

مواد کربن دهنده مختلف

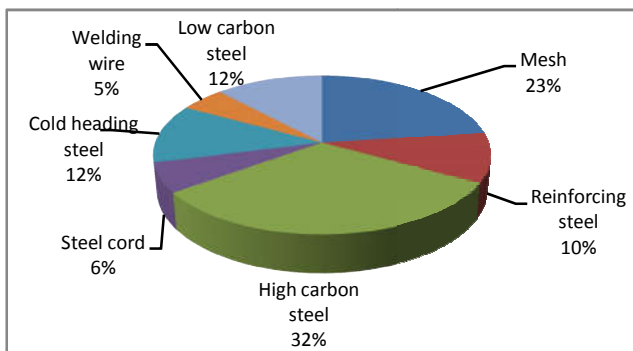
برای تولید فولادهای پرکربن با کوره قوس الکتریکی¹

ترجمه: محمدحسین نشاطی

در تولید فولادهای پر کربن با کیفیت بالا برای گریدهای سیم مفتول نوردی، یک ماده کربن دهنده به جریان فولاد مذاب در حال تخلیه از کوره قوس الکتریکی (EAF) اضافه می‌شود. اما، ماده کربن دهنده باید طوری انتخاب گردد تا اطمینان حاصل شود که هیدروژن، نیتروژن و گوگرد جذب شده ذوب پایین است و همچنین نباید تمیزی فولاد را هم کاهش دهد. در آزمایش‌های تولیدی، مقایسه‌ای بین مواد مختلف کربن دهنده به صورت کک لیگنیت ریز، کک سوزنی و الکتروگرافیت انجام شد. مشخص شد که کک لیگنیت ریز، ارزانه‌ترین گزینه، نتایجی معادل با نتایج حاصل از دو ماده کربن دهنده دیگر ارائه می‌دهد.

برنامه تولید کارخانه IHSW²

کارخانه IHSW یک مینی میل یکپارچه شده شامل تنها کارخانه تولید آهن اسفنجی در اروپای غربی می‌باشد. تولید آهن اسفنجی در سال 1997 بیش از 470 هزار تن بود. این مواد شارژ پایه تولید فولادهای با مقدار کم گازهای محلول و عناصر ناچیز همراه (trace elements) در کوره قوس الکتریکی را تشکیل می‌دهند. در این کارخانه با استفاده از مسیر فرآیندی معمول در مینی میل‌ها، فولادهای با کیفیت بالا بطور گسترده‌ای تولید می‌شوند. شکل 1 ترکیب محصولات این کارخانه فولاد را نشان می‌دهد. فولادهای



شکل 1- توزیع درصد تولید سیم مفتول کارخانه IHSW از ژانویه تا جون 1997.

پرکربن با سهم 38 درصد، یکی از گروه‌های اصلی تولیدات شرکت را تشکیل می‌دهند. این فولادها، پس از فرآیند نورد و کشش، برای تولید، بطور مثال، فنرها، سیم کابل‌های/طناب-های فولادی، میله تقویت بتن و سیم فولادی لاستیک خودرو (6 درصد) مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این رو، انتخاب یک ماده کربن دهنده مناسب از لحاظ فنی و اقتصادی بسیار مهم است.

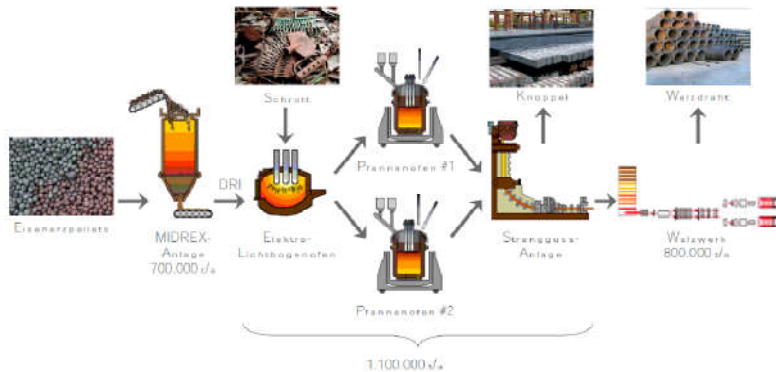
تکنولوژی تولید در کارخانه IHSW

تولید سیم مفتول نوردی از آهن قراضه و آهن اسفنجی در این کارخانه طبق مسیر فرآیند نشان داده شده در شکل 2، یعنی احیای مستقیم - EAF - کوره پاتیلی (LF) - ماشین ریخته‌گری پیوسته بیلت - خط نورد سیم مفتول، انجام می‌شود. برای تولید سیم فولادهای با کیفیت بالا، شارژ فلزی EAF شامل تا 75 درصد آهن اسفنجی با درجه فلزی (Fe_{met}/Fe_{total}) 93 تا 95 درصد و کربن 1.5 تا 2.5 درصد، همراه با آهن قراضه با میزان آلودگی کم می‌باشد. با استفاده از این ترکیب شارژ، کارخانه قادر به تولید فولاد با کمترین درصد عناصر ناچیز همراه می‌باشد که فقط از طریق مسیر معمول کوره بلند و کنورتر قابل دستیابی هستند. علاوه بر این، مقدار نیتروژن و هیدروژن قبل از تخلیه EAF نیز در همان میزان پایین مشابه فرآیند کنورتر می‌باشد.

¹ - Different carburizing agents in the EAF production of high-carbon steel grades, MPT International 4/1998.

² - Ispat Hamburger Stahlwerke

پس از طی زمان ذوب تا ذوب تقریباً 60 دقیقه، 120 تن فولاد خام از EAF در دمای 1620°C و با مقدار اکسیژن 800ppm به پاتیل ریخته‌گری تخلیه می‌شود. با تخلیه فولاد به پاتیل، سرباره‌سازها، مواد آلیاژی و مواد کربن‌دهنده به جریان تخلیه اضافه می‌شوند بطوری که یک خوراک به درستی اندازه‌گیری شده همراه با اختلاط خوب مطابق با حد پایین مشخصات آنالیز فولاد مورد نظر حاصل می‌شود.



شکل 2- خط تولید کارخانه IHSW

در کوره پاتیلی دما و آنالیز شیمیایی هدف مورد نیاز فولاد در حالی که ذوب با همزنی با گاز آرگون همگن می‌شود بدست می‌آید. فرآیند همزنی، تحت سرباره احیائی متشکل از آهک-سیلیکات-فلورسپار، که همچنین میزان لازم گوگردزائی را نیز تامین می‌کند، انجام می‌گیرد. اکسیژن‌زدائی کنترل شده نفوذی (دیفیوژنی) به دستیابی به مقادیر مشخص شده اکسیژن محلول در فولاد منتج می‌گردد.

این به نوبه خود تضمین می‌کند که ترکیب، اندازه و فراوانی آخال‌ها، فرآوری بعدی سیم مفتول را تسهیل می‌کند. عملیات پایانی در کوره پاتیلی افزودن کلسیم با سیم مغزه‌دار CaSi، آمادگی برای قابلیت ریخته‌گری از طریق نازل‌های کنترل جریان تاندیش را تضمین می‌کند.

فولاد در یک ماشین ریخته‌گری پیوسته شش رشته برای تولید بیلت 120mm ریخته‌گری می‌شود. فولاد از اکسید شدن مجدد توسط پوشش کامل جریان مذاب بین پاتیل و تاندیش توسط یک لوله پوشش‌دهنده (shroud tube)، و بین تاندیش و قالب با یک لوله پوشش محافظ فانوسی (belows shroud) با جریان داخلی گاز بی اثر محافظت می‌شود.

همزنی الکترومغناطیسی فولاد در قالب همراه با خنک‌سازی شدید رشته ریخته‌گری در منطقه خنک‌کننده ثانویه میزان جدایش مرکزی را تا میزان بسیار کمی کاهش می‌دهد. برای نوردکاری بعدی، بیلت‌ها در کوره گامی 150 تن مجدداً گرم شده و به دنبال آن در یک خط نورد دو رشته با 25 قفسه به سیم مفتول‌های با قطر بین 5.5 و 16 mm نورد می‌شوند.

مواد کربن‌دهنده

هدف این پروژه تحقیقاتی، محدود به بررسی 3 ماده کربن‌دهنده شامل کک لیگنیت ریز، کک سوزنی و الکتروگرافیت بود، زیرا با توجه به کاربردهای مورد نظر، سایر مواد کربن‌دهنده موجود در بازار برای تامین نیازهای کیفی محصولاتی همانند سیم تاپر فولادی پر استحکام (HT) ناکارآمد لحاظ شدند. برای مثال، کربن‌دهی با کک متالورژیکی به اصطلاح خاموش شده خشک، به نیتروژن بالای فولاد در حد غیرقابل قبول برای چنین

جدول 1- ترکیب شیمیایی مواد کربن‌دهنده مورد بررسی و خاکستر آنها.			
اجزا	کک لیگنیت ریز %	کک سوزنی %	الکتروگرافیت %
C-fix	86.78	99.44	99.25
رطوبت	0.70	0.00	0.10
خاکستر	9.32	0.05	0.21
مواد فرار	3.20	0.51	0.44
H	0.43	0.23	0.12
N (pyrolytic)	0.40	0.14	0.12
N (Kjeldahl)	0.39	< 0.05	0.05
S total	0.50	0.09	0.03
S ash-bonded	0.48	0.00	0.01
S volatile	0.02	0.09	0.02
واکنش پذیری Nml/(g.s)	2.18	0.04	0.04
خاکستر			
SiO ₂	3.43	45.10	26.10
Fe ₂ O ₃	17.40	12.40	19.90
Al ₂ O ₃	5.00	13.70	13.30
CaO	39.30	7.06	18.30
MgO	17.10	1.65	0.51
سایر	17.77	20.09	21.89
بازرسیته B ₄	6.69	0.15	0.48

کاربردهائی منجر می‌شود. ترکیب شیمیایی سه ماده کربن‌دهی بررسی شده و نیز ترکیب خاکستر آنها در **جدول 1** خلاصه شده است.

کک سوزنی یک محصول جانبی فرآیند تقطیر نفت خام است. ویژگی آن محتوی کربن تثبیت شده بالای کربن آن با نیتروژن، گوگرد و خاکستر کم است. ضریب انبساط حرارتی کم آن مخصوصاً برای تولید الکتروگرافیت (الکتروگرافیتی) مناسب است. **الکتروگرافیت** یا گرافیت مصنوعی می‌تواند از منابع مختلف کربن، مثلاً گرافیت طبیعی یا کک نفتی که در دمای 2700°C گرافیت شده‌اند، ساخته شود. اجزای فرار و همچنین هیدروژن آن در این فرآیند به حد عالی پایین می‌آید. الکتروگرافیت دارای هدایت حرارتی و الکتریکی بالا و همچنین استحکام خمشی بالا است. گرافیت به عنوان یک ماده کربن‌دهنده به صورت یک محصول جانبی فرآیند ساخت الکتروگرافیت تولید می‌شود.

کک لیگنیت ریز یا کک ریز بستر کوره از لیگنیت در کوره کک‌سازی به اصطلاح گردان (روتاری) تولید می‌شود. این کوره کنسانتره ریزدانه، خیلی متخلخلی از کربن با خواص مشابه با کربن فعال تولید می‌کند. ترکیب خاکستر نسبتاً بالای آن، از نوع بازی می‌باشد که برعکس دو ماده دیگر در این مقایسه است. منطبق با آن کربن تثبیت شده کمی دارد. نیتروژن، هیدروژن و گوگرد و همچنین مواد فرار آن نیز نسبتاً بالا است. اما، کک لیگنیت ریز مزیت واکنش‌پذیری بالا (ثابت سرعت واکنش بودووارد) را که به سرعت بالای انحلال منتج می‌شود ارائه می‌دهد. کک لیگنیت ریز بسیار ارزان نیز هست.

روش تحقیق

10 ذوب یک گرید فولاد پر استحکام (HT) سیم تاپر برای هر ماده کربن‌دهنده تولید شد. **جدول 2** ترکیب شیمیایی نهایی معمول این گرید فولاد را نشان می‌دهد.

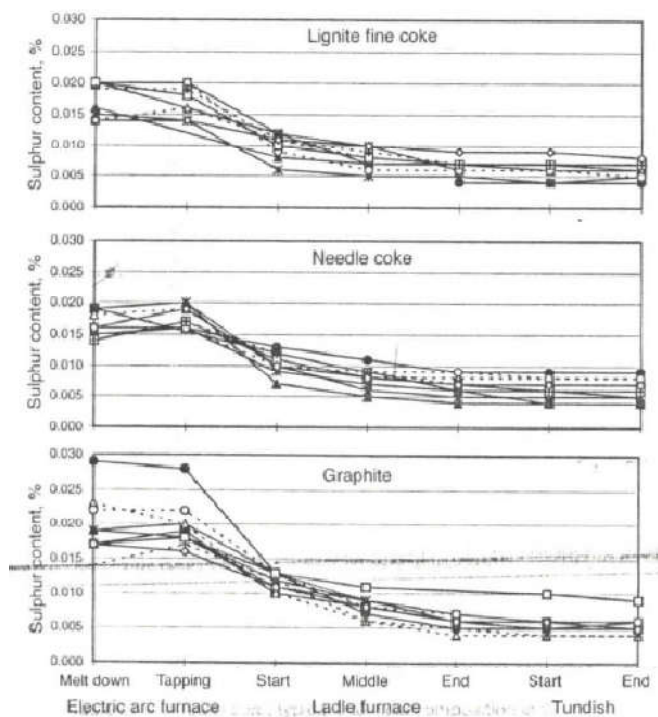
جدول 2- سیم تاپر فولادی پر استحکام (HT)، ترکیب شیمیایی معمول بر حسب درصد.												
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	V	Mo	Sn	Al	N
0.82	0.20	0.52	0.004	0.006	0.04	0.02	0.03	0.001	0.005	0.003	0.0015	0.0032

در تمام ذوب‌های مورد آزمایش، تغییرات کربن، گوگرد و نیتروژن از EAF تا متالورژی ثانویه (فرآوری کوره پاتیلی) و تا فرآیند ریخته‌گری ثبت شد.

آنالیز اولیه هیدروژن تا زمانی که فولاد در پاتیل ریخته می‌شد قابل انجام نبود، زیرا عمق سرباره در EAF انجام یک آنالیز با سیستم لنس غوطه‌ور را غیرممکن می‌سازد. بنابراین برای انجام مقایسه، میزان هیدروژن دسته‌ای از ذوب‌های فولاد بدون افزودن مواد کربن‌دهنده و آلیاژی، بلافاصله پس از تخلیه کوره در پاتیل ریخته‌گری اندازه‌گیری شد.

کربن و گوگرد با استفاده از دستگاه Leco (نوع CS 225) با جذب اشعه مادون قرمز مشخص شد، میزان نیتروژن نیز با روش مشابه جذب اشعه مادون قرمز با دستگاه Leybold-Hraeus (نوع NOA 2003) تعیین شد. هیدروژن فولاد مذاب با استفاده از سیستم لنس غوطه‌ور "Hydris" با پشتیبانی اندازه‌گیری هدایت حرارتی تعیین شد.

بیلت‌های تمام ذوب‌ها به قطر 5.5mm نورد شدند. تمیزی میکروسکوپی از ریزمقطع طولی میله مطابق با استاندارد بازرسی شماره 1570 موسسه آهن و فولاد آلمان (Stahl-Eisen-Prufblan 1570) تعیین شد. علاوه بر این، تمیزی تمام ذوب‌ها، با استفاده از فرآیند توسعه یافته توسط یک سازنده سیم تاپر فولادی، بطور دقیق مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب شیمیایی، اندازه آخال‌ها و همچنین فراوانی آخال‌ها در ارتباط با منطقه مورد بررسی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به میکروپروب تعیین شد. آخال‌ها، که اساساً از CaO ، SiO_2 ، Al_2O_3 ، MgO و MnO تشکیل می‌شوند، باید به آسانی قابل تغییر شکل باشند. فراوانی آخال‌ها باید زیر 800 آخال ($\geq 1\mu\text{m}$) در هر cm^2 باشد، در حالی که آخال منفرد باید از نظر اندازه کمتر از $10\mu\text{m}$ و میانگین آنها هم زیر $5\mu\text{m}$ باشد.



شکل 3- مقدار گوگرد فولاد در کوره، پاتیل و تاندیش.

خواص مکانیکی به صورت استحکام کششی و کاهش سطح مقطع پس از شکست سیم مفتول نیز مورد آزمایش قرار گرفت. پس از آزمایش کشش، منطقه شکست به صورت چشمی برای مشاهده ترک هیدروژن مورد بررسی قرار گرفت.

تجربه عملیاتی

در هنگام استفاده از کک لیگنیت ریز برای کربن دهی فولاد در طی تخلیه، تولید قابل توجه گاز همراه با واکنش جوشش ذوب و سرباره پفکی به علت واکنش پذیری بالای این مواد و اجزای فرار زیاد این مواد مشاهده می شود. اما، از "بیش از حد پفکی شدن" با اطمینان از حداقل ورود سرباره در جریان تخلیه (پاشنه مذاب 15 تن، برگشت سریع کوره در پایان تخلیه)، اجتناب می شود.

در هنگام انجام فرآیند کربن دهی با کک سوزنی و گرافیت، چنین واکنش جوششی، همراه با تولید شدید گاز و همچنین سرباره پفکی، به علت واکنش پذیری کم و

محتوای کم اجزای فرار آنها تماماً وجود ندارد. با وجود معایب آشکاری که در ابتدا با کک لیگنیت ریز همراه بود سایر مزایای مثبت زیر را دارد:

- در طی تخلیه، ذوب بطور خود به خود همزنی می شود. این امر منتج به همگن شدن اولیه در توزیع نه تنها کربن بلکه همچنین تمام عناصر آلیاژی دیگر اضافه شده در طی تخلیه نیز می شود، بنابراین تسهیل کننده تنظیم دقیق موثر آنالیز فولاد در طی متالورژی ثانویه در کوره پاتیلی است. واکنش فولاد مذاب با سرباره سازهای اضافه شده در طی عملیات تخلیه نیز تسریع می شود.

- گاز تولید شده صرف محافظت از جریان تخلیه و سطح فولاد مذاب در پاتیل ریخته گری در برابر ورود و جذب هیدروژن، نیتروژن و اکسیژن از اتمسفر می شود.

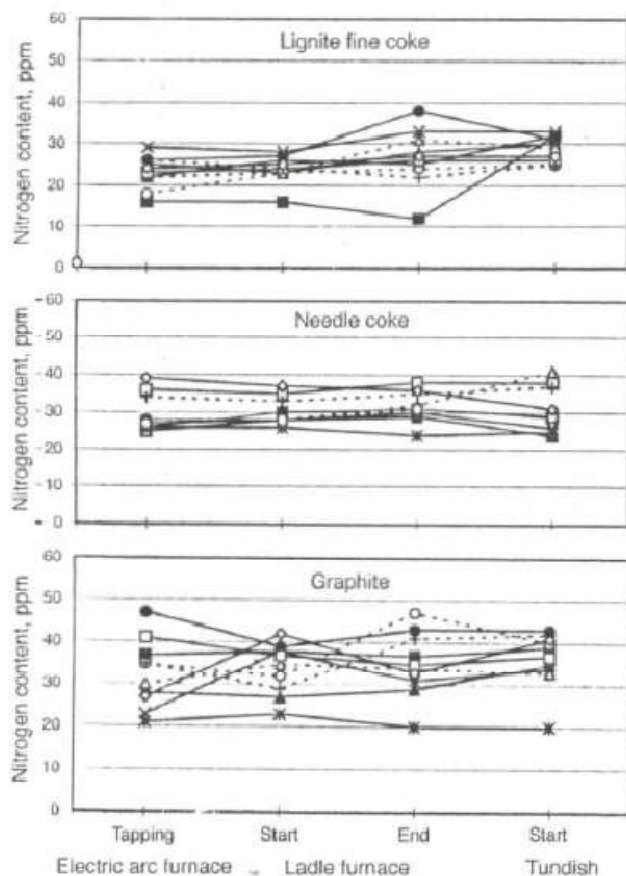
- فرآیند جوشش درون فولاد مذاب، اثر همزنی و تمیز کردن فولاد در طی فرآیند تخلیه را دارد.

نتایج تحقیق

بهره دهی کربن. بهره دهی کربن (بین آخرین نمونه از کوره و اولین نمونه از پاتیل فولاد و در ارتباط با کربن تثبیت شده) در مورد کک لیگنیت ریز در منطقه 91 درصد قرار گرفت، در حالی که مقدار متناظر برای دو کربن دهنده دیگر تقریباً 94 درصد بود. انحراف استاندارد در منطقه 5 تا 7 درصد قابل مقایسه است. اما، با توجه به اثر همزنی حاصله بیان شده فوق، مقدار انحراف استاندارد بدست آمده با کک لیگنیت ریز، کمی مطلوب تر است.

تغییرات گوگرد. شکل 3 تغییرات گوگرد را از EAF تا تاندیش نشان می دهد. با شروع از میزان گوگرد 0.015 تا 0.030 درصد در آخرین نمونه گرفته شده بطور مستقیم قبل از تخلیه از EAF، مقدار در مورد تمام مواد کربن دهنده به سطح 0.005 تا 0.015 درصد در شروع مرحله متالورژی ثانویه کاهش یافت. با توجه به عملیات سرباره احیائی استفاده شده در کوره پاتیلی، مقدار گوگرد نمونه نهایی همیشه کمتر از مقدار مشخصه 0.015 درصد است.

تغییرات نیتروژن. شکل 4 تغییرات نیتروژن را از EAF تا تاندیش نشان می‌دهد. با توجه به مقدار بالای آهن اسفنجی شارژ فلزی کوره، مقدار نیتروژن فولاد مذاب قبل از تخلیه معمولاً کمتر از 40ppm می‌باشد. هنگام انجام فرآیند کربن‌دهی با کک لیگنیت ریز، بیشترین مقدار نمونه‌هایی که از پاتیل ریخته‌گری گرفته شده‌اند نیتروژن کمتر از 30ppm است، در حالی که بیشترین مقدار نمونه‌های گرفته شده از تاندیش کمتر از 35ppm



شکل 4- مقدار نیتروژن فولاد در کوره، پاتیل و تاندیش.

نیتروژن است. این قابل توجه است از این جهت که نیتروژن محتوی در کک لیگنیت ریز، 0.4 درصد، بسیار بالاتر از دو ماده کربن‌دهنده دیگر می‌باشد (جدول 1). این "بهره‌دهی نیتروژن" پائین کک لیگنیت ریز در هنگام افزودن به جریان تخلیه قابل نسبت دادن به اثرات جوشش و همزنی ایجاد شده در طی تخلیه تشریح شده در بالا است.

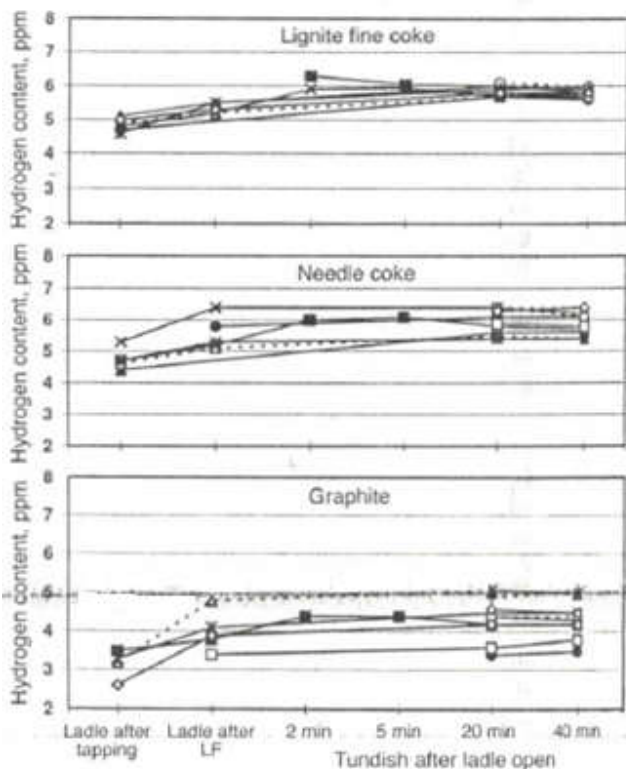
تغییرات هیدروژن. شکل 5 تغییر مقدار هیدروژن فولاد مذاب را برای سه ماده کربن‌دهنده از اولین نمونه برداشته شده از پاتیل بطور مستقیم پس از تخلیه تا تاندیش را نشان می‌دهد.

همانطور که قبلاً ذکر شد، با توجه به مقدار زیاد سرباره دخیل در فرآیند EAF، یک آنالیز با استفاده از سیستم لنس غوطه‌ور زیرسطحی در حالی که فولاد هنوز در کوره باشد قابل انجام نیست. بنابراین، به منظور مقایسه، دسته‌ای از ذوب‌های فولاد که بدون افزودن هر ماده آلیاژی یا کربن‌دهنده تخلیه شده بودند، پس از تخلیه در پاتیل فولاد مورد آنالیز قرار گرفتند. این مقدار مرجع در منطقه 2.5 تا 3ppm هیدروژن قرار دارد.

با در نظر گرفتن مواد آلیاژی و سرباره‌سازها، استفاده از گرافیت به عنوان ماده کربن‌دهنده باعث افزایش مقدار هیدروژن تا 0.3ppm شد.

ذوب‌های کربن‌دهی شده با کک لیگنیت ریز و کک سوزنی مقدار هیدروژن پس از تخلیه تقریباً 5ppm را نشان می‌دهند. این متناظر با جذب تقریباً 1.8ppm هیدروژن از این دو ماده کربن‌دهنده می‌باشد. همانند مورد نیتروژن، این یک نتیجه غیرمنتظره با توجه به ترکیب شیمیایی مواد کربن‌دهنده - و به ویژه مورد کک لیگنیت ریز - می‌باشد همانطور که در جدول 1 نشان داده شده است. تفاوت در "بهره‌دهی هیدروژن" دوباره قابل نسبت دادن به اثرات جوشش و همزنی ایجاد شده توسط کک لیگنیت ریز است. بین اولین نمونه آنالیز برداشته شده از پاتیل و پایان عملیات در کوره پاتیلی، افزایش هیدروژن 0.5 تا 2ppm در مورد تمام ذوب‌ها مشاهده می‌شود. این افزایش در مقدار هیدروژن در طی عملیات کوره پاتیلی اساساً قابل نسبت دادن به افزودن سرباره‌سازها می‌باشد، زیرا مقادیر مواد آلیاژی اضافه شده برای تنظیم ترکیب شیمیایی فولاد تنها در حد ناچیزی است. اکسیژن‌زدائی و گوگردزدائی به کاهش عناصر فعال سطحی اکسیژن و گوگرد منتج می‌شود. این موضوع انتقال جرم هیدروژن از سرباره‌سازها به فولاد مذاب را افزایش می‌دهد.

افزایش هیدروژن دیگری حدود 1ppm بین آخرین اندازه‌گیری در پاتیل و اولین اندازه‌گیری در تاندیش فقط در مورد ذوب‌های مورد استفاده در آغاز یک مجموعه ذوب متوالی (سیکوئنس)/کمپین جدید ریخته‌گری مشاهده می‌شود (نگاه کنید به شکل 5)، و فقط نتیجه رطوبت در نسوز تاندیش است. در هنگام ریخته‌گری اولین ذوب، مقدار هیدروژن در تاندیش به سرعت به حالت پایدار بر می‌گردد. سپس در ذوب‌های بعدی مورد استفاده برای بقیه کمپین ریخته‌گری، مقدار هیدروژن در سطح اندازه‌گیری شده در پاتیل ثابت باقی می‌ماند.



شکل 5- مقدار نیتروژن فولاد در پاتیل و تاندیش از تخلیه تا ریخته‌گری پیوسته.

ذوب‌های کربن‌دهی شده با کک لیگنیت ریز پهنه بسیار باریک هیدروژن زیر 6ppm در تاندیش، قابل قبول برای تولید سیم را نشان می‌دهند. مقادیر مشابه هیدروژن نهایی با ذوب‌های کربن‌دهی شده با کک سوزنی بدست می‌آیند. هیدروژن در تاندیش برای ذوب‌های با گرافیت، بین 3.5 تا 5ppm قرار می‌گیرد.

تمیزی. برای سیم مقتول مورد استفاده به عنوان مواد اولیه برای سیم تایر فولادی، شاخص آخال K1 کمتر از 8 باید تضمین شود. همچنین ضروری است که هرگونه آخال در طی مراحل شکل‌دهی بعدی به آسانی قابل تغییرشکل باشد. بنابراین آخال‌های اکسیدی نوع کرومی (OG) نامطلوب هستند. شاخص آخال هر سه ماده کربن‌دهنده مورد بررسی کاملاً زیر مقادیر مشخص شده است.

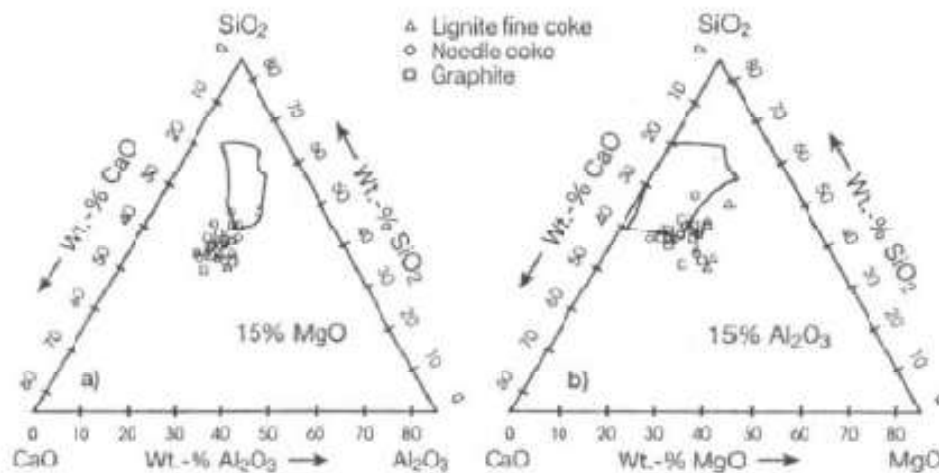
آخال‌های اکسیدی نوع طویل شده (OS) غالب است. اکسیدهای نوع کرومی تنها به ندرت یافت می‌شوند. بنابراین، تأثیر سیستماتیک مواد کربن‌دهنده مختلف بر شاخص آخال، و نیز بر نوع آخال مواجهه شده، معلوم نیست.

تغییرشکل‌پذیری آخال‌های غیرفلزی در طی فرآیندهای نورد و کشش با نقطه نرم شدن آنها و از این رو بر اساس ترکیب شیمیایی آنها تعیین می‌شود.

ادامه پیشرفت‌ها در متالورژی ثانویه، متالورژی تاندیش و تکنولوژی پوشش جریان مذاب، به کاهش شدید ایجاد آخال نوع درشت (ماکرو) کمک کرده‌اند که مانع از فرآوری اضافی می‌شوند. بنابراین تحقیقات اخیر بر امکانات اصلاح محصولات اکسیژن-زدائی ثانویه یا آخال‌های درونزاد متمرکز شده است.

تکنولوژی فرآیند متالورژی تشریح شده بالا که توسط کارخانه IHSW مورد استفاده قرار می‌گیرد به آخال‌های درونزاد ($<8\mu\text{m}$) منتج می‌شود که شامل بیش از 90 درصد از اجزای اصلی CaO ، MgO ، Al_2O_3 و SiO_2 می‌باشد. بنابراین، اثر و خواص آنها می‌تواند بر اساس سیستم‌های چهارتائی $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ، با 15 درصد MgO و $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO}$ با 15 درصد Al_2O_3 توصیف شود.

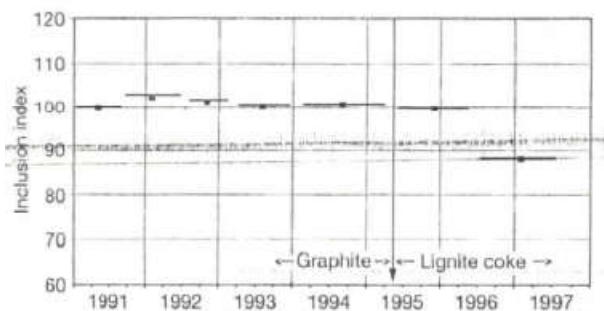
دمای بیلت در طی نوردکاری بیش از 1200°C است. بنابراین، **شکل‌های 6a و 6b** سیستم‌های چهارتائی ذکر شده در بالا برای دمای 1300°C را برای نشان دادن منطقه فاز اکسید مایع همگن شده ارائه می‌دهند. آخال‌های مطلوب نوع OS در این منطقه یا - در حضور دیگر اجزای با نقطه ذوب پایین - حداقل در مجاورت آن قرار می‌گیرند.



شکل 6- ترکیب شیمیایی آخال های درونزاد در سیم مفتول قطر 5.5mm با استفاده از مواد مختلف کربن دهنده.

از ترکیب شیمیایی آخال‌ها در سیم مفتول، آنالیز شده با استفاده از میکروپروپ، یک مقدار متوسط برای هر ذوب محاسبه شد، به مقیاس 100 درصد تبدیل و به سیستم‌های سرباره نشان داده شده در شکل‌های 6a و 6b وارد شد. تمام آخال‌ها در یک منطقه واقع در داخل یا در نزدیکی فاز اکسید مایع در دمای 1300°C قرار دارند و از این رو به آسانی قابل تغییر شکل هستند. هیچ اثر واضح اعمال شده بر ترکیب آخال‌ها توسط ماده کربن‌دهنده انتخاب شده وجود ندارد.

شکل 7 تحول شاخص آخال فولاد پراستحکام (HT) سیم



شکل 7- شاخص آخال سیم مفتول قطر 5.5mm برای سیم تاپر فولادی HT (1991 = 100%); ارزیابی یک تولیدکننده سیم تاپر.

تایر برای سال‌های گذشته را به صورت مشخص شده و ارزیابی شده توسط کارخانه کشش سیم مفتول نشان می‌دهد. بر اساس این تجزیه و تحلیل، تغییر ماده کربن‌دهنده از الکتروگرافیت به کک لیگنیت ریز در ماه مه 1995 تاثیر قابل توجهی بر شاخص آخال نداشته است.

سایر خواص سیم مفتول. آزمایش تمام نمونه‌های مفتول برای تعیین استحکام کششی و کاهش سطح مقطع نتایج استاندارد به ترتیب حدود 1170 N/mm² و 42 درصد ایجاد کرد.

بازرسی چشمی سطوح شکست پس از آزمایش کشش، عدم وجود ترک‌های هیدروژنی را نشان داد. همه مفتول‌ها بعداً در کارخانه کشش برای تولید سیم تاپر بدون مشکلات فرآوری شدند.