



## سمپوزیوم فولاد ۹۳

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۳  
یزد، مجتمع معدنی و صنعتی اردکان



انجمن آهن و فولاد ایران

### بررسی تأثیر فرآیند اکسیژن زدایی مذاب فولاد با آلومینیوم بر تمیزی محصول

سعید صابری<sup>۱</sup>، فاطمه جعفری، حسین کاردی، محمد علی جعفرزاده، سید علی موسوی  
واحد تحقیق و توسعه شرکت فولاد آلیاژی ایران

#### چکیده

تولید فولاد تمیز از دغدغه‌های همیشگی تولیدکنندگان فولادهای آلیاژی می‌باشد. فرآیندهای اکسیژن زدایی با عناصر مختلف منجر به تولید ناخالصی‌هایی می‌گردد که هر کدام به نوعی باعث افت خواص مکانیکی فولاد می‌شوند. در این میان، فولادهایی که نیاز به اکسیژن زدایی با آلومینیوم دارند و یا این عنصر در آنالیز آنها موجود است به دلیل حضور ناخالصی‌های آلومینایی بیشتر در معرض آسیب‌های مکانیکی قرار دارند. از این رو، مقدار و نیز فرآیند اضافه کردن آلومینیوم به مذاب تأثیر قابل توجهی بر کیفیت فولاد خواهد داشت. در این پژوهش، با در نظر گرفتن تمام پارامترهای اثرگذار در اکسیژن زدایی فولاد، مقدار دقیق آلومینیوم مورد نیاز در هنگام تخلیه از کوره اضافه شد و رفتار آلومینیوم و اکسیژن مذاب تا هنگام ریخته‌گری پیگیری شد. سپس نتایج به دست آمده با ذوب‌هایی که به صورت جزئی در هنگام تخلیه از کوره اکسیژن زدایی می‌شدند مقایسه گردید. نتایج حاکی از بهبود اکسیژن زدایی، کاهش ناخالصی‌ها و نیز قیمت آلومینیوم مصرفی ذوب‌های کشته شده کامل با آلومینیوم در تخلیه از کوره بود.

**کلمات کلیدی:** اکسیژن زدایی، آلومینیوم، اکسیژن محلول، ناخالصی، کوره قوس الکتریکی.

<sup>1</sup> S.Saberifar@iasco.ir

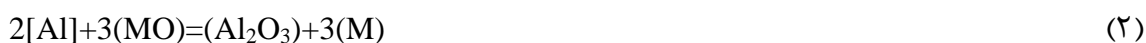
در سال‌های اخیر با افزایش تقاضا برای فولاد تمیز، فولادسازان را بر آن داشته تا کنترل دقیق‌تری بر میزان اکسیژن و عناصر ناخالصی محصولات خود داشته باشند. در این راستا، اکسیژن‌زدایی سریع و دقیق فولاد به یک مقدار اکسیژن معین، یک گام حساس در تولید فولادهای آلیاژی می‌باشد. در حقیقت هدف از اکسیژن‌زدایی کاهش اکسیژن محلول فولاد به منظور جلوگیری از تشکیل عناصر ناخالصی، حذف حفرات گازی، گوگردزدایی و حتی کنترل اندازه دانه فولاد می‌باشد. این عمل با افزودن عناصری به مذاب که تمایل بیشتری برای واکنش با اکسیژن نسبت به آهن دارند (کلسیم، منیزیم، آلومینیوم، سیلیسیم، منگنز، کربن و...) که از آن به عنوان اکسیژن‌زدایی رسوبی نام برده می‌شود و یا اختلاط و واکنش فولاد حاوی اکسیژن با سرباره‌ای که ظرفیت FeO بالایی دارد که به آن اکسیژن‌زدایی نفوذی گفته می‌شود انجام می‌گردد. آلومینیوم در فولادسازی یک عنصر آلیاژی و همچنین یک اکسیژن‌زدای قوی است. آلومینیوم به عنوان یک عنصر آلیاژی جهت افزایش تافنس فولاد به وسیله کنترل اندازه دانه محصول نهایی استفاده می‌شود. برای دستیابی به هر دو هدف مورد نظر بایستی یک مقدار بهینه برای آلومینیوم تعریف شود. به عنوان اکسیژن‌زدا، استفاده از آلومینیوم اضافی نه تنها باعث افزایش قیمت فولاد می‌شود بلکه تمیزی فولاد نیز به دلیل تشکیل آخال غیر فلزی به شدت آسیب می‌بیند. صنعت فولاد همواره با مشکل ناخالصی‌ها دست و پنجه نرم می‌کند که با کشتن مذاب فولاد با آلومینیوم تشدید می‌گردد. این ناخالصی‌ها باعث افت شدید خواص مکانیکی و انسداد نازل و کاهش قدرت ریخته‌گری مذاب می‌گردند. بنابراین استفاده از آلومینیوم کمتر در فولادسازی به صرفه‌تر است [۱]. آلومینیوم قدرت اکسیژن‌زدایی بسیار قوی دارد که گفته می‌شود ۴ الی ۵ برابر سیلیسیم در فولادهای حاوی ۰/۵٪ منگنز است که طبق رابطه زیر با اکسیژن واکنش می‌دهد [۲].



در حقیقت، آلومینیوم اضافه شده به ذوب در صورت حضور اکسیژن (و عدم حضور اکسیژن زدهای قویتر) تبدیل به اکسید آلومینیوم (آخال) خواهد شد و پس از حذف اکسیژن، بقیه آلومینیوم به صورت محلول در ذوب باقی خواهند ماند لذا، در آنالیز مذاب گزارش شده توسط روش کوانتومتری، آلومینیوم به صورت مجموع اکسیدی ( $Al_{Oxide}$ ) و محلول ( $Al_{Sol}$ ) گزارش خواهد شد که به آن  $Al_{total}$  گفته می‌شود. شکل ۱ رابطه بین مقدار آلومینیوم محلول و اکسیژن در ذوب را در حالت‌های محاسبه شده ترمودینامیکی و نیز به دست آمده از آزمایشات را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد با افزایش آلومینیوم محلول مذاب از مقدار ۰/۰۳٪، اکسیژن تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت. هرچقدر میزان آلومینیوم اکسیدی ذوب کمتر باشد به معنی حذف ناخالصی‌ها است از این رو، یکی از مشخصه‌های فولاد

تمیز کاهش میزان آلومینیوم اکسیدی (افزایش آلومینیوم محلول) در ترکیب است به طوریکه نسبت  $(Al_{Sol}) / (Al_{Total})$  می‌بایست بالا باشد.

آلومینیوم در فولادسازی به سه صورت مصرف می‌شود: ۱- آلومینیوم شمش ۲- سیم آلومینیوم ۳- آلومینیوم ساچمه‌ای. از شمش آلومینیوم زمانی که اکسیژن فولاد بسیار بالا است خصوصاً حین تخلیه وقتی اکسیژن در حد ۱۲۰۰-۲۰۰ ppm است استفاده می‌شود. سیم آلومینیوم حدوداً ۴۰-۳۵٪ از شمش آلومینیوم گرانتر است اما سیم آلومینیوم به قسمت پایین تر ذوب تزریق می‌شود و فرصت حل شدن و باقی ماندن در ذوب را فراهم می‌کند. آلومینیوم ساچمه‌ای به شکل ذرات آلومینیوم با دانسیته کمتر است که برای اکسیژن زدایی سرباره به کار می‌رود [۳]. در بسیاری از فولادسازی‌ها، مصرف آلومینیوم برحسب آنالیز هدف فولاد می‌باشد. این عمل موجب پراکندگی شدید آنالیز آلومینیوم و اکسیژن ذوب در هنگام ورود مذاب به ایستگاه کوره پاتیلی می‌شود. این پدیده کاملاً قابل پیش‌بینی است زیرا اکسیژن تخلیه شده در هر ذوب بسته به میزان سرباره ورودی از کوره و مقدار اکسیژن محلول متفاوت بوده و صرفاً محاسبه آلومینیوم به منظور رسیدن به آنالیز تعیین شده باعث سوختن شدید آلومینیوم و پراکندگی آنالیز آن می‌گردد. برای محاسبه مقدار آلومینیوم مورد نیاز جهت اکسیژن‌زدایی کامل مذاب در تخلیه باید پارامترهای مختلفی را در نظر داشت. اولین پارامتر مقدار اکسیژن محلول در مذاب است که طی واکنش (۱) با آلومینیوم واکنش می‌دهد. اکسیژن محلول با غوطه‌ور کردن پروب‌های مخصوص اندازه‌گیری اکسیژن (شامل سلول الکتروشیمیایی) در مذاب که به دستگاه اندازه‌گیری (سلوکس) متصل است اندازه‌گیری می‌شود. پارامتر دوم، احیا مقدار سرباره تخلیه شده از کوره است که خود شامل اکسیدهای قابل احیا متفاوت (FeO, MnO و SiO<sub>2</sub>) می‌باشد که طبق روابط ۲ صورت می‌گیرد.



که در اینجا M عناصری چون منگنز، سیلیسیم و آهن را شامل می‌شود. در گریدهای فولادی که نیاز به گوگردزدایی وجود دارد، مقداری آلومینیوم طبق رابطه (۳) باید بدین منظور در نظر گرفت [۳].



در نهایت نیز مقداری آلومینیوم به عنوان آلومینیوم محلول مورد نیاز باید در نظر گرفته شود. با در اختیار داشتن آنالیز سرباره، ذوب و اکسیژن محلول می‌توان توسط روابط فوق آلومینیوم مورد نیاز برای هر ذوب را محاسبه نمود.

## روش تحقیق

در شرکت فولاد آلیاژی ایران سه کوره قوس الکتریکی به ظرفیت ۴۰ تن، قراضه و آهن اسفنجی را ذوب کرده و در حالت عادی هنگام تخلیه مذاب از کوره، مواد فروآلیاژ و اکسیژن‌زدا (آلومینیوم و کاربید کلسیم) به آن اضافه می‌شود. سپس پاتیل به ایستگاه کوره پاتیلی (LF) ارسال شده و در آنجا سرباره‌سازی کامل، تنظیم دما و آنالیز شیمیایی صورت می‌گیرد. در این پروژه، به منظور محاسبه مقدار آلومینیوم مورد نیاز طبق روابط فوق، ابتدا اکسیژن مذاب قبل از تخلیه کوره توسط دستگاه سلوکس اندازه‌گیری شد. در هنگام تخلیه در بازه‌های زمانی مساوی مقدار آلومینیوم محاسبه شده جهت اکسیژن‌زدایی کامل و نیز مقدار ۲۰۰ کیلوگرم آهک برای پوشش مذاب اضافه گردید. پس از ورود مذاب به ایستگاه LF از سرباره ورودی و نیز در انتهای فرآیند متالورژی ثانویه از سرباره نهایی تشکیل شده نمونه‌برداری شد تا روند احیاء سرباره بررسی گردد. همچنین از نمونه‌های گرفته شده از مذاب آنالیز کوآتومتری به عمل آمد تا میزان آلومینیوم اکسیدی، محلول و کل موجود تخمین زده شود و در زمان‌های مختلف اکسیژن ذوب توسط دستگاه سلوکس اندازه‌گیری گردید. لازم به ذکر است که محاسبات آلومینیوم طوری صورت گرفت که در LF نیازی به تزریق مجدد آن نباشد. در نهایت نتایج حاصل از این روش با فرآیند معمول مورد استفاده در شرکت مقایسه گردید.

## نتایج و بحث

جدول ۱، تمام اطلاعات مربوط به ذوب‌های تولید شده با اکسیژن‌زدایی جزئی و کامل در تخلیه و نتایج حاصل از آن را نشان می‌دهد. طبق اطلاعات این جدول، معمولاً در این شرایط  $Al_{total} < 0.01\%$  می‌باشد که طبق شکل ۱، فولاد در این شرایط کاملاً اکسیژن‌زدایی نشده و سرباره این فولاد نیز هنوز کاملاً احیا نشده است. نسبت  $Al_{sol}/Al_{tot}$  فولاد در این صورت تقریباً ۵۰-۳۰٪ است که بیانگر حضور گسترده آلومینیوم اکسیدی (آخال‌ها) در فولاد مذاب می‌باشد. اپراتور ایستگاه کوره پاتیلی مقدار قابل توجهی آلومینیوم گرانوله را برای کشتن کامل فولاد و احیاء سرباره به مذاب اضافه می‌نماید و در انتهای فرآیند نیز در صورت کمبود آلومینیوم مذاب، به وسیله سیم آلومینیوم، مقدار آلومینیوم مذاب را به هدف می‌رساند. با توجه به اینکه در طول فرآیند اکسیژن‌زدایی ناقص در تخلیه و افزودن فرو آلیاژها اکسیژن مذاب تا مقدار ۲۰-۳۰ ppm کاهش یافته است، به علت مقدار اکسیژن کم باقیمانده در ذوب، هرگونه مصرف آلومینیوم باعث تشکیل آخال‌های بسیار ریزی می‌گردد که حذف آن بسیار دشوار خواهد بود. آزمایشات نشان داد که نسبت  $Al_{sol}/Al_{tot}$  فولاد به سختی به ۶۵٪ می‌رسد که خود دشواری حذف ناخالصی‌ها را در این فرآیند بازگو می‌کند. اکسیژن کل ( $O_{tot}$ ) این ذوب‌ها معمولاً بیش از ۴۰ ppm است.

در ذوب‌های آزمایشی اکسیژن‌زدایی شده کامل با آلومینیوم در هنگام تخلیه، با دانستن اکسیژن و گوگرد ذوب در تخلیه و میزان گوگردزدایی تا مقدار ۰/۰۰۵٪، میزان آلومینیوم هدف و با در نظر گرفتن ورود تقریباً ۳۰۰ کیلوگرم سرباره کوره به پاتیل محاسبات، میزان آلومینیوم مورد نیاز برای اکسیژن‌زدایی انجام شد. مقدار آلومینیوم محاسبه شده در طول تخلیه از کوره در بازه‌های زمانی مختلف و به صورت کیسه‌های ۵ کیلوگرمی به مذاب اضافه شد. به هم زدن مذاب قبل و بعد از ورود به ایستگاه متالورژی ثانویه توسط دمش گاز آرگون به خوبی انجام شد. جدول ۲ نمونه‌ای از آنالیز سرباره LF در ابتدای ورود مذاب به ایستگاه کوره پاتیلی و نیز در انتهای فرآیند متالورژی ثانویه (قبل از ریخته‌گری) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در ابتدای ورود مذاب به LF هنوز تماس سرباره با مذاب حاوی آلومینیوم به اندازه کافی انجام نشده است که بتواند میزان اکسیدهای قابل احیا را کاهش دهد ولی در انتهای فرآیند متالورژی ثانویه با به هم خوردن مناسب مذاب و سرباره، آنالیز سرباره کاهش قابل قبول این اکسیدها  $(\text{FeO}+\text{MnO}) < 2\%$  را نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول ۲ دیده می‌شود، با انجام اکسیژن‌زدایی کامل، اکسیژن مذاب ورودی به LF، به پایتترین مقدار ممکن رسیده و مادامی که آلومینیوم ذوب بالا باشد این اکسیژن ثابت باقی می‌ماند. از طرف دیگر، به دلیل اضافه شدن آلومینیوم به مذاب حاوی اکسیژن زیاد، ناخالصی‌های آلومینایی تشکیل شده در حین تلاطم مذاب به هم پیوسته که بالا آمدن و حذف آن را تسریع می‌بخشد. این پدیده به خوبی در نسبت  $\text{Al}_{\text{sol}}/\text{Al}_{\text{tot}}$  نمایان است که در این ذوب‌ها بیش از ۸۰٪ بوده که در یک مورد به ۹۷٪ نیز رسیده است. اکسیژن کل ( $\text{O}_{\text{tot}}$ ) این ذوب‌ها به زیر ۲۰ ppm تقلیل پیدا کرد که خود بیانگر اثر بخشی فرآیند است. البته بسته به زمان ماندگاری ذوب در LF و شدت هم زدن آن با گاز آرگون، همیشه مقداری آلومینیوم محلول با اکسید شدن تلف می‌شود که می‌بایست به منظور جبران آن، مقداری آلومینیوم اضافه در هنگام تخلیه به مذاب اضافه نمود. این مقدار آلومینیوم تلف شده در آزمایشات تقریباً معادل ۰/۰۱۵٪ بود. بررسی ناخالصی‌های تولید شده در هر دو حالت اکسیژن‌زدایی نیز حاکی از کاهش چشمگیر اندازه و میزان ناخالصی‌های تولید شده در روش اکسیژن‌زدایی کامل فولاد در تخلیه بود.

### نتیجه‌گیری

- ۱- در حالت اکسیژن‌زدایی کامل با آلومینیوم، اکسیژن محلول ذوب از ابتدای ورود به LF، پایین بوده و تا ریخته‌گری حفظ می‌شود ولی در اکسیژن‌زدایی جزئی، می‌بایست در طول فرآیند LF، آلومینیوم به ذوب اضافه شود که خود موجب کثیفی ذوب خواهد شد.
- ۲- اکسیژن کل ذوب ( $\text{O}_{\text{total}}$ ) در حالت اکسیژن‌زدایی کامل به کمتر از ۲۰ ppm رسید در حالی که در حالت اکسیژن‌زدایی جزئی در تخلیه این مقدار بیش از ۴۰ ppm بود.

۳- نسبت  $Al_{sol}/Al_{tot}$  ذوب‌های اکسیژن‌زدایی شده کامل در تخلیه بیش از ۸۰٪ بود در حالی که این نسبت در ذوب‌های اکسیژن‌زدایی شده جزئی در تخلیه با آلومینیوم کمتر از ۶۵٪ بود که بیانگر جذب بهتر ناخالصی‌ها در حالت اکسیژن‌زدایی کامل است.

۴- به دلیل استفاده از شمش آلومینیوم در تخلیه مذاب از کوره که از سیم آلومینیوم و نیز ساچمه‌ای که در LF مصرف می‌شود ارزانتر است، از نظر اقتصادی اکسیژن‌زدایی کامل در تخلیه صرفه اقتصادی بیشتری دارد و همچنین از سوختن بسیاری از فرو آلیاژها نیز جلوگیری می‌شود.

### تقدیر و تشکر

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند تا از حمایت‌های فنی و مادی شرکت فولاد آلیاژی ایران برای انجام این تحقیق، تقدیر و تشکر نمایند.

### مراجع

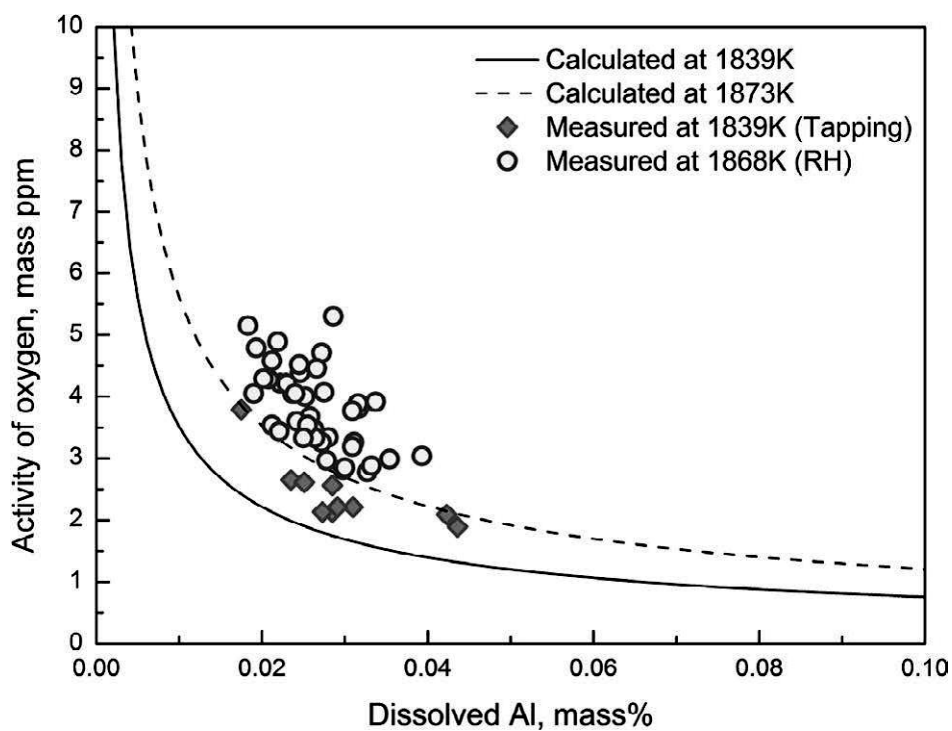
- [1] A. N Conejo, D. E. Hernandez, L. Micele, "Optimization of Aluminum Deoxidation Practice in the Ladle Furnace", Materials and Manufacturing processes, 2006, 21, pp.796-803.
- [2] J. W. Gerrit, J. Kor, P. C. Glaws, "The Making, Shaping and Treating of Steel", 2003, Pittsburg, The AISE Steel Foundation.
- [3] P. K. Ghosh, R. R. Rote, T. W. Junker, "The development of a New Approach to Deoxidation at Nucor Steel-Arkansas", Iron&Steel Technology, Vol. 4, No. 7, 2007, pp.96-104.
- [4] Z. deng, M, Zhu, " Evolution Mechanism of Non-Metallic Inclusions in Al-Killed Alloyed Steel During Secondary Refining Process", ISIJ International, 2012, Vol. 53, No. 3, pp. 450-458.

جدول ۱. تغییرات آنالیز سرباره ورودی و خروجی از LF.

	%CaO	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%SiO <sub>2</sub>	%FeO	%MnO
ذوب ورودی به LF	۵۵	۲۲	۱۴	۲/۵	۳
ذوب خروجی از LF	۵۰	۲۷	۸/۷	۱/۱۶	۰/۷۵

جدول ۲. فرآیند اکسیژن زدایی و روند تغییرات آلومینیوم و اکسیژن در LF.

اکسیژن تخلیه (ppm)	اکسیژن ورودی به LF (ppm)	Al تخلیه (Kg)	Al در LF (Kg)	%Al <sub>(LF)</sub>	%Al <sub>(Cast)</sub>	Al <sub>sol</sub> /Al <sub>tot</sub>
۲۹۱	۲۳	۲۰	-	۰/۰۱	۰/۰۰۴	٪۳۱
۶۰۱	۳۵	۴۰	-	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	٪۳۲
۷۹۷	۱۷	۴۵	-	۰/۰۱	۰/۰۰۵	٪۴۴
۴۵۶	۷	۶۵	۱۹	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	٪۳۵
۴۳۳	۴	۶۵	۳۰	۰/۰۴	۰/۰۱۵	٪۶۵
۶۰۰	۴	۶۰	-	۰/۰۳۳	۰/۰۲۲	٪۸۲
۵۹۹	۴	۸۰	-	۰/۰۳۷	۰/۰۲۳	٪۸۷
۵۹۵	۴	۷۰	-	۰/۰۴۱	۰/۰۲۷	٪۹۷



شکل ۱. رابطه بین آلومینیوم و اکسیژن محلول در مذاب [۴].