



An Investigation on Reduction of Insoluble Build-ups in the Inductor of Ductile Iron Pouring Machine

**Hossein Aghajani^{1*}, Sahand Behrangi², Navid Farzammehr³, Amir Hassan Shafie Farhoud⁴,
Golnaz Naseri Azari⁵**

1. Associate Professor, Materials Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2. M.Sc., Materials Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3. M.Sc., Materials Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
4. M.Sc., Tractor Sazi Tabriz Co., Tabriz, Iran
5. B.Sc., Materials Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 22 May 2018
Accepted: 02 October 2018

Abstract:

The pile-up of insoluble build-ups in induction pressure pouring machines has been one of the important problems in casting of ductile iron. The main constituent of these build-ups is magnesium oxide (MgO). The formation of MgO is resulted by oxidation of the magnesium which was used for graphite spheroidisation. In this research, the effectiveness of two solutions has been studied to overcome this problem in pouring machines of a casting plant. The solutions were the addition of a flux into the melt and applying nitrogen atmosphere instead of air. The chemical analysis of the melt, slag and build-ups were done using X-ray diffraction (XRD), wet chemistry method and quantometry technique. For the first approach, the best efficiency was obtained with addition of 900 g/ton flux into the ladle before inoculation. Without flux addition, the electrical current drop was drastic (~350 A in 16 days). However, the flux addition resulted in a slight drop in the electrical current (~50 A in 28 days). Moreover, the flux addition has changed the main constituent of build-ups from MgO to iron oxide (Fe₂O₃). The using of nitrogen atmosphere resulted in a significant decrement in the fading rate of magnesium from 0.017% in 36 min to 0.0146 % in 50 min.

Keywords:

Insoluble build-up,
Flux,
Ductile iron,
Pouring machine.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Aghajani H., Behrangi S., Farzammehr N., Shafei Farhoud A.H., Naseri Azari G. An investigation for reduction of insoluble build-ups in the inductor of ductile iron pouring machine, in Persian, Founding Research Journal, 2018, 2(2) 101-108.
DOI: 10.22034/FRJ.2018.132213.1038

*** Corresponding Author:**

Hossein Aghajani, Associate Professor
Address: Materials Engineering Department, University of Tabriz,
P.O. Box 51666-16471, 29th Bahman Blvd., Tabriz, Iran. Tel: +98 41 33392472.
E-mail: h_aghajani@tabrizu.ac.ir



فصل‌نامه علمی پژوهشی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

بررسی روش‌های کاهش رسوبات نامحلول در اینداکتور ماشین ذوب‌ریز چدن نشکن

حسین آقاجانی^{۱*}، سه‌نهد بهرنگی^۲، نوید فرزام مهر^۳، امیر حسن شفیعی فرهود^۴، گلناز ناصری آذری^۵

۱-دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز. h_aghajani@tabrizu.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

۲-کارشناس ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

۳-کارشناس ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

۴-کارشناس ارشد، شرکت مهندسی تراکتورسازی تبریز، تبریز.

۵-کارشناس، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۰

یکی از مهم‌ترین مشکلات پیش روی کارخانه‌های ریخته‌گری قطعات چدن نشکن، انباشتگی رسوبات نامحلول در قسمت‌های مختلف کوره‌های القایی، افت شدید جریان الکتریکی و در نتیجه توقف خط تولید است. ماده اصلی تشکیل دهنده این رسوبات، اکسید منیزیم (MgO) است که در نتیجه اکسیداسیون منیزیمی تولید می‌شود که برای کروی‌سازی گرافیت استفاده می‌شود. در این مطالعه، دو راه حل برای غلبه بر این مشکل پیشنهاد شده و میزان تاثیرگذاری هر کدام در خط تولید یک کارخانه‌ی ریخته‌گری بررسی شده است. این دو راه حل عبارت بودند از افزودن فلاکس به مذاب و استفاده از اتمسفر نیتروژن به جای هوا. آنالیز شیمیایی مذاب، سرباره و رسوبات با استفاده از پراش اشعه ایکس، روش شیمی تر و کوانتومتری انجام شد. بهترین نتیجه با افزودن ۹۰۰ گرم فلاکس به داخل پاتیل قبل از تلقیح به دست آمد. بدون افزودن فلاکس، افت شدید در جریان الکتریکی دستگاه (۳۵۰ آمپر در ۱۶ روز) مشاهده شد. افزودن فلاکس منجر به افت سطحی در جریان الکتریکی (۵۰ آمپر در ۲۸ روز) شد. همچنین افزودن فلاکس باعث تغییر پایه رسوبات از MgO به Fe₂O₃ شد. همچنین با استفاده از اتمسفر نیتروژن، نرخ میرایی منیزیم از ۰/۱۷٪ در ۳۶ دقیقه (در حالت استفاده از هوا) به ۰/۱۴۶٪ در ۵۰ دقیقه رسید.

واژه‌های کلیدی:

رسوبات نامحلول،

فلاکس،

چدن داکتیل،

ماشین ذوب ریز.

۱- مقدمه

می‌گیرند. ذوب‌ریزهای فشاری، ماشین‌های نگهداری/ ذوب ریزی با لایه‌ای پوشیده شده از گاز بی‌اثر یا اتمسفر هوا بر فراز مذاب هستند و اینداکتوری دارند که به عمق یا کناره‌ی کوره متصل شده است. ماشین‌های ذوب‌ریز فشاری برای نگهداری مذاب در دمای ثابت برای دوره‌های زمانی گسترده طراحی شده‌اند. هنگامی که مذاب، تحت فشار قرار می‌گیرد، جریانی از فلز مذاب از دریچه برای پر کردن قالب خارج می‌شود. این ماشین برای ذوب فلزات طراحی نشده است. گردش مذاب فلز از میان حلقه‌ی اینداکتور، فوق گرمایش پیوسته‌ی مذاب را برای ثابت نگاه‌داشتن دمای مذاب باقیمانده در کوره تامین می‌کند [۷، ۸].

در تولید و ذوب‌ریزی چدن نشکن، دو مشکل عمده وجود دارد: اول، زمان کوتاه میرایی منیزیم [۱] و دوم، تشکیل

چدن نشکن از طریق کروی‌سازی گرافیت‌های چدن خاکستری (تلقیح) به دست می‌آید. تلقیح با افزودن منیزیم به مذاب قبل از ریخته‌گری صورت می‌گیرد [۱]. به این منظور، روش‌های متنوعی از قبیل پاتیل باز [۲]، تاندیش کاور، داخل قالب و سیم مغزه دار وجود دارد [۱]. امروزه، روش سیم مغزه‌دار به علت عملیات کروی‌سازی بهتر گرافیت و بازیابی بیشتر منیزیم، کاربرد گسترده‌ای یافته است [۳-۵]. در فرآیند ذوب و ریخته‌گری چدن نشکن از کوره‌های القایی استفاده می‌شود که سه نوع عمده دارند: کوره‌های القایی بدون هسته [۶]، کوره‌های القایی کانالی [۸] و ذوب‌ریزهای فشاری [۶]. از این میان، نوع اول برای ذوب و نگهداری آن و انواع دوم و سوم، فقط برای نگهداری مذاب مورد استفاده قرار

سدیم و کلسیم تشکیل می‌دهند. این ترکیبات بخش اعظم عملیات تصفیه را انجام می‌دهند. نکته‌ی مهم در مورد این فلاکس، عدم واکنش‌های خورنده با ماده‌ی نسوز کوره است. EF40L برای انواع کوره‌های ذوب الکتریکی از قبیل کوره‌های بدون هسته و کوره‌های کانالی مناسب است. استفاده از این فلاکس، از انباشتگی و رسوب سرباره در دیواره‌های کوره جلوگیری کرده و باعث حفظ حجم کوره می‌شود. همان‌طور که واضح است، گرفتگی مجرای ماشین و توقف‌های مکرر خط تولید برای تمیز کردن مجرای ماشین و نسوزچینی مجدد، هزینه‌ی زیادی را از لحاظ اقتصادی به کارخانه تحمیل می‌کند. بنابراین انجام این پژوهش نقطه‌ی عطفی در جهت افزایش عمر اینداکتورها و کاهش هزینه‌های تحمیلی به شمار می‌رود.

۲- مواد و روش تحقیق

در ابتدا قبل از هر نوع تغییر و اقدام اصلاحی، رفتار جریان الکتریکی در یک بازه‌ی کاری ماشین ذوب‌ریز مورد بررسی قرار گرفت تا رابطه‌ی افت جریان الکتریکی ماشین ذوب‌ریز با ضخامت رسوبات مشخص شود. سپس اثر افزودن فلاکس و استفاده از گاز نیتروژن بر میزان رسوبات و ترکیب رسوبات به طور جداگانه بررسی شد. از روش‌های پراش اشعه ایکس و شیمی تر برای تعیین ترکیب فازی رسوبات استفاده شد. برای رسیدن به یک رژیم بهینه جهت افزودن فلاکس به مذاب (مقدار و زمان)، مقادیر مختلف از ۴۵۰ تا ۹۰۰ گرم فلاکس بر تن چدن مذاب در مراحل مختلف به شکل تریق سیم به مذاب اضافه شده و بهترین رژیم انتخاب شد. فلاکس مورد استفاده از نوع Ca-Si با ترکیب اسمی ۷۰ درصد وزنی کلسیم و ۳۰ درصد وزنی سیلیسیم بوده است. متغیر دیگری که مورد بررسی قرار گرفت، نرخ میرایی منیزیم بود. برای این منظور، در دو حالت استفاده از اتمسفر هوا و نیتروژن، مقدار منیزیم موجود در مذاب، در فاصله‌های زمانی معین به روش کوانتومتری اندازه‌گیری شده و نرخ میرایی منیزیم محاسبه شد.

۳- نتایج و بحث

شکل (۲)، نشان‌دهنده تغییرات جریان الکتریکی ماشین ذوب‌ریز در یک بازه کاری در طی روزهای ذوب‌ریزی بدون افزودن فلاکس است. همان‌طور که در این منحنی دیده می‌شود، جریان الکتریکی در طول ۱۴ روز حدود ۳۰۰ آمپر

رسوبات نامحلول در مجراهای کوره یا ماشین ذوب‌ریز [۶] است. برای حل مشکل اول، فاصله‌ی زمانی بین تلقیح و ریخته‌گری به طور میانگین نباید از ۲۰ دقیقه تجاوز کند. ولی مورد دوم، همچنان یکی از مشکلات اصلی پیش‌روی کارخانه‌های ریخته‌گری است. این موضوع به طور نمادین در شکل (۱) نشان داده شده است. رسوبات اضافی در قسمت "زانویی پرکننده" و "زانویی ذوب ریز (خروجی)" نرخ جریان فلز را به داخل و خارج دریچه محدود می‌کند. این مسدود شدگی یا "تشکیل رسوب" در زانویی‌ها با سرعت بالایی رخ می‌دهد و به دلیل افت شدید جریان دستگاه و کاهش شدید بازده ذوب‌ریزی، باید توسط هر شیفت به دقت، کنترل شود. زمانی که رسوبات به اندازه‌ای باشند که از گرم شدن کافی و مناسب فلز جلوگیری کنند، اینداکتور باید تعویض شود [۶]. تا کنون برای جلوگیری از تشکیل و انباشتگی رسوبات نامحلول و گرفتگی کانال‌ها، روش‌های مختلفی از قبیل افزودن فلاکس [۶ و ۷]، استفاده از اتمسفر نیتروژن به جای هوا [۹] و تعویض ماده نسوز [۷] ارائه شده است.

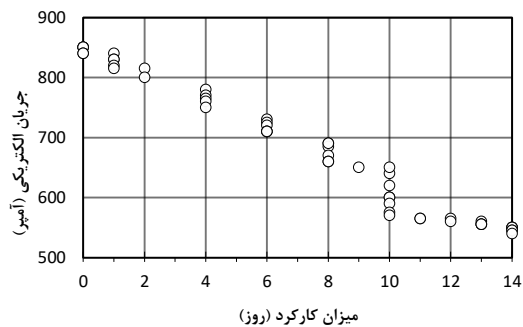
گستره‌ی وسیعی از فلاکس‌ها وجود دارد که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. نوع فلاکس مصرفی باید بر اساس نوع استفاده و ویژگی‌های مورد انتظار انتخاب شود. EF40، EF40L، EF40LP و Nu-Flux مثال‌هایی از فلاکس‌های تجاری هستند که برای کاهش نرخ انباشتگی رسوبات و گرفتگی مجاری کوره مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. در این پژوهش، با توجه به عملکرد مورد انتظار، فلاکس EF40L برای جلوگیری از ایجاد رسوب در ماشین ذوب‌ریز استفاده شد.



شکل ۱- تصویر نمادین از کوره‌ی ذوب‌ریز فشاری [۷].

EF40L، یک نوع فلاکس بدون فلوراید است که در کوره‌های الکتریکی استفاده می‌شود. با اضافه کردن این فلاکس به مذاب، اجزای EF40L واکنش می‌دهند و آلومینات‌های

جدول (۲)، نشان دهنده‌ی مقدار منیزیم موجود در مذاب از لحظه‌ی تلقیح در بازه‌های زمانی مختلف است. در طی ۳۶ دقیقه ۰/۰۱۷٪ از منیزیم اولیه کم شده است. با این مقدار کاهش، میزان منیزیم مذاب از حد لازم پایین‌تر رفته و بازده کروی‌سازی گرافیت کاهش می‌یابد. محاسبه‌ی نرخ میرایی از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا در این فاصله، منیزیم اکسید شده و به تدریج در مجرای اینداکتور رسوب کرده و جریان مذاب را مختل می‌کند. بنابراین هر گونه کاهش نرخ میرایی، منجر به بازده بهتر ماشین ذوب‌ریز می‌شود.



شکل ۲- روند تغییرات جریان الکتریکی با زمان برای ماشین ذوب‌ریز در حالت ذوب‌ریزی معمولی.

جدول ۱- آنالیز شیمی تر رسوبات تشکیل شده در مجاری ماشین ذوب‌ریز (درصد وزنی).

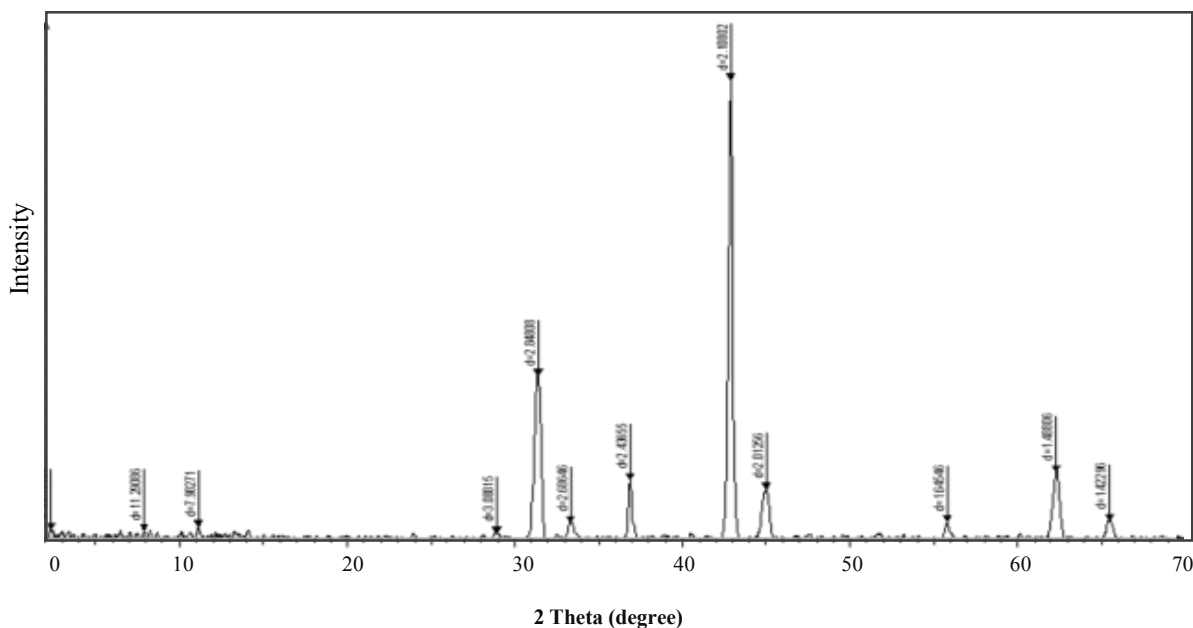
فاز	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
مقدار	۰/۹	۰/۵	۱/۱	۷/۵	۰/۳	۱۹/۳	۱/۵	۰/۷

جدول ۲- مقدار منیزیم مذاب در بازه‌های زمانی مختلف در حالت ذوب‌ریزی معمولی (درصد وزنی).

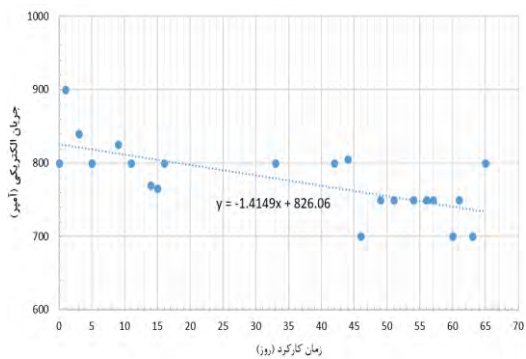
زمان	مقدار منبریز
پس از تخلیه	۱-۸۵۱
۶ دقیقه بعد	۱-۸۸۶
۱۲ دقیقه بعد	۱-۸۳۳
۱۸ دقیقه بعد	۱-۷۷۶
۲۴ دقیقه بعد	۱-۷۳۹
۳۰ دقیقه بعد	۱-۶۸۱

افت داشته است. با این میزان افت در جریان دستگاه و کاهش شدید بازده ماشین، خط تولید متوقف می‌شود. علت این امر، ضخیم‌تر شدن رسوبات نامحلول در مجراهای ماشین ذوب‌ریز و جلوگیری از جریان مذاب است.

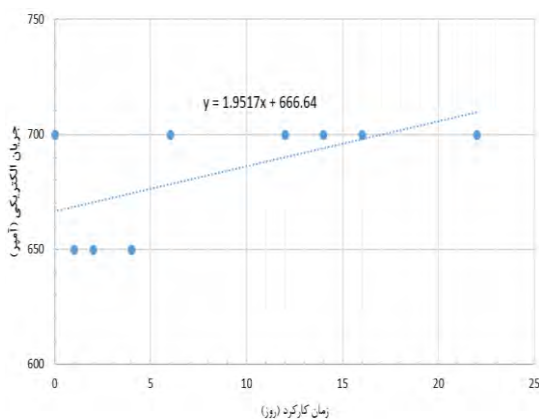
شکل (۳)، نشان‌گر الگوی پراش اشعه ایکس رسوبات ماشین است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، فاز اصلی تشکیل دهنده‌ی این رسوبات، MgO است که پیک پراش آن در زاویه‌ی $2\theta = 42/094$ دیده می‌شود. فازهای اصلی دیگر FeS و Fe₃O₄ هستند که پیک‌های‌شان به ترتیب در زوایای ۳۱/۲۷ و ۳۶/۷۷ دیده می‌شوند. پیک‌های مربوط به فازهای CaO، MgS₂ و Fe₂Si نیز به ترتیب در زوایای ۶۵/۵۳، ۶۲/۲۱ و ۴۵/۵۰ درجه شناسایی شدند. برای بررسی دقیق کمی این فازها، از روش شیمی تر استفاده شد که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۳- الگوی پراش اشعه ایکس رسوبات نامحلول تشکیل شده در ماشین ذوب‌ریز.



شکل ۴- روند تغییرات جریان الکتریکی ماشین ذوب‌ریز یکم پس از افزودن فلاکس.



شکل ۵- روند تغییرات جریان الکتریکی ماشین ذوب‌ریز دوم پس از افزودن فلاکس.

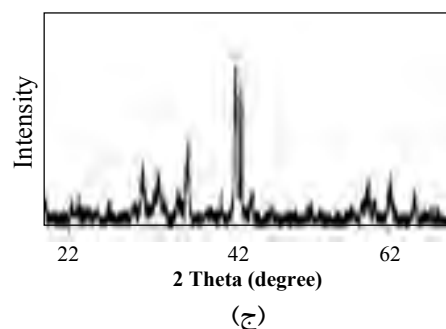
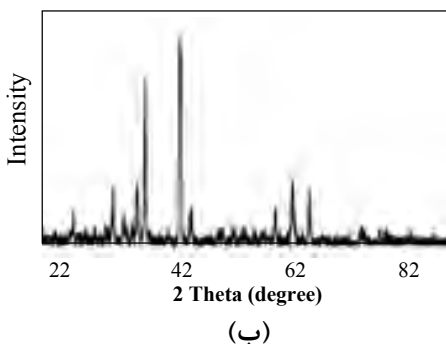
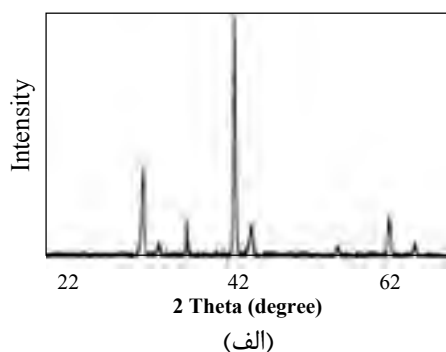
بهتری از خود نشان داد. در این اینداکتور (همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است) شیب منحنی معادل مثبت است که نشان‌گر افزایش جزئی جریان ماشین ذوب‌ریز پس از افزودن فلاکس است.

در این تحقیق از فلاکس Ca-Si بدون فلوراید استفاده شد. بر اساس دیاگرام الینگهام، احتمال وقوع واکنش‌هایی که انرژی آزاد گیبس منفی‌تری دارند، بیشتر است که نشان‌دهنده اکتیویته بالاتر آن عنصر است. در صورت عدم حضور فلاکس، واکنش اکسید منیزیم، سریع‌تر از دیگر واکنش‌ها اتفاق می‌افتد. لذا، اکسید منیزیم تشکیل‌دهنده عمده رسوبات است. بعد از افزودن فلاکس، اکسید کلسیم سریع‌تر از اکسید منیزیم تشکیل می‌شود. برای بررسی این پدیده، یک نمونه از سرباره بلافاصله بعد از افزودن فلاکس مورد بررسی قرار گرفت. مطابق انتظار، مقدار اکسید کلسیم نسبت به زمانی که از فلاکس استفاده نشد، به میزان قابل توجهی افزایش یافت. همچنین اکسید منیزیم کمتر شد. این پدیده به دلیل بیشتر بودن انرژی آزاد منفی گیبس واکنش اکسید کلسیم نسبت به واکنش اکسید منیزیم است [۱۰].

پس از اتمام این پیش مطالعات، افزودن فلاکس به مذاب آغاز شد. در ابتدا ۴۵۰ گرم بر تن (معادل ۹ عدد کپسول) فلاکس قبل از سرباره‌گیری و در حین شارژ مذاب به داخل ماشین ذوب‌ریز اضافه شد. بر اساس مقدار سرباره‌ی تولیدی و مقدار رسوبات تشکیل شده در مجاری ماشین، مشاهده شد که این رژیم افزودن فلاکس چندان برای افزایش بازده ماشین مطلوب نیست. بنابراین رژیم افزودن فلاکس به این صورت تغییر یافت: ۷۰۰ گرم بر تن پس از شارژ مذاب اولیه به پاتیل و قبل از تلقیح و ۱۰۰ گرم بر تن به داخل ماشین ذوب‌ریز. به دلیل عدم پایداری جریان الکتریکی در این رژیم، سهم ماشین ذوب‌ریز به ۲۰۰ گرم بر تن افزایش یافت. بر اساس میزان سرباره‌ی تولید شده و پایداری جریان الکتریکی ماشین، این رژیم مناسب‌ترین گزینه برای افزایش عمر اینداکتورها تشخیص داده شد. متأسفانه به دلیل عدم امکان اضافه کردن فلاکس به داخل ماشین ذوب‌ریز، همه ۹۰۰ گرم فلاکس (مجموع سهم پاتیل و ماشین) پس از شارژ مذاب اولیه و قبل از تلقیح به داخل پاتیل اضافه شد.

راه حل دیگر، افزایش عمر اینداکتور، استفاده از نیتروژن به عنوان اتمسفر ماشین ذوب‌ریز فشاری است. برای بررسی تاثیر این روش، نرخ میرایی منیزیم مورد مطالعه قرار گرفت. مقادیر منیزیم موجود در مذاب در فاصله‌های زمانی مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. در مقایسه با میرایی منیزیم در حضور اتمسفر هوا (جدول ۲)، نیتروژن موجب کاهش نرخ میرایی منیزیم شده است.

برای یک پاتیل پر (حدود ۳/۵ تن مذاب)، ۴/۵ کیلوگرم فلاکس (معادل ۹۰ کپسول) برای افزایش عمر اینداکتور و کاهش رسوبات مجاری ماشین افزوده شد. این رژیم افزودن فلاکس، برای دو اینداکتور ذوب‌ریز کارخانه اعمال شد. برای ارزیابی تاثیر افزودن فلاکس، روند تغییرات جریان الکتریکی در یک چرخه‌ی کاری ماشین ثبت شد. برای اینداکتور یکم، منحنی تغییرات جریان در شکل (۴) نشان داده شده است. در مقایسه با شکل (۲)، بهبود بازده و عمر اینداکتور کاملاً مشهود است. نرخ کاهش جریان الکتریکی قبل از افزودن فلاکس ۲۰۰ آمپر در ۱۰ روز بود. اما با اضافه کردن فلاکس EF40L، این مقدار به ۱۴ آمپر در ۱۰ روز رسید. این موضوع را می‌توان به وضوح در منحنی معادل جریان در شکل (۴) مشاهده کرد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، شیب منحنی معادل ۱/۴- است که به معنی کاهش متوسط جریان به میزان ۱۴ آمپر در ۱۰ روز است. ماشین دوم، حتی رفتار



شکل ۶- الگوهای پراش اشعه ایکس رسوبات تشکیل شده بر روی نسوز ماشین ذوب‌ریز برای سه حالت ذوب‌ریزی: الف) معمولی، ب) با افزودن فلاکس و ج) تحت اتمسفر نیتروژن.

جدول (۴)، آنالیز شیمی تر نمونه‌های رسوب اینداکتور را در هر ۳ حالت مختلف ذوب‌ریزی نشان می‌دهد. مورد مهم در جدول (۴) این است که پایه‌ی رسوب از MgO به Fe₂O₃ تغییر می‌یابد. این تغییر را می‌توان به افزایش اکتیویته‌ی یون‌های آهن و کاهش اکتیویته‌ی یون‌های منیزیم نسبت داد. به این معنی است که موادی که در ذوب‌ریزی معمولی در مجاری اینداکتور رسوب کرده و موجب گرفتگی آن می‌شوند، با اعمال این روش‌ها بیشتر در سرباره به صورت مذاب جمع شده و اینداکتور تا مدت زمانی طولانی‌تری بدون مسدود شدن می‌تواند کار کند.

جدول ۳- مقادیر منیزیم در بازه‌های زمانی در حالتی که از اتمسفر نیتروژن استفاده شده است (درصد وزنی).

زمان	پس از تخلیه مذاب	۱۰ دقیقه بعد	۲۰ دقیقه بعد	۳۰ دقیقه بعد	۴۰ دقیقه بعد	۵۰ دقیقه بعد
مقدار منیزیم	۰/۰۵۱۵	۰/۰۴۷۵	۰/۰۴۹۹	۰/۰۴۲۸	۰/۰۳۷۳	۰/۰۳۶۹

در شکل (۶)، آنالیز فازی رسوب اینداکتور در سه حالت ذوب‌ریزی معمولی، همراه با افزودن فلاکس و تحت اتمسفر نیتروژن ارائه شده است. در زاویه‌ی $2\theta=32/1$ فاز FeS، در زاویه‌ی $2\theta=27/31$ فاز Mg₅Al_{2.4}Zr_{1.7}O₁₂، در زاویه‌ی $2\theta=36/77$ فاز Fe₃O₄، در زاویه‌ی $2\theta=42/94$ فاز MgO، در زاویه‌ی $2\theta=44/50$ فاز FeO-Cr₂O₃ و در زاویه $2\theta=45/50$ فاز Fe₂Si مشاهده شدند. همچنین وجود پیک‌های دیگر را می‌توان به وجود فازهای اکسیدی، سولفیدی و نیتریدی دیگر همچون اکسید منیزیم و غیره نسبت داد که به علت کوچک بودن اندازه و احتمال تداخل پیک‌ها به طور قطعی نمی‌توان آن‌ها را مشخص کرد.

در حالت ذوب‌ریزی معمولی تنها چند فاز به صورت کلی در اینداکتور رسوب کرده‌اند. با اعمال تغییر در روش ذوب‌ریزی (استفاده از فلاکس و تغییر اتمسفر به نیتروژن)، تعداد فازهای رسوب یافته بسیار افزایش می‌یابند. این تغییر را می‌توان به تولید فازهای دیگر و کاهش در تولید فازهای اولیه نسبت داد. هنگامی که فازهای اصلی رسوب کرده در روش ذوب‌ریزی معمولی کاهش می‌یابند، میزان رسوب‌گذاری نیز کاهش می‌یابد. همچنین با تغییر شرایط ذوب‌ریزی، میزان شدت فازهای رسوب کرده، کاهش می‌یابد. هر چند شدت فاز در الگوی پراش پرتو ایکس تابع عوامل مختلفی است و نظر دادن راجع به آن به صورت قطعی درست نیست، با این حال به دلیل این که تمامی الگوهای ارائه شده در یک روز کاری و توسط یک دستگاه و یک اپراتور اخذ شده است، می‌توان گفت که میزان شدت پیک‌های XRD نمایان‌گر میزان فازهای رسوب کرده است. همچنین مشاهده می‌شود که با تغییر در روش ذوب‌ریزی، میزان شدت پیک‌ها کاهش یافته است. چند فازی شدن و کاهش میزان رسوبات را می‌توان دلیلی برای این کاهش دانست.

(N^{3+}) ، و D_m و D_s میزان ضریب نفوذ نیتروژن به ترتیب در سرباره و فلز مذاب است.

نفوذ نیتروژن در موقعیت‌های مختلف سرباره و فاز مایع به صورت تابعی از زمان به روش اختلاف محدود (Finite Difference) محاسبه شد. در این روش معادله‌های (۲) و (۳) به صورت معادلات (۴) و (۵) ساده می‌شوند.

$$C_{x;j+1} = C_{x;j} + r(C_{x-1;j} - 2C_{x;j} + C_{x+1;j}) \quad (4)$$

که در این رابطه، r تغییرات زمانی (Δt) ، x فاصله مکانی و

$$r = \frac{D \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \quad (5)$$

معادله‌ی بالا برای هر دو فاز مذاب و سرباره با استفاده از شرایط اولیه و مرزیشان حل شد. ضریب تفکیک، L_N ، با استفاده از ظرفیت نیتروژن سرباره به وسیله معادله (۶) محاسبه شد.

$$L_N = \frac{\%N}{[\%N]} = \frac{C_{N^{3-}}}{(p_{O_2})^{3/4}} \cdot K \quad (6)$$

که در این رابطه، $C_{N^{3-}}$ میزان ظرفیت نیتروژن، p_{O_2} میزان فشار جزئی اکسیژن بر حسب اتمسفر و K میزان ثابت تعادل برای انحلال نیتروژن طبق معادله‌ی (۷) است.

$$[N] = \frac{1}{2} N_2 \quad (7)$$

$$\Delta G^0 = -3590 - 23.89T \text{ (J mol}^{-1}\text{)} \quad (8)$$

همچنین، میزان فشار جزئی اکسیژن به وسیله تعادل $Al-Al_2O_3$ محاسبه می‌شود (معادلات ۹ و ۱۰).

$$[Al] + \frac{3}{4} O_2 = \frac{1}{2} (Al_2O_3) \quad (9)$$

$$\Delta G^0 = -778422 + 189.99T \text{ (J mol}^{-1}\text{)} \quad (10)$$

میزان اکتیویته‌ی آلومینا در سرباره به وسیله‌ی نرم‌افزار FactSage محاسبه شد و مقدار آن برای سرباره‌های غنی از اکسید منیزیم و اکسید آلومینیم به ترتیب ۰/۰۰۰۶۷۴۵ و ۰/۰۷۱۲۵ گزارش شد. این مقادیر برای محاسبه‌ی فشار جزئی اکسیژن لحاظ شدند. میزان ضریب نفوذ نیتروژن در سرباره بستگی به ترکیب شیمیایی سرباره دارد و مقدار آن تقریباً برابر با مقدار محاسبه شده در سرباره‌ی معمولی است.

جدول ۴- آنالیز شیمی تر نمونه‌های رسوب اینداکتور در ۳ حالت مختلف ذوب‌ریزی

نوع ذوب‌ریزی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	سایر
معمولی	۰/۷	۱/۵	۷۵	۱۹/۲	۳/۶
همراه با فلاکس	۳	۸/۵	۳۳	۵۱	۴/۵
تحت نیتروژن	۱	۳۵	۷/۷	۵۶	۰/۳

در خصوص تزریق نیتروژن می‌توان از محاسبات ترمودینامیکی نیز بهره گرفت. گاز نیتروژن از روی سطح اینداکتور به داخل مذاب تزریق می‌شود. در صورتی که نیتروژن بتواند از روی سطح مذاب (سرباره روی سطح مذاب) به داخل مذاب نفوذ کند، به دلیل کاهش اکسیژن استیوکیومتری، تمایل به تشکیل ترکیبات اکسیدی کاهش یافته و تمایل به تشکیل ترکیبات نیتریدی افزایش می‌یابد. این عامل می‌شود تا ذرات معلق نیتریدی که وزن کمتری دارند، به بالای سطح مذاب آمده و از تشکیل رسوب جلوگیری نمایند. تنها مشکل در راه انجام این فرآیند، عبور گاز نیتروژن از سرباره و نفوذ به داخل مذاب است. هدف اصلی این بخش بررسی نفوذ نیتروژن به داخل مذاب از لحاظ ترمودینامیکی و سینتیکی است. با اینکه سرباره به عنوان یک سیستم محافظ از نفوذ گاز نیتروژن به داخل مذاب جلوگیری می‌کند، اما همچنان مقداری از گاز نیتروژن به دلیل اندازه کوچک و ضریب نفوذ بالا به داخل مذاب نفوذ می‌کند. لذا، با استفاده از قانون دوم فیک تلاش می‌شود تا نفوذ نیتروژن به داخل مذاب مورد بررسی قرار گیرد. معادله (۱) قانون دوم فیک را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه، C غلظت، x فاصله، t زمان و D ضریب نفوذ است. با فرض اینکه، نفوذ نیتروژن مستقل از غلظت باشد، برای سرباره و فلز مذاب معادله‌ی نفوذ به صورت معادلات (۲) و (۳) ساده می‌شود.

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C_s}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} \quad (3)$$

که در این روابط، C_s و C_m میزان غلظت یون نیتروژن

- iron, Archives of Foundry Engineering, ISSN (1897-3310), 2012, 12, 25–28.
- [5] Jonuleit M., Maschke W., Production of GJS with cored wire, ASK Chemicals L.P., Dublin, Ohio, USA, 2012.
- [6] Naro R. L., Control of slag and insoluble build-up in melting furnaces, International Iron Melting Conference Orlando, Florida, November 4, 2003.
- [7] Williams D. C., Naro R. L., Mechanism and control of buildup phenomenon in channel induction and pressure pouring furnaces – Part 1, ASI International Ltd., Flux Division, Cleveland, Ohio USA, 2004.
- [8] Doetsch E., Holding and pouring magnesium treated cast iron in induction furnaces, Trans. American Foundry Soc., 1986, 94.
- [9] Williams D., Induction melters examine furnace and pouring technology refractories, AFS Induction Melting, Holding and Pouring of Iron Conference, 1999.
- [10] Gaskell D. R., Introduction to the Thermodynamics of Materials, 4th ed., New York, USA, 2003, 359.
- [11] Improving Ladle Cleanliness, Foundry Management and Technology, January 2007, 28-30.

این مقدار تقریباً برابر با $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ است. همچنین بر اساس مراجع، مقدار ضریب نفوذ نیتروژن در فلز مذاب برابر با $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ خواهد بود. چنانچه مشخص است، به نظر می‌رسد محاسبات تئوری تقریباً به نحو درستی روند و میزان نفوذ نیتروژن را گزارش کرده‌اند. شایان ذکر است، هر قدر میزان نفوذ نیتروژن بیشتر باشد، احتمال تشکیل فازهای نیتريدی افزایش یافته و در عوض تمایل به تشکیل فازهای اکسیدی کاهش می‌یابد. در نتیجه چون فازهای اکسیدی اصلی‌ترین تشکیل‌دهنده رسوبات هستند، مقدار این رسوبات کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش قابلیت نفوذ نیتروژن، می‌توان فرآیند رسوب‌گذاری را کنترل کرد [۱۱].

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- بخش عمده‌ی رسوبات نامحلول انباشته شده در مجاری و دیواره‌های ماشین ذوب‌ریز فشاری، از اکسید منیزیم تشکیل یافته است. این فاز در اثر اکسیداسیون منیزیم به کار رفته برای کرومی سازی گرافیت‌ها در چدن مذاب به وجود می‌آید.
- ۲- استفاده از فلاکس EF40L منجر به بهبود قابل توجه نرخ کاهش جریان الکتریکی شد که نشان‌گر کاهش نرخ انباشتگی رسوبات نامحلول در کوره است.
- ۳- استفاده از اتمسفر نیتروژن به جای هوا، منجر به افزایش ماندگاری منیزیم در مذاب (کاهش نرخ میرایی) شد. استفاده از این روش نیز باعث کاهش قابل توجه در مقدار اکسید منیزیم شد.
- ۴- برای افزایش عمر اینداکتور ماشین‌های ذوب‌ریز فشاری و کاهش توقف‌ها برای تعویض اینداکتور، استفاده از روش‌هایی مانند افزودن فلاکس یا استفاده از اتمسفر نیتروژن ضروری است.
- ۵- با به کارگیری راه‌حل‌های ارائه شده در مقاله، عمر اینداکتور از حدود دوازده روز به بیش از دو برابر و در برخی موارد تا حدود دو ماه افزایش یافت.

مراجع

- [1] Brown J. R., Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, 11th ed., Oxford, UK, 2000.
- [2] ASM Handbook, Formerly 9th Edition Metals Handbook, Volume 15, Casting, 1998.
- [3] Qizhou C., Bokank W., Recent development of ductile cast iron production technology in China, China Foundry, 2008, 5, 82-91.
- [4] Guzik E., Wierzchowski D., Modern cored wire injection 2PE-9 method in the production of ductile