بررسی اثر هماتیت و اکسید تیتانیوم بر ویسکوزیته پودرهای قالب ریخته گری مداوم فولاد

احمدرضا عارف پور*[۱]، احمد منشی[۲]، محمدرضا فروغی[۱]، حمیدرضا ربیعی[۳] و مرضیه ابراهیمیان[۴]

چکیده

پودرهای قالب به گونه عمده از اکسیدهایی نظیر سیلیسیم، کلسیم، آلومینیوم، سدیم به همراه فلوئور و کربن تشکیل شده‌اند. فلوئور یکی از ترکیبات تشکیل دهنده پودرهای قالب می‌باشد که به منظور کنترل ویسکوزیته و ایجاد روانکاری مطلوب بین پوسته فولادی منجمد شده و قالب در ترکیب شیمیایی پودرهای قالب بکار می‌رود، اما انتشار فلوئور به دلیل ترکیباتی مانند $HF(g)$ مشکلات سلامتی و زیست محیطی را به همراه دارد. هدف از انجام این پژوهش حذف فلوئور از ترکیب شیمیایی یک پودر روان‌ساز سرعت بالاست که در صنعت ریخته‌گری مداوم فولاد بکار می‌رود. هم‌چنین، بررسی اثر ترکیب‌های جایگزین بر ویسکوزیته و تبلور نمونه‌ها از اهداف این پژوهش است. بدین مطالعات آزمون ویسکومتر شیاری و آنالیز تصویری جهت مقایسه ویسکوزیته پودرهای تولیدی با پودر اصلی مذاب و بررسی رفتار بلوری از مطالعات پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز اسپکتروسکوپی انرژی پراکنده استفاده گردید. نتایج مطالعات نشان دادند که کلینکر سیمان پرتلند جایگزینی مناسب برای ولاستونیت در ترکیب پایه پودرهای قالب می‌باشد. هم‌چنین، با استفاده از اکسید تیتانیوم و هماتیت در مقادیر حدود ۳ درصد وزنی (مازاد بر هماتیت موجود در ترکیب شیمیایی کلینکر سیمان پرتلند) نمونه‌ای بدون فلورین تهیه گردید که دارای ویسکوزیته بسیار مشابه با پودر اصلی مذاب بود. با توجه به فازهای تشکیل شده نظیر پروسکایت ($CaTiO_3$) و فایالیت (Fe_2SiO_4) در این نمونه، می‌توان نتیجه گرفت که یک نمونه بدون فلورین است که به لحاظ مشابهت ویسکوزیته و تبلور آن با پودر قالب اصلی می‌تواند جایگزینی مناسب برای پودر قالب اصلی بکار رفته در صنعت ریخته‌گری مداوم فولاد باشد.

واژه‌های کلیدی: پودرقالب ریخته‌گری مداوم، ویسکوزیته، هماتیت، اکسید تیتانیوم.

۱- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه ازاد اسلامی واحد نجف آباد اصفهان،اصفهان، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه ازاد اسلامی واحد نجف آباد اصفهان، اصفهان، ایران.

۳- دانشجوی کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه ازاد اسلامی واحد نجف آباد اصفهان، اصفهان، ایران.

۴- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

* نویسنده مسئول مقاله: arefpour.a@gmail.com

پیشگفتار

پودرهای قالب به گونه عمده از اکسیدهایی نظیر سیلیسیم، کلسیم، آلومینیوم، سدیم به همراه فلوئور و کربن تشکیل شده‌اند. این پودرها که به گونه معمول در ریخته‌گری مداوم تختال‌های فولادی بکار می‌روند، نقشی مهم در پایداری فرآیند و کیفیت سطحی نهایی فرآورده دارند [۳-۱]. از وظایف اصلی پودرهای قالب می‌توان به حفاظت سطح فلز مذاب از اکسیداسیون، عایق بندی حرارتی، روانکاری، جذب آخال‌ها، کنترل انتقال حرارت بین پوسته و قالب از راه پوسته منجمد شده و کاهش شدت نشانه‌های نوسانی اشاره نمود [۸-۴].فلوئور یکی از ترکیب‌های تشکیل دهنده پودرهای قالب است که به منظور کنترل ویسکوزیته و دمای انجماد به‌وجود آمده در لایه سرباره بکار می‌رود که این ویژگی‌ها به گونه مستقیم با روان‌سازی و انتقال حرارت میان پوسته منجمد شده فولاد و دیواره قالب مسی در ارتباطاند [۱۱-۹]. نشر فلوئور از راه ترکیباتی مانند $HF(g)$ مشکلات سلامتی و زیست محیطی را به همراه دارد. افزون بر جنبه‌های ایمنی و سلامت، انتشار مواد سمی از پودرهای حاوی فلوئور در آب‌های سرد کننده و آثار مخرب آن بر محیط زیست، سبب شد تا جایگزین ساختن فلوئور با سایر ترکیب‌های بدون زیان یکی از موضوع های مورد توجه در سال‌های اخیر باشد [۱۵-۱۲]. فلوئور به دلایل تکنیکی ویژه‌ای نظیر کاهش دمای ذوب، ویسکوزیته و ایجاد ذرات بلوری در فیلم سرباره بکار می‌رود. بنابراین، هر گونه جایگزینی فلورین بایستی این اهداف را برآورده کند[۱۸-۱۶]. ترکیب شیمیایی تاثیر زیادی بر ویسکوزیته پودرهای قالب دارد. ترکیبات موجود در پودرهای قالب را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم بندی کرد: دسته نخست، ترکیب‌های شبکه ساز هستند که ساختار شبکه‌ای مذاب را تشکیل می‌دهند. از قبیل: اکسیدهای سیلیسیم و آلومینیوم و دسته دوم ترکیب‌های پیوند شکنی هستند که با شکستن پیوندهای موجود سبب کاهش ویسکوزیته و روان‌سازی سرباره می‌شوند و به طورکلی شامل اکسیدهای سدیم، پتاسیم، لیتیم، کلسیم، منیزیم، منگنز، آهن، بور و ترکیب پیوند شکن فلورین می باشد. اثر برخی از ترکیب‌ها نظیر اکسید تیتانیوم بر ویسکوزیته بسیار پیچیده است؛ برای مثال، افزودن اکسید تیتانیوم تا مقادیر حدود ۶ درصد وزنی به ترکیب شیمیایی پودر قالب به عنوان پیوند شکن و با شکستن پیوندها در ساختار شبکه، به صورت یک شبکه ساز عمل نموده و بدین ترتیب ویسکوزیته را کاهش می‌دهد. بدین ترتیب، افزودن آلومینا و سیلیکا که ترکیب های ویسکوز ساز هستند، ویسکوزیته را افزایش و اکسیدهای سدیم، لیتیم و آهن ویسکوزیته را کاهش می‌دهد [۱۹]. بنابراین، از دسته دوم ترکیب‌های موجود در پودرهای قالب می‌توان به عنوان جایگزینی برای فلوئور در ترکیب پودرهای قالب استفاده نمود. هدف از این پژوهش، تغییر ترکیب شیمیایی یک پودر روان‌ساز (پودر اصلی) سرعت بالاست که در صنعت ریخته گری مداوم فولاد بکار می‌رود. به بیان دیگر، هدف از انجام این پژوهش حذف فلوئور از ترکیب شیمیایی پودر و بررسی اثر ترکیب‌های جایگزین بر ویسکوزیته و تبلور آن‌هاست. بدین منظور، ترکیب‌هایی نظیر هماتیت (Fe_2O_3)، اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید روی (ZnO) و اکسیدسدیم (Na_2O) به عنوان جایگزین فلوئور در پودرهای تولیدی بکار می‌روند. مطالعات آزمون ویسکومتر شیاری و آنالیز تصویری به منظور مقایسه ویسکوزیته پودرهای تولیدی با پودر اصلی مذاب و هم‌چنین، به منظور بررسی رفتار بلوری پودر اصلی و پودرهای تولیدی، آنالیزهای XRD، SEM و EDX بررسی گردید. در نهایت، یک ترکیب بهینه که از نظر ویژگی‌ها مشابه با پودر اصلی بود، معرفی گردید.

مواد و روش‌های پژوهش

پودر روان‌ساز سرعت بالا که در صنعت ریخته‌گری مداوم فولاد استفاده می‌شود، پودر مرجع نامگذاری شده است که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. به منظور تهیه نمونه‌های پودری از مواد کانی نظیر سیلیس (SiO_2)، کربنات سدیم (Na_2CO_3)، اکسید منگنز (MnO)، اکسید منیزیم (MgO)، فلورین (CaF_2)، هماتیت (Fe_2O_3)، اکسیدروی (ZnO)، اکسیدتیتانیوم (TiO_2) و کلینکر سیمان پرتلند که بدون ناخالصی‌های زیانبار سولفاته است، استفاده گردید. ترکیب شیمیایی کلینکر سیمان پرتلند بر اساس جدول ۲

می‌باشد. بر این اساس، ۳ نمونه پودری تهیه گردید که ترکیب شیمیایی نمونه‌ها بر اساس درصد وزنی در جدول ۴ آورده شده است. جهت مخلوط نمودن و همگن‌سازی نمونه‌ها، آن ها را به همراه اتانول (مقدار اتانول هم وزن پودرها بود) به داخل محفظه‌های آسیاب گلوله‌ای (گلوله های فولادی و محفظه فولادی) ریخته و مدت زمان ۵ دقیقه با سرعت Rpm ۶۰۰، پودرها به همراه اتانول در آسیاب گلوله‌ای مخلوط گردید. سپس به منظور تبخیر اتانول و خشک کردن پودرها، نمونه‌ها در داخل خشک کن در دمای ^{o}C ۱۱۰ به مدت ۳ ساعت قرار داده شدند. پس از آن، با استفاده از دستگاه پرس با فشار ۶ تن قرص‌هایی به وزن g ۱ از نمونه‌های خشک شده و پودر مرجع که دارای قطر mm ۱۳ و ارتفاع mm ۲ بود، تهیه گردید. سپس این قرص‌ها بالای یک ویسکومتر شیاری گذاشته شد و ویسکومتر روی یک سطح شیبدار با زاویه ^{o}۴۵ گذاشته و کل مجموعه در داخل کوره‌ای با دمای ^{o}C ۱۱۵۰ قرار داده شد. در این دما نمونه‌ها روی شیارهای ویسکومتر شیاری ذوب گردید و در نهایت، کوره خاموش و مجموعه در داخل کوره خنک گردید. هم‌چنین، در ادامه این پژوهش به منظور بررسی بیش‌تر مقایسه ویسکوزیته نمونه‌های تولیدی با پودر مرجع مذاب از نرم افزار آنالیز تصویری که مساحت نمونه‌های مذاب روی شیارهای ویسکومتر را به صورت تقریبی محاسبه نموده است، استفاده گردید.

نتایج و بحث

در این ۳ نمونه، فلورین به گونه کامل از ترکیب شیمیایی حذف شد. در نمونه l_1 (شکل۱) مقدار هماتیت از ۱/۵۴ درصد وزنی به ۴/۷۸ درصد وزنی افزایش یافته است. از سوی دیگر، مقدار ۳/۱۴ درصد وزنی اکسید تیتانیوم نیز به نمونه l_1 اضافه شده است. با توجه به شکل ۱ نمونه l_1 بدون فلوئور است و ویسکوزیته آن مشابه پودر مرجع مذاب است. ترکیب‌های پیوند شکنی نظیر اکسید سدیم، اکسید تیتانیوم، هماتیت و کربنات سدیم وجود دارند که با پیوند شکنی در شبکه سیلیکاتی باعث کاهش ویسکوزیته پودرهای قالب و روانکاری مطلوب آن‌ها می‌شوند، اما اثر برخی از این ترکیب‌ها نظیر اکسید تیتانیوم، اثری پیچیده است. اکسید تیتانیوم تا مقادیر ۶ درصد وزنی به عنوان پیوند شکن عمل نموده و باعث کاهش ویسکوزیته پودرهای قالب می‌گردد، اما در مقادیر بالاتر از ۶ درصد وزنی به عنوان اصلاح کننده یا شیشه ساز عمل نموده و باعث افزایش ویسکوزیته پودرهای قالب می‌گردد [۱۹]. در نمونه l_1 مقدار اکسید تیتانیوم کمتر از ۶ درصد وزنی است. از سوی دیگر، در این نمونه یک ترکیب پیوند شکن قوی به نام هماتیت وجود دارد که با شکستن اکسیژن‌های پل به غیر پل، باعث پیوند شکنی در شبکه سیلیکاتی و در نتیجه، کاهش ویسکوزیته پودرهای قالب می‌گردد. هماتیت در ترکیب شیمیایی پودر قالب عملکردی نظیر فلورین داشته که می‌تواند منجر به کنترل ویسکوزیته پودر قالب شود. ساز و کار پیوند شکنی هماتیت در شبکه سیلیکاتی در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه l_2 (شکل ۱) حاوی ۳/۳ درصد وزنی اکسید تیتانیوم و ۱/۱ درصد وزنی اکسید روی است. ویسکوزیته این نمونه نسبت به پودر مرجع مذاب به مراتب زیادتر است. در این نمونه اگرچه اکسید تیتانیوم به عنوان نطفه ساز(جوانه زا) در ترکیب شیمیایی پودر قالب عمل نموده، اما یک ترکیب پیوند شکن قوی نظیر فلورین یا هماتیت در این نمونه وجود ندارد که باعث کاهش ویسکوزیته پودر قالب گردد. در نمونه l_3 مقدار اکسید سدیم از ۹/۰۸ درصد وزنی به ۱۰/۰۷ درصد وزنی افزایش یافته است و هم‌چنین، ۳/۳۳ درصد وزنی اکسید تیتانیوم نیز به نمونه افزوده شده است. این نمونه نیز کاملاً ویسکوز شده است و هیچ‌گونه روانکاری ایجاد نکرده است (شکل ۱). با توجه به ترکیب شیمیایی نمونه l_3 مقدار اکسید سدیمی که از راه کربنات سدیم اضافه شده است، کم بوده و می‌بایست مقدار آن افزایش می یافت تا روانکاری مورد نظر بدست آید. اکسید سدیم یک ترکیب روان‌ساز است که می بایست به مقدار لازم در ترکیب شیمیایی پودر قالب افزوده شود تا باعث کنترل ویسکوزیته پودر قالب گردد[۳و۱۴]. جدول ۴ محاسبه تقریبی مساحت‌های نمونه‌های گروه l که با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری محاسبه شده است را نشان می‌دهد. با توجه به اعداد محاسبه شده در جدول ۴، نمونه l_1 با مساحت تقریبی $۴۷۰/۴۰۴mm^2$ قابل مقایسه با مساحت تقریبی پودر مرجع مذاب با مقدار

۴۹۴/۵۳۰ میلی‌متر مربع بوده است. می‌توان نتیجه گرفت که نمونه l_1 ویسکوزیته‌ای مشابه نسبت به پودر مرجع مذاب بدست آورده است. در ادامه، به منظور شناسایی پودر مرجع و مقایسه رفتار بلوری پودر مرجع مذاب و نمونه l_1، از پودر مرجع پراش پرتو ایکس و از نمونه پودر مرجع مذاب پراش پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و از نمونه l_1 ، پراش پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز EDX تهیه و بررسی گردید.

الگوی پراش پرتو ایکس پودر مرجع فازهای ولاستونیت ($CaSiO_3$)، سیلیکا (SiO_2)، فلورین (CaF_2)، کوراندم (Al_2O_3)، سیلیکات منگنز ($MnSiO_3$)، کربنات سدیم (Na_2CO_3)، $CaMg(SiO_3)_2$ و $CaAl_2O_4$ را نشان داد که با توجه به شدت پیک‌ها در پراش پرتو ایکس این پودر، فاز ولاستونیت دارای بیش‌ترین شدت پیک نسبت به سایر فازها بوده است. به بیان دیگر، ولاستونیت ترکیب اصلی (پایه) این پودر را تشکیل داده است. با توجه به وجود فاز ولاستونیت که در الگوی پراش پرتو ایکس پودر مرجع وجود دارد و ترکیب شیمیایی آن $CaSiO_3$ است، می‌توان نتیجه گرفت که از کلینکر سیمان پرتلند که ۸۸٪ ترکیب آن از CaO و SiO_2 تشکیل شده است، به درستی به عنوان ترکیب اصلی نمونه‌ها استفاده شده است. شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس پودر مرجع را نشان می‌دهد. پس از آن، پودر مرجع در دمای 1150^oC ذوب گردید و از آن به عنوان پودر مرجع مذاب جهت مقایسه ویسکوزیته با نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شد.

الگوی پراش پرتو ایکس پودر مرجع مذاب فازهای بلوری نظیر ژلنیت ($Ca_2Al_2SiO_7$)، کاسپیدین ($Ca_4F_2Si_2O_7$)، آکرمانیت ($Ca_2MgSi_2O_7$)، نفلین ($NaAlSiO_4$) و فاز بلوری Mn_3O_4 را نشان داده است. در پودر مرجع ولاستونیت به عنوان اصلی ترین فاز موجود در پودر همراه سایر ترکیب‌ها ذوب گردیده است و در موقع سرد شدن از درون مذاب اولیه فازهایی نظیر ژلنیت، کاسپیدین، آکرمانیت، نفلین و Mn_3O_4 حاصل گردیده است. این فازهای بلوری نظیر ژلنیت و کاسپیدین که در الگوی پراش پرتو ایکس مشاهده گردید، به کنترل ویسکوزیته پودر قالب منجر خواهند شد [۴] . شکل ۳ الگوی پراش پرتو ایکس پودر مرجع مذاب را نشان داده است. تصاویر الکترون‌های ثانویه (SE) میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه پودر مرجع مذاب در شکل ۴ بیانگر مذاب با زمینه گسترده است که نتیجه شیشه‌سازی می‌باشد. در حین انجماد، به خاطر اشباع بودن شیشه از سیلیس، بلورهای متعددی در زمینه شیشه، تشکیل شده است که برای پودر قالب از اهمیتی ویژه برخوردار است زیرا از ویسکوزیته بسیار کم که می‌تواند در دمای ذوب فولاد (1600^oC) برای پودر قالب رخ دهد و فروریزی ناگهانی مذاب بسیار روان‌ساز را در پی داشته باشد، می‌کاهد و ویسکوزیته‌ای بهینه برای ایجاد شرایط مناسب به سرد شدن شمش ارائه می‌دهد [۶] . تصاویر میکروسکوپ الکترونی گویای زاده شدن این بلورهاست. نکته قابل توجه در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه پودر مرجع مذاب این است که تصویر۴(a) در بزرگنمایی ۳۰۰۰ است که وجود بلورها در زمینه شیشه را نشان داده است. تصویر ۴(b) در بزرگنمایی ۹۰۰۰ است که رشد بلورها را در زمینه شیشه نشان می‌دهد که منجر به کنترل ویسکوزیته پودر قالب خواهند شد. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه l_1 (شکل ۵) فازهای بلوری ژلنیت، آکرمانیت، نفلین و Ca_3SiO_5 را به همراه Mn_3O_4 نشان داد. افزون بر این، با افزودن هماتیت و اکسید تیتانیوم به ترکیب شیمیایی نمونه l_1 فازهای بلوری فایالیت و پروسکایت بدست آمده است که هر دو فاز بلوری عملکردی نظیر فاز بلوری کاسپیدین در ترکیب پودر قالب ریخته‌گری مداوم فولاد داشته‌اند که منجر به کنترل ویسکوزیته پودر قالب خواهند شد. با توجه به الگوی پراش نمونه l_1 (شکل ۵) و تشکیل فاز بلوری پروسکایت می‌توان نتیجه گرفت که اگر اکسید تیتانیوم در ترکیب شیمیایی پودر قالب وجود داشته باشد و همراه مذاب در قالب ریخته گری مداوم فولاد اضافه شود، هنگام تشکیل فیلم سرباره باعث جوانه زنی نا همگن شده و باعث تشکیل بلور پروسکایت در زمینه شیشیه خواهد شد. به بیان دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که اکسید تیتانیوم در ترکیب شیمیایی پودر قالب یک ترکیب نطفه ساز یا جوانه زا است. تصاویر الکترون‌های ثانویه میکروسکوپ الکترون

روبشی نمونه l_1 (شکل ۶) وجود بلورهایی الیافی یا رشته‌ای مانند در زمینه شیشه را نشان می‌دهد که بر کنترل ویسکوزیته در این نمونه دخالت مستقیم دارد که البته، ماهیت این الیاف از فازهای ثبت شده در الگوی پراش پرتو ایکس نمونه l_1 مشخص نگردیده است. در این حالت باید چنین تصور کرد که بلور پروسکایت ($CaTiO_3$) به جای یک بلور مکعبی زنجیره‌ای نظیر سیلیکات منیزیم ($MgSiO_3$) است که به چهار وجهی های کناری متصل است، به گونه‌ای که در مجموع (۲×۱/۲)+(۲×۱) سه اکسیژن به یک Ti^{4+}متعلق شود و Ca^{2+} نیز در گوشه قرار گرفته و الکترون دهنده باشد (نظیر آن چه در آزبست یا پنبه نسوز دیده می شود). البته، این موضوع هم اکنون به صورت یک فرضیه است و قطعی شدن آن نیاز به پژوهش‌های بیش‌تری دارد. شکل گیری $CaO.TiO_2$ به صورت چهار وجهی متصل به یک‌دیگر به صورت مقداری از $CaTiO_3$ های موجود مکعبی شکل در ظاهر به صورت یک آلوتروپی نادر ناممکن نیست، ولی قطعی نیز نمی‌باشد. آنالیز EDX نمونه l_1 از بلورهای سفید رنگ (منطقه ۱ شکل ۶ و جدول ۵) حضور حدود ۳/۴۶ درصد وزنی عنصر تیتانیوم و ۶/۴۱ صد وزنی عنصر آهن را گزارش نموده است. به نظر می‌رسد که این موضوع تشکیل بلورهای پروسکایت و فایالیت را در کنار بلورهای دیگری که به فازهای بلوری آن در الگوی پراش پرتو ایکس اشاره گردید، در زمینه شیشه با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده است. به نظر می‌رسد که با تشکیل بلورهایی نظیر فایالیت و پروسکایت در زمینه شیشه، نمونه l_1 می‌تواند نظیر پودر مرجع مذاب کنترل کننده ویسکوزیته پودر قالب باشد و هم‌چنین، نمونه l_1 می‌تواند جایگزینی مناسب برای پودر مرجع بکار رفته در صنعت ریخته گری مداوم فولاد باشد.

نتیجه گیری

- از کلینکر سیمان پرتلند که ترکیبی بسیار مناسب برای پودرهای قالب ریخته گری مداوم فولاد است به جای ولاستونیت دور از دسترس در ترکیب شیمیایی پودر قالب با موفقیت استفاده شد.

- ترکیب‌هایی نظیر اکسید روی و کربنات سدیم اثری متقابل بر ویسکوزیته پودرهای قالب داشته که جهت بدست آمدن ویسکوزیته ای مشابه با پودر مرجع مذاب، از پتانسیل مناسب برخوردارند.

- با توجه به الگوی پراش پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه l_1 ، با تشکیل شدن فازهای بلوری پروسکایت و فایالیت و تشکیل بلورهای آن‌ها در زمینه شیشه می‌توان نتیجه گرفت که این نمونه، یک نمونه بدون فلورین از پودر قالب ریخته گری مداوم فولاد است که باعث کنترل ویسکوزیته پودر قالب خواهد شد.

- با استفاده از اکسید تیتانیوم در مقادیر حدود ۳ درصد وزنی و هماتیت در مقادیر حدود ۳ درصد وزنی (مازاد بر هماتیت موجود در ترکیب شیمیایی کلینکر سیمان پرتلند) نمونه‌ای بدون فلورین ساخته شد که ویسکوزیته و تبلور مشابه با پودر مرجع مذاب ایجاد کرده است. این نمونه، بدون فلوئور است که می‌تواند جایگزین پودر مرجع مورد استفاده در صنعت ریخته گری مداوم فولاد گردد.

Refrences

1- J.Y. Chung, "Improvements & innovations in the continuous casting process at POSCO", Materials Science Forum, Vol. 561, pp. 3-4, 2007.

2- A. Morita, T. Omoto and Y. Iwamoto, "Molding powder for continuous casting of steel and a method for continuous casting of steel", United States Patent, No. US00641402B1, 2002.

3- H. Lidefelt and P. Hasselstrom, "Characterization of the Functional Properties of Mould Powders for Continuous casting of steel", china, 4th International Iron and Steel Congress Proceedings, 1982.

4- M. Nakamoto, Y. Miyabayashi, L. Holappa and T. Tanaka, "A Model for Estimating Viscosities of Aluminosilicate Melts Containing Alkali Oxides", ISIJ International, Vol. 47, No. 10, pp. 1409-1415, 2007.

5- E.T. Turkdogan, "Fundamentals of steelmaking", Cambridge : The University Press, pp. 138-179, 1996.

6- M. Mueller, W. Willenborg, K. Hilpert and L. Singheiser, "Structural dependence of alkali oxide activity in coal ash slage", VII International Conference on molten slage, fluxes and salts, The South African Institute of Minig and Metallurgy, 2004.

7- M. Nakamoto, J. Lee and T. Tanaka, "A Model for Estimation of Molten Silicate Slag", ISIJ International, Vol. 45, No. 5, pp. 651-656, 2005.

8- S. Sridhar, "Estimation Models for Molten Slag and Alloy Viscosities", JOM, pp. 46-48, 2005.

9- R.F. Brooks, A.T. Dinsdale and P.N. Quested, "The measurement of viscosity of alloys –a review of methods, data and models", Meas. Sci. Technol., Vol. 16, pp. 354-362, 2005.

10- Q. Shu and J. Zhang, "Viscosity Estimatin for Slags Containing Clacium Fluoride", Journal of University of Science and Technology Beijing, Vol. 12, p. 221, 2005.

11- P.V.Riboud and M. Larrecq, "Fundamental study of the behavior of casting powders", ISIJ International, Vol. 36, pp. 522-525, 1996.

12- C. Orrling, A.W. Cramb, A. Tilliander and Y. Kashiwaya,"Observations of the melting and solidification behavior of mold slags", Iron and steelmaker, Vol. 27, No. 1, pp. 53-63, 2000 .

13- S. Feldbauer, I. Jimbo, A. Sharan, K. Shimizu, W. king, J. Stepanek, J. Harman and A.W. Cramb, "Physical properties of mold slags that are relevant to clean steel manufacture", Proceedings 78th Steelmaking Conference, Nashville, Iron & Steel Society, pp. 655-667, 1995.

14- K.C.Mills, S. Sridhar, A.S. Normanton and S.T. Mallaband, "Mould flux behavior in continuous casting",japan, The Brimacombe Memorial Symposium, pp. 781-794, 2000.

15- P.V. Riboud, Y. Roux, L.D. Lucas and H. Gaye, "Improvement of Continuous Casting Powders", Fachber. Huttenprax. Metallweiterverarb., Vol. 19, p. 859, 1981.

16- G. Urbain, F. Cambier, M. Deletter and M.R. Anseau, "Viscosity of Silicate Melts", Transaction and Journal of British Ceramics Society, Vol. 80, p. 139, 1981 .

17- E.T. Turkdogan, "Physicochemical Properties of Molten Slags and Glasses", The Metals Society, p. 11, 1983.

18- S. Seetgraman, D. Sichen and F.Z. Ji, "Estimation of Viscosities of Ternary Silicate Melts using the Excess Gibbs Energy of Mixing", Metallurgical and Materials Transaction B, Vol. 31B, p. 105, 2000.

19- L. Zhang and S. Jahanshahi, "Review and Modeling of Viscosity of Silicate Melts: Part I. Viscosity of Binary and Ternary Silicates Containing CaO, MgO and MnO", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 29B, issue.1, p. 177, 1998.

پیوست‌ها

۱- ترکیب شیمیایی پودر مرجع بر حسب درصد وزنی.

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی
LOI	۱۵-۱۸
C(total)	۷-۹
C(free)	۴/۵-۶/۵
SiO_2	۲۸-۲۹/۵
Fe_2O_3	۱-۲/۵
Al_2O_3	۳-۵
CaO	۲۶-۲۸
MgO	۵-۶
Na_2O+K_2O	۶-۸
F^-	۳-۴
MnO	۴-۶
S	۰/۳ >
$H_2O(120^oC)$	۰/۸ >

جدول ۲ - ترکیب شیمیایی کلینکر سیمان پرتلند تیپ I مورد استفاده بر حسب درصد وزنی.

SO_3	K_2O	Na_2O	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	CaO
۰/۰۱	۰/۷۳	۰/۲۸	۱/۸۹	۳/۱۴	۵/۴۱	۲۱/۷۸	۶۴/۳۲

جدول ۳ - ترکیب شیمیایی نمونه‌های آماده شده بر حسب درصد وزنی.

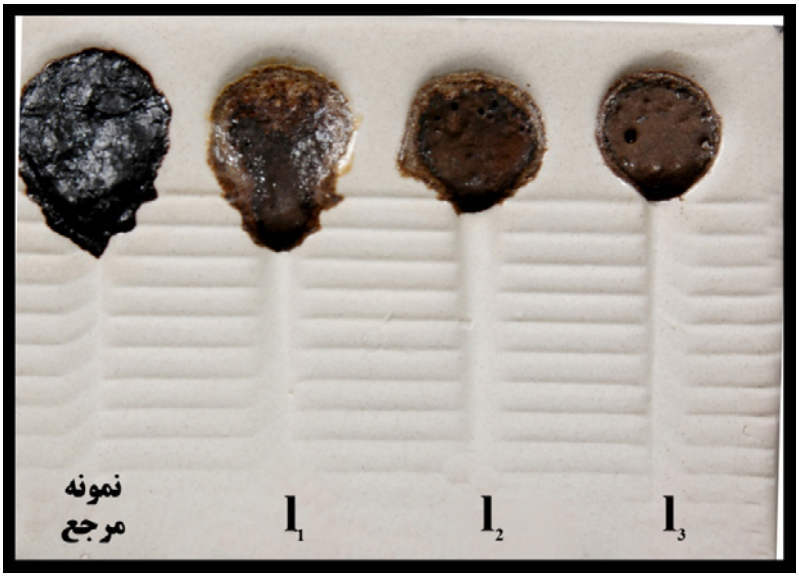
نام نمونه	*CaO* (اکسید کلسیم)	*SiO_2* (اکسید سیلیسیم)	*Al_2O_3* (اکسید آلومینیوم)	*Fe_2O_3* (هماتیت)	*MnO* (اکسید منگنز)	*MgO* (اکسید منیزیم)	*Na_2O* (اکسید سدیم)	K_2O *(اکسید پتاسیم)*	*F^-* (فلوئور)	*TiO_2* (اکسید تیتانیوم)	*ZnO* (اکسید روی)	*B_2O_3* (اکسید بور)	*Li_2O* (اکسید لیتیم)	*C* (کربن)	گوگرد *S*
l_1	۳۱/۷	۳۳/۷	۲/۶۷	۴/۷۸	۶/۴۲	۶/۰۲	۹/۳۲	۰/۳۶		۳/۲۴				۱/۷۷	۰/۰۰۴
l_2	۳۲/۴	۳۴/۵	۲/۷۲	۱/۶	۶/۵۶	۶/۱۶	۹/۵۲	۰/۳۶		۳/۳۰	۱/۱			۱/۸۱	۰/۰۰۴
l_3	۳۲/۵۵	۳۴/۶۲	۲/۷۴	۱/۶	۶/۶	۶/۲	۱۰/۰۷	۰/۳۶		۳/۳۳				۱/۹۵	۰/۰۰۴

جدول ۴- نتایج بدست آمده از مساحت تقریبی محاسبه شده نمونه ها با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری

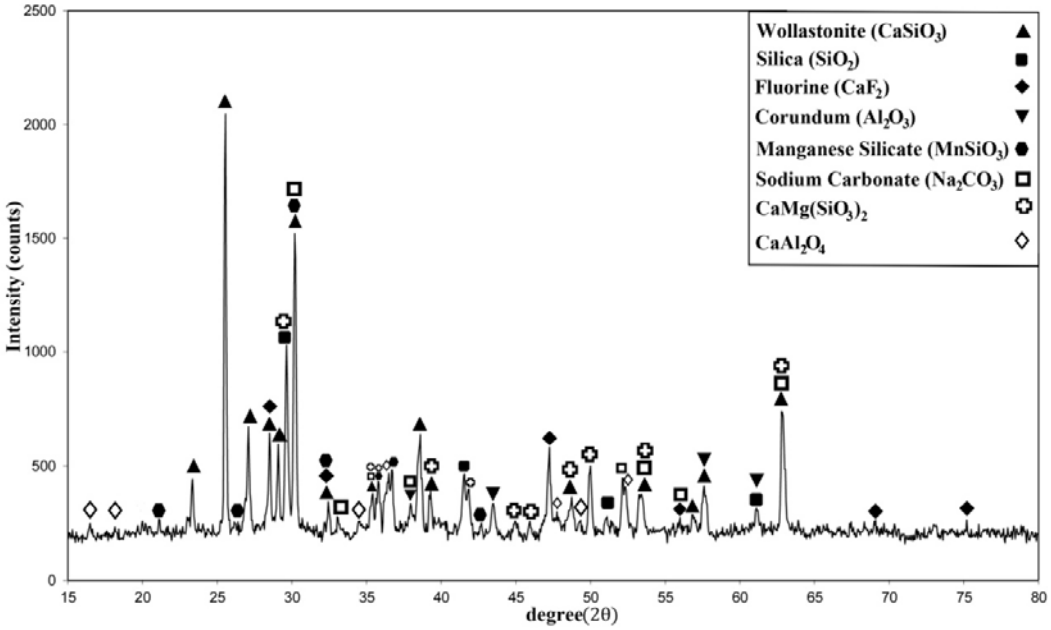
پودر مرجع مذاب	l_1	l_2	l_3
۴۷۰/۴۰۴	۴۹۴/۵۳۰	۴۰۰/۰۰۶	۳۹۴/۱۲۷

جدول ۵- نتایج آنالیز **EDX** از منطقه ۱ نمونه l_1.

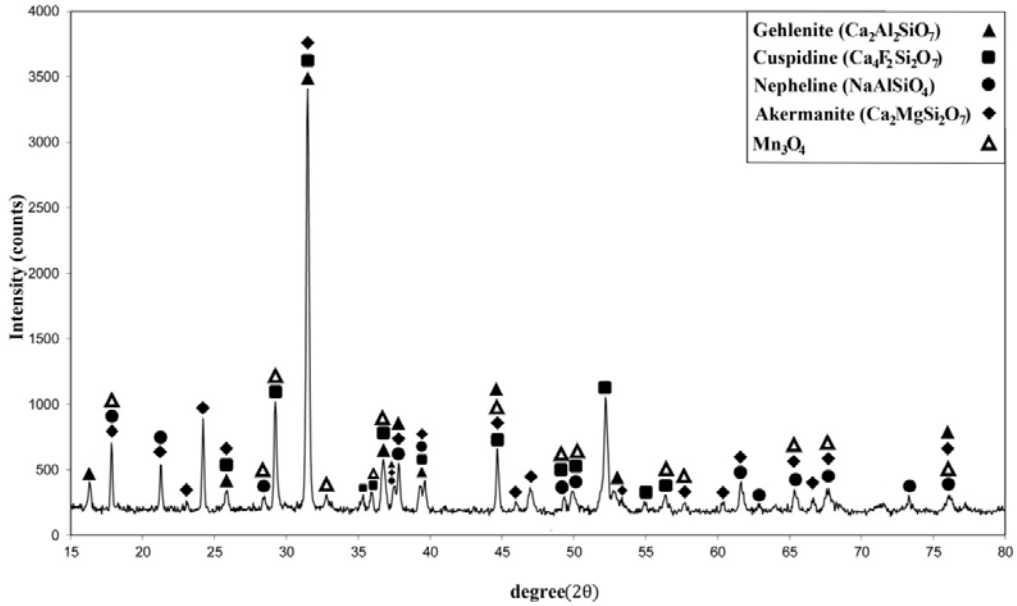
Element	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]
Carbon	K series	0.00	0.00	0.01
Oxygen	K series	10.49	12.39	22.24
Sodium	K series	8.26	9.76	12.19
Magnesium	K series	3.41	4.03	4.76
Aluminum	K series	2.81	3.32	3.54
Silicon	K series	22.57	26.66	27.27
Potassium	K series	1.02	1.21	0.89
Calcium	K series	25.96	30.65	21.98
Titanium	K series	3.06	3.61	2.17
Manganese	K series	1.42	1.68	0.88
Iron	K series	5.66	6.69	3.44
		Total: 100 %		



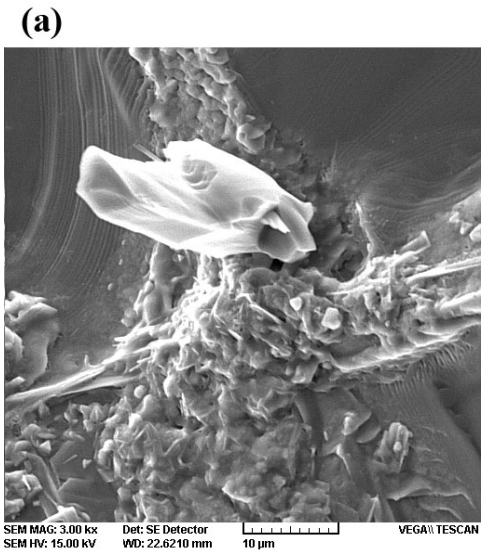
شکل ۱- نتایج تست ویسکومتر شیاری نمونه‌های گروه **l**.



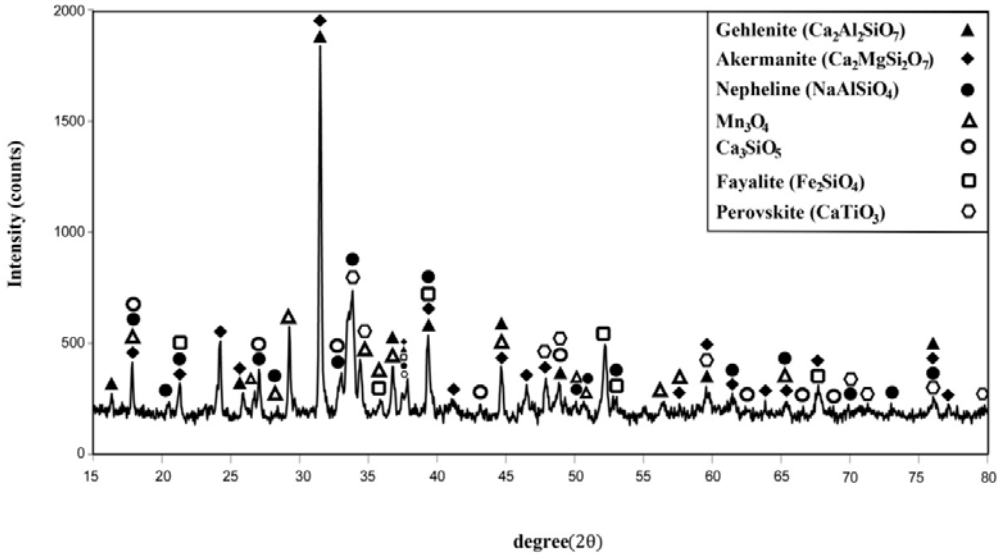
شکل ۲- الگوی پراش پرتوایکس پودر مرجع.



شکل ۳- الگوی پراش پرتو ایکس نمونه مرجع (پودر مرجع مذاب).



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر مرجع مذاب.



شکل ۵ – الگوی پراش پرتو ایکس نمونه l_1.

شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه l_1 (کریستال‌های سفید).