

اثر افزودن آلومینا به عنوان رقیق کننده بر سنتز احتراقی کامپوزیت $Al_2O_3-ZrB_2$

دینا پزشکی^۱، محمد رجبی^{۱*}، سید محمود ربیعی^۱ و غلامرضا خیاطی^۲

۱- گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۳/۲۰ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۱۰/۰۷)

چکیده - در این پژوهش، اثر افزودن آلومینا به عنوان رقیق کننده بر سنتز احتراقی خود انتشار دما بالای فعال شده مکانیکی کامپوزیت آلومینا-دی بوراید زیر کونیم بررسی شد. بدین منظور، مخلوط ترمیت شامل آلومینیوم، اکسید زیر کونیم، اسید بوریک و مقادیر متفاوت اکسید آلومینیوم (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی) به عنوان ماده اولیه استفاده و برای ۵ ساعت فعال سازی مکانیکی شد، سپس تفجوشی در کوره در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش اکسید آلومینیوم تا ۶ درصد وزنی، شدت قله گرماگیر در منحنی های تحلیل گرماسنجی افتراقی افزایش، اما با افزودن مقادیر بیش تر، شدت قله کاهش می یابد. در این حالت، توزیع یکنواخت تر ذرات دی بوراید زیر کونیم با اندازه دانه ظریف تر مشاهده شد.

واژگان کلیدی: آسیاب مکانیکی، رقیق کننده، سنتز احتراقی، کامپوزیت زمینه آلومینا

Effect of Al_2O_3 Addition as Diluent on Combustion Synthesis of $Al_2O_3-ZrB_2$ Composite

D. Pezeshki¹, M. Rajabi^{1*}, S.M. Rabiee¹ and G. Khayati²

1- Material Science and Engineering Group, Faculty of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Faculty of Materials Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Abstract: In this study, the effect of Al_2O_3 addition as a diluent during mechanically activated self-propagating high temperature synthesis (MASHS) of $Al_2O_3-ZrB_2$ composite was investigated. For this purpose, the thermite mixture of Al, ZrO_2 ,

* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: m.rajabi@nit.ac.ir

H₃BO₃ and different amounts of Al₂O₃ (0, 3, 6, 9 wt.%) were used as the raw materials and mechanically activated for 5 h, then furnace sintering was performed at 650 °C. The results showed that by increasing the Al₂O₃ content up to 6 wt.%, the intensity of exothermic peak in the DSC curves increases, but for higher additive contents it decreases. In this case, more homogenous distribution of ZrB₂ particles with finer grain size was observed.

Keywords: Al₂O₃-based composite, Combustion synthesis, Diluent, Mecanical milling

۱- مقدمه

دانه است [۶، ۷].

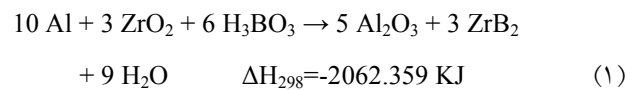
افزودن ماده افزودنی از جنس محصول به مواد اولیه یکی از پارامترهای موثر در سنتز احتراقی است [۷]. گزارش شده است ماده افزودنی که از جنس محصول باشد دمای آدیباتیک را کاهش می‌دهد و منجر به کاهش سرعت انجام واکنش و در نتیجه کنترل فرایند می‌شود [۸]. علاوه بر این، افزودن آلومینا می‌تواند منجر به کاهش دمای تفجوشی و در نتیجه افزایش قابلیت تفجوشی شود [۹]. میسرا و همکارانش [۳] با افزودن ۵ درصد وزنی آلومینا به مواد اولیه و تولید کامپوزیت Al₂O₃-ZrB₂ به روش SHS، نشان دادند که اندازه ذره فاز تقویت کننده (ZrB₂) با افزودن آلومینا کاهش می‌یابد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون اثر مقادیر متفاوت افزودنی بر سنتز کامپوزیت Al₂O₃-ZrB₂ به روش MASHS بررسی نشده است. در این پژوهش، با افزودن مقادیر متفاوت آلومینا (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی) به مواد اولیه (شامل آلومینیوم، اکسید زیرکونیم و اسید بوریک) و سنتز کامپوزیت Al₂O₃-ZrB₂ به روش MASHS، اثر افزودنی بر گرمای تشکیل و تکمیل واکنش و ویژگی محصول بررسی شده است.

۲- روش آزمایش

در این پژوهش از پودر آلومینیوم (۹۹/۵٪، میانگین اندازه ذرات ۵ میکرومتر) به‌عنوان عامل احیا کننده و اسید بوریک (۹۹٪، میانگین اندازه ذرات ۱۰۰ میکرومتر) و اکسید زیرکونیم (۹۸/۵٪، اندازه ذرات کم‌تر از ۴ میکرومتر) به‌عنوان واکنش‌گرهای ترمیت و پودر α-آلومینا (۹۹/۹٪، میانگین اندازه ذرات ۴ میکرومتر) به‌عنوان افزودنی استفاده شد. مقدار ماده افزودنی به ترتیب ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی انتخاب شد. توزین مواد اولیه طبق نسبت استوکیومتری مطابق با واکنش (۱)

کاربرد آلومینا به‌عنوان یک ماده سرامیکی به‌دلیل خواصی مثل چقرمگی شکست پایین، استحکام پایین، مقاومت به ضربه و شوک گرمایی ضعیف با محدودیت‌هایی مواجه است. یکی از روش‌های موثر در بهبود خواص سرامیک‌ها، افزودن ذرات تقویت کننده و ساخت کامپوزیت است [۱]. دی بوراید زیرکونیم یک ماده سرامیکی است که از مهمترین ویژگی‌های آن می‌توان به نقطه ذوب بالا (۳۲۴۶ درجه سانتی‌گراد)، سختی و هدایت الکتریکی مناسب و هم‌چنین مقاومت شیمیایی عالی در برابر اسیدهایی مثل اسیدکلریدریک اشاره کرد [۲]. افزودن ذرات دی بوراید زیرکونیم به‌عنوان فاز تقویت کننده به کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی، منجر به بهبود خواصی مثل استحکام، سختی، چقرمگی شکست و مقاومت به ضربه می‌شود. تاکنون روش‌های بی‌شماری برای ساخت این کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که از میان آن‌ها، روش سنتز احتراقی خود انتشار دما بالا (SHS)^۱ در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۳، ۴]. از مهمترین مزایای این روش، سرعت بالای واکنش، هزینه پایین، دمای کم کاری و خلوص بالای محصول است [۵]. با این وجود، به‌دلیل گرادیان دمایی و سرعت بالای واکنش، ایجاد ترکیبات غیرهمگن در این روش گزارش شده است. به‌منظور بهبود فرایند سنتز احتراقی، استفاده از فعال‌سازی مکانیکی مورد توجه قرار گرفته است و بر این اساس روش سنتز احتراقی خود انتشار دما بالای فعال شده مکانیکی (MASHS)^۲ ارائه شده است. از آثار محسوس فعال‌سازی مکانیکی بر فرایند سنتز می‌توان به افزایش شدت واکنش‌های سنتز، تغییر قابل ملاحظه در دمای شروع واکنش‌ها و هم‌چنین سنتز حالت جامد محصولات اشاره کرد که نتیجه آن افزایش تعداد مکان‌های جوانه‌زنی مؤثر و محدودیت در رشد

انجام گرفت.



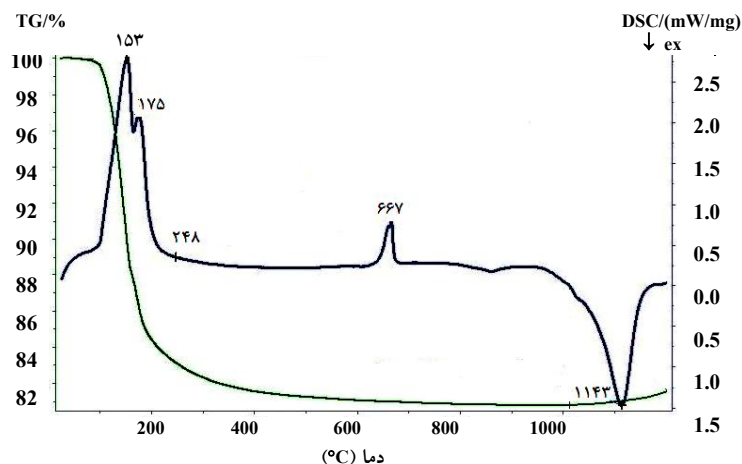
عملیات اختلاط و فعال‌سازی مکانیکی در آسیاب سیاره‌ای پرانرژی (Retsch, PM 100, Germany) با استفاده از گلوله‌های فولادی با قطرهای ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر، با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰ به ۱ در سرعت چرخش ۴۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ ساعت انجام شد. برای جلوگیری از آلودگی اتمسفری پودر، از گاز محافظ آرگون استفاده شد و کلیه مراحل توزین و نمونه برداری در محفظه خلا^۳ انجام شد. به منظور بررسی رفتار گرمایی مخلوط پودری، تحلیل گرماسنجی افتراقی روبشی (NETZSCH STA409PC/PG)، در اتمسفر آرگون و با نرخ گرمایش ۳۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در ادامه، مخلوط پودری در یک قالب فولادی به قطر ۱۵ میلی‌متر تا ۶۵٪ چگالی نظری متراکم شد و نمونه‌های حاصل در یک کوره الکتریکی تا دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمایش ۳۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و تحت اتمسفر محافظ آرگون گرما داده شدند. زمان ماندگاری در دمای بیشینه ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. مشخصه یابی ساختاری و فازی نمونه‌های سنتز شده توسط تحلیل پراش پرتو ایکس (Philips X'PERT MPD) با تابش Cu(K α) و با گام زاویه‌ای ۰/۰۱ درجه انجام شد. اندازه دانه دی بوراید زیرکونیم به روش دبای-شرر و بر اساس نتایج پراش پرتو ایکس محاسبه شد. ریخت (مورفولوژی) و توزیع ذرات تقویت کننده حاصل از سنتز به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA همراه با تحلیل EDX^۵ مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

۳- نتایج

در شکل ۱، نتایج حاصل از تحلیل گرماسنجی افتراقی روبشی مواد اولیه بدون افزودنی و پیش از فعال‌سازی مکانیکی نشان

داده شده است. اولین قله گرمازا در این نمونه در دمای ۱۱۴۳ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل گرماسنجی افتراقی روبشی ترکیبات مختلف پودری پس از فعال‌سازی مکانیکی در شکل ۲ نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌ها، یک قله گرماگیر در گستره دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که می‌تواند به تجزیه اسید بوریک مربوط باشد [۱۰]. مشاهده یک قله گرمازا در منحنی مربوط به تحلیل هر یک از نمونه‌ها نشان دهنده انجام سنتز احتراقی و تشکیل محصول است. مقادیر گرمای واکنش که از سطح زیر منحنی تحلیل گرمایی به دست می‌آید در جدول ۱ آورده شده است. گرمایی سیستم معیاری برای بررسی پیشرفت واکنش است و در شدت‌های بالاتر، سرعت انتشار منطقه احتراق افزایش می‌یابد و واکنش دهنده بیش‌تری به محصول تبدیل می‌شود. همچنین اختلاف دمای شروع و پایان قله (ΔT) به عنوان معیاری از سرعت انجام واکنش در نظر گرفته می‌شود و هر چه این اختلاف دما، کم‌تر باشد، سرعت واکنش بیش‌تر است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۱، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان آلومینا تا ۶ درصد وزنی، درصد محصول افزایش و با افزایش بیش‌تر افزودنی تا ۹ درصد، میزان محصول کاهش یافته است. گفتنی است که در منحنی تحلیل گرماسنجی افتراقی هیچ‌یک از نمونه‌های مورد بررسی، قله گرماگیر مربوط به ذوب اکسید بور (۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) دیده نمی‌شود. اگرچه مقداری از اکسید بور در حین آسیاب‌کاری با آلومینیوم واکنش و ترکیبات میانی تشکیل داده است اما به نظر می‌رسد دلیل این مسئله پایین بودن درصد بلوری بودن اکسید بور باشد که منجر به عدم مشاهده قله هنگام ذوب آن شده است [۱۰-۱۲].

در شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مخلوط‌های پودری فعال‌سازی مکانیکی شده بدون افزودنی و حاوی ۶ درصد وزنی آلومینا نشان داده شده است. با مقایسه اندازه ذرات، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن آلومینا بر شرایط



شکل ۱- تحلیل گرمایی افتراقی مواد اولیه سیستم $\text{Al-ZrO}_2\text{-H}_3\text{BO}_3$ قبل از فعال سازی مکانیکی

جدول ۱- گرمای تشکیل واکنش در ترکیبات پودری مختلف

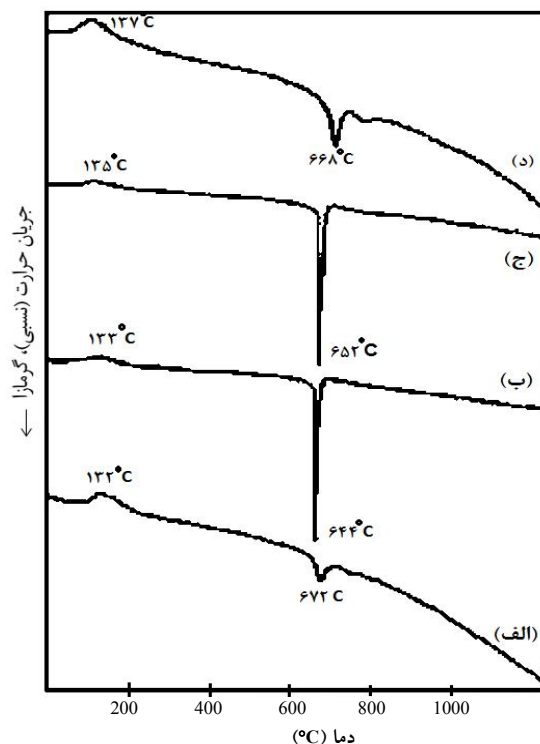
درصد افزودنی	۰	۳	۶	۹
ΔH (J/gr)	-۲۹۶	-۱۱۴۰	-۱۲۵۴	-۲۸۹
ΔT^* (°C)	۸۰	۵۰	۴۸	۶۰

* ΔT به صورت اختلاف دمای شروع و پایان قله تعریف می شود.

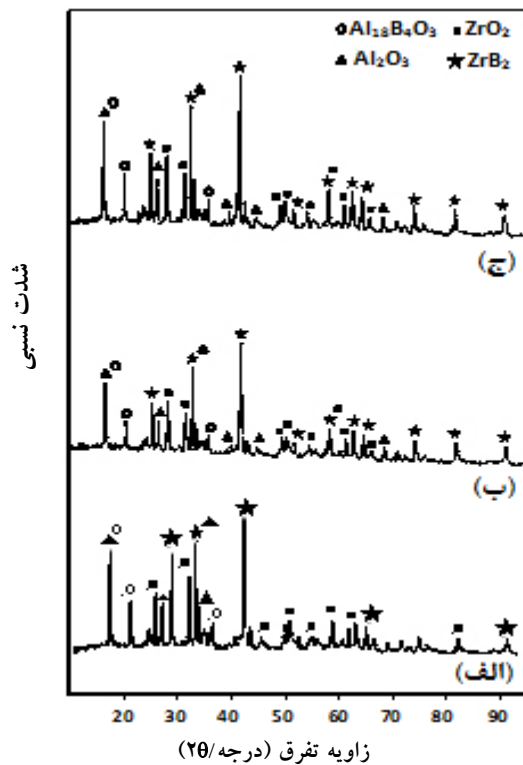
آسیاب تاثیر گذاشته، منجر به کاهش اندازه ذرات و توزیع همگن تر آن ها شده است.

به منظور بررسی تشکیل احتمالی محصول قبل از سنتز، تحلیل پراش پرتو X بر روی مخلوط پودری پس از فعال سازی مکانیکی انجام شد که نتایج آن در شکل ۴ آورده شده است. در این نمودار قله های مربوط به مواد اولیه (آلومینیوم (00-004-0787)، اکسید زیرکونیم (00-013-0307) و هم چنین ترکیبات آلومینیوم بورات (00-012-0639, 00-022-0002, AIB_{10} و AIB_2) دیده می شود. عدم مشاهده قله های مربوط به آلومینا و دی بوراید زیرکونیم نشان می دهد که در حین فعال سازی مکانیکی، محصول تشکیل نشده است.

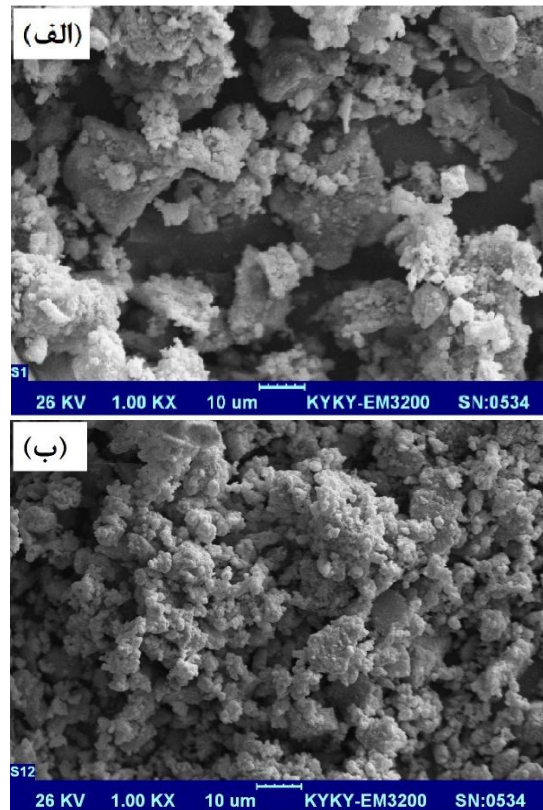
با توجه به قله گرمزای مشاهده شده در نتایج تحلیل گرماسنجی افتراقی روبشی، دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد برای سنتز نمونه ها در کوره انتخاب شد و نمونه بدون افزودنی و نمونه های حاوی ۳ و ۶ درصد وزنی آلومینا سنتز شدند. در شکل ۵ الگوهای پراش پرتو ایکس مخلوط های پودری پس از



شکل ۲- تحلیل گرماسنجی افتراقی روبشی ترکیبات مختلف پودری آسیاب شده: (الف) نمونه بدون افزودنی و نمونه های حاوی (ب) ۳، (ج) ۶ و (د) ۹ درصد وزنی آلومینا



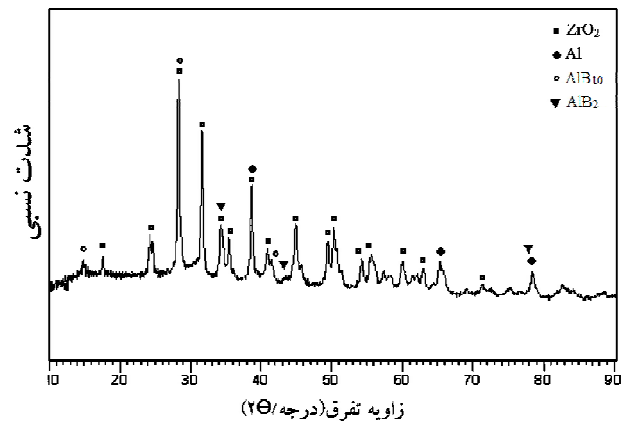
شکل ۵- نتایج پراش پرتو X مربوط به مخلوط‌های پودری سنتز شده در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد: الف) نمونه بدون افزودنی، ب) نمونه حاوی ۳ درصد افزودنی و ج) نمونه حاوی ۶ درصد افزودنی



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی از مخلوط‌های پودری آسیاب شده: الف) نمونه بدون افزودنی و ب) نمونه حاوی ۶ درصد وزنی آلومینا

وجود دارد و شدت قله ZrB_2 در نمونه‌های حاوی آلومینا، نسبت به نمونه بدون افزودنی افزایش یافته است که این امر نشان‌دهنده پیشرفت واکنش در حضور افزودنی است. همچنین قله‌های مربوط به ZrO_2 و ترکیبات میانی Al-B-O نیز در نتایج پراش قابل مشاهده است. مقایسه شدت قله‌های مربوط به ZrO_2 در مخلوط‌های پودری متفاوت نشان می‌دهد که افزودن آلومینا منجر به کاهش شدت قله‌های ZrO_2 شده است. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که افزودن آلومینا، منجر به پیشرفت بیش‌تر واکنش می‌شود. گفتنی است که علت مشاهده ZrO_2 در محصول، پایداری بالای این اکسید در ضمن احیا است و حضور این ماده در محصول نهایی توسط پژوهشگران دیگر [۱۱، ۱۲] نیز گزارش شده است.

در جدول ۲ مقادیر اندازه دانه دی بوراید زیرکونیم که



شکل ۴- الگوی پراش پرتو X مخلوط پودری بدون افزودنی بعد از فعال سازی مکانیکی

سنتز نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر سه مخلوط پودری سنتز شده، قله‌های مربوط به Al_2O_3 (00-012-0539) و ZrB_2 (00-006-0610)

جدول ۲- اندازه دانه ZrB_2 پس از سنتز بر حسب مقدار آلومینا

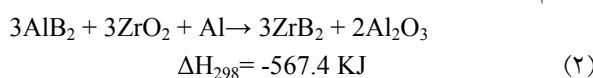
درصد افزودنی	۰	۳	۶
ZrB_2 (nm)	۵۳	۵۰	۴۴/۸

به روش دبای- شرر محاسبه شده، آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش مقدار آلومینا تا ۶ درصد وزنی، اندازه دانه دی بوراید زیرکونیم از ۵۳ به ۴۴/۸ نانومتر کاهش یافته است.

در شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ترکیبات پودری پس از سنتز در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد نشان داده شده است. توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه و کاهش اندازه آن ها در نمونه های حاوی افزودنی در مقایسه با نمونه بدون افزودنی، اثر افزودن آلومینا بر تولید کامپوزیت را نشان می دهد. تحلیل EDX از زمینه و فاز تقویت کننده (شکل ۶- الف) در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به نتایج تحلیل، می توان نتیجه گرفت که ذرات تقویت کننده ZrB_2 در زمینه Al_2O_3 توزیع شده اند. هم چنین عدم حضور قله مربوط به عنصر آهن در این تحلیل، نشان می دهد که آسیاب کاری به مدت ۵ ساعت سبب ورود ناخالصی آهن به مواد اولیه نشده است.

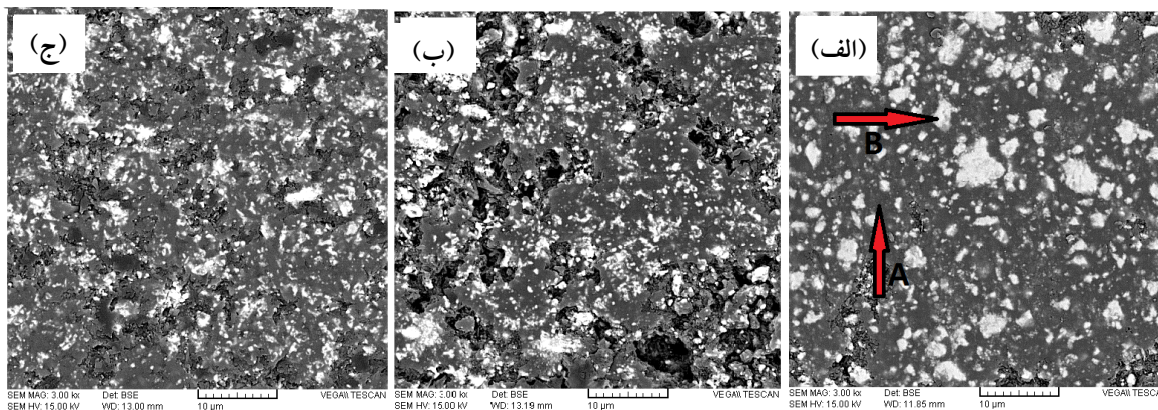
۴- بحث

مکانیسم سنتز در نمونه بدون افزودنی، مشابه مکانیسمی است که قبلاً توسط سایر پژوهشگران هم گزارش شده است [۱۰، ۱۱]. در شروع گرمایش، ابتدا اسید بوریک تجزیه می شود. سپس در دمایی کم تر از نقطه ذوب آلومینیوم، ترکیبات میانی از آلومینیوم و بور تشکیل می شود [۱۰]. این ترکیبات در دمای حدود ۶۵۰ درجه سانتی گراد طبق واکنش (۲)، منجر به احیای اکسید زیرکونیم می شوند که در نهایت با واکنش زیرکونیم و بور، ZrB_2 تشکیل می شود.

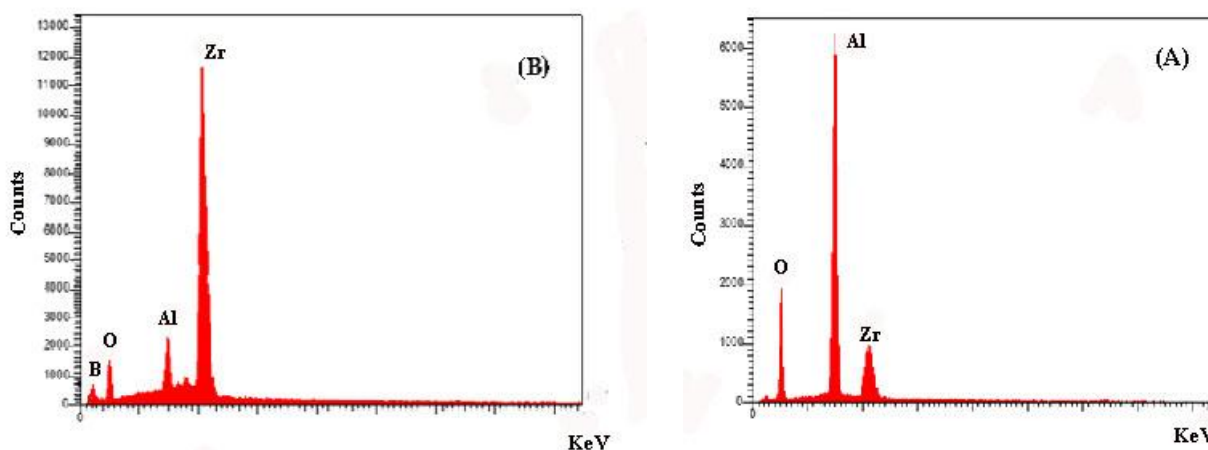


در حضور افزودنی، مکانیسم سنتز پیچیده است زیرا افزودنی، به طور هم زمان بر شرایط مختلف فرایند سنتز احتراقی تأثیرگذار است. آلومینا به دلیل ماهیت تردی که دارد، بر شرایط آسیاب نیز تأثیر گذار است و باعث افزایش فعال سازی پودرها می شود. در این حالت، در اثر برخورد آلومینا با ذرات آلومینیوم، چگالی عیوب کریستالی از جمله نابجایی ها در سطح مشترک ذرات افزایش می یابد و بنابراین با ایجاد کار سختی، شکست ذرات در حین آسیاب آسان می شود. از طرف دیگر، آلومینا در برخورد با ذرات ترد (مانند ZrO_2 و اسید بوریک)، با ایجاد ریز حفره ها، منجر به جوانه زایی ترک و سهولت شکست این ذرات می شود. به عبارت دیگر، افزودن آلومینا منجر به ریزش ذرات پودر و در نتیجه افزایش سطح مواد اولیه می شود که این مساله در بهبود شرایط سینتیکی سنتز موثر است. از آنجایی که واکنش های ترمیت به سطح تماس ذرات وابسته اند، انتظار می رود کاهش اندازه ذرات و در نتیجه افزایش سطح، دمای انجام واکنش را کاهش دهد که طبق نتایج تحلیل گرمایی (شکل ۲)، دمای سنتز در نمونه های حاوی ۳ و ۶ درصد آلومینا در مقایسه با نمونه بدون آلومینا، کاهش یافته است. بنابراین، انتظار می رود با کاهش دمای سنتز، رشد دانه ها و اندازه دانه محصول نهایی نیز کاهش یابد.

نتایج تحلیل گرمایی هم چنین نشان می دهد که با افزایش میزان آلومینا به عنوان ماده افزودنی تا ۶ درصد وزنی، گرمای تشکیل واکنش افزایش می یابد اما افزایش بیش تر آلومینا تا ۹٪، گرمای تشکیل واکنش را کاهش می دهد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که افزودن بیش از اندازه یک ماده افزودنی به عنوان رقیق کننده، مطلوب نیست. در پدیده شناسی این مساله، دو مکانیسم پیشنهاد شده است. در مکانیزم اول، چنانچه افزودنی خنثی باشد، ظرفیت گرمایی را بدون این که سهمی در گرمای واکنش داشته باشد، افزایش می دهد. بنابراین دمای آدیاباتیک را به زیر مقدار مورد نیاز برای واکنش سنتز احتراقی کاهش می دهد و در نتیجه میل احتراقی سیستم کاهش می یابد. مکانیسم دوم به این صورت بیان می شود که افزودنی بین ذرات



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های سنتز شده در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد حاوی مقادیر متفاوت افزودنی: الف) بدون افزودنی، ب) ۳ درصد و ج) ۶ درصد



شکل ۷- تحلیل EDX از فازهای مشاهده شده در شکل ۴-الف که با A (زمینه) و B (فاز تقویت کننده) مشخص شده‌اند

آلومینیوم-اکسید آهن، دمای احتراق را کاهش می‌دهد و با توجه به شرایط آسیاب مکانیکی، شروع احتراق را متوقف می‌نماید [۷].

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر افزودن مقادیر متفاوت آلومینا بر سنتز احتراقی کامپوزیت آلومینا-دی بوراید زیرکونیم با استفاده از ترکیب پودری اولیه آلومینیوم، اکسید زیرکونیم و اسید بوریک بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد افزودن آلومینا اندازه ذرات را در حین آسیاب مکانیکی کاهش می‌دهد، بنابراین

واکنش کننده قرار می‌گیرد؛ بنابراین سطح تماس کاهش یافته، در نهایت سرعت انجام واکنش کاهش می‌یابد [۷]. گفتنی است که افزودنی، شرایط سنتز را با مکانیسم‌های دیگری هم تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عنوان نمونه، افزودنی بر خواص مکانیکی پودر اثر می‌گذارد و در حین آسیاب مکانیکی، در نحوه تغییر اندازه ذرات پودر مؤثر است. البته بررسی تک تک این عوامل به‌طور جداگانه دشوار است [۱۳، ۱۴]. نتایج مشابهی در مورد اثر افزودن بیش از اندازه ماده افزودنی در سیستم‌های دیگر نیز گزارش شده است. به عنوان نمونه، نشان داده شده است که افزودن ۲۵ درصد وزنی آلومینا به ترکیب استوکیومتری

حاوی ۶ درصد کاهش می‌یابد. لذا در این ترکیب میل احتراقی سیستم کاهش می‌یابد و واکنش بطور کامل انجام نمی‌شود.

گرمای تشکیل افزایش می‌یابد که نتیجه آن افزایش مقدار ZrB_2 تشکیل شده و کاهش اندازه دانه آن است. در ترکیب پودری حاوی ۹ درصد وزنی آلومینا، گرمای تشکیل نسبت به نمونه

واژه‌نامه

1. self-propagating high-temperature synthesis
2. mechanically activated self-propagating high-temperature synthesis

3. glove box
4. scanning electron microscopy
5. energy-dispersive X-ray spectroscopy

مراجع

۱. کلانتر، م.، سرامیک‌های سازه‌ای دما بالا، چاپ اول، انتشارات دانشگاه یزد، ۱۳۸۷.
2. Upadhyaya, K., Yang, J.M. and Hoffman, W.P., "Advanced Materials for Ultrahigh Temperature Structural Application Above 2000 °C", *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 76, pp. 51-56, 1997.
3. Mishra, S.K., Das, S.K. and Sherbacov, V., "Fabrication of $Al_2O_3-ZrB_2$ In Situ Composite by SHS Dynamic Compaction: A Novel Approach", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 2447-2453, 2007.
4. Patil, K.C., Aruna, S.T. and Mimani, T., "Combustion Synthesis: An Update", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 6, pp. 507-512, 2002.
5. Aruna, S.T. and Mukasyan, A.S., "Combustion Synthesis and Nanomaterials", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 12, pp. 44-50, 2008.
6. Mossino, P., "Some Aspects in Self-Propagating High-Temperature Synthesis", *Ceramics International*, Vol. 30, pp. 311-332, 2004.
7. Takacs, L., "Self-sustaining Reactions Induced by Ball Milling" *Progress in Materials Science*, Vol. 47, pp. 355-414, 2002.
8. Atong, D. and Clark, D.E., "Ignition Behavior and Characteristics of Microwave-Combustion Synthesized Al_2O_3-TiC Powders", *Ceramics International*, Vol. 30, pp. 1909-1912, 2004.

9. Guoxi, L., Dongming, Y. and Jinyong, Z., "Microstructure and Mechanical Properties of $TiB_2-Al_2O_3$ Composites", *Journal of Wuhan University of Technology- Materials Science Ed.*, Vol. 26, pp. 696-699, 2011.
10. Taherzadeh Mousavian, R., Sharafi, S. and Shariat, M.H., "Microwave-Assisted Combustion Synthesis in a Mechanically Activated $Al-TiO_2-H_3BO_3$ System", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 29, pp. 281-288, 2011.
11. Khanra, A.K., "Reaction Chemistry during Self-Propagating High-Temperature Synthesis (SHS) of $H_3BO_3-ZrO_2-Mg$ system", *Materials Research Bulletin*, Vol. 42, pp. 2224-2229, 2007.
12. Deris, L., Sharafi, S. and Akbari, G.H., "Effect of Milling Speed on Mechanical Activation of $Al/ZrO_2/H_3BO_3$ System to Prepare $Al_2O_3-ZrB_2$ Composite Powder", *Journal of Thermal Analysis Calorimetry*, Vol. 115, pp. 401-407, 2014.
13. Mishra, S.K., Rura, P.K.P., Das, S.K. and Shcherbakov, V., "Effect of Alumina Diluent on the Fabrication of In-Situ Al_2O_3-Ti/ZrB_2 Composite by Self Propagating High Temperature Synthesis Dynamic Compaction", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 37B, pp. 641-647, 2006.
14. Deqing, W., "Effects of Additives on Combustion Synthesis of $Al_2O_3-TiB_2$ Ceramic Composite", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 29, pp. 1485-1492, 2009.