

## بررسی اثرات پوشش دهی گندله گل گهر - چادرملو بر رفتار آن در فرایند احیای مستقیم

جعفر صفریان دستجردی\*، علی سعیدی\*\*  
دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۲/۹/۸ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۱۰/۱۶)

چکیده - افزایش دما در فرایند احیای مستقیم به خاطر فواید آن نظیر افزایش سرعت تولید و بهبود کیفیت محصول همواره مورد توجه تولیدکنندگان آهن اسفنجی است. پارامتر محدود کننده افزایش دمای احیا پدیده چسبندگی یا خوشه شدن آهن اسفنجی در راکتور احیای مستقیم است و بنابراین در عمل نمی توان دما را از حد معینی بالاتر برد. ثابت شده است که پوشش دهی گندله با برخی مواد و سپس استفاده از آن در احیای مستقیم اثر قابل توجهی بر جلوگیری از چسبندگی و کاهش آن دارد. در این تحقیق میل به چسبندگی گندله تولیدی از کنسانتره سنگ آهن گل گهر و چادرملو در دماهای مختلف بررسی شد. همچنین چسبندگی این گندله در حالتی که با مقادیر مختلف آهک هیدراته پوشش داده شده بود در یک دما ثابت مورد مطالعه قرار گرفت. با افزایش دمای احیای درجه خوشه شدن این گندله به طور خطی در محدوده دمایی مورد مطالعه افزایش می یابد و در مقابل در حالت پوشش داده شده مقاومت خوبی در مقابل خوشه شدن از خود نشان می دهد. این رفتار عالی در حالی است که احیای پذیری و فلزی شدن این گندله در طی احیای مستقیم به خاطر ماهیت پوشش آهک هیدراته که متخلخل و ناپیوسته است تفاوت چندانی با گندله بدون پوشش ندارد.

واژگان کلیدی: آهن اسفنجی، احیای مستقیم، پوشش دهی گندله، خوشه دار شدن DRI

## Effects of Coating Golegohar-Chadormalu Pellet on Its Behaviour in Direct Reduction Process

J. Safarian-Dastjerdi\* and A. Saidi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

**Abstract:** A higher bustle temperature in midrex direct reduction process is always desirable due to its positive effect on the productivity and DRI quality. The limit of the bustle temperature is related to the sticking or clustering behaviour of oxide pellets during the reduction in the reactor. It has been well established that coating of oxide pellets by a refractory material decreases its

\*\* - استاد

\* - مربی

*tendency to clustering. In this study, the clustering behaviour of oxide pellets (produced from Golegozar-Chadormalu iron ore) during reduction at different temperatures was investigated. The effect of coating with different amounts of hydrated lime on the clustering behaviour was also examined. Microscopic examination of coated pellets shows a porous, non-continuous layer of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  being formed on the surface of the pellets. The clustering tendency of coated pellets, measured by the standard sticking test at pilot scale, was much lower, compared with normal (uncoated) pellets, while their reducibility was the same.*

**Keywords:** *Sponge iron, Direct reduction, Coated pellet, Clustering of DRI*

## ۱- مقدمه

در فرایند احیای مستقیم اکسید آهن معمولاً به شکل گندله<sup>۱</sup>، بریکت<sup>۲</sup> یا کلوخه<sup>۳</sup> توسط عوامل جامد (زغال یا کک) و یا عوامل گازی ( $\text{H}_2$ , CO و ...) احیا شده و از آن آهن اسفنجی<sup>۴</sup> تولید می‌شود. عمل احیای اکسیدهای آهن براساس مدل هسته کاهنده<sup>۵</sup> انجام می‌شود، بدین صورت که اگر یک ذره اکسید آهن به شکل هماتیت ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) تحت عمل احیا قرار گیرد، در یک درصد مشخص از عمل احیا مقداری از  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  در مرکز ذره باقی می‌ماند و در اطراف آن به ترتیب لایه‌های  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و Fe قرار می‌گیرند به طوری که در سطح خارجی ذره آهن فلزی وجود خواهد داشت.

در شرایط صنعتی احیای مستقیم در مدت زمان زیادی از پروسه احیا مواد داخل کوره در سطح خود دارای آهن فلزی اند که در اثر احیای اکسید آهن تولید شده است، بنابراین چنانچه دمای داخل کوره بالا باشد به طوری که بین دو ذره در تماس (یا برای مثال دو گندله در تماس) نفوذ اتمهای آهن اتفاق بیفتد دو ذره در اثر مکانیزم جوش نفوذی<sup>۶</sup> به یکدیگر پیوند می‌خورند. چنانچه دمای احیا از حد مشخص بیشتر باشد چسبندگی ذرات با این مکانیزم توسعه یافته و تعداد زیادی از ذرات به یکدیگر چسبیده و تولید خوشه<sup>۷</sup> می‌کنند. به این پدیده خوشه شدن آهن اسفنجی گفته می‌شود [۱].

امروزه تقریباً کل آهن اسفنجی جهان در کوره‌های عمودی و با فرایندهای میدرکس و HYL تولید می‌شود. به طور کلی در این فرایندها هر چه دمای احیای بیشتر باشد سرعت تولید (سرعت احیای مستقیم) بیشتر خواهد بود، برای مثال در فرایند احیای مستقیم میدرکس به ازای هر ۲۵ درجه سانتیگراد افزایش دمای

در بستر مواد میزان تولید کوره حداقل به میزان ۲٪ افزایش خواهد یافت [۲]. عامل محدود کننده در افزایش دمای احیا پدیده خوشه شدن آهن اسفنجی است زیرا برای هر کانه مشخص پدیده چسبندگی ذرات آهن اسفنجی در بالاتر از یک دمای مشخص که به دمای نرم شدن معروف است به شدت افزایش می‌یابد. خوشه شدن آهن اسفنجی در کوره‌های قائم باعث بروز مشکلاتی نظیر کانالیزه شدن بستر مواد، حرکت نایکنواخت بار در کوره، افزایش ضایعات از نوع خوشه آهن اسفنجی و مهمتر از همه غده بستن<sup>۸</sup> مواد در کوره می‌شود، به همین دلیل در شرایط بهره‌برداری احیا، دمای احیا کمی کمتر از دمای نرم شدن تنظیم می‌شود تا حداکثر سرعت احیا در شرایط عدم خوشه شدن آهن اسفنجی میسر شود. بررسی مراجع نشان می‌دهد با پوشش دهی آهن اسفنجی می‌توان دمای چسبندگی و خوشه‌ای شدن را افزایش داد و لذا امکان افزایش دمای احیای و در نتیجه افزایش راندمان تولید رافراهم آورد. هدف از این تحقیق مطالعه رفتار چسبندگی گندله تولیدی از دو کسانتره گل گهر و چادرملو در فرایند احیای مستقیم و تعیین اثر پوشش آهک هیدراته بر کاهش چسبندگی و نیز احیای پذیری گندله بوده است.

## ۲- سابقه پوشش دهی گندله اکسید آهن

مهمترین ماده اولیه مصرفی در احیا مستقیم، گندله اکسیدی است که در آن اکسید آهن تقریباً به طور کامل به شکل  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  است. از بیش از سه دهه پیش ایده پوشش دهی گندله اکسیدی و سپس استفاده از آن در احیای مستقیم برای جلوگیری از پدیده خوشه شدن آهن اسفنجی مطرح بوده است و لیکن اولین اقدام عملی

جدول ۱- تحلیل شیمیایی گندله اکسیدی (اعداد به درصد وزنی اند).

CaO/SiO <sub>2</sub>	Fe O	S	TiO <sub>2</sub>	Mn	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Fe-total
۰/۴۷	۰/۱۴	۰/۰۰۴	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۵۲	۰/۳۴	۰/۷۵	۰/۸۷	۱/۵۹	۶۷/۱۷۵

جدول ۲- تحلیل شیمیایی آهک هیدراته (اعداد به درصد وزنی اند)

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Mg(OH) <sub>2</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>
۰/۰۹	۰/۲	۲/۱	۰/۵۵	۹۵/۵

شیمیایی گندله مصرفی که در جدول (۱) آمده است تقریباً مشابه گندله خط تولید شرکت فولاد مبارکه است. به عنوان ماده پوشش از آهک هیدراته تولیدی از سنگ آهک معدن حوض ماهی استفاده شد. ترکیب آهک هیدراته مصرفی در جدول (۲) نشان داده شده است.

### ۲- عملیات پوشش دهی

در این تحقیق از روش اسپری برای پوشش دهی استفاده شد که سوسپانسیون مصرفی متشکل از ۸۵ درصد وزنی آب و ۱۵ درصد وزنی آهک هیدراته بود. نمونه‌های پوشش داده شده بر پایه ۰/۸، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ کیلوگرم ماده پوشش دهی به ازای هر تن گندله تهیه شد. قبل از مرحله پوشش دهی، گندله‌ها برای مدت حدود ۲۴ ساعت در ۸۵ درجه سانتیگراد، که مشابه دمای تخلیه گندله از کوره‌های صنعتی گندله‌سازی است، همدم شدند. در طی پاشیدن سوسپانسیون، بستر گندله که به وزن ۲۰۰۰ گرم بود به طور مداوم برای پوشش‌گیری یکنواخت کلیه گندله‌ها زیرورو شد، در حالی که آب اسپری شده بر آنها به خاطر گرم بودن گندله‌ها سریعاً تبخیر می‌شد.

### ۳- آزمایش چسبندگی

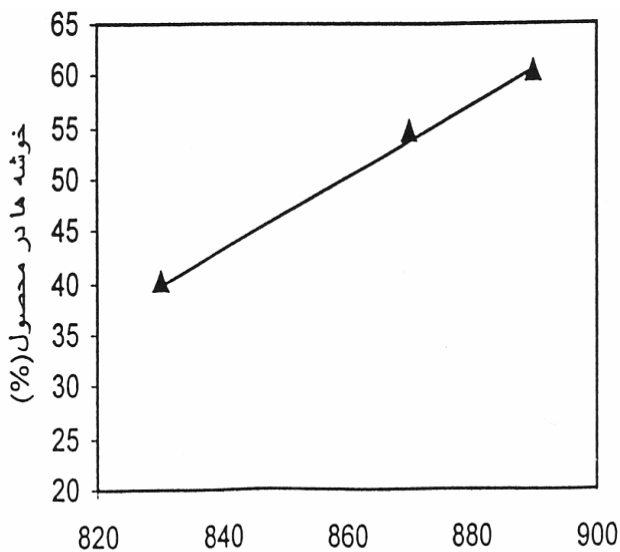
به منظور بررسی چسبندگی گندله‌های پوشش‌دار و بدون پوشش در طی احیای مستقیم، آزمون چسبندگی در یک کوره مقیاس نیمه صنعتی که شماتیک آن در شکل (۱) آمده است

در مقیاس صنعتی به فعالیتهای شرکت<sup>۹</sup> OEMK در سال ۱۹۸۸ بر می‌گردد، این شرکت از گندله تولیدی از سنگ آهن با دمای نرم شدن پایین استفاده می‌کرد که در دماهای ۶۸۰-۷۲۰ درجه سانتیگراد دچار خوشه شونده می‌شد. بنابراین دمای احیا در محدوده ۶۸۰-۷۰۰ درجه سانتیگراد تنظیم می‌شد، با پوشش دهی این گندله با آهک امکان افزایش دمای احیا تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد میسر شد و در اثر آن ظرفیت تولید احیای مستقیم به حد ۱۵-۱۰٪ افزایش یافت [۳]. در عملیات پوشش دهی گندله، گندله پخته شده با روشهای غوطه‌وری یا اسپری با سوسپانسیونی حاوی ذرات جامد نظیر آهک، دولومیت، سیمان، تالک و.... در تماس قرار می‌گیرد و لایه‌ای از این ذرات بر روی سطح گندله یا بخشی از آن شکل می‌گیرد. وجود این لایه باعث قطع ارتباط فلز - فلز (تماس آهن با آهن) موجود در سطح گندله شده و در نتیجه امکان و احتمال چسبندگی گندله‌ها به یکدیگر کاهش یافته و بنابراین امکان افزایش دمای احیا به بالاتر از دمای حساسیت به خوشه شدن گندله میسر می‌شود.

### ۳- روش تحقیق

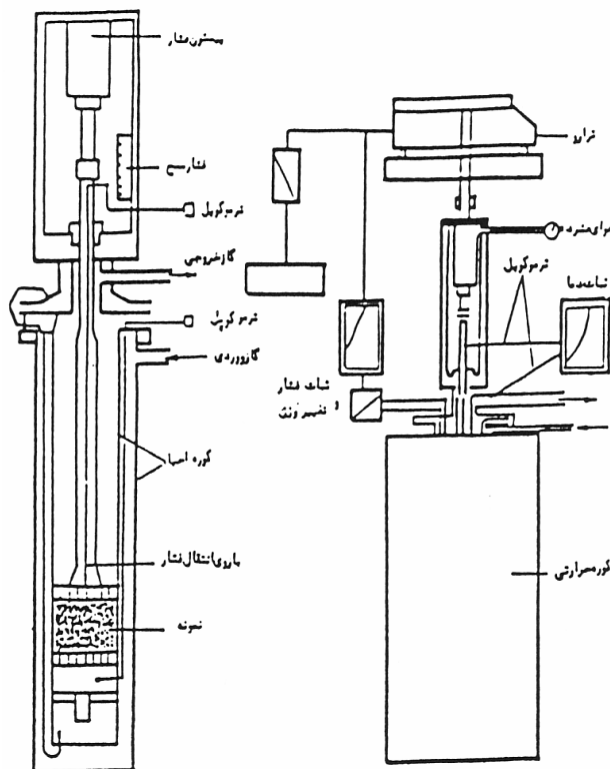
#### ۱- مواد اولیه

گندله مورد مصرف در این کار تحقیقاتی، با استفاده از مخلوط کنسانتره چادرملو و گل گهر (با نسبت‌های مساوی ۵۰٪) همراه با افزودنی بنتونیت به میزان ۰/۶ درصد، در آزمایشگاه آهن سازی شرکت فولاد مبارکه در مقیاس نیمه صنعتی تولید شد. ترکیب



دمای احیا (C)

شکل ۲- ارتباط بین درصد خوشه شدن آهن اسفنجی بدون پوشش با دمای احیای مستقیم



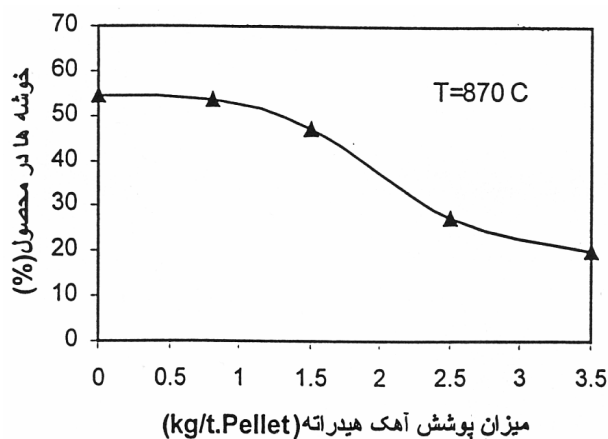
شکل ۱- شماتیک و اجزای دستگاه آزمون احیای تحت فشار

محصول تعیین می‌شود. برای مطالعه استحکام خوشه‌ها (شدت چسبندگی مواد) از استوانه مینی تامبلر (طول ۲۰cm و قطر ۱۲/۵cm) استفاده شده و پس از هر ۷ دور چرخش آن درصد خوشه‌های باقی مانده نسبت به کل آهن اسفنجی تولیدی محاسبه شد [۴].

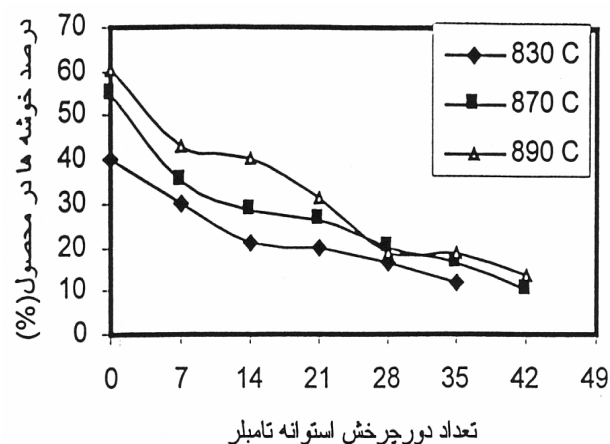
#### ۴-آزمون احیای پذیری

برای بررسی اثر پوشش دهی گندله با آهک هیدراته بر روی احیای پذیری، از یک دستگاه ترموگراویمتری<sup>۱</sup> مقیاس نیمه صنعتی استفاده شد. آزمون احیای پذیری بر روی گندله بدون پوشش و گندله پوشش داده شده با مقدار ۲/۵kg آهک هیدراته به ازای هر تن گندله انجام شد. هر آزمون بر روی ۵۰۰ گرم گندله و در شرایط ایزوترم (دمای بستر ۸۳۰ درجه سانتیگراد) و گاز احیاکننده با ترکیب  $10\%N_2, 15\%CO_2, 30\%CO, 45\%H_2$  و دبی کل  $50 \text{ lit/min}$  براساس استاندارد I SO/DIS 11258 انجام شد [۴]. در طی این آزمایش تغییرات وزن توده گندله نسبت به زمان ثبت شد.

انجام شد. در این روش احیا در بستر ثابت و تحت فشار صورت می‌گیرد، طبق دستورالعمل‌های این آزمایش گندله با دانه بندی بالای ۶۳mm و وزن ۱۲۰۰ گرم در محفظه استوانه‌ای به قطر ۱۲/۵ Cm شارژ می‌شود. کوره و بستر گندله تا دمای مورد نظر ( ۸۳۰، ۸۷۰، و ۸۹۰ درجه سانتیگراد برای گندله بدون پوشش و ۸۷۰ درجه سانتیگراد برای گندله پوشش دار) تحت جریان گاز خنثی گرم می‌شود. گاز احیاکننده شامل  $10\%N_2$  و  $15\%CO_2, 30\%CO, 45\%H_2$  (درصد حجمی) با دبی کل  $40 \text{ lit/min}$  برای احیا استفاده می‌شود. پس از یک ساعت احیا، فشار ۱۴۷kPa بر بستر گندله اعمال شده و احیا برای ۲ ساعت دیگر ادامه می‌یابد. در ادامه فشار و جریان گاز احیاکننده حذف و بستر DRI تولیدی تحت جریان گاز نیتروژن تا دمای محیط سرد می‌شود. پس از احیای گندله‌ها تحت فشار، DRI تولیدی تخلیه و درجه خوشه شدن (درصد خوشه‌ها) با توزین خوشه‌ها (دو یا چند گندله چسبیده به یکدیگر) و کل



شکل ۴- اثر میزان پوشش آهک هیدراته بر درجه خوشه شدن آهن اسفنجی در دمای ۸۷۰ C



شکل ۳- تغییرات درصد خوشه های آهن اسفنجی بر حسب تعداد دور استوانه تامبلر برای گندله بدون پوشش و در دماهای مختلف

#### ۴- نتایج و بحث

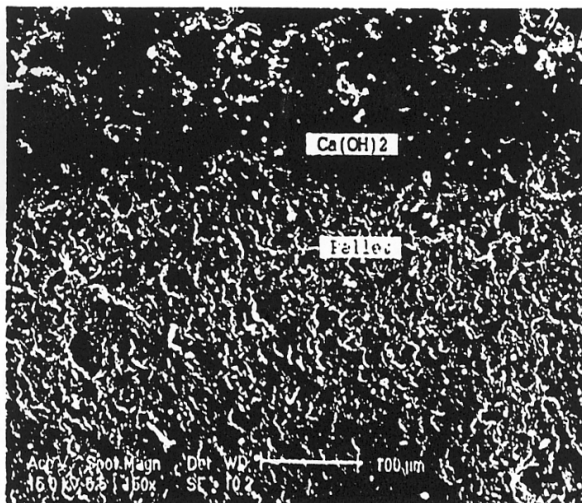
میل به چسبندگی گندله در فرایند احیای در ارتباط مستقیم با دمای احیاست. شکل (۲) ارتباط بین درجه خوشه شدن گندله گل گهر- چادرملو (بدون پوشش) و دمای احیای آن را نشان می دهد. براساس این نمودار با افزایش دمای از ۸۳۰ به ۸۹۰ درجه سانتیگراد میل به تشکیل خوشه به طور خطی از ۴۰٪ به ۶۰٪ افزایش می یابد و می توان گفت برای این گندله به ازای هر ۱۰ درجه سانتیگراد افزایش دمای احیا، درجه خوشه شدن ۳/۴٪ بیشتر می شود. بر اساس مدل هسته کاهنده، در طول فرایند احیا به تدریج آهن فلزی در سطح گندله تشکیل و به سمت مرکز رشد می کند. بنابراین در نقاط تماس گندله ها با یکدیگر یک تماس فلز با فلز در طول زمان احیا وجود دارد، در این شرایط انتقال جرم با مکانیزم نفوذ<sup>۱۱</sup> در حالت جامد عنصر آهن بین هر گندله و همسایگان آن رخ می دهد. این پدیده باعث تشکیل باندهای نفوذی بین گندله ها می شود و با گذشت زمان، توسعه می یابد. وسعت این پیوندها تابعی از نفوذ است که خود طبق معادله زیر با دما به طور نمایی در ارتباط است.

$$D = D_0 \cdot \exp(-Q/RT)$$

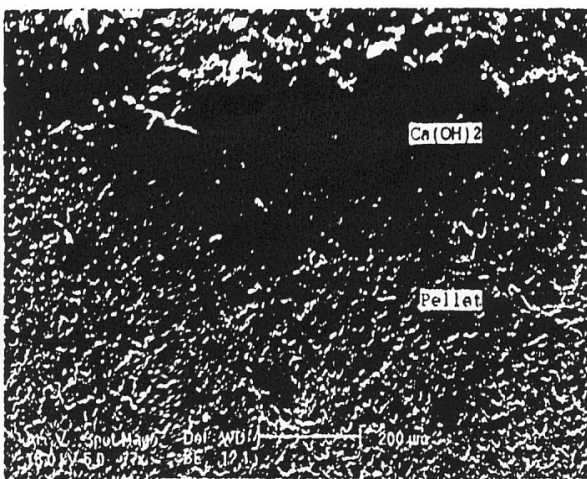
بنابراین در شرایط یکسان با افزایش دما انتظار می رود درجه خوشه شدن گندله به طور نمایی افزایش یابد ولیکن در مورد این گندله همان طور که در

شکل (۲) دیده می شود برای محدوده دمای مورد مطالعه درجه چسبندگی به طور خطی افزایش یافته است. از آنجا که گندله ها همگی دارای سطح صاف و یکنواخت نیستند می توان گفت این موارد باعث عدم حصول سطح تماس یکسان بین گندله ها شده اند و بنابراین متفاوت بودن سطح تماسهای اولیه باعث عدم حصول نتایج مطابق تئوری شده است. شدت چسبندگی گندله ها یا استحکام خوشه های تولید شده ارتباط مستقیم با دما دارد که نتایج آزمایش تامبلر در شکل (۳) به خوبی آن را نشان می دهد. براساس نمودارهای این شکل مقدار خوشه ها برای دماهای بالاتر همواره بیشتر از دماهای پایینتر است که این واقعیت نشان دهنده باندهای فلزی قویتر در نمونه های احیا شده در دماهای بالاتر است. برای مثال در ۲۱ دور چرخش استوانه تامبلر برای گندله احیا شده در ۸۳۰ درجه سانتیگراد مقدار ۲۰٪ مواد به صورت خوشه باقی می ماند در حالی که برای دماهای بالاتر ۸۷۰ و ۸۹۰ درجه سانتیگراد این رقم به ترتیب به ۲۵٪ و ۳۰٪ می رسد.

شکل (۴) درجه خوشه شدن گندله های پوشش شده با مقادیر مختلف پوشش در دمای احیای ۸۷۰ درجه سانتیگراد را نشان می دهد. کاهش درجه خوشه شدن با افزایش میزان پوشش گندله با آهک امری بدیهی است که در شکل (۴) نیز ملاحظه



(الف)

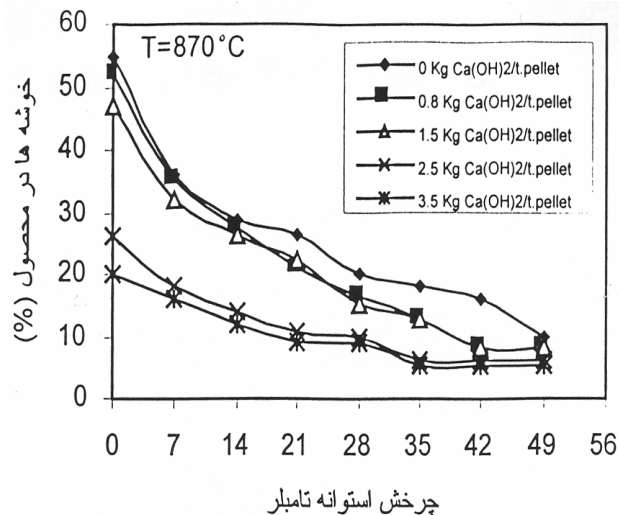


(ب)

شکل ۶- تصویر SEM از پوشش آهک هیدراته روی سطح گندله اکسیدی (الف) سطح یکنواخت و فاقد حفرات میکروسکوپی، (ب) سطح نایکنواخت که حفره میکروسکوپی را نشان می‌دهد.

جامد) افزایش می‌یابد و علاوه بر اینکه مقدار پوشش و ضخامت آن افزایش می‌یابد، کل سطح در معرض پوشش‌گیری گندله‌ها نیز افزایش می‌یابد.

مقایسه بین استحکام خوشه‌ها برای گندله‌های پوشش‌دار و بدون پوشش پس از احیای در ۸۷۰ درجه سانتیگراد در شکل (۵) نشان داده شده است. منحنیهای این شکل نشان می‌دهند که بین گندله‌های پوشش داده شده در مقادیر کم با گندله بدون



شکل ۵- چگونگی تغییرات میزان خوشه‌ها در محصول احیا شده

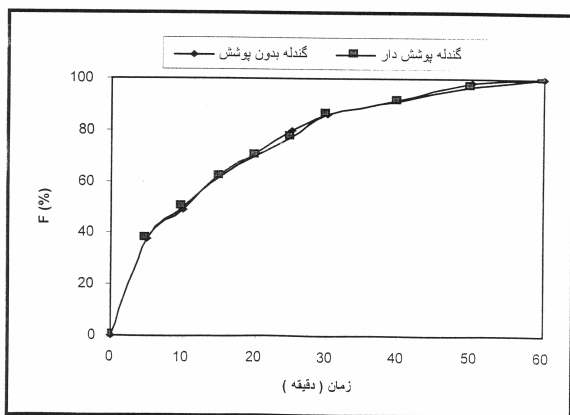
بر حسب چرخش استوانه تامبلر

می‌شود لکن روند این تغییرات از جنبه‌های کاربردی حائز اهمیت است. همان طور که در شکل (۴) دیده می‌شود نرخ کاهش درجه خوشه‌ای شدن تا حدود ۱/۵ کیلوگرم بر تن مصرف آهک هیدراته نسبتاً کم است. ولی با افزایش مقدار مصرف آهک هیدراته تا ۲/۵ کیلوگرم بر تن گندله کاهش قابل ملاحظه‌ای در درجه خوشه‌ای شدن اتفاق می‌افتد و درجه خوشه‌ای شدن به حدود ۲۰٪ می‌رسد که این یک مقدار قابل قبول در فرایند میدرکس است. با افزایش آهک هیدراته به ۳/۵ کیلوگرم بر تن گندله درجه خوشه‌ای شدن با آهنگ کندتری کاهش می‌یابد. با مصرف بیشتر آهک هیدراته پیش بینی می‌شود می‌شود درجه خوشه‌ای شدن باز هم کاهش یابد ولی به دلیل عدم ضرورت دستیابی به درجات خوشه‌ای شدن کمتر از نظر صنعتی و حفظ این اصل که حداقل درجه خوشه‌ای شدن به ازای حداقل مصرف آهک هیدراته مطرح است آزمایش با مقادیر بیشتر هیدرات آهک انجام نشد. اطلاعات شکل (۵) نیز که بعداً تشریح می‌شود عدم نیاز به مقادیر بیشتر آهک را تأیید می‌کند.

با توجه به اینکه در محلول پوشش نسبت ماده جامد به آب ثابت نگهداشته شده با افزایش مصرف ماده پوشش دهی حجم سوسپانسیون مورد استفاده (با نسبت ۸۵٪ آب و ۱۵٪ ماده

جدول ۳- تحلیل شیمیایی DRI تولیدی از دو گندله پوشش دار و بدون پوشش (اعداد به درصد وزنی اند)

گندله	بدون پوشش	پوشش دار
ترکیب شیمیایی		
آهن کل	۹۳/۹۴	۹۲/۶
آهن فلزی	۸۸/۰۵	۸۷/۲۴
درجه فلزی	۹۳/۷۳	۹۴/۲۱
کربن	۰/۲۳	۰/۵۳
گوگرد	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳



شکل ۷- نمودار تغییرات درجه احیا برحسب زمان برای دو گندله بدون پوشش و پوشش دار

مقابل دور می مانند پیشگیری می کند. این خصوصیت گندله پوشش دار نشان می دهد که اگر یکی از دو گندله مجاور پوشش شده باشند نیز از تشکیل پیوند بین آنها جلوگیری می شود، این مسئله از لحاظ فنی در صنعت بسیار مهم است زیرا نیازی نیست که تمامی بار کوره پوشش داده شود. براساس تجربیات حاصله اگر بیشتر از ۳۰٪ گندله های مصرفی پوشش شده باشند خوشه شدن آنها در راکتورهای صنعتی در حد رضایتبخشی خواهد بود [۵].

شکل (۷) نمودار تغییرات درجه احیا (F) برحسب زمان را در آزمون احیاپذیری نشان می دهد که براساس معادله (۱) تعریف شده است. چنانچه ملاحظه می شود هر دو منحنی بسیار نزدیک به هم هستند و اختلافی در احیاپذیری آنها مشاهده نمی شود.

$$F = \frac{\text{کاهش وزن به واسطه احیا}}{\text{حداکثر کاهش وزن ممکن در اثر احیا}} \times 100 \quad (1)$$

$$= \frac{\text{وزن اکسیژن حذف شده در اثر احیا}}{\text{وزن کل اکسیژن قابل حذف}} \times 100$$

رفتار احیاپذیری مشابه گندله پوشش دار با گندله بدون پوشش مؤید این واقعیت است که پوشش آهک هیدراته باعث تأخیر یا

پوشش رفتار نسبتاً یکسانی وجود دارد. از طرف دیگر اختلاف بین گندله پوشش داده شده با مقدار  $2/5 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{t.Pellet}$  و سایر نمونه ها بسیار زیاد است. برای مثال در ۲۱ دور چرخش استوانه تامبلر درصد خوشه ها برای آن حدود ۱۰٪ است در حالی که برای بقیه بیشتر از ۲۰٪ است. مقایسه بین شکل های (۳) و (۵) نشان می دهد که میل به خوشه شدن و همچنین استحکام خوشه ها برای گندله پوشش داده شده با مقدار  $2/5 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{t.Pellet}$  و احیا شده در ۸۷۰ درجه در حد قابل توجهی از گندله بدون پوشش احیا شده در دمای ۸۳۰ درجه نیز بهتر است. این رفتار بهتر گندله پوشش داده شده نشان می دهد که با مصرف آن به عنوان بار کوره به راحتی می توان دمای احیا را بدون اینکه مشکل خاصی در بستر بار به وقوع بپیوندد افزایش داد.

در اثر پوشش دهی گندله، لایه ای از ماده پوشش دهی روی سطح گندله ها یا بخشی از سطح آنها تشکیل می شود. در شکل (۶) یک تصویر از لایه آهک هیدراته روی سطح گندله نشان داده شده است. این لایه در طی فرآیند احیا از تماس فلز با فلز در نقاط تماس گندله ها جلوگیری می کند و در نتیجه چسبندگی و قابلیت خوشه شدن کاهش پیدا می کند. براساس نظر برخی محققان [۴] چسبندگی گندله ها عمدتاً ناشی از چسبندگی و سینتریگ ویسکرها بین گندله های مجاور است، حضور پوشش از چسبندگی گندله ها با ایجاد فضایی که ویسکرها آهن در آن رشد می کنند و در نتیجه از ویسکرها آهن گندله

اخلال در فرایند احیا نمی‌شود. این موضوع به خاطر ماهیت پوشش آهک هیدراته است که روی سطح تشکیل می‌شود. گرچه از لحاظ ماکروسکوپی این پوشش پیوسته و متراکم به نظر می‌رسد ولی از لحاظ میکروسکوپی این پوشش پیوسته نیست و متشکل از مجموعه‌ای از ذرات  $\text{Ca(OH)}_2$  است که در سطح گندله پراکنده شده‌اند. وجود حفرات درشت و حتی درشت تر از حفرات موجود در خود گندله باعث نفوذ راحت گازهای احیاکننده ( $\text{CO}$  و  $\text{H}_2$ ) به داخل گندله و همچنین خروج محصولات گازی احیا ( $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$ ) به خارج از گندله می‌شود. جدول (۳) تحلیل شیمیایی دو گندله پس از احیا را نشان می‌دهد و چنانچه ملاحظه می‌شود هر دو تقریباً آنالیز یکسانی دارند و از لحاظ فلزی شدن نیز پوشش آهک هیدراته اثر منفی ندارد [۶]. بر اساس نتایج این جدول کربن گیری D RI نیز با عمل پوشش دهی با آهک هیدراته تحت تأثیرچندانی قرار نمی‌گیرد، در واقع در صد کربن در تحلیلهای مربوطه نسبتاً پایین و زیر مقدار متعارف کربن در آهن اسفنجی (حدود ۱/۸ درصد) است. این موضوع ناشی از آن است که در استاندارد آزمون احیا استفاده شده، هدف عمل کربن دهی نیست و کربن گرفته شده توسط نمونه‌ها تحت شرایط آزمایش جذب شده است. البته لازم به ذکر است که براساس مطالعات قبلی کربن گیری در شرایط واقعی احیا برای نمونه های بدون پوشش و با پوشش تقریباً یکسان است [۷]. این نکته نیز نباید فراموش شود که در شرایط صنعتی با توجه با اینکه امکان افزایش بیشتر دمای احیا با نمونه پوشش دار میسر می‌شود امکان تولید آهن اسفنجی با کربن بالاتر نیز فراهم می‌شود.

بررسی و مشاهده میکروسکوپی مقاطع برشی گندله پوشش داده شده نشان می‌دهد که مقدار پوشش مصرفی مرتبط با مشخصات سطحی گندله است. برای گندله تحت مطالعه برخی میکروتترکهای سطحی و همچنین حفرات درشت سطحی باعث زبری سطح گندله شده‌اند. در طی پوشش دهی با رسیدن سوسپانسیون بر سطح این گندله‌ها حجم قابل توجهی از سوسپانسیون به داخل این عیوب سطحی (به خاطر نیروهای

موینگی<sup>۱۲</sup> وارد می‌شوند. این پدیده باعث می‌شود که مقداری از ماده پوشش دهی برای پر کرده حفره‌های سطح گندله مصرف شود (نظیر آنچه در شکل ۶-ب دیده می‌شود) و بنابراین اثر چندانی در پیشگیری از خوشه‌شدن نداشته باشد. بنابراین انتظار می‌رود مقدار بهینه ماده پوشش دهی مصرفی برای یک گندله تابع خواص سطحی گندله باشد و پیش‌بینی می‌شود برای گندله گل گهر- چادرمولو با مشخصات سطحی بهتر مقدار پوشش کمتر از مقدار  $\text{Ca(OH)}_2/\text{t.Pellet}$  ۲/۵ Kg نیز بتواند مقاومت به خوشه شدن خوبی در طی احیا در دمای ۸۷۰ درجه سانتیگراد ایجاد کند.

## ۵- نتیجه گیری

۱- میل به خوشه شدن گندله گل گهر- چادرمولو با افزایش دمای احیا در محدوده دمایی ۸۳۰ تا ۸۹۰ درجه سانتیگراد به طور تقریباً خطی و به ازای هر ۱۰ درجه سانتیگراد به میزان ۳/۴٪ افزایش می‌یابد.

۲- برای گندله پوشش داده شده با آهک هیدراته در بالاتر از ۱/۵ کیلوگرم آهک بر تن گندله، میل به خوشه‌شدن شدیداً افت می‌کند. در نمونه‌های احیای شده در دمای ۸۷۰ درجه سانتیگراد برای گندله گل گهر - چادرمولو به ازای مصرف ۲/۵ کیلوگرم آهک هیدراته بر تن گندله درجه خوشه‌ای شدن به حدود ۲۰٪ می‌رسد که برای مصارف صنعتی قابل قبول است.

۳- پوشش دهی گندله با سوسپانسیون آهک هیدراته ایجاد لایه‌ای متخلخل از  $\text{Ca(OH)}_2$  بر سطح گندله می‌کند که ضمن جلوگیری از چسبندگی، احیاپذیری گندله‌ها را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

۴- استحکام خوشه‌های آهن اسفنجی تولید شده در فرایند احیا با افزایش دمای احیا افزایش یافته و با افزایش مقدار پوشش مصرفی کاهش می‌یابد.

۵- بخشی از محلول پوشش همواره وارد خلل و فرج‌های سطحی گندله می‌شود و لذا پیش‌بینی می‌شود مقدار بهینه



کارشناسان محترم واحد تحقیق و توسعه، دفتر فنی آهن سازی، آزمایشگاه پایلوت آهن سازی و آزمایشگاه مرکزی به خاطر همکاریهای مؤثر در انجام پروژه صمیمانه تشکر می‌شود.

پوشش مصرفی برای گندله‌هایی که سطح صاف دارند کمتر باشد.

## قدردانی

هزینه انجام این پروژه توسط شرکت فولاد مبارکه تأمین شد که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از مسئولین و

## واژه‌نامه

1. Pellet
2. Briquette
3. Lump ore
4. Sponge iron
5. Shrinkage core model
6. Diffusion welding

7. Cluster
8. hanging
9. Oskol Electrometallurgical kombinat
10. Thermogravimetry
11. Diffusion
12. capillary action

## مراجع

1. Narita, K. Kaneko, D. and Kimura, Y. "Study on Clustering and its Prevention in the Shaft Furnace for Direct Reduction Process," *Trans. ISIJ*. Vol. 20, PP. 228-235, 1980
2. Griscom, F. N. Metiuse G. E., and Kopfle, J. T. "Ironmaking Technology for the New Millennium," 2<sup>nd</sup> Quarter, Direct from Midrex, PP. 3-6, 2000
3. Griscom, F. N. "Coated Oxided Pellets," 1st Quarter, Direct From Midrex, PP. 8-10, 1995.
4. Feinman J. and Mac Rae, D. R. "Direct Reduced Iron Technology and Economics of Production and Use," *The Iron & steel society*, 1999.
5. Wong, P. L. M. Kim M. J. and Choi, C. H. "Sticking Behaviour in Direct Reduction of Iron

- Ore," *Ironmaking and steelmaking*, Vol. 26, No. 1, PP. 53-57, 1999.
6. Kortman H. A., and Munnik, B. de "Improvement of DR-Pellets Related to Sticking and Process by Application of Specifically Adjusted Coating," *Ironmaking conference proceeding*, Vol. 55, Pittsburgh, Pennsilvatina, USA, PP. 24-27, 1996
۷. صفریان دستجردی، ج. سعیدی، ع. رفاهی، م. و سلیمانپور، ر.، "بررسی تأثیر پوشش دهی گندله اکسیدی بر خواص آن در طی احیای مستقیم، سمپوزیوم فولاد، ۸۰، ۱ تا ۲ اسفندماه ۱۳۸۰.