

بررسی و تحقیق در رابطه با تاثیر آنتی اکسیدانهای Al، Si و SiC بر خواص ترمومکانیکی و مقاومت اکسیداسیون آجرهای AMC پاتیل صنعت فولاد

رضا وطن دوست^۱، یگانه محمدی^۲، یاسر داوودی^۳

شرکت فرآورده های دیرگداز ایران

reza_watandoost@yahoo.com ، تلفن ۰۵۱-۵۷۲۵۵۶۷۱-۲

چکیده

در این کار تحقیقاتی تاثیر افزودن مقادیر مختلف آنتی اکسیدانهای Al، Si و SiC بر خواص ترمومکانیکی و مقاومت اکسیداسیون آجرهای آلومینا- منیزیا- کربنی (AMC) پاتیل صنعت فولاد بررسی شد. نمونه های حاوی درصد های متفاوت آنتی اکسیدان در شرایط احیایی در دو دمای ۱۴۵۰ و ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ ساعت قرار گرفت. سپس پارامترهای فیزیکی نمونه ها نظیر استحکام فشاری سرد، تخلخل ظاهری، دانسیته بالک و استحکام خمشی اندازه گیری شد. تست مقاومت اکسیداسیون با روش قرار دادن نمونه ها در کوره در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴ ساعت و بررسی مقدار کربن مغز نمونه ها انجام شد. تست هیدراتاسیون با قرار دادن نمونه های حالت احیاء در معرض بخار آب (درون اتوکلاو) در سه سیکل انجام گرفت. به منظور بررسی ساختار میکروسکوپی نمونه ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM/EDS) و جهت بررسی آنالیز فازی از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که افزودن آنتی اکسیدانهای Al، Si و حالت ترکیبی آنها (Al+Si) موجب بهبود خواص فیزیکی و افزایش استحکام فشاری، استحکام خمشی و همچنین کاهش تخلخل ظاهری می شود اما آنتی اکسیدان SiC تاثیر قابل توجهی بر روی پارامترهای فیزیکی مذکور نداشت. نتایج تست اکسیداسیون نیز نشان داد نمونه های حاوی Al، Si و (Al+Si) دارای مقاومت اکسیداسیون بالاتری در مقایسه با نمونه های حاوی SiC بودند. نتایج تست هیدراتاسیون نشان داد در صورت افزایش بیش از اندازه مقدار Al، تشکیل فاز کاربید آلومینیوم و هیدراته شدن آن موجب ایجاد ترک در نمونه ها خواهد شد در صورتیکه نمونه های حاوی (Al+Si) و (Al+SiC) تمایل کمتری به هیدراته شدن داشتند. در نهایت مقدار بهینه افزودن آنتی اکسیدانهای Al و Si در آجرهای AMC بدست آمد.

واژه های کلیدی: دیرگداز، AMC، آنتی اکسیدان، پاتیل فولاد

۱- مقدمه

امروزه دیرگدازهای آلومینا- منیزیا- کربنی (AMC) با توجه به خواص منحصر بفردشان نظیر مقاومت سایشی عالی، مقاومت به خوردگی شیمیایی و مکانیکی مناسب، مقاومت به شوک حرارتی خوب و مقاومت به سرباره مناسب عمدتاً بعنوان پوشش نسوز پاتیل های فولادسازی بکار می روند. تشکیل اسپینل ثانویه (in-situ spinel) در دماهای بالا باعث انبساط آجر و جلوگیری از فرسایش ناشی از درز بین آجرها شده و مقاومت به خوردگی و همچنین شوک پذیری آجر نسوز را تقویت می کند. اما از طرف دیگر تشکیل میکروتکرک های ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی اجزای تشکیل دهنده نسوز می تواند باعث پدیده نفوذ مذاب و سرباره شود. همچنین مقدار انبساط پایدار (PLC) ناشی از تشکیل اسپینل ثانویه نیز بایستی کنترل شده باشد. لذا بدست آوردن مقدار و دانه بندی بهینه منیزیا در این نوع آجرها حائز اهمیت است (۳۰۲۰۱). حضور گرافیت و مقدار آن نقش اساسی در خصوصیات و رفتار محصول ایجاد می کند. هر چند افزایش مقدار گرافیت سبب کاهش دانسیته و استحکام می شود ولی افزایش هدایت حرارتی و در نتیجه شوک پذیری را نیز به همراه دارد. از طرف دیگر افزودن گرافیت سبب افزایش انعطاف پذیری سیستم می شود. اکسیداسیون گرافیت یکی از عوامل اصلی فرسایش نسوزهای AMC محسوب شده که جهت کنترل مقدار اکسیداسیون گرافیت و همچنین بهبود برخی خواص ترمومکانیکی نسوز از افزودنی هایی نظیر آنتی اکسیدانهای فلزی و غیر فلزی استفاده می شود. ترکیب آنتی اکسیدانها طوری انتخاب می شود که میل ترکیبی اکسیژن با این مواد نسبت به میل ترکیبی اکسیژن با گرافیت بیشتر باشد. لذا در صورت نفوذ اکسیژن به درون آجر، ابتدا با این پودرها واکنش انجام می دهد و آنها را اکسید می کند، بنابراین صدمه ای به گرافیت نمی زند. البته این مواد از طریق تاثیر بر تشکیل منطقه متراکم نیز باعث بهبود مقاومت اکسیداسیون می شوند. تحقیقات نشان داده که این مواد از طریق تشکیل فازهای

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد- سرامیک، شرکت فرآورده های دیرگداز ایران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی مواد- نانو مواد، شرکت فرآورده های دیرگداز ایران

۳- کارشناسی ارشد مهندسی مواد- سرامیک، شرکت فرآورده های دیرگداز ایران

کاربیدی، نیتریدی و اکسیدی موجب افزایش استحکام مکانیکی نسوز در دمای بالا نیز می گردند. پودرهای فلزی Al، Si، Mg و همچنین کاربیدهای بور و سیلیسیم (SiC & B₄C) متداولترین آنتی اکسیدانهای هستند که استفاده می شوند. اما پودرهای فلزی Al و Si به دلیل قیمت پایین بیشتر استفاده شده، در دمای بالا تشکیل فازهای کاربید آلومینیم و کاربید سیلیسیم داده و علاوه بر نقش آنتی اکسیدانی، استحکام نسوز را هم ارتقاء می دهند. مهمترین مشکل آنتی اکسیدان Al تجزیه کاربید آلومینیوم بواسطه نفوذ رطوبت بعد از سرد شدن آجر می باشد (۵،۴، ۷،۶۰). در این کار تحقیقاتی تاثیر افزودن مقادیر مختلف آنتی اکسیدانهای Al، Si و SiC بر خواص ترمومکانیکی و مقاومت اکسیداسیون آجرهای آلومینا- منیزیا- کربنی (AMC) پاتیل صنعت فولاد بررسی شد. همچنین تست هیدراتاسیون آجرهای مذکور به منظور بررسی رفتار آجرهای حاوی مقادیر بالای آنتی اکسیدان نیز انجام شد.

۲- روش تحقیق :

مواد اولیه مورد استفاده جهت تولید آجرهای آلومینا- منیزیا- کربنی (AMC) شامل آلومینای تبولار (TA)، آلومینای فیوز قهوه ای (BFA)، آلومینای کلسینه، منیزیا فیوز (FM)، بوکسیت، گرافیت پولکی، رزین فنولیک بعنوان بایندر (مایع و جامد) و آنتی اکسیدانهای پودری Al، Si و SiC بود.

۲-۱- آزمایشهای مرحله اول :

فرمولاسیونهای اولیه مورد استفاده مطابق با جدول یک بود.

جدول ۱- فرمولاسیون آزمایشهای مرحله اول

شماره نمونه	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶	نمونه ۷
کد نمونه	0	A1	A3	A5	A3.S1	A3.S2	A3.SC2
فرمولاسیون							
TA	72	71	69	67	68	67	67
FM	8	8	8	8	8	8	8
BFA	10	10	10	10	10	10	10
Calcined alumina	5	5	5	5	5	5	5
Flake Graphite	5	5	5	5	5	5	5
Phenolic Resin	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
آنتی اکسیدان							
Al	0	1	3	5	3	3	3
Si	0	0	0	0	1	2	0
SiC	0	0	0	0	0	0	2

میکسهای فوق توسط میکسر آزمایشگاهی همزده و بوسیله پرس هیدرولیکی تک محوره با فشار ۱۵۰۰ مگاپاسکال با قالب 30/0 فرمدهی شدند. در ادامه نمونه های استحکام فشاری سرد (CCS)، تخلخل ظاهری (AP)، MOR و HMOR از داخل آجرهای تولید مطابق با استاندارد ASTM تهیه شده و در بستر کک (حال احیایی) در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶ ساعت قرار گرفته و پارامترهای کیفی نمونه های فوق اندازه گیری شد. با توجه به نوع دستگاه موجود، تست HMOR در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر هوا انجام گرفت. جهت بررسی ساختار میکروسکوپی از میکروسکوب الکترونی روبشی (SEM, Oxford S360) و به منظور بررسی آنالیز فازی از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD, Philips XPert PW 3040/60, Cu K α = 1.54 Å) استفاده شد.

۲-۲- تست هیدراتاسیون :

جهت انجام تست هیدراتاسیون، نمونه های استوانه ای شکلی که در حالت احیاء در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد حرارت دیده بودند، درون یک محفظه اتوکلاو طوری قرار گرفت که روی نمونه ها کمی با آب پوشانده شود (از یک زودپز بعنوان اتوکلاو استفاده شد). سپس حرارت محفظه فوق بالا رفته تا نمونه ها تحت بخار آب به مدت یکساعت قرار داشته باشند. در ادامه نمونه ها بیرون آورده شده و در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه خشک شدند. سیکل فوق سه بار تکرار گردید و نمونه ها از لحاظ افزایش وزن و وضعیت ظاهری بررسی شد.

۲-۲- آزمایشهای مرحله دوم :

با توجه به مطالعات تکمیلی ، نتایج تستهای مرحله اول و همچنین نتایج تست هیدراتاسیون ، فرمولاسیونهای مرحله دوم آزمایشها مطابق با جدول دو طراحی گردید. در این سری تستها ، تمامی نمونه ها حاوی یک درصد آنتی اکسیدان Al بوده و به جای BFA از بوکسیت استفاده شد (جدول دو).

جدول ۲- فرمولاسیون آزمایشهای مرحله دوم

شماره نمونه	نمونه ۸	نمونه ۹	نمونه ۱۰	نمونه ۱۱	نمونه ۱۲	نمونه ۱۳	نمونه ۱۴
کد نمونه	A1-second	A1.S1-second	A1.S3-second	A1.S5-second	A1.1SC-second	A1.3SC-second	A1.5SC-second
فرمولاسیون							
TA	71	70	68	66	70	68	66
FM	8	8	8	8	8	8	8
Bauxite	10	10	10	10	10	10	10
Calcined alumina	5	5	5	5	5	5	5
Flake Graphite	5	5	5	5	5	5	5
Phenolic Resin	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
آنتی اکسیدان							
Al	1	1	1	1	1	1	1
Si	0	1	3	5	0	0	0
SiC	0	0	0	0	1	3	5

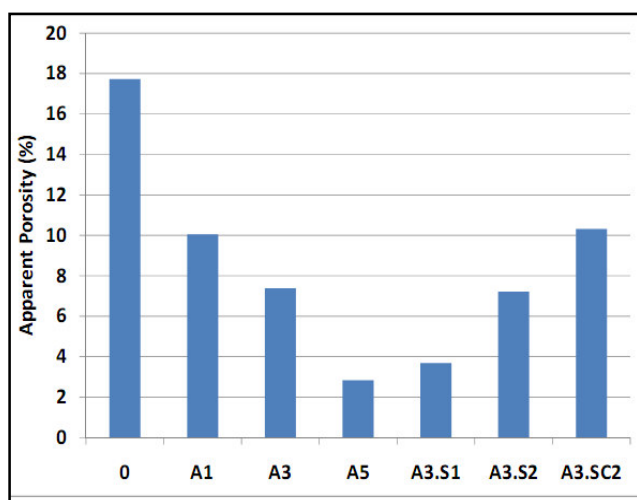
میکسهای فوق مشابه مرحله اول تبدیل به آجر شده و در بستر کک (شرایط احیایی) در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت. پارامترهای کیفی نمونه ها نیز مشابه با نمونه های مرحله اول اندازه گیری شد.

۴-۲- تست اکسیداسیون :

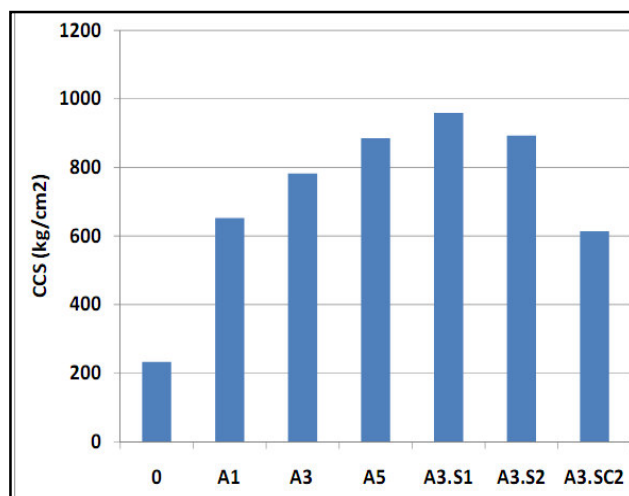
جهت انجام این تست نمونه های استوانه ای که در حالت احیا در بستر کک پخت شده بودند (نمونه های مرحله اول ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد و نمونه های مرحله دوم ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد) در یک کوره الکتریکی آزمایشگاهی در دمای ۱۴۰۰ درجه به مدت ۶ ساعت سانتیگراد در اتمسفر هوا قرار گرفتند. در ادامه نمونه های فوق سرد شده و پس از برش با اهر ، مغز سیاه نمونه ها اندازه گیری گردید. نسبت قطری از نمونه که حاوی کربن بوده و اکسید نشده بود به قطر اولیه نمونه بعنوان شاخص مقاومت اکسیداسیون در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث :

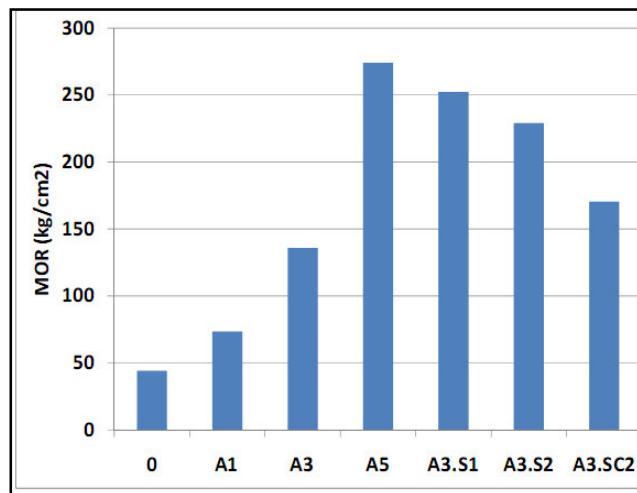
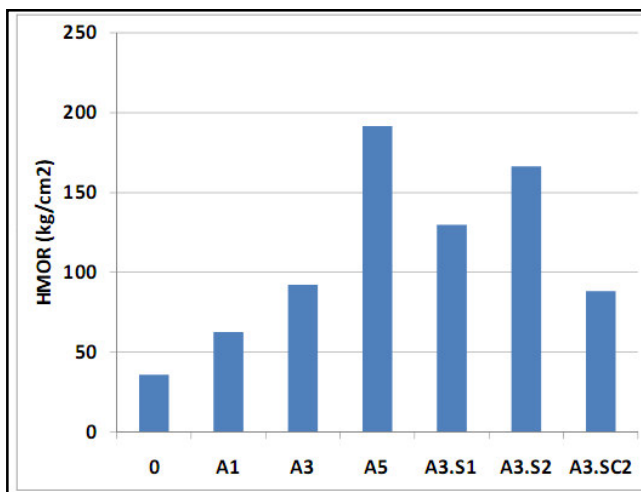
شکلهای یک و دو نتایج تستهای استحکام فشاری سرد (CCS) ، تخلخل ظاهری (AP) ، MOR و HMOR میکسهای مرحله اول و دوم را نشان می دهد.



(ب)



(الف)

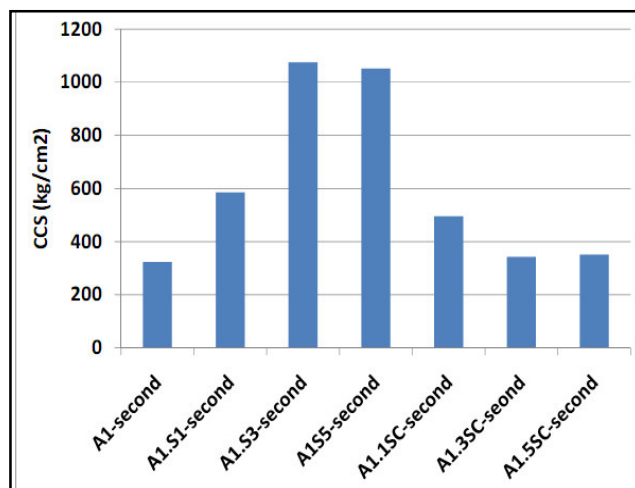
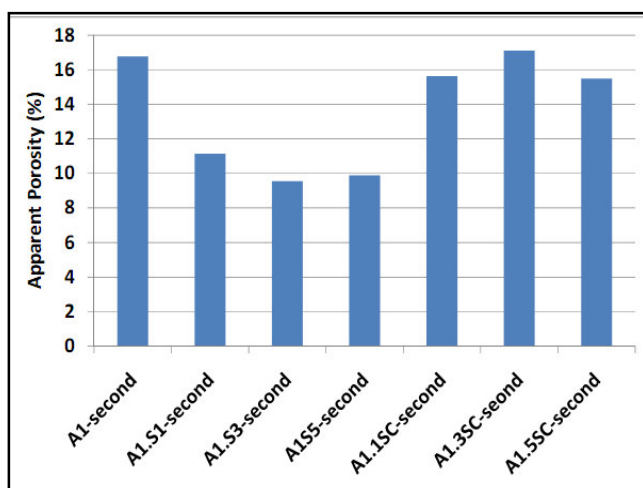


(د)

(ج)

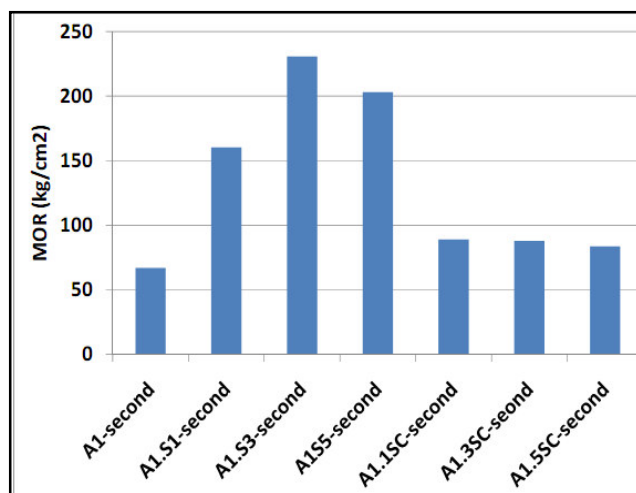
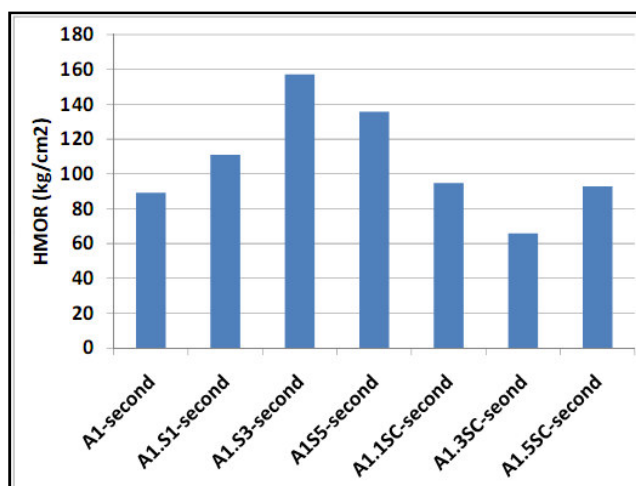
شکل ۱- پارامترهای کیفی میکسهای مرحله اول (حالت احیاء ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد)

الف- استحکام فشاری سرد (CCS) ، ب- تخلخل ظاهری (AP) ، ج- MOR ، د- HMOR



(ب)

(الف)



(د)

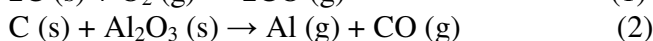
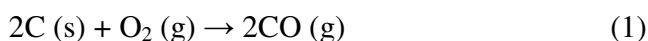
(ج)

شکل ۲- پارامترهای کیفی میکسهای مرحله دوم (حالت احیاء ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد)

الف- استحکام فشاری سرد (CCS) ، ب- تخلخل ظاهری (AP) ، ج- MOR ، د- HMOR

همانطور که شکل‌های یک و دو نشان می‌دهد با افزایش مقدار Al پارامترهای CCS، MOR و HMOR افزایش و AP کاهش یافته است. این رفتارها می‌تواند بدلیل نقش آنتی اکسیدانهای مورد استفاده در کاهش مقدار اکسیداسیون کربن و همچنین تشکیل باندهای سرامیکی و استحکام ساختاری ناشی از تشکیل فازهای ثانویه نظیر فازهای کاربیدی، نیتریدی، اسپینل، فورستریت و مولایت در دیرگدازهای AMC حاوی آنتی اکسیدانها باشد. تشکیل فازهای ثانویه فوق با پر کردن تخلخلهای باز نیز، می‌تواند از نفوذ اکسیژن به درون آجر جلوگیری کند.

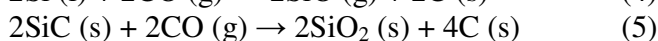
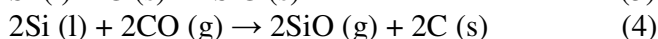
بطور کلی در این نوع نسوزها کربن به دو روش اکسید می‌شود: (i) اکسیداسیون مستقیم و (ii) اکسیداسیون غیر مستقیم. اکسیداسیون مستقیم مطابق با معادله (۱) تحت دمای 1400°C و در حالتیکه کربن مستقیماً توسط اکسیژن موجود در اتمسفر اکسید می‌شود رخ می‌دهد. اکسیداسیون غیر مستقیم طبق معادله (۲) در دمای بالای 1200°C و در جاییکه کربن توسط اکسیژن موجود در Al_2O_3 اکسید می‌شود اتفاق می‌افتد.



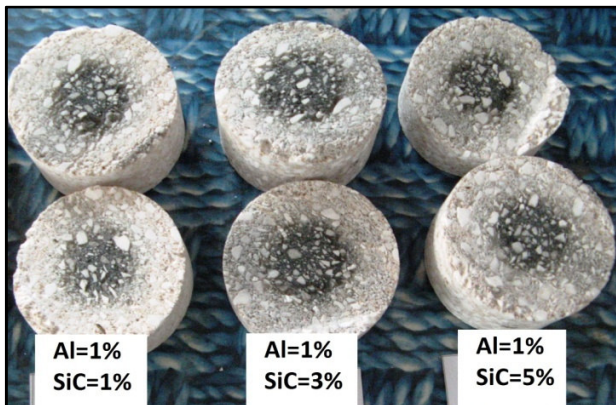
در مرحله اولیه اکسیداسیون، سرعت اکسیداسیون بوسیله سرعت واکنش شیمیایی در سطح نمونه کنترل می‌شود. نتیجه اکسیداسیون، یک لایه متخلخل اکسید شده سطحی بوده و به تدریج فصل مشترک واکنش به طرف داخل حرکت می‌کند. در این شرایط برای ادامه اکسیداسیون، گاز اکسیژن باید برای رسیدن به فصل مشترک واکنش، به داخل این لایه نفوذ کند و در نتیجه سرعت اکسیداسیون کاهش می‌یابد. با افزایش دما و افزایش سرعت واکنشهای شیمیایی و در نتیجه تسهیل شرایط نفوذ موثر، سرعت اکسیداسیون زیاد خواهد شد.

در اثر افزودن Al، این پودر فلزی در دمای حدود 660°C درجه سانتیگراد ذوب شده و هر ذره پودر Al، لایه اکسیدی اطراف خود را شکسته و مذاب Al به بیرون راه پیدا می‌کند. در ادامه واکنش بین Al و کربن و همچنین Al با N_2 منجر به تشکیل فازهای کاربید آلومینیوم (Al_4C_3) و نیتريد آلومینیوم (AlN) می‌شود. تشکیل این فازهای می‌تواند منجر به افزایش استحکام آجر نسوز شود. این فازها نیز می‌توانند با منوکسید کربن ناشی از اکسیداسیون گرافیت واکنش داده تا Al_2O_3 بوجود آید. این اکسید نیز می‌تواند با MgO موجود در آجر واکنش داده و فاز اسپینل (MgAl_2O_4) بوجود آورد.

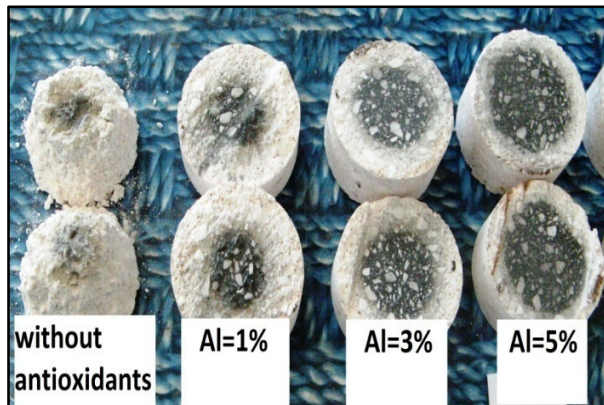
پودر Si فلزی استفاده شده نیز در دمای بالا ذوب شده، سطح کربن را پوشش داده بنابراین یک لایه محافظ برای جلوگیری از اکسیداسیون کربن ایجاد می‌کند. این Si مایع با گرافیت واکنش داده و تشکیل SiC می‌دهد. در دمای بالا مایع Si می‌تواند با CO واکنش داده و SiO (g) تشکیل دهد. SiO (g) تشکیل شده می‌تواند به SiO_2 تشکیل دهد. SiC تشکیل شده می‌تواند با CO واکنش داده و SiO_2 (s) تشکیل دهد. البته بایستی توجه کرد که در شرایط کاربردی در پاتیل مذاب، انحلال SiO_2 در سرباره، بازیسیته سرباره (نسبت CaO/SiO_2) را کاهش خواهد داد. در نتیجه قابلیت انحلال Al_2O_3 در سرباره افزایش یافته و فرسایش دیرگداز را سریع تر می‌شود. مکانیزم واکنش برای تشکیل SiO_2 بصورت زیر می‌باشد.



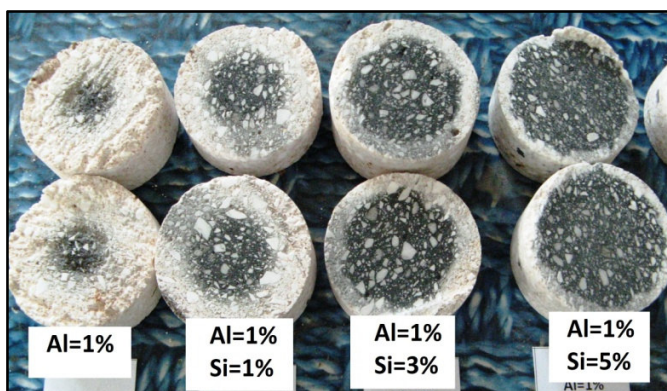
کاهش در مقدار AP به عنوان تابعی از افزودنی پودرهای Al و Si فلزی را می‌توان بصورت زیر توضیح داد. آنتی اکسیدان های فلزی نقش مهمی در جلوگیری از اکسیداسیون پیوند کربن بازی می‌کند بدلیل دو مکانیزم یعنی (i) آنها خودشان ذوب شده و یک کوتینگ محافظ بر روی گرافیت یا کربن تشکیل داده و مانع از اکسیداسیون کربن می‌شوند و یا (ii) آنها خودشان اکسید شده و فشار جزئی اکسیژن موجود برای اکسید کردن کربن را کاهش می‌دهند. بنابراین اکسیداسیون کربن از سطح نمونه با افزایش افزودنی Al و Si فلزی متوقف می‌شود. این کاهش اکسیداسیون سطح با افزایش افزودنی فلزی باعث کاهش AP می‌شود. پودر SiC نیز می‌تواند مطابق با واکنش (۵) با CO واکنش داده، اکسید شده و SiO_2 بوجود آید. اما SiC در مقایسه با Al و Si پایداری بالاتری داشته و تاثیر آن بر مقاومت اکسیداسیون کمتر است (شکل سه).



(ب)

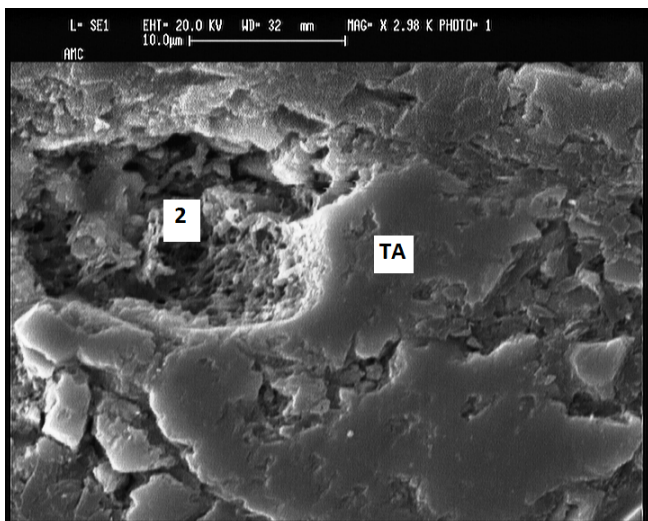


(الف)

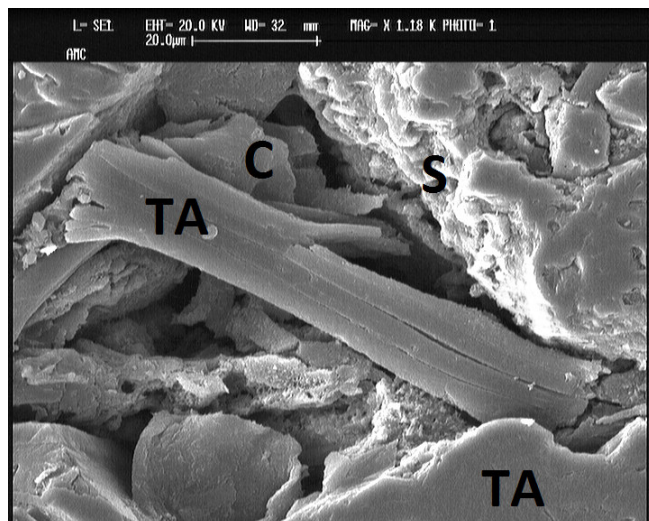


(ج)

شکل ۳- مقاطع برش تست اکسیداسیون در دمای ۱۴۰۰ درجه به مدت ۶ ساعت : الف- نمونه های مرحله اول حالت احیاء ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد ، ب- نمونه های مرحله دوم حالت احیاء ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد ، ج- نمونه های مرحله دوم حالت احیاء ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد در شکل چهار عکسهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) فازهای اسپینل (۴- الف) ، کاربید آلومینیوم و مولایت (در منطقه ۲ شکل ۴- ب) نمونه اکسید شده شماره شش (نمونه حاوی ۳ درصد Al و ۲ درصد Si) دیده می شود.



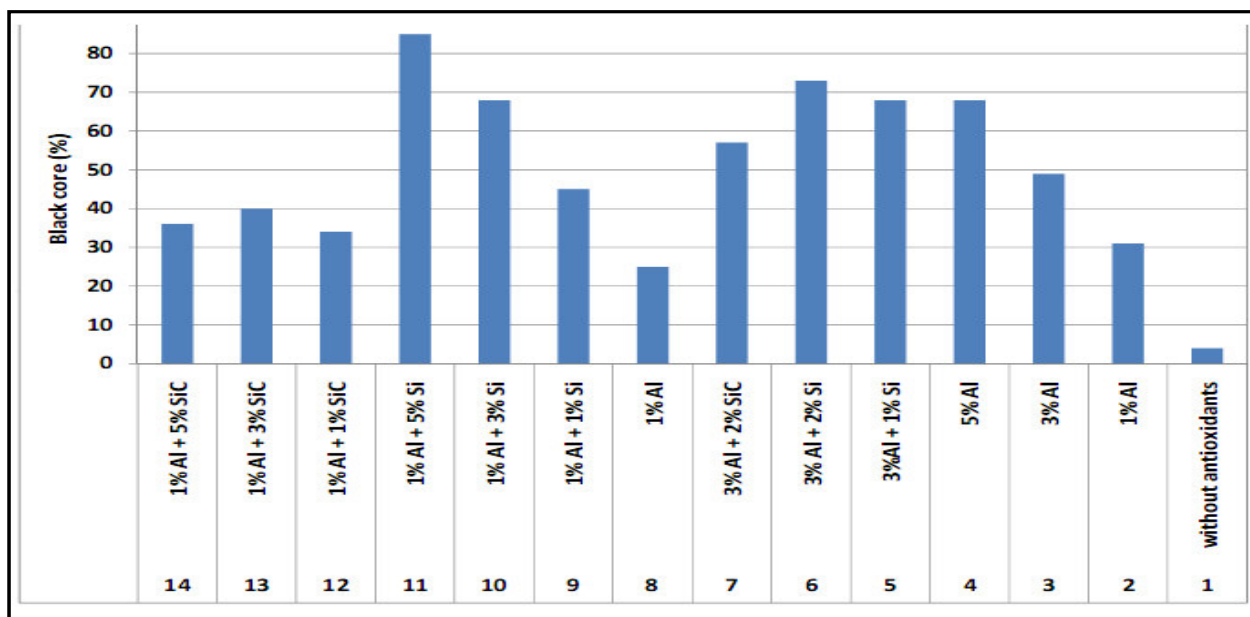
(ب)



(الف)

شکل ۴- عکسهای SEM از ریزساختار نمونه شش ($Al=3\%$, $Si=2\%$) پس از تست اکسیداسیون ($T=1400^{\circ}C$, $t=6h$)
 TA=Tabular Alumina, C=Graphite, S=Spinel

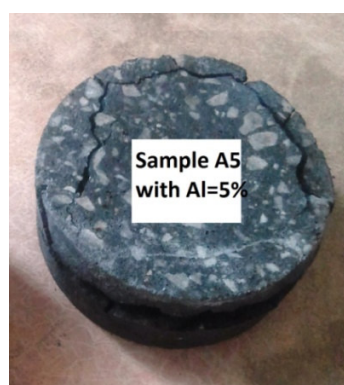
در شکل پنج درصد مغز سیاه باقیمانده (کربن اکسید نشده) نمونه های تست اکسیداسیون محاسبه و نشان شده است.



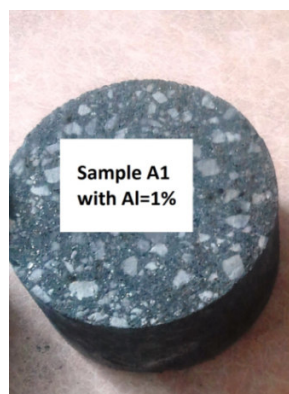
شکل ۵- درصد مغز سیاه باقیمانده (کربن اکسید نشده) نمونه های تست اکسیداسیون

همانطور که در شکل های سه و پنج دیده می شود با افزایش مقدار آنتی اکسیدان ، مقاومت اکسیداسیون نمونه ها زیاد شده است. تاثیر آنتی اکسیدانهای Al و Si بیشتر از SiC بوده است که دلیل این مساله احتمالاً واکنش پذیری کمتر SiC خواهد بود. نمونه های حاوی آنتی اکسیدانهای ترکیبی Al+Si نسبت به نمونه های حاوی Al و یا نمونه های حاوی Al+SiC مقاومت اکسیداسیون بالاتری داشته است.

همانطور که در منابع مختلفی ذکر شده است یکی از مشکلات آنتی اکسیدان Al ، هیدراتاسیون فاز کاربرد آلومینیوم (Al_4C_3) است. این واکنش انبساطی بوده و می تواند باعث ایجاد ترک در آجر شود. نتایج تست هیدراتاسیون نمونه های حاوی مقادیر بالای Al و این مساله را نشان داد (شکل شش). بررسی نمونه های تست اکسیداسیون و نمونه های حالت احیاء پس از نگهداری به مدت دو ماه نیز نشان داد که فاز کاربرد آلومینیوم (Al_4C_3) در نمونه های با مقادیر بالای Al وجود داشته و می تواند منجر به ترکدار شدن و از هم پاشیدن آجر شود.



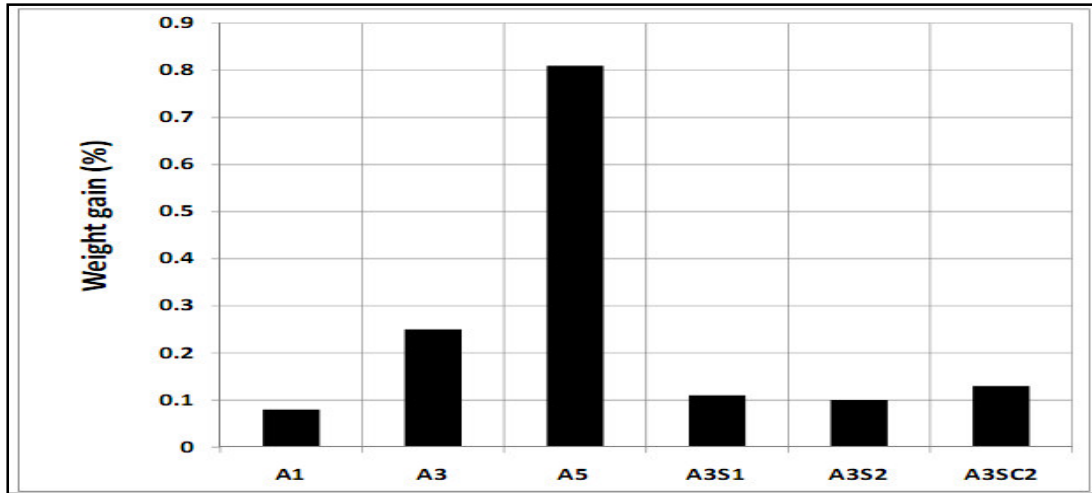
(ب)



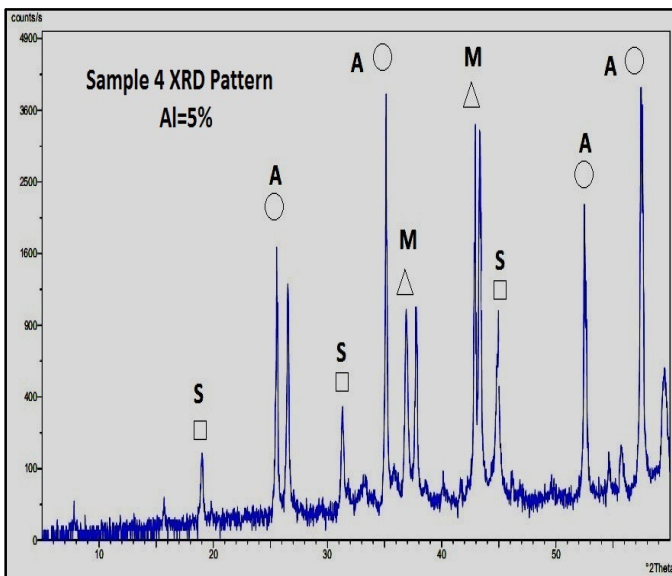
(الف)

شکل ۶- نمونه های تست هیدراتاسیون (سه سیکل) : الف- نمونه شماره دو (Al=1%) ، ب- نمونه شماره چهار (Al=5%)

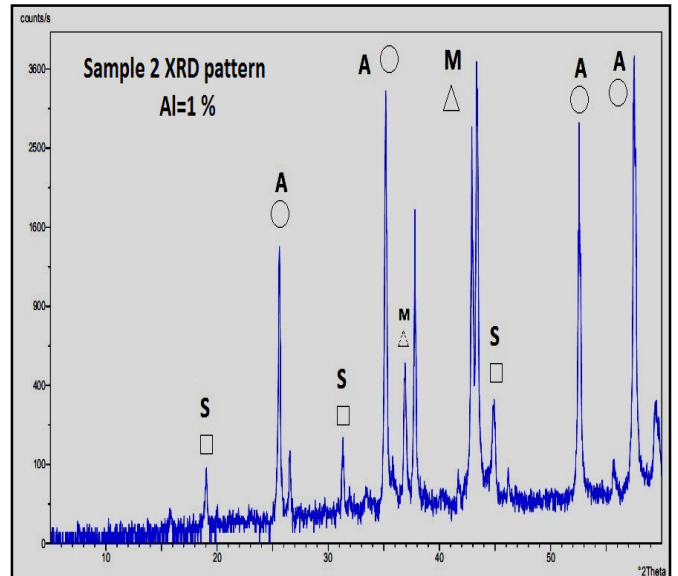
در شکل هفت نیز افزایش وزن نمونه ها پس از سه سیکل تست هیدراتاسیون و خشک کردن نشان داده شده است. افزایش وزن بالاتر در نمونه های حاوی مقدار زیاد Al می تواند وجود فاز کاربرد آلومینیوم (Al_4C_3) را تایید نماید.



در شکل هشت الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه های دو (Al=1%) و چهار (Al=5%) پس از پخت در بستر کک (دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶ ساعت) و سپس اکسید شده (در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶ ساعت) نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۸- الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه دو (Al=1%) و ب- نمونه چهار (Al=5%) پس از تست اکسیداسیون (A = Al₂O₃ (43-1484) , M = MgO (78-0430) , S = Spinel (05-0672) , (T=1400 ° C , t = 6 h

همانطور که مشاهده می شود در نمونه حاوی پنج درصد پودر Al ، شدت پیک فاز اسپینل بیشتر از نمونه حاوی یک درصد پودر Al است. نتایج آنالیز نیمه کمی فازی انجام گرفته با نرم افزار MATCH نیز نشان داد مقدار فاز اسپینل در نمونه چهار (Al=5%) حدود دو برابر نمونه دو (Al=1%) است. در هیچکدام از الگوهای XRD گرفته شده ، فاز فلزی و کاربید آلومینیوم مشاهده نشد.

۴- نتیجه گیری :

مهمترین نتایج افزودن مقادیر مختلف آنتی اکسیدانهای Al ، Si و SiC بر خواص ترمومکانیکی و مقاومت اکسیداسیون آجرهای آلومینا-منیزیا-کربنی (AMC) پاتیل صنعت فولاد بصورت زیر بود :

الف- افزودن آنتی اکسیدانهای Al و Si نسبت به SiC تاثیر بیشتری بر مقاومت اکسیداسیون دارد.

ب- افزودن آنتی اکسیدانهای Al ، Si و حالت ترکیبی آنها باعث افزایش استحکام فشاری ، استحکام خمشی سرد و گرم و کاهش تخلخل آجرهای AMC می شود. اما تاثیر SiC بر خواص مکانیکی آجر به مراتب کمتر از دو آنتی اکسیدان Al و Si است.
ج- افزودن آنتی اکسیدان Al به مقدار بیشتر از ۳ درصد می تواند منجر به ایجاد ترکهای ناشی از هیدراتاسیون فاز کاربید آلومینیوم شود.
د- افزودن حالت ترکیبی (Al+Si) ضمن افزایش استحکام مکانیکی آجر در دمای بالا ، مقاومت اکسیداسیون را نیز افزایش می دهد. در این حالت احتمال تشکیل فاز کاربید آلومینیوم و ترک ناشی از هیدراتاسیون آن نیز کاهش می یابد.

۵- مراجع :

- [1]- VanesaMuñoza , PilarPenab , AnalíaGladysTombaMartínez , “Physical, chemical and thermal characterization of alumina–magnesia–carbon refractories” , *Ceramics International* 40 (2014) 9133–9149.
[2]- V. Muñoz, A. G. Tomba Martinez , “Thermal evolution of Al₂O₃-MgO-C refractories” , *Procedia Materials Science* 1 (2012) 410 – 417.
[3]- Marcus Emmel ,Christos G.Aneziris a ,Francesco Sponza ,Steffen Dudcziga ,Paolo Colombo , “In situ spinel formation in Al₂O₃–MgO–C filter materials for steel melt filtration” , *Ceramics International* 40 (2014) 13507–13513.
[۴]- نعمتی ، زیارتعلی ؛ " دیرگدازهای سرامیکی " ، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
[۵]- میرهادی ، بهزاد ؛ " مواد دیرگداز " ، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
[6]- M.N.Khezrabadi , J.Javadpour,H.R.Rezaei,R.Naghizadeh , “The effect of additives on the properties and microstructures of Al₂O₃-C refractories” , *J MATER SCI* 41 (2006) 3027– 3032.
[7]- S.K. Sadrnezhad , N. Bagheri , “Effect of Si antioxidant on the rate of oxidation of carbon in MgO–C refractory” , *IJE Transactions B: Applications* , Vol. 24, No. 4, December 2011 357-366.