

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

جعفر صفریان دستجردی<sup>\*</sup>، علی سعیدی<sup>\*\*</sup>

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 خوششدن آهن اسفنجی در راکتور احیای مستقیم است و بنابراین در عمل نمی‌توان 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 خوششدن این گندله به طور خطی در محدوده دمایی مورد مطالعه افزایش می‌یابد و در مقابل در حالت پوشش داده شده مقاومت خوبی در مقابل خوششدن از خود نشان می‌دهد. این رفتار عالی در حالی است که احیاپذیری و فلزی شدن این گندله در طی احیای مستقیم به خاطر ماهیت پوشش آهک هیدراته که مخلخل 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

\* - مریب

*tendency to clustering. In this study, the clustering behaviour of oxide pellets (produced from Golegohar-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

در بستر مواد میزان تولید کوره حداقل به میزان ۲٪ افزایش خواهد یافت [۲]. عامل محدود کننده در افزایش دمای احیا پدیده خوش 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. خوش 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 غله بستن<sup>۱</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 خوش 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 احیا و در نتیجه افزایش راندمان تولید رافراهم آورد. هدف از این تحقیق مطالعه رفتار چسبندگی گندله تولیدی از دو کنسانتره گل گهر و چادرملو در فرایند احیا مستقیم و تعیین اثر پوشش آهک هیدراته بر کاهش چسبندگی و نیز احیاپذیری 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 تقريباً به طور کامل به شکل  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  است. از بیش از سه دهه پيش ايده پوشش دهی گندله اکسیدی و سپس استفاده از آن در احیای مستقیم برای جلوگیری از پدیده خوش شدن آهن اسفنجی مطرح بوده است و لیکن اولین اقدام عملی

## 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 ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  و ...) احیا شده و از آن آهن اسفنجی<sup>۴</sup> تولید می‌شود. عمل احیای اکسیدهای آهن براساس مدل هسته کاوهنه<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  $\text{Fe}$  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 فلزی‌اند 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 و ذره در اثر مکانیزم جوش نفوذی<sup>۶</sup> به یکدیگر پیوند می‌خوردند. 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 خوش<sup>۷</sup> می‌کنند. به این پدیده خوش 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 احیا 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

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) 2	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 فولادمبارکه 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 دهن

در این تحقیق از روش اسپری برای پوشش دهن استفاده شد که سوسپانسیون مصرفی متشکل از ۸۵ درصد وزنی آب و ۱۵ درصد وزنی آهک هیدراته بود. نمونه های پوشش داده شده بر پایه ۰/۸، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ کیلوگرم ماده پوشش دهن به ازای هر تن گندله تهیه شد. قبل از مرحله پوشش دهن، گندله ها برای مدت حدود ۲۴ ساعت در ۸۵ درجه سانتیگراد، که مشابه دمای تخلیه گندله از کوره های صنعتی گندله سازی است، همدما شدند. در طی پاشیدن سوسپانسیون، بسترهای گندله که به وزن ۲۰۰۰ گرم بود به طور مداوم برای پوشش گیری یکنواخت کلیه گندله ها زیرورو شد، در حالی که آب اسپری شده بر آنها به خاطر گرم بودن گندله ها سریعاً تبخیر می شد.

## ۳- آزمایش چسبندگی

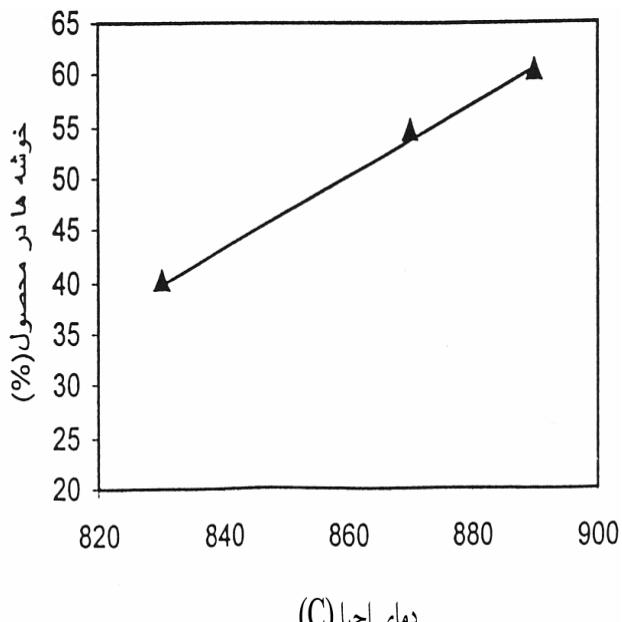
به منظور بررسی چسبندگی گندله های پوشش دار و بدون پوشش در طی احیای مستقیم، آزمون چسبندگی در یک کوره مقیاس نیمه صنعتی که شماتیک آن در شکل (۱) آمده است

در مقیاس صنعتی به فعالیتهای شرکت OEMK در سال ۱۹۸۸ بر می گردد، این شرکت از گندله تولیدی از سنگ آهن با دمای نرم شدن پایین استفاده می کرد که در دماهای ۶۸۰-۷۲۰ درجه سانتیگراد چار خوش شوندگی می شد. بنابراین دمای احیا در محدوده ۶۸۰-۷۰۰ درجه سانتیگراد تنظیم می شد، با پوشش دهنی این گندله با آهک امکان افزایش دمای احیا تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد میسر شد و در اثر آن ظرفیت تولید احیا مستقیم به حد ۱۰-۱۵٪ افزایش یافت [۳]. در عملیات پوشش دهن گندله، گندله پخته شده با روشهای غوطه وری یا اسپری با سوسپانسیونی حاوی ذرات جامد نظیر آهک، دولومیت، سیمان، تالک و..... در تماس قرار می گیرد و لایه ای از این ذرات بر روی سطح گندله یا بخشی از آن شکل می گیرد. وجود این لایه باعث قطع ارتباط فلز - فلز (تماس آهن با آهن) موجود در سطح گندله شده و در نتیجه امکان و احتمال چسبندگی گندله ها به یکدیگر کاهش یافته و بنابراین امکان افزایش دمای احیا به بالاتر از دمای حساسیت به خوش شدن گندله میسر می شود.

## 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٪/۵۰٪) همراه با افزودنی بتونیت به میزان ۰/۶ درصد، در آزمایشگاه آهن سازی شرکت فولادمبارکه در مقیاس نیمه صنعتی تولید شد. ترکیب

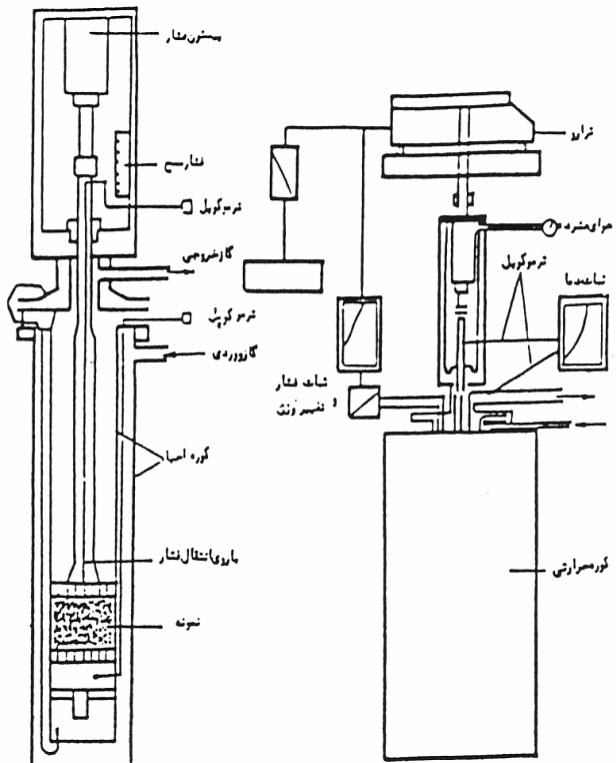


شکل ۲- ارتباط بین درصد خوشیدن آهن اسفنجی بدون پوشش با دمای احیای مستقیم

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

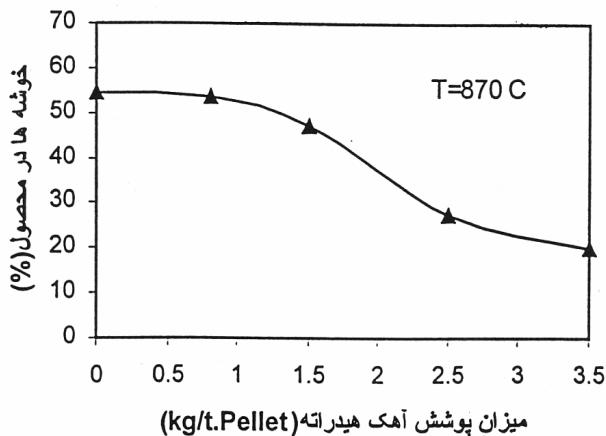
#### ۴-آزمون احیاپذیری

برای بررسی اثر پوشش دهی گندله با آهک هیدراته بر روی احیاپذیری، از یک دستگاه ترمومتری ۱۰ میلیمتری<sup>۱</sup> مقیاس نیمه صنعتی استفاده شد. آزمون احیاپذیری بر روی گندله بدون پوشش و گندله پوشش داده شده با مقدار ۲/۵ kg آهک هیدراته به ازای هر تن گندله انجام شد. هر آزمون بر روی ۵۰۰ گرم گندله و در شرایط ایزو ۸۳۰ درجه سانتیگراد و ۱۴۷ kPa بر بستر گندله اعمال شده و احیا شد. در طی این آزمایش تغییرات وزن توده گندله نسبت به زمان ثبت شد.



شکل ۱- شماتیک و اجزای دستگاه آزمون احیای تحت فشار

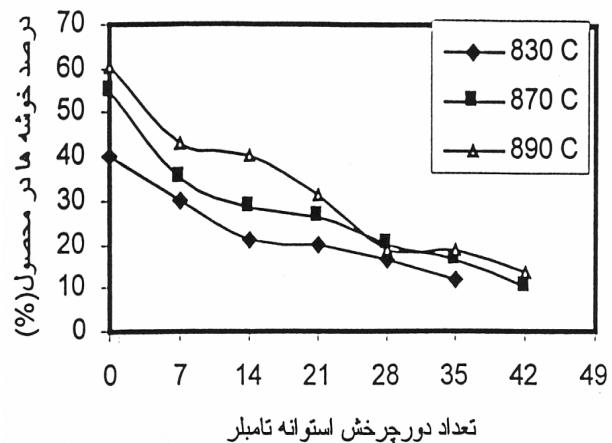
انجام شد. در این روش احیا در بستر ثابت و تحت فشار صورت می‌گیرد، طبق دستورالعمل‌های این آزمایش گندله با دانه‌بندی بالای ۶/۳ mm و وزن ۱۲۰۰ گرم در محفظه استوانه‌ای به قطر ۱۲/۵ cm شارژ می‌شود. کوره و بستر گندله تا دمای مورد نظر (۸۳۰، ۸۷۰ و ۸۹۰ درجه سانتیگراد برای گندله بدون پوشش و ۸۷۰ درجه سانتیگراد برای گندله پوشش دار) تحت جریان گاز خشی گرم می‌شود. گاز احیاکننده شامل  $10\text{ N}_2$ ،  $45\text{ H}_2$ ،  $30\text{ CO}$ ،  $15\text{ CO}_2$  و  $4\text{ lit}/\text{min}$  برای احیا استفاده می‌شود. پس از یک ساعت احیا، فشار ۱۴۷ kPa 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 خوشیدن (درصد خوشیده) با توزین خوشیده‌ها (دو یا چند گندله چسبیده به یکدیگر) و کل



شکل ۴- اثر میزان پوشش آهک هیدراته بر درجه خوششدن آهن اسفنجی در دمای  $870^{\circ}\text{C}$

شکل (۲) دیده می‌شود برای محدوده دمای مورد مطالعه درجه چسبندگی به طور خطی افزایش یافته است. از آنجا که گندله‌ها همگی دارای سطح صاف و یکنواخت نیستند می‌توان گفت این موارد باعث عدم حصول سطح تماس یکسان بین گندله‌ها شده‌اند و بنابراین متفاوت بودن سطح تماسهای اولیه باعث عدم حصول نتایج مطابق تئوری شده است. شدت چسبندگی گندله‌ها یا استحکام خوشه‌های تولید شده ارتباط مستقیم با دما دارد که نتایج آزمایش تامبلر در شکل (۳) به خوبی آن را نشان می‌دهد. براساس نمودارهای این شکل مقدار خوشه‌ها برای دماهای بالاتر همواره بیشتر از دماهای پایینتر است که این واقعیت نشان دهنده باندهای فلزی قویتر در نمونه‌های احیا شده در دماهای بالاتر است. برای مثال در ۲۱ دور چرخش استوانه تامبلر برای گندله احیا شده در  $830^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد مقدار  $20\%$  مواد به صورت خوشه باقی می‌ماند در حالی که برای دماهای بالاتر  $870$  و  $890$  درجه سانتیگراد این رقم به ترتیب به  $25\%$  و  $30\%$  می‌رسد.

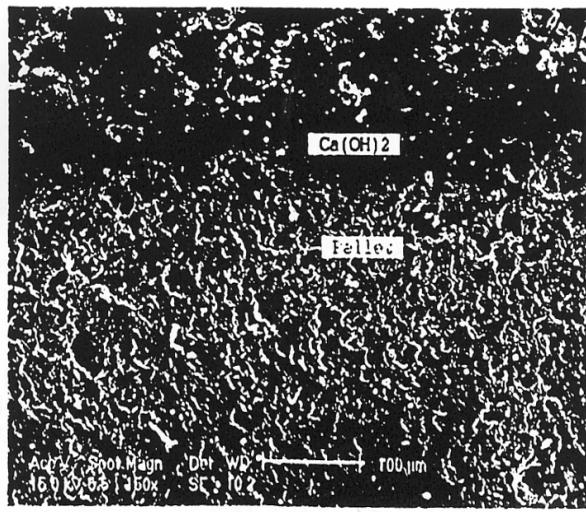
شکل (۴) درجه خوششدن گندله‌های پوشش شده با مقادیر مختلف پوشش در دمای احیای  $870^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. کاهش درجه خوشه شدن با افزایش میزان پوشش گندله با آهک امری بدیهی است که در شکل (۴) نیز ملاحظه می‌رسد.



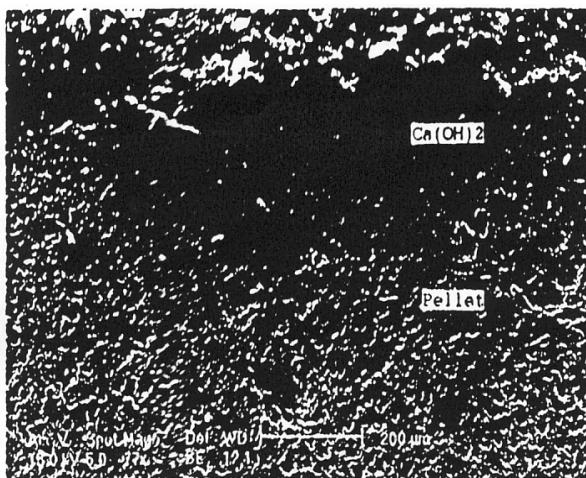
شکل ۳- تغییرات درصد خوشه‌های آهن اسفنجی بر حسب تعداد دور استوانه تامبلر برای گندله بدون پوشش و در دماهای مختلف

#### ۴- نتایج و بحث

میل به چسبندگی گندله در فرایند احیای در ارتباط مستقیم با دمای احیاست. شکل (۲) ارتباط بین درجه خوششدن گندله گل گهر- چادرملو (بدون پوشش) و دمای احیای آن را نشان می‌دهد. براساس این نمودار با افزایش دمای از  $830$  به  $890^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد میل به تشکیل خوشه به طور خطی از  $40\%$  به  $60\%$  افزایش می‌یابد و می‌توان گفت برای این گندله به ازای هر  $10^{\circ}\text{C}$  افزایش دمای احیا، درجه خوششدن  $\frac{3}{4}\%$  بیشتر می‌شود. بر اساس مدل هسته کاهنده، در طول فرایند احیا به تدریج آهن فلزی در سطح گندله تشکیل و به سمت مرکز رشد می‌کند. بنابراین در نقاط تماس گندله‌ها 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 می‌دهد. این پدیده باعث تشکیل باندهای نفوذی بین گندله‌ها می‌شود و با گذشت زمان، توسعه می‌یابد. وسعت این پیوندها تابعی از نفوذ است که خود طبق معادله زیر با دما به طور نمایی در ارتباط است.  $D = D_0 \text{Exp}(-Q/RT)$  بنا براین در شرایط یکسان با افزایش دما انتظار می‌رود درجه خوشه شدن گندله به طور نمایی افزایش یابد ولیکن در مورد این گندله همان‌طور که در



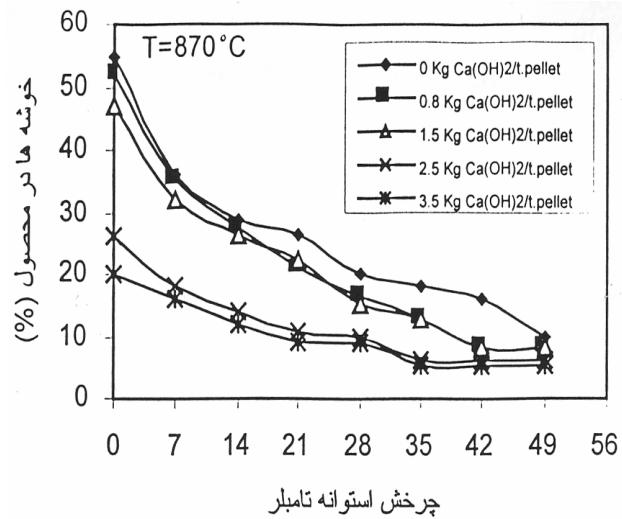
(الف)



(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 می دهد.

جامد) افزایش می یابد و علاوه بر اینکه مقدار پوشش و ضخامت آن افزایش می یابد، کل سطح در معرض پوشش گیری گندله ها نیز افزایش می یابد. مقایسه بین استحکام خوشها برای گندله های پوشش دار و بدون پوشش پس از احیای در ۸۷۰ درجه سانتیگراد در شکل (۵) نشان داده شده است. منحنیهای این شکل نشان می دهند که بین گندله های پوشش داده شده در مقادیر کم با گندله بدون



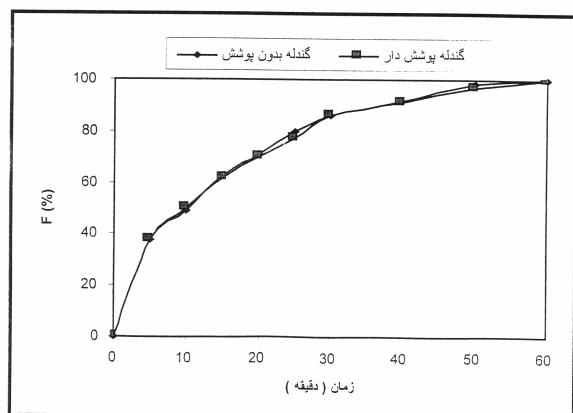
شکل ۵- چگونگی تغییرات میزان خوشها در محصول احیا شده بر حسب چرخش استوانه تامبلر

می شود لکن روند این تغییرات از جنبه های کاربردی حائز اهمیت است. همان طور که در شکل (۴) دیده می شود نرخ کاهش درجه خوشاهی شدن تا حدود  $1/5$  کیلوگرم بر تن مصرف آهک هیدراته نسبتاً کم است. ولی با افزایش مقدار مصرف آهک هیدراته تا  $2/5$  کیلوگرم بر تن گندله کاهش قابل ملاحظه ای در درجه خوشاهی شدن اتفاق می افتد و درجه خوشاهی شدن به حدود  $20\%$  می رسد که این یک مقدار قابل قبول در فرایند میدرکس است. با افزایش آهک هیدراته به  $3/5$  کیلوگرم بر تن گندله درجه خوشاهی شدن با آهنگ کندتری کاهش می یابد. با مصرف بیشتر آهک هیدراته پیش بینی می شود می شود درجه خوشاهی شدن باز هم کاهش یابد ولی به دلیل عدم ضرورت دستیابی به درجات خوشاهی شدن کمتر از نظر صنعتی و حفظ این اصل که حداقل درجه خوشاهی شدن به ازای حداقل مصرف آهک هیدراته مطرح است آزمایش با مقادیر بیشتر هیدرات آهک انجام نشد. اطلاعات شکل (۵) نیز که بعداً تشریح می شود عدم نیاز به مقادیر بیشتر آهک را تأیید می کند.

با توجه به اینکه در محلول پوشش نسبت ماده جامد به آب ثابت نگهداشته شده با افزایش مصرف ماده پوشش دهی حجم سوپسانسیون مورد استفاده (با نسبت آب و  $15\%$  ماده

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

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



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

مقابل دور می‌مانند پیشگیری می‌کند. این خصوصیت گندله پوشش دار نشان می‌دهد که اگر یکی از دو گندله مجاور پوشش شده باشند نیز از تشکیل پیوند بین آنها جلوگیری می‌شود، 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٪ گندله‌های مصرفی پوشش شده باشند خوش شدن آنها در راکتورهای صنعتی در حد رضایت‌بخشی خواهد بود.

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

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

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

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 نمونه‌ها بسیار زیاد است. برای مثال در ۲۱ دور چرخش استوانه تامبلر درصد خوش‌ها برای آن حدود ۱۰٪ است در حالی که برای بقیه بیشتر از ۲۰٪ است. مقایسه بین شکلهای (۳) و (۵) نشان می‌دهد که میل به خوش شدن و همچنین استحکام خوش‌ها 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 می‌دهد که با مصرف آن به عنوان بار کوره به راحتی می‌توان دمای احیا را بدون اینکه مشکل خاصی در بستر بار به وقوع پیوندد افزایش داد.

در اثر پوشش دهی گندله، لایه‌ای از ماده پوشش دهی روی سطح گندله‌ها یا بخشی از سطح آنها تشکیل می‌شود. 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 گندله‌ها جلوگیری می‌کند و در نتیجه چسبندگی و قابلیت خوش شدن کاهش پیدا می‌کند. براساس نظر برخی محققان [۴] چسبندگی گندله‌ها عمدتاً ناشی از چسبندگی و سینترینگ ویسکرهای بین گندله‌های مجاور است، حضور پوشش از چسبندگی گندله‌ها با ایجاد فضایی که ویسکرهای آهن در آن رشد می‌کنند و در نتیجه از ویسکرهای آهن گندله

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 - چادرملو با مشخصات سطحی بهتر مقدار پوشش کمتر از مقدار  $\text{Ca(OH)}_2/\text{t.Pellet}$  ۲/۵ Kg نیز بتواند مقاومت به خوشه‌شدن خوبی در طی احیا در دمای  $870^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد ایجاد کند.

## ۵- نتیجه‌گیری

۱- میل به خوشه‌شدن گندله گل گهر - چادرملو با افزایش دمای احیا در محدوده دمایی  $830^\circ\text{C}$  تا  $890^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد به طور تقریباً خطی و به ازای هر  $10^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد به میزان  $3/4\%$  افزایش می‌یابد.

۲- برای گندله پوشش داده شده با آهک هیدراته در بالاتر از  $1/5$  کیلوگرم آهک بر تن گندله، میل به خوشه‌شدن شدیداً افت می‌کند. در نمونه‌های احیای شده در دمای  $870^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد برای گندله گل گهر - چادرملو به ازای مصرف  $2/5$  کیلوگرم آهک هیدراته بر تن گندله درجه خوشه‌ای شدن به حدود  $20\%$  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

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 مجتمعه‌ای 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 RI نیز با عمل پوشش دهی با آهک هیدراته تحت تأثیر چندانی قرار نمی‌گیرد، در واقع در صد کربن در تحلیلهای مربوطه نسبتاً پایین و زیر مقدار متعارف کربن در آهن اسفنجی (حدود  $1/8$  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 نمونه‌های بدون پوشش و با پوشش تقریباً یکسان است [۷]. این نکته نیز نباید فراموش شود که در شرایط صنعتی با توجه به 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 میکروترکهای سطحی و همچنین حفرات درشت سطحی باعث ذیری 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

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 می شود.

پوشش مصرفی برای گندله هایی که سطح صاف دارند کمتر باشد.

### قدردانی

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

### واژه نامه

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

- 7. Cluster
- 8. hanging
- 9. Oskol Electrometallurgical kombinate
- 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. Metuse 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 Oxidized 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
7. 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، ۱۳۸۰، ۱ تا ۲ اسفندماه ۱۳۸۰.