نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

J. Energy Conversion
Volume: 12, Issue:3, 2025: 27-37

دوره ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، ص: ۳۷-۲۷

بررسی تأثیر افزودن زیرکونیا (ZrO_2) بر مقاومت به خوردگی جرم ریختگی مجرای EBT کوره قوس الکتریک شرکت فولاد روهینا جنوب

حسین تمن[۱]، محبوبه واثقی[۲و*]، مهدی قبیتی حسب[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، hoseintaman73@gmail.com
۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، vaseghi62@gmail.com
۳- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، mghasab@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲۰

چکیده

در این پژوهش، تأثیر میزان افزودن زیرکونیا (ZrO_2) و توزیع اندازه ذرات بر ویژگی‌های ریزساختاری و مقاومت به خوردگی جرم نسوز منیزیتی (جرم ریختنی پایه منیزیا) مورد استفاده در نازل EBT (تخلیه از کف خارج از مرکز) در کوره قوس الکتریکی بررسی شد. نمونه‌هایی با مقادیر مختلفی از ZrO_2 تهیه و در یک بوته شبیه‌سازی‌شده‌ی EBT در دمای ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و در اتمسفر هوا آزمایش شدند. تکامل ریزساختار، تخلخل، اندازه دانه و تشکیل فازها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش مقدار ZrO_2 موجب ریزتر شدن اندازه میانگین دانه‌ها تا حدود ۳۶ نانومتر، یکنواخت‌تر شدن ساختار میکروسکوپی و کاهش تخلخل ظاهری می‌شود. این تغییرات، همراه با نقطه ذوب بالای زیرکونیا، مقاومت به خوردگی و پایداری ساختاری را در ناحیه نازل EBT به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشند. به‌طور کلی، افزودن بهینه‌ی حدود ۲۰درصد وزنی ZrO_2 می‌تواند عملکرد نسوز منیزیتی را در دماهای بالا به‌طور چشم‌گیری ارتقا دهد.

***عهده‌دار مکاتبات**: vaseghi62@gmail.com

کلمات کلیدی: جرم نسوز منیزیتی، زیرکونیا، کوره قوس الکتریکی مجهز به EBT، دانه‌بندی، مقاومت به خوردگی

نحوه استناد به این مقاله حسین تمن، محبوبه واثقی، مهدی قبیتی حسب. بررسی تأثیر افزودن زیرکونیا (ZrO_2) بر مقاومت به خوردگی جرم ریختگی مجرای EBT کوره قوس الکتریک شرکت فولاد روهینا جنوب. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی**. **۱۴۰۴؛ ۱۲ (۳) : ۳۷-۲۷**.

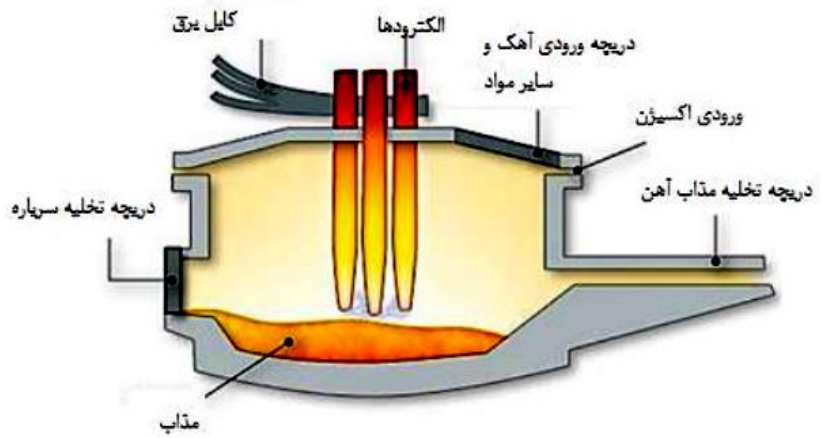
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]

۱- مقدمه

جرم‌های نسوز[1] موادی هستند که در محدوده‌های دمایی بسیار بالا مقاومت داشته و عایق حرارتی خوبی هستند. این مواد به‌دلیل مقاومت بالایی که در برابر حرارت و شوک حرارتی دارند در صنایع گوناگونی مانند فولادسازی، خودروسازی، شیشه‌سازی و ... دارای کاربردهای گوناگونی است. تنها در موارد خاصی می‌توان از نسوزهای منزیایی خالص استفاده کرد زیرا در حالت خالص ویژگی‌هایی هم‌چون مقاومت شیمیایی بسیار خوب در برابر سرباره‌های قلیایی و پایداری حرارتی بسیار بالا از خود نشان می‌دهند. اما در مقابل چنین مزیت‌هایی، چقرمگی شکست پایین و مقاومت ضعیف در برابر شوک‌های حرارتی نیز مشاهده می‌شود که منجر به کاربرد محدود نسوزهای منیزیایی خالص در صنایع فولاد شده است [۱]. صنعت آهن و فولاد از مهم‌ترین صنایع مصرف کننده مواد دیرگداز می‌باشند. دیرگدازها ترکیبات غیرفلزی با نقطه ذوب بالاتر از $1650^{o}C$ هستند که اصولاً در انواع کوره‌ها و پاتیل‌ها در صنایع و در مکان‌هایی که با دماهای بالا سر و کار دارند، به‌کار می‌روند [۲-۴]. حدود ۷۰درصد از نسوزهای مصرفی در صنعت فولاد را نسوزهای پایه منیزیت تشکیل می‌دهند. در حال حاضر با وجود روند توسعه و افزایش تولید فولاد، میزان مصرف دیرگدازها به‌دلیل بهبود کیفیت آن‌ها کاهش یافته که باعث تولید فولاد با کیفیت بهتر و کاهش هزینه‌ها می‌شود. اما اصلی‌ترین نارسایی‌ها در صنعت نسوز ایران که منجر به مصرف زیاد این محصولات می‌شود، عبارتند از: ۱- محدودیت در تنوع تولید ۲- عدم تولید نسوزهای پیشرفته و با کیفیت قابل مقایسه با محصولات خارجی ۳- مشکلات مربوط به تهیه مواد اولیه [۵].

یکی از روش‌های تولید فولاد، ذوب و پالایش آهن و فولاد قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی است. در این کوره‌ها ذوب شدن بار توسط ایجاد قوس الکتریکی بین الکترودهای گرافیتی و بار فلزی انجام می‌شود. در گذشته، کوره‌های قوس الکتریکی فقط برای تولید نوع خاصی فولاد مورد استفاده قرار می‌گرفتند اما امروزه این کوره‌ها در سطح وسیع، حتی برای تولید فولادهای معمولی نیز به کار می‌روند [۶]. کوره‌های قوس الکتریکی (شکل ۱) دارای یک بدنه فولادی با آستر نسوز، سطح مقطع مدور و کف گود هستند. یک حلقه سقفی متحرک و جداشدنی وجود دارد که معمولاً با آب سرد خنک می‌شود، سقف گنبدی شکل، نسوز را حمایت می‌کند. برداشتن سقف معمولاً به‌وسیله یک سیستم هیدرولیکی انجام می‌گیرد. کار سیستم به این نحو است که ابتدا سقف را بلند می‌کند و سپس آن را به کنار حرکت می‌دهد. سقف متحرک و جداشدنی امکان بارگیری کوره را با دلوهایی که از کف باز می‌شوند، عملی می‌سازد. هم‌چنین می‌توان از چنگک‌های مکانیکی استفاده کرد، ولی معمولاً از دلوهای مخصوص جهت بارگیری این نوع کوره استفاده می‌شود [۷].



شکل ۱: نمایی از کوره قوس الکتریک [۷]

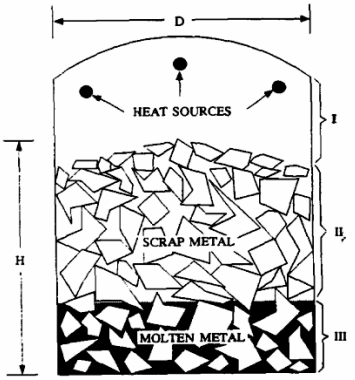
[1] Refractory Mass

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]

از آن‌جایی که فرآیند تولید فولاد بر پایه مصرف انرژی کم‌تر و تولید فولاد با کیفیت بیش‌تر متمرکز است، امروزه بهترین روش‌های موجود تولید فولاد بر پایه مصرف بهینه انرژی بنا شده‌د. انرژی بخش عمده‌ای از هزینه‌های تولید فولاد (بین ۲۰ تا ۴۰ درصد) را به خود اختصاص داده است، در نتیجه بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های تولید و در نهایت افزایش میزان کیفیت فولاد تولیدی، رقابت‌پذیری این صنعت را به دنبال خواهد داشت. برای رسیدن به این منظور اغلب کوره‌های قوس الکتریکی جدید مجهز به سیستم EBT طراحی شده‌اند [۸].

طراحی سیستم‌های تخلیه از کف برای اولین بار در سال ۱۹۸۳ انجام گرفت و امروزه به‌صورت وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم‌ها، امکان کاهش انتقال میزان سرباره‌های اکسیدی به درون پاتیل حین تخلیه را فراهم می‌آورند [۹]. در طراحی‌های جدید کوره‌های قوس الکتریکی، به‌منظور ممانعت از نفوذ سرباره به درون مذاب فلزی، یک محفظه تخلیه به‌صورت عمودی در کف کوره طراحی شده است. زمانی‌که دریچه تخلیه بسته است، این محفظه با جرم نسوز ویژه‌ای پر می‌شود که این جرم ماسه‌ای نقش ممانعت از نفوذ مذاب به درون محفظه را دارد. پس از اتمام بارگیری کوره، قوس الکتریکی ایجاد و فرآیند ذوب آغاز می‌گردد. پس از اتمام فرآیند ذوب، کوره حدود ۱۲-۱۰ درجه به سمت دریچه تخلیه سرباره خم شده و سرباره‌گیری انجام می‌شود. فرآیند ذوب در کوره‌های دارای EBT در سه مرحله انجام می‌شود که این سه مرحله در شکل (۲) قابل مشاهده است. مرحله اول گرمایش است که قراضه‌ها در این مرحله توسط قوس الکتریک و شعله گرم می‌شوند. گرما، هم از طریق تشعشع و هم از طریق هدایت منتقل می‌شود. تشعشع از طریق حرکت گازهای گرم از تخلخل بین قراضه‌ها و هدایت به وسیله تماس ایجاد شده بین قراضه‌ها به انتقال گرما کمک می‌کنند. دما تا دمای ذوب قراضه‌ها افزایش پیدا می‌کند. معمولاً مرحله شروع ذوب با ولتاژ متوسط قوس الکتریکی آغاز می‌شود تا از صدمه زدن قوس الکتریکی به سقف جلوگیری شود. مرحله دوم ذوب است. فرآیند ذوب از روی سطوح بالایی قراضه‌ها شروع می‌شود و مایع مذاب به طرف کف کوره نفوذ می‌کند و با افزایش ارتفاع مایع، ارتفاع تکه‌های قراضه کاهش پیدا می‌کند. در مرحله ذوب، ولتاژی انتخاب می‌شود که حداکثر انرژی ورودی را به کوره بدهد. مرحله سوم، بخش نهایی است. در این مرحله قراضه‌ها به‌طور کامل توسط مذاب پوشانده می‌شوند و تمام قراضه‌ها ذوب می‌شوند. وقتی حوضچه مذاب ایجاد شد، میزان ولتاژ را به مقدار متوسط کاهش می‌دهند تا از آسیب رساندن تشعشع به آسترهای نسوز جلوگیری شود [۱۰].

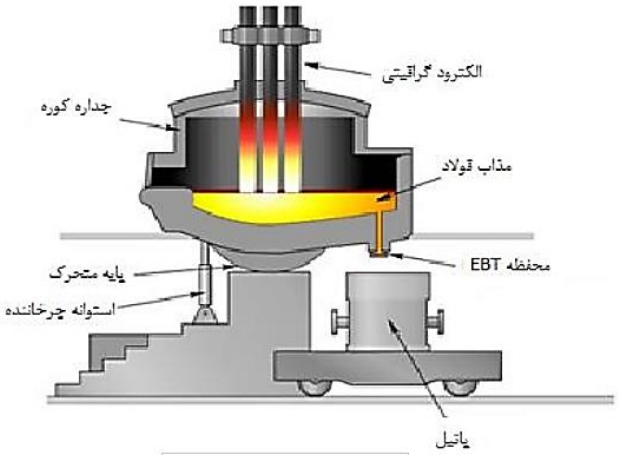


شکل ۲: سه مرحله ذوب قراضه در کوره قوس الکتریکی [۱۰]

در این کوره‌ها محفظه تخلیه به‌صورت عمودی در کف کوره قرار می‌گیرد (شکل ۳). انتهای محفظه با دریچه هیدرولیکی بسته می‌شود. جداره خارجی این محفظه فولادی بوده و جداره داخلی آن با یک نوع نسوز پوشانده می‌شود. قبل از شروع بارگیری درون محفظه با ماسه نسوز مانند ماسه الیوینی پر می‌شود. پس از اتمام فرآیند ذوب و سرباره‌گیری، کوره حدود ۱۰-۱۲ درجه به سمت دریچه خم شده و مذاب تخلیه می‌شود. در این حالت مذاب مستقیماً به درون پاتیل تخلیه می‌شود [۸].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

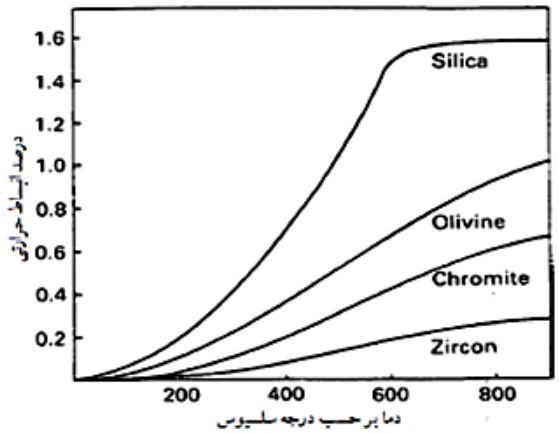
[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]



شکل ۳: نمایی از کوره قوس الکتریکی مجهز به سیستم EBT [۸]

مواد پرکننده محفظه تخلیه در کوره‌های EBT شامل مواد اکسیدی نسوز است که به‌صورت موقتی مانع نفوذ مذاب فولاد به طرف دریچه تخلیه می‌شوند. ماسه‌های نسوز مورد استفاده در صنایع فولادسازی اغلب سیلیکاتی، زیرکونیایی، الیوینی و یا کرومیتی هستند. به‌دلیل این‌که حجم محفظه تخلیه ثابت است، نیاز است ماسه مورد استفاده در محفظه تخلیه میزان انبساط حرارتی کمی داشته باشد. در بین ماسه‌های نسوز مورد استفاده در صنایع، ماسه‌های سیلیسی دارای بیش‌ترین میزان انبساط حرارتی و ماسه زیرکونیایی کم‌ترین میزان انبساط حرارتی را دارا است (شکل ۴).

اما استفاده از ماسه‌های الیوینی ارزان‌تر از استفاده از ماسه کرومیتی و زیرکونیایی بوده و علاوه بر این، کاهش استحکام ماسه‌های الیوینی با افزایش دما و عدم ترشوندگی این ماسه‌ها توسط مذاب آهنی سبب شده است که ماسه‌های مورد استفاده در محفظه تخلیه عموماً بر پایه الیوین فورستریتی و یا منیزیایی باشد [۱۱].



شکل ۴: نمودار مقایسه‌ای میزان ضریب انبساط حرارتی ماسه‌های الیوینی با ماسه‌های سیلیسی، کرومیتی و زیرکونیایی [۱۱]

این ماسه نقش بسیار مهم و حساسی در فرآیند ریخته‌گری دارد. هدف از مهندسی و طراحی این ماسه، دست‌یافتن به حداکثر خودگشودگی محفظه تخلیه است. در صورت عدم خودگشودگی محفظه تخلیه، باید از دمش اکسیژن برای گشودگی محفظه استفاده شود که این عمل منجر به کاهش عمر نسوزهای محفظه و کاهش کیفیت محصول فولادی می‌شود. امروزه در ایران، عملکرد ماسه‌های داخلی انتظارات را تا حد زیادی برآورده نمی‌سازند لذا عمده ماسه‌های مورداستفاده در مجرای EBT، وارداتی هستند. ازاین‌رو جهت کاهش هزینه‌های صنعتی و لزوم بومی‌سازی محصولات مورد استفاده، مطالعه دقیق‌تر ماسه EBT و بهبود

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]

عملکرد آن‌ها اجتناب ناپذیر است. ترکیب شیمیایی این ماسه‌ها عموماً از خانواده منیزیوسویلیکات‌ها نظیر فورستریت و الیوین‌ها است [۱۱]. افزودن زیرکن به نسوز منیزیا-اسپینلی با ایجاد فازمانع در برابر نفوذ کلینکر، مقاومت به خوردگی این نسوزها را بهبود می دهد [۱۲].

در این پژوهش اثر افزودن زیرکونیا به جرم نسوز مورداستفاده در مجرای EBT مورد بررسی قرار گرفت و هدف اصلی، تأثیر تغییر ترکیب شیمیایی نسوز بر روی مقاومت به خوردگی آن می‌باشد.

۲- روند تحقیق

به‌منظور حصول نزدیک‌ترین نتایج، از جرم منیزیتی مورد استفاده در شرکت فولاد روهینا جنوب (که به‌عنوان نمونه شاهد شناخته می‌شود) با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول (۱) استفاده شد.

جدول ۱: آنالیز جرم منیزیتی مورد استفاده در این تحقیق (wt%)

ترکیب	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Cr_2O_3	CaO	MgO
مقدار	۰/۵	۰/۸	۰/۸	۱/۰	۱/۲	۹۵/۷

برای بهبود خواص جرم مجرای EBT کوره قوس الکتریکی ۲۰ درصد وزنی زیرکونیا (99%-2μm،ZrO_2-1314-232-4-Japan) به نمونه شاهد اضافه شد و در آسیاب ماهواره‌ای به مدت ۱ ساعت کاملاً خرد و همگن شدند. ترکیب شیمیایی نسوز حاصل در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: آنالیز جرم منیزیتی حاوی زیرکونیا مورد استفاده در این تحقیق (wt%)

ترکیب	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Cr_2O_3	CaO	ZrO_2	MgO
مقدار	۰/۵	۰/۸	۰/۸	۱/۰	۱/۲	۲۰/۰	۷۵/۷

برای تهیه نمونه شاهد از روی قطعه کار (مجرای EBT کوره) نمونه‌برداری و آنالیز انجام شده است. سپس جهت تهیه نمونه هدف ابتدا بوته‌ای ساخته شد و پس از ترکیب جرم نمونه شاهد با ۲۰درصد زیرکونیا (طبق جدول (۲)) و همگن سازی مناسب، لایه‌ای به ضخامت ۲سانتی متر تهیه شد (شکل ۵). پس از گذشت ۲۴ ساعت و خشک شدن کامل نمونه، اقدام به ریختن مذاب با دمای ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد درجه درون بوته شد و ۲۴ ساعت تا سرد شدن کامل مذاب وقت لازم بود. در نهایت برای ارزیابی مقاومت به خوردگی جرم منیزیتی از جداره بوته نمونه‌برداری صورت گرفت است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]



شکل ۵: تهیه بوته برای نمونه حاوی ۲۰ درصد زیرکونیا

به‌منظور بررسی تغییرات ریز ساختار در نمونه‌های حاصل از تست بوته از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips مجهز به اسپکتومتری اشعه ایکس (EDS) استفاده شد. بدین منظور برای بررسی بوته های حاصل از آزمون خوردگی ابتدا نمونه‌های بوته طوری در راستای قطر بریده شد که محور حفره در مقطع برش قرار گیرد سپس در راستای ضخامت بوته نمونه‌هایی با سطح مقطع cm ۱×۱ تهیه و با استفاده از سنباده ۱۲۰ تا ۳۰۰۰ پولیش شده و سپس به وسیله محلول HF اچ شدند. لازم به‌ذکر است که آنالیز اسپکترومتری اشعه ایکس (EDS) به‌منظور میکروآنالیز نواحی مختلف در ریزساختارهای مشاهده شده توسط میکروسکوپ SEM به‌کار گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

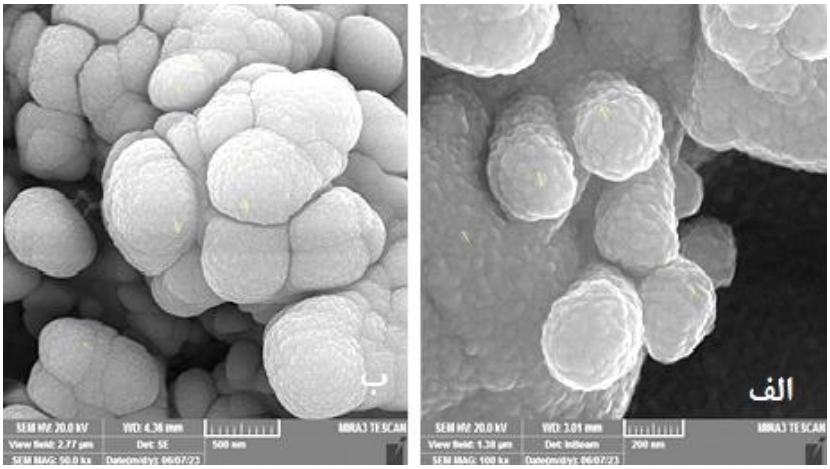
پیش‌تر اشاره شد که هدف از انجام این پژوهش، ارایه راه‌کاری برای کاهش خوردگی جرم نسوز منیزیتی مورد مصرف در قسمت مجرای EBT کوره قوس الکتریکی است. بدین منظور ابتدا تأثیر دانه‌بندی جرم در تخلخل و سپس اثر افزودن زیرکونیا به جرم منیزیتی بررسی شده و نتایج حاصل از آزمایشات مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد.

۳-۱- تأثیر دانه‌بندی و تخلخل بر روی خوردگی نسوز

با توجه به این‌که تخلخل‌ها و حفره‌ها، سطوحی هستند که در هنگام قرارگیری در معرض مذاب، نفوذ سرباره به درون آن‌ها اتفاق می‌افتد، بنابراین هرچه اندازه دانه‌بندی بزرگ‌تر باشد اندازه حفرات بزرگ‌تر خواهد بود و مذاب/سرباره در عمق بیش‌تری نفوذ می‌کند. شکل (۶ الف) تصویر SEM از ریزساختار نمونه شاهد شکل (۶ ب) با دانه‌بندی مختلف را نشان می‌دهد. نواحی روشن همان جرم نسوز است و قسمت‌های سیاه رنگ تخلخل‌های موجود در نمونه است. توجه شود که مقیاس تصویربرداری در نمونه شاهد، ۲۰۰nm و در تصویر نمونه حاوی زیرکونیا ۵۰۰nm است. با مقایسه تصاویر مشخص است با افزودن زیرکونیا، میزان تخلخل و اندازه دانه‌بندی در ریزساختار تغییر می‌کند.

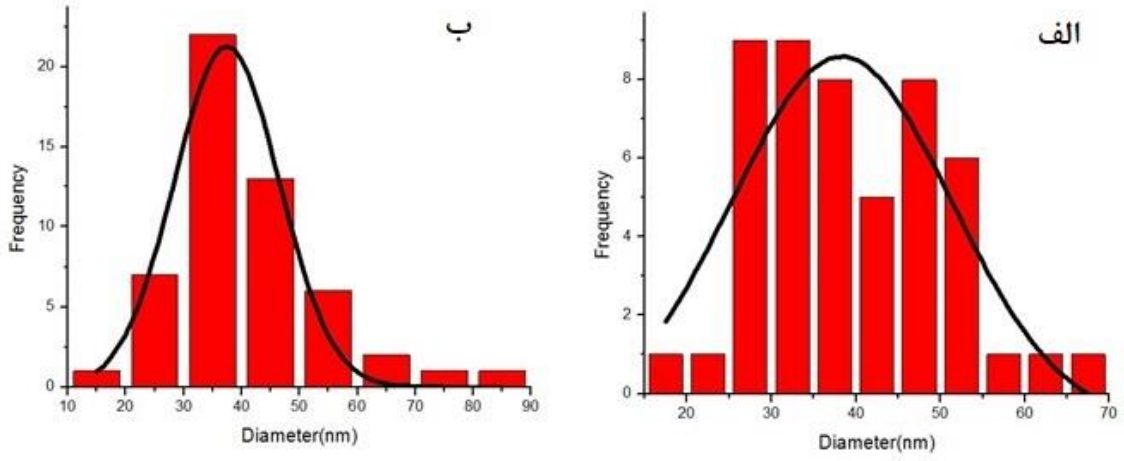
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]



شکل ۶: تصویر SEM از دانه بندی نمونه الف) شاهد و ب) نمونه حاوی زیرکونیا

شکل (۷) توزیع اندازه ذرات نمونه شاهد و نمونه حاوی زیرکونیا را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود نمونـه شـاهد دارای میانگین توزیع اندازه ذرات حدود ۳۹ نانومتری است. در حالی‌که با افزودن زیرکونیا این مقدار به ۳۶ نانومتر کاهش پیدا کرده است.



شکل ۷: توزیع اندازه ذرات الف) نمونه شاهد و ب) نمونه حاوی زیرکونیا

تخلخل به نسبت حجم فضاهای خالی (حفره‌ها) به حجم کلی جرم نسوز اشاره دارد. تخلخل ممکن است ناشی از: *ساختار میکروسکوپی* (نوع و توزیع مواد اولیه، روش‌های تولید و مراحل پخت باشد که تأثیر زیادی بر تخلخل دارند) و *نوع و اندازه دانه‌ها* (دانه‌های بزرگ‌تر می‌تواند فضاهای خالی بیش‌تری را ایجاد کنند و در نتیجه تخلخل را افزایش دهند) باشد. هم‌چنین نفوذ سرباره به درون نسوز به عواملی مانند ویسکوزیته سرباره (هرچه ویسکوزیته سرباره کم‌تر باشد، نفوذ آن به داخل جرم نسوز راحت‌تر خواهد بود) و فشار و دما (شرایط دما و فشار در کوره می‌تواند بر نحوه حرکت سرباره و نفوذ آن تأثیرگذار باشد) بستگی دارد. از آن‌جاکه بررسی این عوامل در شرایط آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده امکان‌پذیر نبود، از بررسی آن‌ها صرف‌نظر شد و سعی شد شرایط آزمایش مشابه هم انجام شود. بنابراین با توجه به این‌که ارتباط بین دو عامل اندازه تخلخل و میزان نفوذ سرباره، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد و کارایی کوره‌های ذوب داشته باشد می‌توان عنوان کرد که تخلخل که به‌معنای وجود فضاهای خالی در

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]

داخل جرم نسوز است، می‌تواند به نفوذ سرباره کمک کند [۱۴و۱۵]. هرچه اندازه تخلخل بیش‌تر باشد، احتمال نفوذ سرباره به داخل جرم نسوز افزایش می‌یابد. این نفوذ می‌تواند تأثیرات مثبت و منفی داشته باشد:

- **تأثیرات مثبت:** نفوذ سرباره به داخل جرم نسوز می‌تواند به ایجاد یک لایه عایق بهتر کمک کند و از تخریب زودهنگام جرم نسوز جلوگیری کند.
- **تأثیرات منفی**: از سوی دیگر، اگر سرباره بیش‌ازحد به داخل جرم نسوز نفوذ کند، می‌تواند خواص مکانیکی و حرارتی جرم نسوز را تحت‌تأثیر قرار دهد و باعث کاهش عمر مفید آن شود.

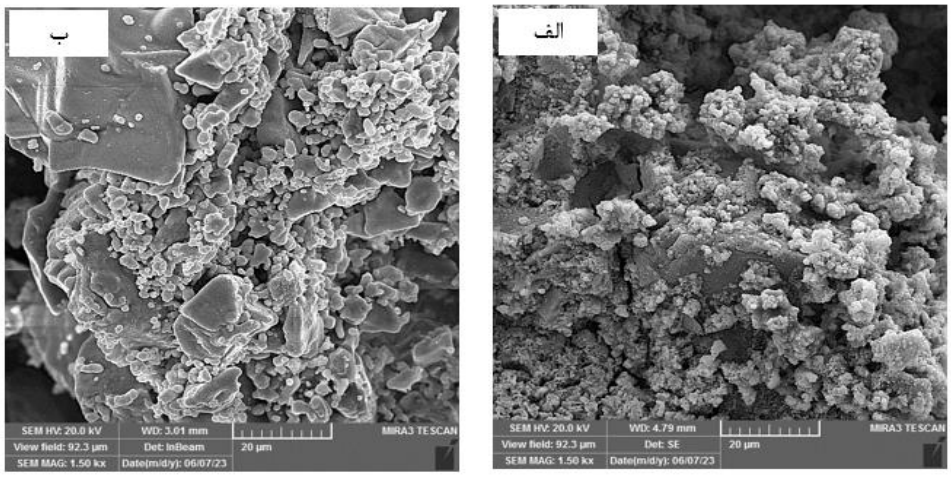
مطابق با رابطه (۱) یکی از عوامل بسیار مؤثر در عمق نفوذ سرباره (h) به درون جرم، قطر تخلخل (d) می‌باشد. همان‌طور که مشخص است عمق نفوذ سرباره به درون نسوز رابطه مستقیم با قطر تخلخل دارد بنابراین هرچه تخلخل‌ها در جرم نسوز بزرگ‌تر باشند میزان نفوذ سرباره افزایش می‌یابد و باعث پوسته شدن ساختاری و خوردگی بیش‌تر جرم منیزیتی می‌شود.

$$h^2 = {td}/{4\eta} \quad (۱)$$

در این رابطه t زمان و η ویسکوزیته می‌باشد [۱۳] بنابراین، اندازه تخلخل و نفوذ سرباره در داخل جرم نسوز در مجرای EBT به یکدیگر به‌صورت مستقیم وابسته‌اند و مدیریت مناسب این عوامل می‌تواند به بهبود کارایی کوره و کاهش هزینه‌ها کمک کند.

۳-۲- تأثیر ترکیب شیمیایی بر روی خوردگی نسوز

شکل (۸) تصاویر SEM از سطح مقطع عرضی نمونه‌های شاهد و نمونه حاوی زیرکونیا متأثر از خوردگی مذاب را نشان می‌دهد.



شکل ۸: تصویر SEM از ریزساختار الف) نمونه شاهد و ب) نمونه حاوی زیرکونیا برای مقایسه تخلخل

تصاویر شکل (۸) به‌خوبی شدت تخریب جرم با مذاب را مشخص می‌کند. اکسید پایه در جرم نسوز منیزیتی، MgO است. وقتی مذاب در تماس با جرم قرار می‌گیرد، واکنش‌هایی در فصل مشترک مذاب و جرم رخ می‌دهد و فازهایی با نقطه ذوب پایین نظیر دیوپساید (۱۳۴۲ درجه سانتی‌گراد) ، مونتی سیلیت (۱۴۹۸ درجه سانتی‌گراد) و مرونیت (۱۵۷۵ درجه سانتی‌گراد) تشکیل

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]

می‌شود. این فازها در کوره قوس الکتریکی که دمایی حدود۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد دارد، به‌راحتی ذوب شده و وارد مذاب/سرباره می‌شوند به‌طوری‌که سیالیت سرباره کاهش یافته و در نتیجه قابلیت نفوذ مجدد سرباره و خوردگی بیش‌تر جرم را به دنبال خواهد داشت. ترکیب سرباره و جرم ریختگی نقش مهمی در واکنش‌پذیری و قابلیت نفوذپذیری در مجرای EBT را دارد. به‌همین دلیل با اضافه کردن ترکیباتی مانند زیرکونیا در جرم، ریزساختار و درجه خورندگی تغییر می‌کند. هنگامی که زیرکونیا به ترکیب جرم اضافه می‌شود، میزان نفوذ جرم به مجرا کاهش می‌یابد. زیرا با افزودن زیرکونیا، ویسکوزیته مذاب/سرباره در تماس با نسوز افزایش می‌یابد [۱۶].

مطابق با رابطه (۲) میزان نفوذ در مذاب/سرباره (L) با ویسکوزیته (η) رابطه عکس دارد. به‌عبارتی با افزایش ویسکوزیته و کاهش سیالیت، سرباره کم‌تر می‌تواند به درون جرم نفوذ کند.

$$L = {r\gamma \cos\theta}/{4\eta} \quad (۲)$$

در این رابطه θ زاویه ترشوندگی، r شعاع تخلخل‌ها و γ نیروی کشش سطحی می‌باشد [۱۳]. تحقیقات نشان داده است زمانی که بازیسیته مذاب/سرباره کم باشد، حد حلالیت اکسیدمنیزیم در سرباره زیاد می‌شود [۱۷]، به‌همین دلیل خوردگی شدیدتر می‌شود. به‌عبارتی دیگر راه برای نفوذ بیش‌تر در درون مجرا را فراهم می‌کند.

پس در مجموع می‌توان گفت با کوچک‌تر شدن دانه‌بندی، دانه‌ها نسبتاً سالم مانده و کم‌تر دچار خوردگی شده‌اند. هم‌چنین فازهای با نقطه ذوب بالا مانند زیرکونیا (۲۷۱۵ درجه سانتی‌گراد) به‌صورت محافظ بر روی جرم عمل نموده و از نفوذ بیش‌تر سرباره و خوردگی جلوگیری نماید.

۴- نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه دستاوردهای حاصل از این پژوهش عبارتند از:

۱) دانه‌بندی جرم منیزیتی در ریزساختار و خواص مکانیکی تأثیر مهمی دارد به‌طوری‌که افزودن زیرکونیا سبب افزایش چگالی، کاهش مقدار و اندازه تخلخل می‌شود.

۲) اضافه کردن زیرکونیا به جرم منیزیتی ایده مناسبی برای کاهش خوردگی جرم می‌باشد. زیرا در اثر تماس جرم با مذاب، فاز زیرکونیا که دارای نقطه ذوب بالایی است، حضور دارد و به‌عنوان محافظ بر روی سطح دانه‌های MgO عمل نموده و از خوردگی بیش‌تر جرم جلوگیری می‌کند.

۳) مقدار اکسیدهای موجود در سرباره بر سیالیت تأثیرگذار است و تغییر سیالیت نقش مهمی در خوردگی جرم منیزیتی دارد. با افزودن زیرکونیا ویسکوزیته افزایش و سیالیت کاهش می‌یابد در نتیجه کاهش نفوذ سرباره به درون جرم و کاهش خوردگی در جرم مشاهده می‌شود.

مراجع

[۱] امین محمدحسن، مضطرزاده فتحاله. اثر افزودنی $CaZrO_3$ بر تحولات فازی و سینترینگ بدنه‌های دیرگداز تهیه شده از منیزیت با نسبت CaO/SiO_2 کوچک‌تر از یک. مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ۱۳۸۲، ۲۹(۲)، ۹-۱.

[2] A. Bellosi, F. Monteverde, Ultra-refractory ceramics: the use of sintering aids to obtain microstructure control and properties improvement, Key Eng. Mater., Trans Tech Publ, (2004), 787–792.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]

[3] C. Sadik, O. Moudden, A. El Bouari, I. E. El Amrani, Review on the elaboration and characterization of ceramics refractories based on magnesite and dolomite, J. Asian Ceram. Soc. , 4(2016), 219-233.
[4] S.Ghasemi-Kahrizsangi, H.G. Dehsheikh, E. Karamian, M. Boroujerdnia, K. Payandeh, Effect of $MgAl_2O_4$ nanoparticles addition on the densification and properties of MgO-CaO refractories, Ceram. Int., 43 (6) (2017), 5014-5019.
[5] M. Shamsuddin, Steelmaking, Phys. Chem. Metall. Process. Second Ed., Springer, (2021), 237–292.
[6] P. Crompton, The diffusion of new steelmaking technology, Elsevier, 27(2) (2001), 87-95.
[7] Y.N. Toulouevski, I.Y. Zinurov, Innovation in electric arc furnaces, Nov. Iorque Springer., (2010), 1–23. DOI 10.1007/978-3-642-03802-0_1, C.
[8] C. Allaire, M. Rigaud, Advances in refractories for the metallurgical industries III: proceedings of the international symposium, (1999).
[9] J.Á. Ocio, H. Bilbao, J.L. Gayo, N. García, C. Seoánez, A.Ş. Ticaret, M. Demir, M. Yayla, Y. Yücekutlu, D. Karadavut, BAT Guide for electric arc furnace iron & steel installations, (2012).
[10] Y.K. Wu, M. Lacroix, Numerical simulation of the melting of scrap metal in a circular furnace, Int. Commun. Heat Mass Transf., 22 (1995), 517–525.
[11] J. Thiel, M. Ziegler, P. Dziekonski, S. Joyce, Investigation into the technical limitations of silica sand due to thermal expansion, Trans. Am. Foundry Soc., 115 (2007), 383–400.
[12] R. Ceylantekin, C. Aksel, Improvements on corrosion behaviours of MgO–spinel composite refractories by addition of $ZrSiO_4$, J. Eur. Ceram. Soc., 32 (2012), 727–736.
[13] W.E. Lee, Theory, Experiment and Practice of Slag Attack of Refractories, Iran. J. Mater. Sci. Eng., 1 (2004), 9–15.
[14] Numerical Understanding on Penetration and Corrosion Behavior of $CaO–Al_2O_3–MeO$ Slag to Al_2O_3–MgO Refractory, Original Research Article, Metallurgical and Materials Transactions B, 55 (2024), 1156–1166.
[15] T. Matsushita, K. Mukai, Insitu Observation of Molten Slag and Metal Penetation Behavior into Porous Refractories, Department of Materials Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Sweden Krosaki Harima Corp., Japan.
[16] H. Liu, Y. An, Z. Wang, Y. M a sol, Ceramics International., 49 (2) (2023), 2478-2485. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.222a, X. Wang, Enhanced corrosion resistance of magnesia-chrome refractories impregnated with zirconi.
[17] K. S. Kwong, J.P. Bennett, Recycling practices of spent MgO-C refractories, J. Miner. Mater. Charact. Eng., 1 (2002)., 69–78.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]

Investigation of the Effect of Adding Zirconia (ZrO_2) on the Corrosion Resistance of the Casting Mass of the EBT Duct of the Electric Arc Furnace at Rohina South Steel Company

Hossein Taman[1], Mahboubeh Vaseghi[2,*], Mehdi Ghobeiti Hasab[2]

[1] M.Sc. Student, Department of Materials Engineering, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran
[2] Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: summer 2025 Accepted: autumn 2025

Abstract

In this study, the effect of zirconia (ZrO_2) addition and particle size distribution on the microstructural characteristics and corrosion resistance of magnesia-based refractory castables was investigated. Experimental samples with different zirconia contents were prepared and tested using a simulated crucible setup at 1650 °C under an air atmosphere. The microstructure and corroded regions were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) to evaluate variations in porosity, grain size, and phase formation. The results revealed that the addition of zirconia reduced the average particle size to approximately 36 nm, improved structural uniformity, and decreased apparent porosity. These improvements, combined with the high melting point of zirconia, significantly enhanced the corrosion resistance and structural stability in the nozzle region. Overall, the presence of an optimal zirconia content can markedly improve the performance of magnesia refractories under high-temperature conditions.

Keywords: Magnesite refractory mass, zirconia, electric arc furnace equipped with EBT, particle size, corrosion resistance

*Corresponding Author: vaseghi62@gmail.com

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.3.555]

Cite this article as: Hossein Taman, Mahboubeh Vaseghi, Mehdi Ghobiti Hasab, Investigation of the Effect of Adding Zirconia (ZrO_2) on the Corrosion Resistance of the Casting Mass of the EBT Duct of the Electric Arc Furnace at Rohina South Steel Company. **Journal of Energy Conversion, 2025; 12(3), 27-37.**