



گروه ملی صنعتی فولاد ایران



انجمن آهن و فولاد ایران



دانشگاه شهید چمران اهواز

## سمپوزیوم فولاد ۸۷

۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷

اهواز - دانشگاه شهید چمران

### افزایش عمر نسوز پاتیل‌های شرکت فولاد مبارکه با کاربرد آجرهای آلومینا- منیزیت گرافیتی ( $Al_2O_3-MgO-C$ ) شرکت فرآورده های نسوز ایران (ایرفکو)

هیراد عباس زاده<sup>۱</sup>، بهزاد امین پور<sup>۱</sup>، غلامعلی خدام الفقراء<sup>۱</sup>، غلامرضا صوفیان<sup>۲</sup>  
 ۱- شرکت فرآورده های نسوز ایران ۲- مدیر مرکز نسوز شرکت فولاد مبارکه

#### چکیده

مواد نسوز همواره یکی از اقلام عمده مواد مصرفی در فرایند فولاد سازی و در نهایت انواع محصولات فولادی محسوب می‌گردد و هر گونه نوسان در مقدار و ارزش آن مستقیماً بر قیمت تمام شده محصول تأثیرگذار است. با توجه به اینکه در پاتیل‌ها علاوه بر عملیات گرم کردن مذاب، تصفیه مجدد یا متالورژی ثانویه نیز صورت می‌پذیرد، لذا پاتیل از تجهیزات پرمصرف در زمینه مواد نسوز بوده که هر گونه کاهش مصرف و توقف باعث کاهش هزینه های تولید فولاد می‌گردد. لزوم کاهش مصرف نسوز مسئولین را بر آن داشته تا علاوه بر بهینه سازی فرایند تولید (کاهش توقفات، کنترل ماهیت سرباره، تنظیمات الکتریکی و مکانیکی ...) انواع کیفیتهای مختلف نسوز از جمله آجرهای : منیزیت - کربنی ( $MgO - C$ ) و آلومینا - منیزیت گرافیتی ( $Al_2O_3 - MgO - C$ ) را بجای آجرهای مرسوم آلومینی و دولومیتی مورد تست و آزمایش قراردادده بطوریکه در همین زمینه به نتایج قابل توجهی نیز رسیده اند.

در این راستا شرکت فرآورده های نسوز ایران به منظور همکاری با شرکت فولاد مبارکه جهت نیل به اهداف کاهش مصارف نسوز در پاتیل پروژه مشترک کاربرد آجر آلومینا منیزیت گرافیتی در پاتیل‌های فولاد را پیشنهاد نمود.

**کلمات کلیدی:** نسوز آلومینا منیزیت گرافیت، اسپینل، خوردگی، آنتی اکسیدان، پاتیل.

#### مقدمه

در این مقاله خصوصیات آجرهای آلومینا-منیزیت گرافیتی، فرآیند تولید، الگوی نسوز چینی و طرح آن، مزایا و معایب این آجرها و همچنین علل افزایش عمر نسوز چگونگی تشکیل فاز اسپینل و همچنین الگوهای خوردگی را در ناحیه خط مذاب و کف) و ضربه گیر شرح داده می‌شود. غالباً در واحدهای فولاد سازی مجهز به کوره قوس الکتریکی، تصفیه و گرم کردن فولاد در پاتیل LF انجام می‌گردد، این عملیات منجر به خوردگی بالای نسوز در بخش های مختلف پاتیل می‌شود بنابراین افزایش طول عمر پاتیل مستلزم بهبود کیفی مواد نسوز در نواحی مختلف می‌باشد.

در اینگونه پاتیلها آجر کربن منیزیت (MC) جهت خط سرباره، و آجر آلومینا منیزیت گرافیتی جهت خط مذاب، کف و ضربه گیر بکار برده می‌شود. در پاتیل LF در نواحی مختلف الگوهای خوردگی متفاوتی دیده می‌شود بنابراین بطور نسبی سعی گردید که با تغییرات کیفی و ابعادی حتی الامکان بالاترین بازده حاصل شود. با اجرای این پروژه و نسوزکاری پنج پاتیل AMC در فولاد مبارکه تعداد ذوب با دو بار تعمیر خط سرباره از ۶۰-۵۰ ذوب در آجرهای آلومینی و دولومیتی به معدل ۱۳۴/۴ ذوب رسیدیم و با محاسبه باقیمانده ضخامت در نواحی مختلف و سرعت خوردگی پیش‌بینی می‌شود که پاتیل ها می‌توانند با آجرهای مذکور تا بالای ۱۵۰ ذوب را تحمل نمایند.

#### روش تحقیق

در شکل ۱ لایه های نسوز نمونه پاتیل LF مشخص شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد لایه اول ایمنی کف و دیواره آجرهای شاموتی، لایه دوم ایمنی خط مذاب و کف آجر آلومینی، لایه دوم خط سرباره آجر منیزیت اسپینلی، لایه کاری خط سرباره آجر کربن منیزیت (MC) و لایه کاری دیواره، کف و ضربه گیر آجرهای آلومینا منیزیت گرافیتی (AMC) کار شده است. در پنج پاتیل مورد آزمایش آجرهای ایرالمگ IP در ناحیه ضربه گیر و ایرالمگ MZ در ناحیه خط مذاب و کف پاتیل کار شده است مشخصات فنی آجرهای مذکور در جدول ۱ آمده است.

نتایج کاربرد آجرهای AMC در پاتیلهای مذکور در جدول ۲ مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود متوسط تعداد ذوب با دو بار تعویض خط سرباره ۱۳۴/۴ ذوب می‌باشد و بیشترین سرعت خوردگی مربوط به ناحیه ضربه گیر با سرعت خوردگی  $1/8 \text{ mm}$  به ازای هر ذوب و مسلماً با بهبود کیفیت این ناحیه می‌توان تعداد ذوب آجرهای پاتیل را تا ۳۰ درصد افزایش داد.

## نتایج و بحث

- آجرهای AMC ترکیبی از دانه‌های  $Al_2O_3$  با خلوص بالا، MgO، گرافیت و آنتی اکسیدان و یک بایندر رزینی می‌باشد مشخصات آجرهای مورد استفاده در نواحی دیواره کف و ضربه گیر در جدول (۱) مشخص شده است. خوردگی در آجرهای MC بیشتر از محل درز بین آجرها نسبت به سایر نواحی می‌باشد. همچنین نقطه ضعف آجرهای MC هدایت حرارتی بیشتر این آجرهاست. اما مزیت های آجرهای AMC نسبت به MC بشرح ذیل می‌باشد.

- تشکیل فاز اسپینل در اثر حرارت ناشی از عملیات ذوب گیری باعث ایجاد انبساط حرارتی لازم جهت بسته شدن درزهای آجرها گشته و از خوردگی سریعتر این نواحی و نفوذ سرباره مذاب به درون درزها جلوگیری می‌نماید.

- بعلت وجود درصد  $Al_2O_3$  بالا بجای MgO در آجرهای AMC هدایت حرارتی آجرهای AMC کمتر از MC بوده و نتیجتاً از اتلاف حرارتی در پاتیل کاسته می‌شود.

- مقاومت بیشتر آجرهای AMC در برابر Spalling و خوردگی شیمیایی.

توزیع دانه های MgO در بافت آجر AMC نقش مهمی در افزایش مقاومت در برابر خوردگی و افزایش عمر آجر دارد. نحوه افزودن MgO در رفتار انبساطی دوام و مقاومت در مقابل پوسته شدن بسیار مؤثر است. رابطه بین میزان MgO و خصوصیات آجر AMC در جدول شماره ۳ نشان داده شده است. در تستهای آزمایشگاهی مشخص شده است که مقاومت در مقابل خوردگی اینگونه آجرها با افزایش درصد MgO به شکل نسبی ارتقاء یافته است. دلیل این بهبود تشکیل فاز اسپینل به علت افزودن MgO و بالا بودن مقاومت دانه های اسپینل و MgO در مقابل خوردگی می‌باشد. البته در کاربرد آجر AMC در دیواره پاتیل LF افزایش بیش از حد MgO باعث بالا رفتن انبساط باقیمانده و در نتیجه کاهش مقاومت در برابر شوک حرارتی می‌گردد.

نوع و دانه بندی منیزیت تاثیر قابل توجهی بر واکنش پذیری آن به جهت تشکیل اسپینل دارد در آجرها با درصد MgO مشابه آن آجرهایی که MgO در آنها نرمتر باشد بعلت افزایش تشکیل فاز اسپینل از نظر مقاومت در مقابل خوردگی بهتر می‌باشد. در آجرهای AMC اسپینل غالباً حول اگریگیت های  $Al_2O_3$  تشکیل می‌شود. واکنش تشکیل اسپینل انبساطی بوده و منجر به ایجاد میکرو ترکهایی حول دانه های آلومینا می‌شود. البته حول دانه های MgO نیز بعلت ضریب انبساط حرارتی بالاتر آن میکروتورها ایجاد می‌گردد.

بر اساس آزمایشات انجام شده در شرایط مساوی مقدار تشکیل اسپینل در آجرهای حاوی تبولار بیشتر می‌باشد که علت آن واکنش پذیری بیشتر تبولار نسبت به فیوزد آلومینا می‌باشد و البته افزایش دما باعث افزایش مقدار تشکیل اسپینل می‌گردد.

۲- انواع خوردگی آجرهای AMC در دیواره پاتیل را می‌توان به ۴ بخش تقسیم نمود.

#### ۱-۲) خوردگی به صورت Spalling

اشکال ۲ و ۳ الگوی واقعی خوردگی دو نمونه آجرهای AMC را نشان می‌دهند. MgO در نمونه A نرمتر و در B درشت‌تر می‌باشد اما از نظر ترکیب مابقی اجزاء دقیقاً مشابه می‌باشند. خوردگی در آجر A بیشتر بصورت پوسته ای در حالی که در آجر B بیشتر بصورت خوردگی شیمیایی می‌باشد. هردو آجر در دیواره پاتیل کار شده اند همانطور که در شکل شماره (۴) مشاهده می‌شود مقدار اسپینل در آجر B کمتر است و علت آن ناشی از تماس کمتر دانه های MgO و  $Al_2O_3$  میباشد. برای تعیین میزان نفوذ سرباره در آجرهای A و B مقدار CaO در لایه های مختلف اندازه گیری شد که نتیجه آن در شکل ۵ آمده است. در آجر A، CaO از سطح داغ به پشت آجر نفوذ کرده در حالی که در آجر B مقدار کمی CaO بصورت محدود در سطح داغ آجر یافت می‌شود. شکل ۴ نتایج آنالیز XRD در مجار سطح داغ هردو آجر را نشان می‌دهد همانطور که مشاهده میگردد در آجر A مقدار زیادی فاز اسپینل تشکیل گردیده در حالی که در آجر B مقدار بسیار کمی فاز اسپینل مشاهده می‌شود. در شکل ۳ ساختار میکروسکوپی در مجاورت سطح داغ دو آجر نشان داده شده است در آجر A سرباره بدون ترکهای ناشی از تشکیل فاز اسپینل نفوذ کرده که عمدتاً در اطراف دانه‌های MgO و  $Al_2O_3$  و بین آنها مشاهده می‌شوند. در اثر تشکیل فاز اسپینل بین دانه های MgO و  $Al_2O_3$  و بدلیل انبساط حجمی ناشی از تشکیل اسپینل ترکهای میکروسکوپی در بافت آجر ایجاد میگردد و از طرفی ترکهای میکروسکوپی دیگری در اطراف دانه های MgO بعلاوه انبساط حرارتی بالاتر آن تشکیل میشود. که بمحض سرد شدن باعث ایجاد حفراتی میگردد. وقتی ترکها و حفرات به یکدیگر متصل شوند سرباره از محل سطح داغ به درون ترکها و داخل آجر نفوذ می‌کند و بمرور با تحلیل رفتن ترکیبات آجر بافت پوسته ای و متلاشی میگردد. میزان خوردگی بصورت Spalling غالباً در آن دسته از آجرهای AMC که دانه های MgO درشت یا خیلی ریز باشند افزایش می‌یابد. برای ممانعت از پوسته و متلاشی شدن بافت آجر AMC توزیع دانه بندی MgO و مسیر تشکیل فاز اسپینل باید کنترل گردد.

## ۲-۲) خوردگی بصورت خوردگی شیمیایی

دانه‌های  $MgO$  و  $Al_2O_3$  در آجرهای AMC با سرباره حاوی ترکیبات  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  و یا  $FeO$  واکنش داده و مشاهده فازهای ملبیت ( $2CaO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $2CaO$ ,  $MgO$ ,  $2SiO_2$ ) با نقطه ذوب پائین در سطح داغ آجرهای مورد آزمایش نتیجه این واکنش‌ها و نهایتاً خوردگی سطح آجرها می‌باشد. از طرفی وجود مقدار کمی  $SiO_2$  در بافت آجر و واکنش آن با اسپینل، شروع تشکیل فاز مایع را در دماهای  $1453^\circ C$  بدنال خواهد داشت. از این موضوع چنین استنباط می‌شود که مقادیر کم ناخالصی‌ها نظیر  $SiO_2$  و  $Si$  بعنوان آنتی اکسیدان با ترکیبات آجر AMC تشکیل فاز مایع می‌دهند این فاز خوردگی توسط سرباره را تسریع می‌کند. کاهش مقدار  $SiO_2$  و استفاده از مواد اولیه با کیفیت مناسب و همچنین گرافیت پرخلوص در بالا بردن مقاومت آجر AMC در مقابل خوردگی سرباره مؤثر می‌باشد.

## ۳-۲) خوردگی ناشی از اکسیداسیون کربن

بخشی از کربن موجود در آجرهای MC و AMC در حین عملیات پيش گرم و ریخته‌گری مذاب فولاد با اکسیژن هوا اکسید می‌گردند. زمانی که لایه‌های نوسوز دکربوره می‌شوند خوردگی و سایش آجر بدلیل نفوذ راحتتر مذاب و سرباره به حفرات ایجاد شده افزایش می‌یابد. البته پوشش یک لایه سرباره روی سطح داغ آجرها از تماس اکسیژن هوا با کربن آجر ممانعت بعمل آورده و مقدار اکسیداسیون کربن را کاهش می‌دهد البته افزایش مقاومت در مقابل اکسیداسیون آجر نیازمند دانه بندی متراکم تر و افزودن آنتی اکسیدان و افزودنیهای مخصوص می‌باشد.

## ۴-۲) خوردگی ناشی از فرسایش

برخی نواحی پاتیل LF در هنگام تخلیه مذاب فولاد از کوره به پاتیل و یا در اثر همزدن از طریق دمش گاز دچار فرسایش می‌شوند در این بخشها لایه‌های دکربوره شده، لایه‌های سست شده در اثر تشکیل اسپینل و قسمت‌هایی که فاز مایع تشکیل شده و همچنین لایه‌های که با مذاب سرباره دچار واکنش شده اند شسته و تخریب می‌شوند.

## نتیجه گیری

در این مقاله نکات مهم در خصوص خوردگی آجرهای AMC استفاده شده در پاتیل‌های LF و همچنین نتایج کاربرد آجرهای AMC شرکت فرآورده‌های نسوز ایران در پاتیل‌های فولاد مبارکه ارائه شده و مسلماً افزایش طول عمر نسوز در پاتیل بستگی به بهبود و دوام آجر AMC استفاده شده در خط مذاب، کف و

ضربه گیر پاتیل دارد و قطعاً استفاده از مواد مرغوب و اصلاح شرایط اپراتوری در واحدهای ریخته گری دوام آجرهای پاتیل را افزایش می دهد.

### تشریح و قدردانی

بدینوسیله از مسئولین و کارکنان واحد نسوز فولاد مبارکه و مدیریت و کارکنان شرکت فرآورده های نسوز ایران بخاطر همکاری در اجرای این پروژه قدردانی می گردد.

### مراجع

- [1] H. Shikano, T. Yagi, M. Kamiide and K. Yamamoto: Taikabutsu, 39, 1987, pp. 645-647  
 [2] A. Okushima and T. Sato : Taikabutsu, 40, 1988, pp. 567-569.  
 [3] A. Watanabe, H. Takahashi, S. Takanaga, N. Goto, O. Matsuura and S. Yoshida: Taikabutsu, 41, 1989, pp. 537-542  
 [4] Y. Sasajima, K. Ariga, S. Morimoto and T. Kato : Taikabutsu, 44, 1992, P. 646  
 [5] A. Okushima, T. Sato, K. Yamamoto and Y. Nakano: Taikabutsu, 41, 1989, pp.545 -547.

جدول ۱. مشخصات فنی آجرهای AMC.

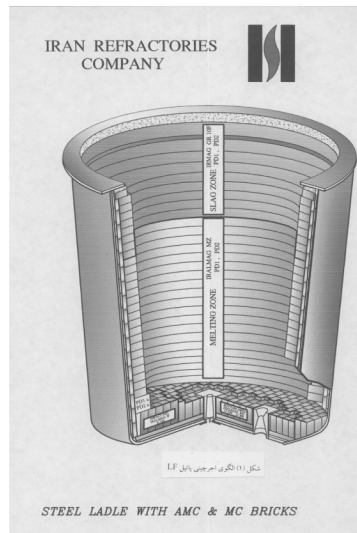
نام محصول	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	C	BD Gr/cm <sup>3</sup>	AP %	CCS Kg/cm <sup>2</sup>	ناحیه پاتیل
ایرالمگ (M-Z)	85%	1.5%	1%	0.5%	0.5%	10%	7%	3.10-3.20	4-8	450-500	خط مذاب کف
ایرالمگ (P-Z)	92%	1%	-	0.3%	0.03%	6%	6%	3.05-3.15	4-8	450-600	ضربه گیر

جدول ۲. نتایج کاربرد آجرهای AMC در پاتیل های فولاد مبارکه.

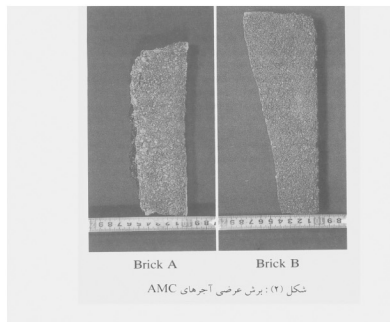
نواحی پاتیل	تعداد ذوب	اندازه استاندارد آجر mm	ضخامت باقیمانده mm	سرعت خوردگی بازای هر ذوب mm	ضخامت بحرانی mm	تعداد ذوب نهایی
خط مذاب	۱۳۴/۴	۲۰۰	۱۰۲	۷۳	۶۰	۱۹۰
کف	۱۳۴/۴	۳۰۰	۱۴۰	۱/۱۹	۷۰	۱۹۳
ضربه گیر	۱۳۴/۴	۳۵۰	۱۰۸	۱/۸	۷۰	۱۵۶

جدول ۳. مقایسه و تأثیر مقدار ودانه بندی MgO اضافه شده به ترکیب آجر بر خواص آجرهای AMC.

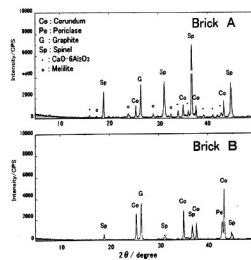
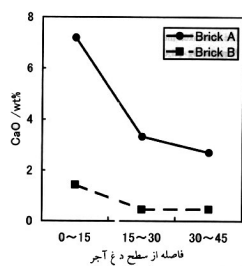
MgO additive amount (Grain Size)	Little $\leftrightarrow$ Many (Large $\leftrightarrow$ Small)
Spinel formation	Little $\leftrightarrow$ Much
Corrosion resistance	Low $\leftrightarrow$ High
Thermal expansion	Low $\leftrightarrow$ High
Permanent linear change	Low $\leftrightarrow$ High



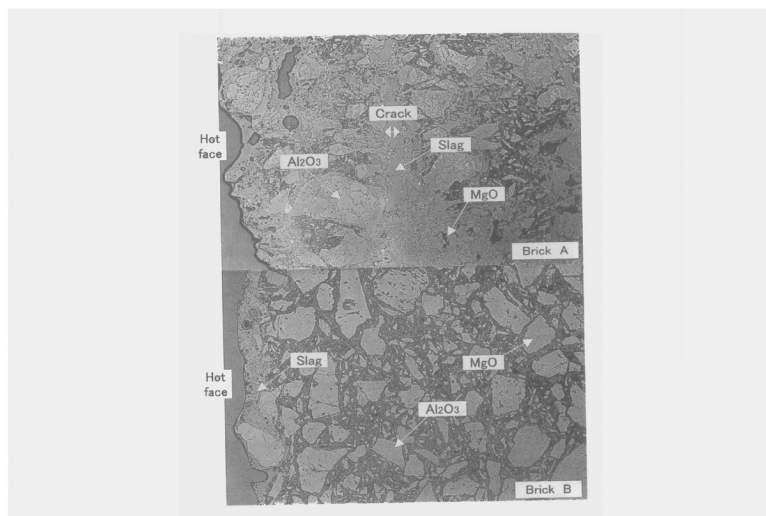
شکل ۱. الگوی آجر چینی پاتیل LF.



شکل ۲. برش عرضی آجرهای AMC.



شکل ۴. نمودار XRD از بافت آجرهای A و B. شکل ۵. میزان نفوذ CaO در آجرهای A و B.



شکل ۳. ساختار میکروسکوپی در مجاورت سطح داغ آجرهای A و B.