال مسافت زیاد تا رسیدن به مشتریان، علاوه بر ظاهر اسلب‌ها از جمله صافی، شکل و ابعاد فراهم شود. مسائلی از قبیل ترک خوردن سطحی، ترک خوردن داخلی، سلامت خط مرکزی و ابعاد اسلب را می‌توان با بهینه‌سازی شیوه‌های ریخته‌گری و خنک‌کاری قالب در دستگاه ریخته‌گری پیوسته مورد رسیدگی قرار داد. اما، با طرح‌های آلیاژی جدید برای کاربردهای بسیار دشوار، برخی از فولادهای API پس از ریخته-گری، مستعدتر به ترک می‌شوند. بنابراین، یک برنامه خنک‌کاری آرام اسلب توسعه داده شد که شامل خنک‌کاری پشته‌ای اسلب و خنک‌کاری جعبه‌ای اسلب برای فراهم آوردن امکان خنک‌کاری یکنواخت تر برای کاهش تنش حرارتی و تنش باقیمانده می‌باشد.

جدول 1- کیفیت داخلی اسلب های تولید شده.

Slab	Central segregation	Internal cracks	Side cracks	Central cracks	Pointform inclusions	Cloud inclusions
1710830302-1	1	1	1	1	1	1
1710830302-2	1	1	1	1	1	1
1710830302-3	1	1	1	1	1	1
1710830302-4	1	1	1	1	1	1
1710830302-5	1	1	1	1	1	1
1710830302-6	1	1	1	1	1	1
1710830302-7	1	1	1	1	1	1
1710830302-8	1	1	1	1	1	1

انواعی ترکیب تعداد اسلب در هر پشته، ضخامت جعبه عایق، زمان انباشت و خواص ریخته‌گری و غیره، توسط ترموکوپل‌ها برای شناخت رفتارهای خنک‌کاری اسلب گریدهای مختلف فولاد مورد پایش قرار گرفتند. این مطالعه به توسعه روش‌های خنک-کاری آهسته بهینه‌سازی شده برای سرعت بخشیدن به خنک‌کاری آهسته بدون به مخاطه انداختن یکدستی اسلب به منظور کاهش موجودی و بهبود لجستیک کمک کرد.

پس از خنک‌کاری آرام، جابجائی و حمل اسلب‌ها بسیار مهم می‌شود. در این کارخانه، یک روش انجام‌پذیر توسعه داده شد که شامل حمل با کامیون، جابجایی با جرثقیل، حمل با کشتی کوچک اسلب ها در نقاط مختلف انتقال برای حمل و بارگیری آرام اسلب‌ها برای کاهش هرگونه خسارت بالقوه به هر اسلب در پشته اسلب می‌باشد. به این ترتیب، تمام اسلب‌ها می‌توانند به بهترین شکل برای نورد به دست مشتریان برسند.



شکل 15- هیستوگرام رتبه‌بندی خط مرکزی براساس استاندارد اچ طولی مانسمان-دماگ.

نتیجه‌گیری

فولادهای API و AHSS نیاز به درصد بسیار کمی P، S، N و H و همچنین فولاد تمیز برای اندازه، تعداد و اصلاح صحیح آخال دارند. استفاده از 100 درصد DRI در عملیات EAF مزیت بسیار مهمی برای کارخانه آرسلورمیتال لازارو کاردناس برای تولید موفقیت‌آمیز این فولادها همراه با مقدار بسیار کم عناصر ناخواسته Cu+Ni+Cr+Sn به میزان کمتر از 0.05 درصد بوده است. اما، تلاش‌های بسیاری برای این مسیر تولید منحصر به فرد از نظر سرمایه‌گذاری تجهیزات و بهبودهای فنی/شیوه عمل متناسب‌سازی شده است. مسیر فولادسازی از طریق EAF+LMF+RH با دانش فنی ویژه میزان بسیار کم S، P، N، H و همچنین عناصر باقیمانده کم را که به طور معمول برای عملیات EAF با شارژ قراضه بسیار بالاست تضمین می‌کند. در ریخته‌گری پیوسته، بندهای DSR همراه با کنترل خنک‌کاری ثانویه بهبود یافته برای دستگاه ریخته‌گری پیوسته شماره 2 مقدار صحیح کاهش ضخامت را در لحظه مناسب نقطه انجماد نهایی اسلب، بسته به سرعت

ریخته‌گری و فوق گداز اعمال می‌کند. این نه تنها امکان تخلخل خط مرکزی را کاهش می‌دهد، بلکه همچنین جدایش خط مرکزی را نیز کاهش می‌دهد به طوری که رسوبات اندازه بزرگ همانند TiN، Nb (CN) و MnS را بتوان به حداقل رساند.

جزئیات نحوه دستیابی به بهترین کیفیت فولادها در این مقاله به طور خلاصه آورده شده است. بدیهی است که باید یک دید کلی استراتژیک در سروکار با هر عنصر ذکر شده در هر مرحله از فرآیند با در نظر گرفتن کل عملیات کارگاه و کنترل هزینه با دقت لحاظ شود. بعضی اوقات، شرایطی که مساعد حذف یک عنصر است، ممکن است همیشه هم برای عناصر دیگر خوب نباشد. یک جنبه کلیدی قبل از دستور تولید دادن، انتخاب مناسب و موازنه مواد اولیه در هر مرحله از فرآیند است. سپس باید محدودیت زمان‌بندی و کنترل دمای هر مرحله در پیش‌بینی مشکلات غیرمنتظره بر اساس شرایط عملیات روزانه با دقت برنامه‌ریزی شود. تعمیرونگهداری کلیه تجهیزات دخیل در اتمام به موقع هر مرحله بسیار مهم است.

تمامی مراقبت‌ها و دانش فنی بیان شده در بالا، این کارخانه را قادر به دستیابی موفقیت‌آمیز به تولید اسلب‌های فولادی API می‌سازد که دشوارترین الزامات مشتریان آنرا تامین می‌کنند.

منابع

1. “ArcelorMittal Lázaro Cárdenas Orders Hot Strip Mill and Hot Skinpass Mill From Primetals Technologies,” press release, Primetals Technologies.
2. R. Lule, F. Lopez, J. Espinoza, R. Torres and R.D. Morales, “The Production of Steels Applying 100% DRI for Nitrogen Removal the
Experience of ArcelorMittal Lázaro Cárdenas Flat Carbon,” AISTech 2009 Conference Proceedings, Vol. I, 2009, p. 467.
3. L.E. Collins, F. Hamad, M. Kostic and T. Lawrence, “Production of High-Strength Line Pipe Steel for Steckel Mill Rolling and Spiral Pipe
Forming,” Frontier Pipe Research Unit, 2013, p. 17.
4. Y. Jing-bo, Y. Shu-Feng, G. Xiang-Zhou and L. Jing, “Sulfur Control in Ultra-Low Sulfur Steel Refined by Ladle Furnace-Vacuum Degassing,” Metallurgical and Mining Industry, 2014, p. 24.
5. R. Lule, F. Lopez, D. Kundrat and A. Wyatt, “Increased Productivity of API-X Steel Grades at ArcelorMittal Flat Carbon Products by Reducing Sources of Hydrogen During Melting and Refining,” Iron & Steel Technology, Vol. 11, No. 10, 2014, p. 93.
6. S. Story, S. Smith, R. Fruehan, G. Casuccio, M. Potter and T. Lersch, “Application of Rapid Inclusion Identification and Analysis,” AISTech 2004 Conference Proceedings, Vol. I, 2005, pp. 41–49.