

به نام آنکه جان را فکرت آموخت

فرآیندهای احیای مستقیم

عنوان کتاب اصلی :

Sponge Iron Production by Direct Reduction of Iron Oxide - Chatterjee Amit,
Second Edition, 2012, PHI Learning

ترجمه نام کتاب اصلی :

تولید آهن اسفنجی به روش احیای مستقیم اکسید آهن، آمیت چاترجی

مترجمین:

دکتر رضا تقی آبادی

عضو هیئت علمی گروه مهندسی و علم مواد - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

علیرضا خاکساران

کارشناس ارشد مهندسی متالورژی

بهار ۱۳۹۴

شاپک	: ۱۶۰۰۰ ریال 1-5-93383-600-978 :
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۰۴۱۶۰۴
عنوان و نام پدیدآور	: فرآیندهای احیای مستقیم / تالیف آمیت چاترجی ؛ مترجمین رضا تقی آبادی، علیرضا خاکساران.
مشخصات نشر	: قزوین: جهاد دانشگاهی، واحد قزوین، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری	: ۲۸۳ ص.
یادداشت	: عنوان اصلی: Sponge iron production by direct reduction of iron oxide, 2ed, 2012.
موضوع	: آهن اسفنجی
موضوع	: آهن اسفنجی -- ذوب و استخراج
موضوع	: اکسیدهای آهن -- ذوب و استخراج
رده بندی دیویی	: ۶۶۹/۱۳
رده بندی کنگره	: ۶۶۹/۱۳/۴۲۴/۱۴
سرشناسه	: چاترجی، آمیت، ۱۹۴۴ - ۲۰۱۴ م. Chatterjee, Amit
شناسه افزوده	: تقی آبادی، رضا، ۱۳۵۰ - مترجم
شناسه افزوده	: خاکساران، علیرضا، ۱۳۶۰ - مترجم
شناسه افزوده	: جهاد دانشگاهی، واحد قزوین
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا

فرآیندهای احیای مستقیم

تألیف: آمیت چاترجی

مترجمین: دکتر رضا تقی آبادی، عضو هیئت علمی گروه مهندسی و علم مواد، دانشکده بین المللی امام خمینی (ره)

علیرضا خاکساران، کارشناس ارشد مهندسی متالورژی

مدیر هنری: سمیرا حکیمی‌ها

نوبت چاپ: اول، ۱۳۹۴

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

بهاء: ۱۶۰۰۰ ریال

ناشر: جهاد دانشگاهی واحد قزوین

کلیه حقوق محفوظ است

در ۵۰ سال اخیر، صنعت فولاد در مسیر توسعه‌ی خود، رویدادهای مختلفی از جمله ظهور فولادسازی توسط اکسیژن، ریخته‌گری پیوسته، ریخته‌گری تختال‌های نازک و... را پشت سر گذاشته است. کلیه این نوآوری‌ها وابسته به چدن خام کوره‌بلند به‌عنوان محصول احیای سنگ‌آهن توسط کک هستند. چدن خام کوره‌بلند به‌عنوان یک ماده‌ی اولیه فولادسازی، ابتدا در کوره‌های اجاق باز مورد استفاده قرار می‌گرفت اما اخیراً به‌طور خاص در کوره‌های اکسیژنی جداره‌بازی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

طی سال‌های اخیر، صنعت فولاد شاهد افزایش محبوبیت و توسعه روز افزون فرآیندهای فولادسازی توسط کوره قوس الکتریکی بوده است به‌گونه‌ای که در حال حاضر تقریباً یک سوم تولید جهانی فولاد (حدود ۱۱۰۰ میلیون تن در سال) به این روش انجام شده و با توجه به اهمیت روزافزون رعایت قوانین زیست‌محیطی، انتظار می‌رود که در دهه یا دهه‌های پیش رو، سهم کوره قوس الکتریکی در تولید جهانی فولاد تا ۵۰ درصد افزایش یابد. بر این اساس و به تبعیت از توسعه فرآیندهای فولادسازی توسط کوره قوس الکتریکی انتظار می‌رود که فرآیندهایی نظیر کک‌سازی، زینترسازی، فرآوری کانه و... به تدریج اهمیت خود را از دست داده و از زنجیره تولید فولاد حذف شوند.

قراضه، ماده اولیه‌ی متداول برای تولید کوره‌های قوس الکتریکی محسوب می‌شود. با این وجود، نظر به بازدهی بالا و مصرف پایین انرژی و همچنین سمع‌های فولادسازی، نرخ ضایعات در کارخانجات به‌سختی کاهش یافته و از سوی دیگر ضایعات خریداری شده معمولاً کیفیت مرغوبی نداشته و دارای ناخالصی‌هایی چون انواع پلاستیک، فلزات غیرآهنی و... هستند. علاوه بر محدودیت دسترسی به قراضه‌های کیفی، قیمت این ماده نیز اغلب بالا بوده و این امر، رقابتی کوره‌های قوس الکتریکی را به امری دشوار مبدل می‌سازد. بنابراین جایگزینی بخشی از قراضه (ماده اولیه) مصرفی توسط چدن خام کوره‌بلند و آهن اسفنجی، امری عجیب تلقی نمی‌شود. امروزه به منظور دستیابی به بالاترین میزان بازدهی در کوره‌های قوس الکتریکی، حدود ۴۰ الی ۵۰ درصد چدن خام کوره‌بلند، ۴۰ الی ۶۰ درصد آهن اسفنجی (و مابقی قراضه) به‌عنوان ماده اولیه استفاده می‌شود لذا میزان قراضه مصرفی به ندرت بیش از ۱۰ درصد خواهد بود.

به موجب تغییرات فوق در روند فولادسازی، تولید آهن احیا شده به صورت مستقیم اخیراً مورد توجه قرار گرفته و با توجه به محدودیت‌های موجود و قوانین زیست‌محیطی، پیش‌بینی می‌شود که در سال‌های آتی رشد چشم‌گیری را تجربه نماید.

هدف از تألیف این کتاب، ارائه اطلاعات جامعی در زمینه‌ی احیا مستقیم اکسیدهای آهن (از جمله احیای زائدات کارخانجات فولاد) است ضمن آن که اصول مقدماتی و جنبه‌های کاربردی تولید آهن اسفنجی نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. انتظار می‌رود که این کتاب اطلاعات ارزشمندی را به

مطالب موجود در حوزه متالورژی اضافه نماید. این کتاب برای دانشجویان (کارشناسی و کارشناسی ارشد)، محققین، اعضای هیئت علمی و متخصصین صنعتی این حوزه مفید خواهد بود.

اینجانب، آمیت چاترجی، تمام تجارب ۴۰ سال اخیر خود در زمینه آهن اسفنجی را در این کتاب جمع آوری کرده‌ام. به عنوان مؤلف این کتاب، صمیمانه از همیاری و کمک تمام همکارانم سپاسگزارم. همراهی خانواده من باعث شد تا بتوانم زمان کافی به آماده سازی کتاب اختصاص دهم. هم چنین از شرکت فولاد تاتا که فرصت همراهی با احیای مستقیم از آزمایشگاه تا کارخانه پایلوت و در نهایت کارخانه تجاری در شهر جودا (اریسا) را در اختیار من گذاشت تشکر می‌کنم. در این مسیر، افراد زیادی به من کمک کردند که اگر چه ذکر اسامی تمام این عزیزان در اینجا مقدور نیست ولی از زحمات تمام این افراد قدردانی می‌کنم.

آمیت چاترجی

میزان تولید و مصرف فولاد، یکی از معیارهای اصلی توسعه یافتگی کشورها به‌شمار می‌آید. بر اساس شاخص‌های جهانی، افزایش یک درصدی میزان مصرف محصولات فولادی، رشد اقتصادی ۰/۸۵ درصدی را به همراه دارد. بر این اساس، کشورهای توسعه یافته و قدرت‌های صنعتی همواره نگاهی ویژه به این کالای استراتژیک داشته و خودکفایی در صنعت فولاد را حتی در صورت عدم برخورداری از منابع اولیه، جزء سیاست‌های صنعتی و برنامه‌های زیربنایی خود قرار داده‌اند. در این بین جمهوری اسلامی ایران که داعیه‌دار توسعه‌ی همه‌جانبه و نجات از اقتصاد تک‌محصولی نفت بوده و راهبردهای اقتصادی خود را متوجه توسعه تولیدات قابل صدور نموده است، توجه و اهتمام ویژه‌ای به رشد و توسعه صنایع زیربنایی نظیر فولاد داشته و پیرو حمایت‌های صورت‌پذیرفته و توسعه و احداث واحدهای فولادسازی جدید، ارتقاء چشم‌گیری را در تولیدکنندگان فولاد خام جهان تجربه نموده است.

یکی از موانع اصلی توسعه صنعت فولاد، تأمین مواد اولیه مناسب است. تأمین قراضه مرغوب با قیمت مناسب، یک چالش فنی اقتصادی جدی برای فولادسازان است و از سوی دیگر بررسی ظرفیت‌های فعلی زنجیره فولاد در حاضر بخش اصلی گندله‌سازی، احیای مستقیم، ذوب و نورد نشان می‌دهد که به‌رغم برخورداری از مزیت‌های مواد معدنی بی‌شمار، سرمایه‌گذاری و توسعه در این بخش به صورت متوازن انجام نشده و در دو بخش گندله و آهن اسفنجی، صنعت فولاد همواره با کمبود مواجه بوده است. خوشبختانه طی سالیان اخیر به‌واسطه برنامه‌ریزی و حمایت‌های صورت‌پذیرفته، واحدهای احیای مستقیم رشد قابل‌توجهی را تجربه نموده‌اند به‌گونه‌ای که در حاضر حاضر جمهوری اسلامی ایران پس از کشور هندوستان، بزرگ‌ترین تولیدکننده آهن اسفنجی در جهان به‌شمار می‌آید.

با توجه به ادامه سیاست‌های حمایتی دولت، توسعه روزافزون واحدهای فولادسازی بالاخص واحدهای با ظرفیت کم تا متوسط و در پی آن افزایش تقاضا برای مواد اولیه مناسب و نیز موقعیت استراتژیک و مزیت‌های نسبی کشور مانند دسترسی به منابع ارزان گاز طبیعی، معادن غنی سنگ آهن، پیش‌بینی می‌شود که توسعه واحدهای احیای مستقیم و نصب ظرفیت‌های جدید در سال‌های آتی هم‌چنان به روند رو به رشد خود ادامه دهد. بر این اساس، کتاب حاضر با هدف شناخت و ارتقاء دانش فنی محققین و صنعتگران محترم در خصوص جنبه‌های تکنولوژیکی و کاربردی فرآیندهای مختلف احیای مستقیم نگاشته شده است و امید آن می‌رود که بتواند به پیشرفت در این حوزه کمک شایانی بنماید.

کتاب حاضر ترجمه‌ای از کتاب ارزشمند *Sponge Iron Production By Direct Reduction of Iron Oxide*

اثر آمیت چاترجی است. در فصل نخست این کتاب، جنبه‌های ترمودینامیکی و سینتیکی فرآیندهای احیای مستقیم مورد بررسی قرار گرفته و در سه فصل بعدی فرآیندهای احیای مستقیم بر پایه ذغال و گاز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در فصل پنجم فرآیندهایی بررسی شده‌اند که به‌منظور احیای مستقیم،

از گاز تولیدشده از زغال استفاده می‌کنند و در فصل آخر کاربردهای آهن اسفنجی در فولادسازی و چدن‌سازی مورد اشاره و بررسی قرار گرفته است. نظر به آن که نگارش این کتاب بر اساس اطلاعات حاصل از تجارب چندین ساله نویسنده صورت پذیرفته است، امید است که ترجمه‌ی حاضر اطلاعات مفیدی در اختیار خوانندگان، متخصصین صنعت فولاد، پژوهشگران و دانشجویان علاقه‌مند قرار دهد.

با وجود کوشش بسیار زیادی که جهت رفع ایرادات نگارشی در متن کتاب صورت پذیرفته است، این اثر نیز به مانند هر اثر مکتوب دیگر، خالی از اشکال نبوده و نظرات و پیشنهادهای ارزشمند و سازنده صاحب نظران، اساتید گرانقدر، متخصصین صنعت فولاد، پژوهشگران و دانشجویان این حوزه، در چاپ‌های بعدی مد نظر قرار خواهد گرفت.

در آغاز سخن بر خود لازم می‌دانیم از آقایان دکتر محمد تلافی نوغانی و دکتر احمد رزاقیان که زحمت، زحماتی و ویراستاری متن را بر عهده داشتند قدردانی نماییم. هم‌چنین از ریاست محترم جهاد دانشگاهی واحد استان قزوین جناب آقای مهندس فائزی که امکان چاپ کتاب را فراهم نمودند سپاسگزاریم.

از مدیریت محترم فولاد البرز غرب به ویژه ریاست محترم هیئت مدیره، جناب آقای مهندس امین سعدی و نایب رئیس محترم هیئت مدیره، جناب آقای مهندس احمد سعدی، به خاطر حمایت‌های مالی مناسبی که از این اثر بعمل آوردند تشکر و قدردانی ویژه‌ای داریم. در پایان، تشکر خود را بابت حسن شکریایی و حمایت‌های خانواده‌های مان اعلام و این اثر را به پاس زحمات ایشان، به شرح زیر، تقدیم به این عزیزان می‌نماییم:

رضا تقی آبادی

به پدر و مادر ارجمند و همسر گرام که همواره مشوق من در اتمام این کار بوده‌اند
و فرزند عزیزم رادین

علیرضا خاکساران

به روح پاک پدر عزیزم و مادر دلسوز و فداکارم که چراغ راهم در تمام مراحل زندگیم
بوده‌اند.

فهرست مطالب

I	پیشگفتار مؤلف
III	پیشگفتار مترجمین
۱	فصل اول - مبانی احیای مستقیم
۱-۱-۱	مقدمه
۱-۲-۱	تاریخچه‌ی احیای مستقیم
۱-۳-۱	ترمودینامیک و تکنیک احیای اکسید آهن
۱-۳-۱-۱	دیاگرام الیگام
۱-۳-۱-۲	دیگر داده‌های ترمودینامیکی
۱-۳-۱-۳	جنبه‌های سینتیکی
۱-۳-۱-۴	سیستم‌هایی که از احیاکننده‌های CO و H_2 استفاده می‌کنند
۱-۳-۱-۵	مراحل احیای اکسید آهن
۱-۴-۱	مکانیزم احیای اکسید آهن در فرایندهای پایه زغالی
۱-۵-۱	مکانیزم احیای اکسید آهن در فرایندهای پایه گازی
۱-۵-۱-۱	احیای اکسید آهن متراکم
۱-۵-۱-۲	احیای اکسید آهن متخلخل
۱-۶-۱	واکنش بودوارد
۱-۶-۱-۱	تأثیر فشار بر روی واکنش بودوارد
۱-۶-۱-۲	احیا با هیدروژن
۱-۶-۱-۳	احیا با مخلوط هیدروژن - مونواکسید کربن
۱-۷-۱	نرخ احیای اکسید آهن

۲۸	۱-۷-۱ کلیات
۲۹	۲-۷-۱ قابلیت احیای سنگ‌های معدن آهن
۳۳	۳-۷-۱ تغییرات ساختاری در حین احیا
۳۵	۴-۷-۱ مراحل کنترل‌کننده نرخ واکنش‌های احیا
۴۰	۵-۷-۱ مراحل نهایی احیا
۴۱	۶-۷-۱ نقش خواص گندله
۴۲	۷-۷-۱ تأثیر ترکیب گاز و فشار
۴۳	۸-۷-۱ احیا با کربن امد
۴۷	فصل ۲- فرایندهای احیای مستقیم پایه زغالی با استفاده از کوره پخت دوار
۴۷	۱-۲ مقدمه
۴۷	۲-۲ طبقه‌بندی گسترده فرایندهای احیای مستقیم
۵۰	۳-۲ کلیات فرایند احیای مستقیم در کوره پخت دوار
۵۳	۴-۲ واکنش‌های احیای مستقیم
۵۴	۵-۲ تأسیسات/تجهیزات واحدهای احیای مستقیم با کوره پخت دوار
۵۵	۶-۲ نقاط قوت و ضعف احیای مستقیم کوره دوار
۵۹	۷-۲ سایر ویژگی‌های فرایندهای احیای مستقیم در کوره پخت دوار
۶۱	۸-۲ وضعیت جهانی احیای مستقیم بر پایه زغال
۶۲	۹-۲ کاربرد تجاری فرایندهای احیای مستقیم کوره دوار
۶۵	۱۰-۲ بررسی فرایندهای احیای مستقیم پایه زغالی
۶۵	۱-۱۰-۲ SL/RN
۶۷	۲-۱۰-۲ فرایند کودیر

۷۱	Accar -۳-۱۰-۲
۷۴	DRC -۴-۱۰-۲
۷۷	TDR -۵-۱۰-۲
۷۹	SIIL -۶-۱۰-۲
۸۰	۷-۱۰-۲ جیندال
۸۳	۱۱-۲ نکات برای احیای مستقیم کوره دوار
۸۳	۱-۱۱-۲ نجان فرآیند
۸۵	۲-۱۱-۲ مشخصه های مواد خام
۹۸	۱۲-۲ فرآیندهای کوره دوار برای آسیای اکسیدهای آهن زائد
۹۸	۱۰-۱۲-۲ فرآیند کاوازاکی
۹۹	۲-۱۲-۲ کوهو
۱۰۱	۳-۱۲-۲ CRIMM
۱۰۵	فصل ۳- سایر فرآیندهای احیای مستقیم پایه زغالی
۱۰۵	۱-۳-۱ مقدمه
۱۰۵	۲-۳ فرآیندهای بر پایه کوره‌ی اجاقی دوار (RHF)
۱۰۸	۱-۲-۳ فرآیند اینمتکو
۱۱۳	۲-۲-۳ فرآیند فستمت
۱۲۱	۳-۲-۳ فرآیند کامت
۱۲۶	۴-۲-۳ فرآیند مائومی (آهن خشک)
۱۳۰	۵-۲-۳ IT Mk3
۱۳۴	۳-۳ فرآیندهای بر پایه قرع عمودی

۱۳۴	۳-۳-۱- فرآیند کینگلار-متور
۱۳۷	۳-۴- فرآیندهای بر اساس کوره‌های اجاقی چندگانه
۱۳۷	۳-۴-۱- فرآیند پریماس
۱۴۲	۲-۵- احیای مستقیم پایه زغالی در کوره‌های تونلی
۱۴۲	۳-۵-۱- هوگanas
۱۴۵	۳-۶- فرآیندهای بسترسیال
۱۴۵	۳-۶-۱- فرآیند سیرکوفر
۱۴۹	فصل ۴ - احیای مستقیم با استفاده از گاز
۱۴۹	۴-۱- گاز طبیعی چیست؟
۱۵۰	۴-۲- پیدایش گاز طبیعی
۱۵۱	۴-۳- استفاده از گاز طبیعی در احیای مستقیم
۱۵۳	۴-۴- اصول احیای مستقیم پایه گازی
۱۵۴	۴-۵- واحدهای تکی در کارخانه‌های احیای مستقیم پایه گازی
۱۵۴	۴-۵-۱- کوره احیا
۱۵۶	۴-۵-۲- بخش شکست گاز
۱۵۷	۴-۵-۳- بخش تصفیه گاز
۱۵۷	۴-۶- فرآیندهای قرع
۱۵۷	۴-۶-۱- HYL (امروزه به نام HYL I)
۱۶۰	۴-۷- فرآیندهای بسترسیال
۱۶۰	۴-۷-۱- فیور
۱۶۲	۴-۷-۲- فاینمت

۱۶۸	 فرآیند HIB ۳-۷-۴
۱۶۹	 سیرکورد ۴-۷-۴
۱۷۳	 فرآیندهای کوره استوانه‌ای ۸-۴
۱۷۴	 HYL III ۱-۸-۴
۱۷۹	 HYL همراه با خود شکست (HYLSA IV M) ۲-۸-۴
۱۸۳	 فرآیند Energiron ۳-۸-۴
۱۸۴	 توسیدی روش Arex برای شکست خودکار گاز ۴-۸-۴
۱۸۶	 میدرکس ۵-۸-۴
۱۹۶	 مقایسه‌ی میدرکس و HYL ۶-۸-۴
۱۹۷	 فرآیند دانارکس ۷-۸-۴
۱۹۹	 آرمکو ۸-۸-۴
۲۰۰	 پیورفر ۹-۸-۴
۲۰۲	 NSC-DR ۱۰-۸-۴
۲۰۶	 احیای مستقیم قائم ۱۱-۸-۴
۲۰۸	 افزایش بازدهی کوره‌های استوانه‌ای احیای مستقیم ۹-۴
۲۱۵	 فصل ۵- احیای مستقیم پایه گازی بدون استفاده از گاز طبیعی
۲۱۵	 ۱-۵ مقدمه
۲۱۵	 ۲-۵ گاز تولیدشده از زغال
۲۱۶	 ۳-۵ واکنش‌های تولید گاز از زغال
۲۱۷	 ۴-۵ فناوری‌های موجود برای تولید گاز زغال
۲۲۱	 ۱-۴-۵ مولد گاز لورگی

۲۲۱	۵-۴-۲- فرآیند وینکلر
۲۲۲	۵-۴-۳- گازساز کوپر-توتزک (KT)
۲۲۲	۵-۴-۴- گاز نکزاکو (GE)
۲۲۳	۵-۴-۵- گازساز زغال شل
۲۲۵	۵-۴-۶- فرآیند ساسول-لورگی
۲۲۵	۵-۵- تمیزسازی و مناسب‌سازی گاز مصنوعی
۲۲۶	۵-۶- الزامات کیفیت گاز برای احیای مستقیم در کوره‌های استوانه‌ای
۲۳۱	فصل ۶- استفاده از آهن اسفنجی در چدن‌سازی و فولادسازی
۲۳۱	۶-۱- مقدمه
۲۳۳	۶-۲- خواص آهن اسفنجی
۲۳۴	۶-۳- استفاده از آهن اسفنجی در کوره‌های بلند
۲۳۹	۶-۴- استفاده از آهن اسفنجی به عنوان ماده فیلر در فولادسازی
۲۴۰	۶-۴-۱- استفاده از آهن اسفنجی در BOF
۲۴۴	۶-۴-۲- استفاده از آهن اسفنجی در کوره‌های قوس الکتریکی
۲۴۸	۶-۴-۳- عوامل مؤثر در استفاده بهینه از آهن اسفنجی در کوره‌های قوس الکتریکی
۲۶۵	۶-۴-۴- توسعه‌های اخیر فولادسازی با کوره‌ی قوس الکتریکی با استفاده از آهن اسفنجی
۲۷۶	۶-۴-۵- استفاده از آهن اسفنجی داغ در فولادسازی
۲۷۹	۶-۴-۶- استفاده از آهن اسفنجی/HBI در کوره‌های القایی
۲۸۱	۶-۴-۷- استفاده از آهن اسفنجی/HBI در پاتیل‌های تولید فولاد (Steel Ladles)