

چکیده :

استفاده از آهن اسفنجی برای تولید چدن نشکن در ملیاس‌های مختلف آزمایشگاهی و صنعتی در کوره‌های متداول ذوب همچون کوره الکتریکی القایی، کوره الکتریکی مقاومتی و کوره بوکه‌ای زمینی مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. اثر عوامل مختلف از قبیل مشخصات آهن اسفنجی، دمای فلز مذاب و روش بارگیری بر نحوه و زمان ذوب شدن آهن اسفنجی، ترکیب شیمیایی فلز مذاب و میزان سر باره حاصل مورد مطالعه و وقت نظر قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بارکردن آهن اسفنجی به هر دو روش منقطع و پیوسته با میزان صد درصد امکان پذیر بوده و عموماً منجر به بهبود کیفیت محصول خواهد شد. در عین حال مشکلاتی از قبیل افزایش حجم سر باره و خوردگی شدن آستر نوز کوره نیز در اثر جایگزین کردن شمش و فولاد قراضه با آهن اسفنجی بخصوص در صورت بکارگیری روش بارکردن منقطع ایجاد می‌شود که عدم رفع آنها ممکن است سبب کاهش بازدهی عملیات تولید چدن نشکن و ایراد خسارت به کوره گردد. بر اساس این نتایج امکان بارگیری مداوم آهن اسفنجی در کلیه انواع کوره‌های فوق وجود داشته و مایل تکنیکی مربوط به بارکردن پیوسته آهن اسفنجی در کوره‌های نوع اول کاملاً قابل رفع تشخیص داده می‌شوند. آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهد که اغلب مشکلات و محدودیت‌های مربوط به استفاده از آهن اسفنجی در تولید چدن نشکن، در صورت بکارگیری روش بارگیری پیوسته همراه با اعمال رژیم‌های مناسب حرارتی و شیمیایی قابل برطرف شدن می‌باشند.

آهن اسفنجی

از زمان بهره‌برداری از اولین واحدهای احیاء مستقیم که در سراسر دنیا به سبک جدید مورد استفاده اقتصادی قرار گرفتند حدود ۳۰ سال می‌گذرد [۱]. در این مدت حداقل ۱۲ روش متفاوت احیاء مستقیم توانسته‌اند در بازارهای جهانی رخنه کنند که بیش از نیمی از آنها با استفاده از گاز طبیعی و مابقی عمدتاً با استفاده از سوخت‌های جامد، سنگ را به آهن بدل می‌کنند (جدول ۱) [۲-۴]. محصول کلیه این روشها، جسم فزی متخلخلی است که به آن آهن اسفنجی گفته می‌شود [۳]. این ماده که در اثر حذف اکسیژن سنگ آهن در حالت جامد ایجاد می‌شود، می‌تواند دارای شکلهای ظاهری گوناگون از گندله Pellet، خسته

Briquette، کلوخه Lump، پودر Powder و یا مخلوطی از آنها

باشد. کلیه این اشکال می‌توانند برای تولید محصولات آهنی همچون انواع فولاد و چدن مورد استفاده واقع شوند [۵-۹]. از آنجا که هیچیک از فرایندهای احیاء مستقیم قادر به خارج ساختن تمام اکسیژن موجود در سنگ آهن نمی‌باشند، لذا انجام فرایندهای بعدی ذوب و تصفیه برای تبدیل آهن اسفنجی به فولاد یا چدن ضروری می‌نماید. اکسیژن باقیمانده در آهن اسفنجی عموماً بصورت اکسید فرو FeO، باطله‌های سنگی همراه سنگ معدن Gauge، و اکسیدهای مفید اضافه شده به بار کوره احیاء مانند CaO و MgO می‌باشد [۲-۴]. ترکیب شیمیایی یک نمونه آهن اسفنجی تولید شده در مجتمع فولاد اهواز، در جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول ۱- کارخانه‌های احیاء مستقیم دنیا [۳].

بهره‌برداری (سال شمسی)	صاحب واحد	محل استقرار	نام فوایند	تعداد	نوع سوخت	ظرفیت اسمی (هزار تن در سال)
۱۳۳۶	Hylsa	مکزیک	HYL	۱	گاز	۹۵
۱۳۳۹	Hylsa	مکزیک	HYL	۱	گاز	*۲۷۵
۱۳۴۶	Tamsa	مکزیک	HYL	۱	گاز	۲۲۵
۱۳۴۸	OSM	آمریکا	Midrex	۲	گاز	(۳۰۰)
۱۳۴۸	Hylsa	مکزیک	HYL	۱	گاز	۳۱۵
۱۳۴۹	Thyssen	آلمان غربی	Purofer	۱	گاز	(۱۵۰)
۱۳۴۹	NZS	زلاندنو	SL/RN	۱	زغال سنگ	۱۶۵
۱۳۵۰	GSC	آمریکا	Midrex	۱	گاز	۴۰۰
	HSW	آلمان غربی	Midrex	۱	گاز	۴۰۰

(۲۳۰)	گاز	۱	Armco	آمریکا	Armco	۱۳۵۰
۳۵	گاز - زغال	۱	Accar	کانادا	NML	۱۳۵۰
۲۰۰	گاز	۱	Midrex	کانادا	Sidbec	
۱۵۰	زغال	۱	Codir	افریقای جنوبی	Dunswart	
۶۵	زغال	۱	SL/RN	برزیل	Piratini	
(۱۰)	زغال	۱	Kinglor	ایتالیا	K-M	
۲۵۰	گاز	۱	HYL	برزیل	Usiba	۱۳۵۰
۵۰۰	گاز	۱	HYL	مکزیک	Hylsa	
(۳۵۰)	گاز	۱	SL/RN	کانادا	Stelco	۱۳۵۰
(۲۵۰)	گاز - نفت مایع	۱	Accar	کانادا	SMC	۱۳۵۰
(۲۰)	زغال	۱	Kinglor Meteor	ایتالیا	Arvedi	
۳۵۰	گاز	۱	Fior	ونزوئلا	Fior de Ven	
۳۳۰	گاز	۱	Midrex	آرژانتین	Dalamine	
۳۶۰	گاز	۱	HYL	ونزوئلا	Sidor	
۳۳۵	گاز	۱	Midrex	ونزوئلا	Sidor	
(۳۵۰)	نفت	۱	Purofer	برزیل	Cosigua	
(۱۵۰)	نفت سفید	۱	NSC	ژاپن	NSC	
۶۲۵	گاز	۱	HYL	مکزیک	Hylsa	
۶۰۰	گاز	۱	Midrex	کانادا	Sidbec	
(۳۳۰)	گاز	۱	Purofer	ایران	NISCO	۱۳۵۷
۶۰	زغال	۱	DRC	آمریکا	DRC	۱۳۵۷
۲۰۰	گاز	۱	Midrex	قطر	OASCO	
۲۲۰	گاز	۱	Midrex	آرژانتین	ACINDAR	۱۳۵۰
۵۷۵	گاز	۱	HYL	اندونزی	Krakatau	
۲۷۵	گاز	۳	Midrex	ونزوئلا	Sidor	۱۳۵۰
۲۸۵	گاز	۲	HYL	عراق	Govt	
(۸۰۰)	گاز	۲	Midrex	انگلستان	BSC	
۵۷۵	گاز	۱	HYL	اندونزی	Krakatau	۱۳۵۰
۱۱۲	گاز	۳	HYL	ونزوئلا	Sidor	
۲۲۰	گاز	۱	Midrex	ترینیداد	ISCOTT	
۱۰۰	زغال	۳	SL/RN	پرو	Siderperu	
۳۰	زغال	۱	SL/RN	هند	SILL	
۷۰	گاز، نفت، زغال	۱	Plasmared	سوئد	SKF	۱۳۵۰
(۸۸۰)	گاز	۲	Midrex	آلمان غربی	Nordferro	
۲۰	زغال	۱	Kingolar Meteor	برمه	Govt	
۲۲۰	گاز	۱	Midrex	ترینیداد	ISCOTT	۱۳۵۰
۱۰۰	گاز	۲	Midrex	نیجریه	Delta Steel	
۱۵۰	زغال، نفت	۱	Accar	هند	OSIL	
۱۵۰	گاز	۲	HYL	اندونزی	Krakatau	
۷۵	زغال	۱	DRC	افریقای جنوبی	Scaw Metals	۱۳۵۰
۸۰۰	گاز	۲	Midrex	عربستان	Hadeed	
۲۰۰۰	گاز	۲	HYL III	مکزیک	Sicartsa	۱۳۵۰
۱۰۶۶۷	گاز	۲	Midrex	شوروی	OEMK	
۱۰۱۰۰	گاز	۲	Midrex	I & S Project		

۱۰۰۰	گاز	۲	HYL	عراق	Govt Sabah Gas	
۶۵۰	گاز	۱	Midrex	مالزی	Industries	
۱ ۲۰۰	گاز	۳	Midrex	ایران	NISCO	
۱۰۰۰	گاز	۳	HYL	ایران	NISCO	
۶۰۰	زغال	۲	SL/RN	افریقای جنوبی	ISCOR	
۶۰۰	گاز	۱	NSC	مالزی	Govt	۱۳۵۰
۲۵۰	زغال	۱	Plasma	افریقای جنوبی	Union Steel	

۳۰۱۲۹

تعطیل شده است.
HYL III تبدیل شده است.

فرایندها با اشکال مواجه خواهد ساخت. ضرورت سرمایه‌گیری میانی Intermediate Deslagging در اینگونه موارد، سبب اتلاف وقت و افزایش انرژی مصرفی خواهد شد [۵-۸].

آزمایش‌های عملی برای تولید چدن نشکن

الف - ذوب الکتریکی القایی به ۱۱۰۰ کیلوگرم چدن مذاب با ترکیب شیمیایی سطر اول جدول ۳ که در بک کوره القایی ۱/۵ تنی با دیوار سیلیسی ذوب شده بود، مخلوطی از ۴۰۰ کیلوگرم آهن اسفنجی و ۸ کیلوگرم گرافیت گرانوله بطور پیوسته بارگردید. سپس برای رساندن ترکیب شیمیایی حمام مذاب به حد قابل قبول برای تولید چدن نشکن، ۱۸ کیلوگرم فروسیلیسیوم ۷۵ درصد به حمام افزوده شد. ترکیب شیمیایی چدن حاصل به شرح سطر دوم جدول ۳ بدست آمد. همین آزمایش با درصدهای بیشتر آهن اسفنجی، پس از تخلیه چدن مذاب بمقدار لازم، تکرار شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده کاهش میزان عناصر ناخالصی همچون گوگرد، فسیلرغم محتوای ۵/۷ درصدی این عنصر در گرافیت گرانوله، بود (جدول ۳).

ب- ذوب الکتریکی مقاومتی در این آزمایش به بررسی اثر اندازه گندله‌های آهن اسفنجی و دمای حمام مذاب بر سرعت و زمان ذوب شدن آهن اسفنجی پرداخته شد. آزمایشها نتایج جالی بدست داد که پس از تحلیل کامل آنها، بصورت مقاله جداگانه‌ای تحریر خواهد شد.

ج- ساختن چدن نشکن در کوره بسوئه‌ای زمینی با استفاده از درصدهای مختلف آهن اسفنجی و شمش‌های سورل Sorrel اقدام به تهیه چدن نشکن در کوره بوت‌های زمینی شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده نوسان محتوای عناصر موجود در محصول در

در کشور ما تولید سالانه حدود ۵ میلیون تن آهن اسفنجی توسط دو مجتمع فولاد اهواز و مبارکه، برای سالهای آخر دهه ۱۳۶۰، از طریق احیاء مستقیم توسط گاز طبیعی برنامه‌ریزی شده است [۱۶ و ۳]. در سطح جهانی، کاربرد آهن اسفنجی در کوره‌های ذوب موجود در کارگاه‌های ریخته‌گری برای تولید چدن نشکن تنها در سالهای اخیر مورد مطالعه و دقت نظر قرار گرفته است. برای مثال، تنها معدودی مقاله علمی در مورد ذوب آهن اسفنجی در کوره‌های کوپل و کوره‌های القایی در نشریات معتبر در سالهای اخیر به چاپ رسیده است [۱۷-۲۲]. اطلاعات مندرج در این مقالات غالباً در حد کلیات بوده و کمتر نوشته‌ای می‌توان یافت که به‌ذکر اطلاعات کمی و نتایج آزمایش‌های عملی بطور دقیق پرداخته باشد. فهرست نسبتاً کاملی از مقالات منتشر شده در خصوص آهن اسفنجی و موارد کاربرد آن، در پایان این مقاله آمده است [۱-۳۶]. محدودیت‌های استفاده از آهن اسفنجی در تولید چدن نشکن در مواردی از قبیل، ایجاد مقادیر نسبتاً زیاد سرمایه‌های ناشی از وجود باطله‌های سنگی و اکسیدهای آهن، خوردگی نسبتاً شدید دیواره‌های کوره ذوب و بالا رفتن زمان ذوب که سبب کاهش بازدهی کوره می‌شود خلاصه می‌گردد. عمده‌ترین اشکال که مربوط به مورد اول است، بسته به نوع کوره فرق می‌کند. مثلاً در کوره کوپل Cupola که دو فاز فلز و سرمایه از هم جدا بوده و از دو مسیر مختلف بطور پیوسته خارج می‌گردند، سرمایه اضافی مسئله چندان مهمی ایجاد نمی‌کند. بلکه تنها سبب افزایش جزئی در میزان سوخت و کاهش مختصر در سرعت ذوب شدن مواد می‌گردد [۲۱-۱۷]. وجود سرمایه اضافی در کوره‌های القایی مثلاً انگیز تر است. زیرا صورت افزایش ضخامت قشر سرمایه، ادامه بار کردن مواد جامد باعث کندی ذوب شدن آنها در هنگام تماس با این قشر،

آنالیز شیمیایی، درصد جرمی

درصد آهن اسفنجی	کربن	سیلیسیوم	منگنز	فسفر	گوگرد	کروم	نیکل
۰	۳/۷۵	۱/۲۵	۰/۲۲۳	۰/۱۲۶	۰/۰۳	۰/۰۲۸	۰/۰۲۲
۲۶/۵	۳/۲	۰/۹۲۶	۰/۱۵۲	۰/۱۰۹	۰/۰۲۹	۰/۰۳۵	۰/۰۲۹
۵۳	۳/۷۱	۱/۷	۰/۱۱۳	۰/۰۸۸	۰/۰۲۶	۰/۰۲۷	۰/۰۲۸
۶۵	۳/۲۲	۱/۲	۰/۰۸۵	۰/۰۷۲	۰/۰۲۲	۰/۰۲۲	۰/۰۳۵

حد قابل قبول برای تولید چدن نشکن بود. این نتایج پس از انجام تحلیل‌های لازم، در مقاله جداگانه‌ای برشته تحریر درخواهد آمد. جدول ۳- آنالیز شیمیائی حمام مذاب حاصل از افزودن درصد‌های مختلف آهن اسفنجی به چدن مذاب موجود در کوره القائی ۱/۵ تنی.

بحث و نتیجه‌گیری

استفاده از آهن اسفنجی در تهیه چدن نشکن نه تنها امکان پذیر است، بلکه در مواردی نیز سبب بهبود عملیات تولید می‌گردد. مثلاً یکنواختی در شکل و ابعاد که حمل و نقل و بار کردن پیوسته را میسر می‌سازد، باعث ساده شدن عملیات ذوب آهن اسفنجی گردیده است. همچنین بدلیل یکنواختی آنالیز شیمیائی آهن اسفنجی و عاری بودن آن از عناصر سرگردان، تنظیم ترکیب شیمیائی و کاهش میزان عناصر مضر محصول در صورت استفاده از آهن اسفنجی به سهولت امکان پذیر خواهد شد. برای مثال استفاده از آهن اسفنجی در ساخت چدن با گرافیت کروی می‌تواند سبب حذف عناصر پایدارکننده پرلیت مانند کرم و قلع و عناصر مانع کروی شدن کربن مانند گوگرد و سرب گردد.

توفیق در جایگزین کردن آهن اسفنجی بجای آهن قراضه و شمش‌های سورل Sorrel (جدول ۳) همراه با بهبود نسبی آنالیز شیمیائی فلز مذاب نشانگر مزیت استفاده از آهن اسفنجی در تولید چدن‌های نشکن است. تولید نسبتاً کم سرباره، در صورت بکارگیری روش بارگیری و آنالیز شیمیائی مناسب، نشان‌دهنده امکان حذف مشکلات و محدودیتهای موجود در استفاده از این ماده در تولید چدن نشکن می‌باشد. این موضوع علیرغم گزارشهای مکرر درباره مشکل تولید سرباره در موارد استفاده از آهن اسفنجی [۷]، بر اساس نتایج حاصل از انجام آزمایشهای ذکر شده در این گزارش تا حد مطلوبی قابل رفع تشخیص داده می‌شود.

از فواید دیگر استفاده از آهن اسفنجی، امکان تخفیف میزان کربن دهی به چدن‌های مذاب در صورت دسترسی به آهن اسفنجی، بر کربن می‌باشد. این موضوع بخصوص در شرایط کشور ما که از گرافیت‌های وارداتی برای افزایش محتوای کربن چدن ریخته‌گری استفاده می‌شود، در صورت نتیجه بخش بودن آزمایشهای مربوط به افزایش درصد کربن آهن اسفنجی در کوره‌های احیاء مستقیم، بسیار دلپذیر خواهد بود. بعلاوه میزان نسبتاً کم سرباره حاصل از ذوب پیوسته آهن اسفنجی در کوره القائی نشان می‌دهد که بسیاری از مشکلات مربوط به بارگیری منقطع آهن اسفنجی، همچون نقصان بازدهی ذوب و خوردگی آستر کوره، در صورت بکارگیری روش بارکردن پیوسته بسادگی قابل رفع خواهد بود. در خاتمه چنین می‌توان نتیجه گرفت که علیرغم محدودیت‌های موجود در بکارگیری آهن اسفنجی، فواید فراوان کاربرد آن برای تولید چدن نشکن بسادگی می‌تواند ادامه تحقیق پیرامون استفاده از این ماده را توجیه نماید. والسلام.

جدول ۲- نمونه آنالیز شیمیائی آهن اسفنجی مجتمع فولاد اهواز

درصد ذوب	درصد وزنی	فلز					درصد ذوب
		آهن کل	احیاء شده آهن	کربن	گوگرد	درجه فلزی شدن	
۹۳/۷۵	۹۲/۱			۱/۶	۰/۰۰۲	۹۲/۵۵	۹۲/۵۵
۳/۳۸	۱/۶	سیلیس	اکسیدهای آلومینیوم و تیتانیوم Al_2O_3, TiO_2	اکسید کلسیم CaO	اکسید منیزیم MgO	اکسید منگنز MnO	اکسید فسفر P_2O_5
	۱/۵۷			۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۰۷۷	۰/۰۴۲

باطله‌های سنگی

22. Ahier & Singer: Ironmaking and Steelmaking, No. 3, 1981, 137-141.
23. Peart & Pearce: Journal of Metals, Dec. 1985, 1396-1400.
24. Ostrowski & Stephenson, «Use of DRI in Ironmaking»: DRI, Tech. & Econom. of Prod. & 128-133. 1980.
- ۲۵- صدرنژاد: نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۷۵، ۱۳۶۲ صفحات ۸۵ تا ۹۸.
26. Sadrnezhaad: Iron and Steel International, 1981, 309-314
27. Ganguly, «Continuous Feeding of Sponge Iron in Electric Arc Furnace»: Tool & Alloy Steels, March & April 1982, 83-87.
28. Brown & Reddy, «Electric arc furnace Steelmaking with sponge iron»: Ironmaking & Steelmaking. 1979, 24-31.
29. Barbi, «The benefits and drawbacks of using Sponge iron in electric arc Steelmaking»: Iron & Steel International, August 1976, 257-282.
30. Sibakin, Hookings & Roeder, «Electric Arc Steelmaking with Continuously Charged Reduced Pellets: Journal of the Iron and Steel Institute, Oct. 1967, 1005-1017.
- 31- Ramachandran, «Sources of Metallic Iron for the Special steel Industry»: Tool & Alloy Steels, Jan. 1984, 5-8.
32. Rodriguez, Carrillo and Jackson, «Concepts Relevant to Steelmaking with HYL Metallized Pellets»: Iron and Steel Engineer, Jan 1977, 57-60.
33. Ahier & Singer, «High Strength Carbon Steel direct from high purity Sponge Iron»: Iron and Steel International, Oct. 1983, 159-183.
34. Ahier & Singer, «Processing of High Purity Sponge Iron Pellets to Hot and Cold Rolled Strip»: Metals Technology, Nov. 1983, 448-451.
35. Sadrnezhaad and Elliott: Iron and Steel International 1980, 327-404.
36. Elliott, Nouman and Sadrnezhaad: Proceedings of the Int. Iron and Steel Congress. TMS - AIME, Ill., April 1978, 397-404.

مراجع

- ۱- صدرنژاد: سمینار ذوب آهن، اصفهان، ۱۹ تا ۲۱ مهرماه ۱۳۵۹.
- 2- Cunningham and Stephenson, «Direct Reduction Processes»: Direct Reduced Iron, Technology and Economics of Production and Use, 84-95, 1980.
- 3- Dancy: IE&M, May 1983, pp 36-42.
- 4- Feinman, «Direct Reduction Technology»: Metallurgical Treatises, Ed. Tien & Elliott, TMS AIME, 211-228, 1983.
- 5- Pietch: British Foundryman, 1976, 89-93.
- 6- Pietch: A. F. S. International Cast Metals Journal, June 1976, 43-76.
- 7- Handerson, «Use of DRI in Foundries»: DRI Technology and Economics of Production and Use, 1980.
- 8- Pietch: Modern Casting, Sep 1976, 50-55.
- 9- Brown: Iron and Steel Engineer, June 1976, 37-46.
- 10- Moore: Journal of Metals, April 1983, 53-62.
- 11- Miller: Ironmaking & Steelmaking, No. 5, 1977, 257-264.
- 12- Reddy «Use of DRI in Steelmaking»: DRI, Tech. & Econom. of Prod. & Use, 1980.
- 13- Ganguly & Aswath: Tool & Alloy Steels, July 1983, 245-254.
14. Miller: Scientific American, 1976, 68-80.
- 15- Brown & Reddy: I&SM, 1983, 34-40.
- ۱۶- دفتر فنی کل، مجتمع فولاد: برنامه زمانبندی مراحل و نصب و راه اندازی مجتمع فولاد اهواز.
- 17- Geck & Maschlanka: Foundry Trade Journal, Nov. 1976, 969-988.
- 18- Ali & Chatterjee: Tool & alloy Steels, July 1982, 235-241
- 19- Hafner & Clow: Trans. of American Foundrymen's Vol 76, 1968, 53-59.
- 20- Korolev, Lekakh, Bely, Bernado and Dovornichaco: Steel in the USSR, Vol 8, 1978, 57-59.
- 21- Udupa, Ghosh and Chatterjee: India Foundry Journal, Jan 1985, 26-28.