

ستز کاربید تیتانیوم به روش سنتز احتراقی فعال شده با گرمایش ماکروویو

مرتضی دستجردی^۱، سید محمد زانیار ابراهیمی^۱، عارف قنبری^۱، مسعود سکاکی^{*}^۱، محمد شیخ شاب بافقی^۲

^۱ گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ^۲ دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

^{*}masoudsakaki79@gmail.com

چکیده:

هدف از این پژوهش سنتز کاربید تیتانیوم با خلوص بالا از طریق فرآیند سنتز احتراقی خود پیش‌رونده فعال شده با موج ماکروویو است. بدین منظور مخلوط پودرهای اکسید تیتانیوم، منیزیم و کربن در یک اجاق ماکروویو خانگی حرارت داده شدند. محصول سنتزی توسط دستگاه پراش اشعه X و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد آنالیز قرار گرفت. با بررسی نتایج، مشخص شد که واکنش موجود در سیستم از نوع احتراقی بوده و منجر به سنتز کامپوزیت $TiC-MgO$ گردیده است. خالص‌سازی محصول، طی فرآیند اسیدشوسی در HCl رقیق انجام و TiC خالص بدلست آمد. در کلیه مرحله‌این پژوهش، از نتایج حاصل از بررسی‌های ترمودینامیکی به منظور پیش‌بینی واکنش‌ها و توجیه نتایج استفاده شد.

اطلاعات مقاله:

دربافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۸

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۰۶

کلید واژه:

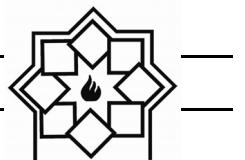
کاربید تیتانیوم، سنتز احتراقی، حرارت دهنی ماکروویو، پراش اشعه X

المنتهای حرارتی، آلیاژهای حافظه‌دار و مبدل‌های حرارتی استفاده می‌شود [۲و۱].

فرایندی که در صنعت برای سنتز کاربید تیتانیوم به کار می‌رود احیا کربوترمال TiO_2 در حضور کربن در دماهای بالا (در حدود ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) است [۲]. برای سنتز این پودر از روش‌های دیگری چون سل ژل [۳]، آسیاکاری [۴] و سنتز با پلاسم [۵] نیز استفاده گردیده است. برخی از مهم‌ترین مشکلاتی که در سنتز TiC با استفاده از این روش‌ها وجود دارد انرژی بالای مورد نیاز، پیچیدگی و زمان بر بودن فرایند، گران بودن تجهیزات و وجود ناخالصی در محصول است [۶].

۱- مقدمه

کاربید تیتانیوم (TiC) از مهم‌ترین ترکیبات سرامیکی غیر اکسیدی بوده و ویژگی‌های مطلوبی همچون دمای ذوب بالا (۳۲۶۰ درجه سانتی‌گراد)، پایداری شیمیایی و حرارتی مطلوب، چگالی کم (۴/۹۳ گرم در سانتی متر مکعب)، هدایت حرارتی مناسب، سختی بالا (۳۲/۴ گیگا پاسکال) و مقاومت به شوک حرارتی را دارد. TiC همچنین مقاومت بسیار زیادی در برابر خوردگی، اکسیداسیون و سایش از خود نشان می‌دهد. از کاربید تیتانیوم در ساخت ابزار برشی، پوشش‌های مقاوم به سایش، هدهای مغناطیسی، جلیقه‌های ضدگلوله،



تسريع در انجام فرآیندها و تأثیر در کاهش هزینه‌های سنتز در سال‌های اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است [۱۲-۱۴].

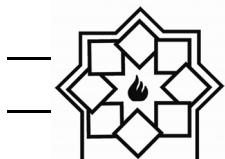
در پژوهش صورت گرفته توسط کیتیوان و همکاران [۱۵]، تأثیر پارامترهای مختلفی مانند نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها، ترکیب مواد اولیه، افزودن فاز رقیق‌کننده به واکنشگرها و $TiC-Al_2O_3$ سنتز شده به کمک احتراق ماکروویوی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان داد که مخلوط مواد اولیه‌ی اکسید تیتانیوم (Rutile)، گرافیت و آلومینیوم بهترین ترکیب برای سنتز محصول با چگالی بالا و ریزساختار مناسب است. همچنین اضافه کردن Al_2O_3 به واکنشگرها (به عنوان فاز رقیق‌کننده) منجر به کاهش دمای احتراق و نرخ واکنش شده و در نتیجه ریزساختار ریزتر می‌گردد. پژوهش انجام‌شده توسط Golkar و همکارانش [۱۶] در مورد تأثیر اندازه ذرات TiO_2 بر سایز ذرات کامپوزیت $TiC-Al_2O_3$ سنتزی به وسیله احتراق ماکروویوی نیز حاکی از این مطلب بود که با ریزتر شدن ذرات TiO_2 اولیه، محصول دانه ریزتری سنتز می‌گردد. اندازه ذرات TiC علاوه بر اندازه ذرات TiO_2 به میزان آلومینیوم اضافی در سیستم، توان ماکروویو، زمان آسیاکاری اولیه و چگالی خام بستگی دارد. عدمه ایجاد این روش، دشواری حذف آلومینیوم از کامپوزیت $TiC-Al_2O_3$ حاصل بوده که سبب می‌شود تا امکان سنتز پودر کاربید تیتانیوم به صورت خالص وجود نداشته باشد.

در این پژوهش سعی شده است تا روشی مناسب برای سنتز پودر TiC با خلوص بالا پیشنهاد شود. بدین منظور، با توجه

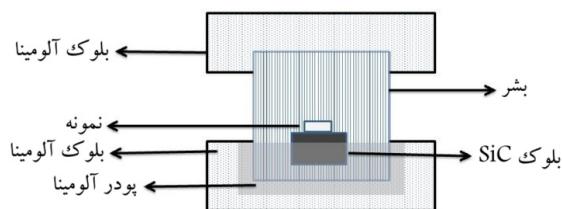
یکی از روش‌هایی که امروزه به منظور سنتز بسیاری از مواد پیشرفت (از جمله TiC) توجه بسیاری را به خود جلب کرده، روش سنتز احتراقی خود پیش‌رونده دما بالا یا به اختصار SHS^۱ است. در فرآیند SHS از گرمایش بودن واکنش‌ها استفاده می‌شود [۷]. برای تعیین احتراقی بودن یک واکنش گرمایش، مرزانوف معیاری محاسباتی را پیشنهاد داده است که بر مبنای آن هرگاه دمای آدیاباتیک مجموعه‌ای (بیشترین دمای ایجادشده در سیستم در شرایط بی‌دررو) بیش از ۱۸۰۰ کلوین باشد ($T_{ad} > 1800K$) واکنش از نوع SHS خواهد بود. فرآیند SHS ساده بوده، به انرژی اولیه‌ی نسبتاً کم نیاز دارد و زمان سنتز را کاهش می‌دهد. دیگر مزایای روش SHS عبارت‌اند از: کیفیت بالای محصولات سنتزی، کاهش فرایندهای ثانویه، هزینه پایین راهاندازی و عدم نیاز به کوره‌های دما بالا [۸].

روش SHS نیاز به یک انرژی اولیه برای شروع واکنش دارد که می‌تواند توسط سیم داغ، اشعه لیزر، تخلیه الکتریکی، انرژی القایی و یا یک جرقه تأمین گردد [۱۰-۹]. فعال‌سازی واکنش‌های سنتز احتراقی به کمک انرژی امواج ماکروویو، تکنیکی جدید برای سنتز پودرهای سرامیکی است [۱۱]. حرارت‌دهی به کمک ماکروویو اساساً با روش‌های مرسوم گرمایش تفاوت دارد. موج ماکروویو، ماده را در سطوح مولکولی گرم می‌کند و انتقال حرارت از داخل به سمت بیرون است. این امر منجر به گرمایش یکنواخت‌تر نمونه می‌شود. گرمایش یکنواخت‌تر سبب سنتز محصول همگن‌تر شده و کیفیت محصول را افزایش خواهد داد. این نوع حرارت‌دهی به دلیل کاهش چشمگیر آلودگی محیط زیستی،

^۱ Self-propagating High-temperature Synthesis



گرمایش ندارد. علت این امر در شفافیت این مواد نسبت به موج ماکروویو نهفته است. نحوه قرار گرفتن اجزا به نحوی طراحی شده است که حتی الامکان از تماس مستقیم نمونه با اکسیژن هوا (که منجر به اکسید شدن نمونه می‌گردد) جلوگیری شود.



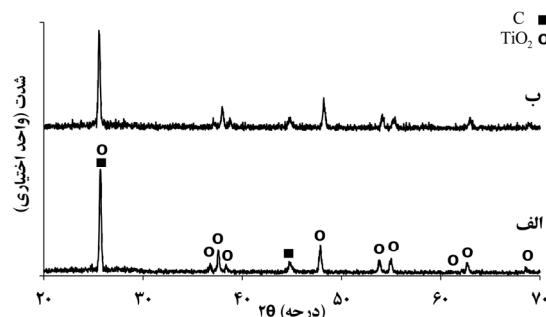
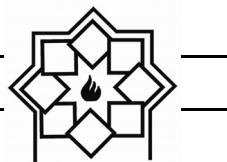
شکل ۱- چیدمان اجزا آزمایش در حین حرارت دهنده ماکروویوی نمونه ها در این پژوهش.

انجام واکنش احتراقی در حین حرارت دهنده قرص ها، از روی سرخ شدن ناگهانی و مشتعل شدن آن ها تشخیص داده شد. پس از انجام واکنش، دستگاه ماکروویو خاموش شده و به مجموعه اجازه داده می شود تا به آرامی سرد گردد. در مرحله بعد، مواد سنتز شده، خرد و فازهای موجود در پودر با استفاده از یک دستگاه XRD (Unisantis-XMD 300) مورد شناسایی قرار گرفت. اسید شویی محصول (با هدف حذف HCl و سنتز فاز TiC خالص) در محلول رقیقی از MgO صورت پذیرفت. دما و زمان اسید شویی به ترتیب $50^\circ C$ و ساعتی 2 می باشد [۱۸]. پس از انحلال فازهای نامطلوب، ذرات باقی مانده توسط کاغذ صافی از محلول جدا شده و خشک گردیدند. در انتهای ریز ساختار محصول سنتزی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. در کلیه مراحل این پژوهش، به منظور به دست آوردن دورنمایی از واکنش های محتمل و تبیین علت پدیده های مشاهده شده، از محاسبات

به نتایج حاصل از بررسی های ترمودینامیکی، عامل احیا کننده مناسب پیشنهاد گردید. واکنش احتراقی در یک دستگاه ماکروویو خانگی انجام و پودرهای سنتزی توسط دستگاه پراش اشعه X و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد آنالیز قرار گرفت. در انتهای خالص سازی محصول طی فرآیند اسیدشویی در HCl رقیق انجام شد.

۲- فعالیت های تجربی

هدف از این پژوهش بررسی امکان سنتز کاربید تیتانیوم توسط حرارت دهنده ماکروویوی است. مواد اولیه مورد استفاده شامل اکسید تیتانیوم (TiO_2)، گرافیت (C) و منیزیم (Mg) با خلوص آزمایشگاهی بود. پودر مواد اولیه با ترکیب مطلوب در هر آزمایش، توزیں و سپس به صورت دستی مخلوط و همگن گردید. در مرحله بعد، مخلوط حاصل با استفاده از یک پرس هیدرولیک تک محور با فشار 50.0 kg/cm^2 به صورت قرص هایی با قطر 10 و ارتفاع 7 میلی متر پرس شدند. گرمایش ماکروویوی قرص ها در درون یک دستگاه ماکروویو خانگی (SAMSUNG:GE2370G) با توان ماکروویو خروجی برابر با 850 وات صورت پذیرفت. بیشترین زمان گرمایش در این پژوهش برابر با چهار دقیقه بود. با توجه به اینکه مخلوط مواد اولیه مورد استفاده از قدرت جذب اشعه ماکروویو اندکی برخوردار است [۱۷]، به منظور افزایش راندمان گرمایش، از یک بلوك SiC به عنوان ماده جاذب اشعه ماکروویو (susceptor) کمک گرفته شد. نحوه چیدمان اجزا (setup) در حین سنتز نمونه ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در این چیدمان، حضور اجزایی از جنس SiO_2 و Al_2O_3 تأثیری بر راندمان



شکل ۲- الگوی پراش اشعه X مربوط به نمونه $\text{TiO}_2:3\text{C}$ قبل (الف) و بعد (ب) از حرارت دهی ماکروویوی به مدت زمان ۴ دقیقه.

۳-۱-۳- بررسی‌های ترمودینامیکی

همان طور که مشاهده شد، سنتز فاز TiC در حین حرارت دهی مخلوط $\text{TiO}_2:3\text{C}$ ممکن نیست. به منظور درک علت این پدیده، در این قسمت از پژوهش از محاسبات ترمودینامیکی کمک گرفته می‌شود.

۳-۱-۲-۳- ترمودینامیک سیستم TiO_2-C

واکنش‌های (۱) و (۲) در حقیقت مجموع واکنش‌های (۳)، (۴) و (۵) می‌باشند.



شکل ۳-الف نتایج حاصل از محاسبات ترمودینامیکی مربوط به واکنش‌های (۳) و (۴) را نشان می‌دهد. پله‌های موجود در منحنی‌ها ناشی از وقوع استحاله فازی (مطابق با جدول ۱) در مواد اولیه و یا محصولات واکنش‌ها است. ΔG° در دمای ۳۰۰ کلوین (دمای محیط) برای هر دو واکنش (۳) و (۴) بسیار مثبت و به ترتیب برابر با ۴۹۴ و ۶۱۴ کیلوژول است.

ترمودینامیکی کمک گرفته شد. به منظور سادگی محاسبات، از تشکیل اکسیدهای فرعی تیتانیوم (sub-oxides) چشم‌پوشی شد و فرض گردید که اکسید تیتانیوم در یک مرحله به Ti احیا می‌گردد. این محاسبات با استفاده از اطلاعات مستخرج از سایت Factstage انجام گردید [۱۹].

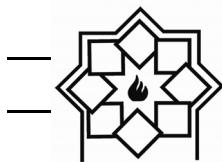
۳- نتایج و بحث

۳-۱-۳- سیستم TiO_2-C

هدف از این پژوهش، سنتز پودر TiC توسط حرارت دهی ماکروویوی است. ساده‌ترین روش برای نیل به این هدف استفاده از مخلوط TiO_2-C با هدف انجام واکنش‌های (۱) و (۲) است.

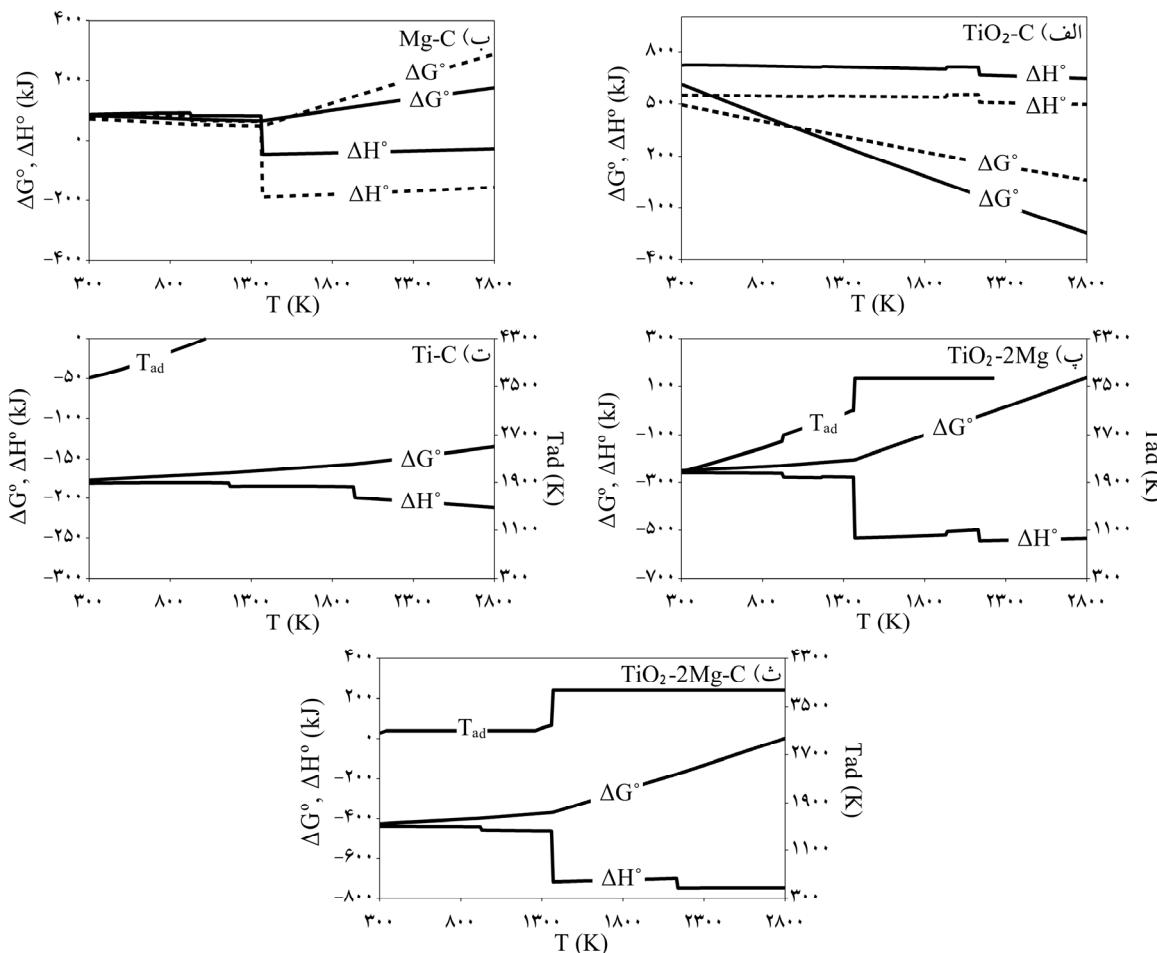


بدین منظور، مخلوط $\text{TiO}_2:3\text{C}$ تهییه و به مدت چهار دقیقه تحت حرارت دهی ماکروویوی قرار گرفت. با این حال هیچ گونه نشانه ظاهری دال بر انجام واکنش در مخلوط مشاهده نگردید. عدم انجام واکنش شیمیایی از الگوی پراش اشعه X این نمونه (شکل ۲) نیز مشخص است. حرارت دهی تغییری در الگوی XRD ایجاد نکرده و تنها پیک‌های مربوط به اکسید تیتانیوم و گرافیت قابل مشاهده هستند.



سوی دیگر مطابق با شکل ۳-الف، ΔH° واکنش‌های (۳) و (۴) در دمای ۳۰۰ کلوین مقداری مثبت و به ترتیب برابر ۷۷۳ و ۵۵۱ کیلوژول بر مول است. این مقادیر مثبت نشان‌دهنده‌ی ماهیت گرمائیگر واکنش است. ΔH° هر دو واکنش در محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۲۸۰۰ درجه کلوین مقداری مثبت بوده که بدین معنی است که واکنش‌های فوق حتی در صورت انجام نیز از نوع خود پیش‌روندۀ نخواهند بود.

امری که نشان‌گر عدم تمایل هر دو واکنش به انجام است. با افزایش دما، در هر دو واکنش ΔG° کاهش یافته که نشان از اثر مطلوب افزایش دما است. با این وجود با توجه به شکل ۳-الف مشخص است که در محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۲۰۴۰ درجه کلوین شانسی برای احیای TiO_2 وجود ندارد. در صورتی که دمای اولیه سیستم (دمای پیش‌گرم) بیش از ۲۰۴۰ کلوین باشد ΔG° واکنش (۴) مقداری منفی شده لذا واکنش احیا از دیدگاه ترمودینامیکی محتمل می‌گردد. از



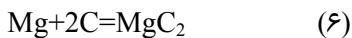
شکل ۳- نمودار تغییرات انرژی آزاد استاندارد گیبس (ΔG°)، گرمای تشکیل استاندارد (ΔH°) و دمای آدیباتیک بر حسب دمای پیش‌گرم. الف) واکنش‌های ۳ (خطوط نقطه‌چین) و ۴ (خطوط پررنگ)، ب) واکنش‌های ۶ (خطوط پررنگ) و ۷ (خطوط نقطه‌چین)، پ) واکنش (۸)، ت) واکنش (۵) و ث) واکنش (۹).



جدول ۱- استحاله‌های فازی مواد اولیه و محصولات این پژوهش [۱۹].

۳۸۰۱	۳۷۷۱	۳۶۳۴	۳۰۹۷	۲۱۳۰	۱۹۳۹	۱۳۶۷	۱۱۶۶	۹۲۳	دما (کلوین)
TiO ₂ (l)	MgO(l)	Ti (l)	MgO(s)	TiO ₂ (s)	Ti (s ₂)	Mg (l)	Ti (s ₁)	Mg (s)	فاز اولیه
TiO ₂ (g)	MgO(g)	Ti (g)	MgO(l)	TiO ₂ (l)	Ti (l)	Mg (g)	Ti (s ₂)	Mg (l)	فاز نهایی

تغییرات انرژی آزاد استاندارد گیبس و گرمای تشکیل استاندارد واکنش‌های محتمل (واکنش (۶) و (۷)) در سیستم دوتایی Mg-C را بر حسب دما نشان می‌دهد که در آن، پله‌های موجود در منحنی‌ها ناشی از وقوع استحاله فازی (مطابق با جدول ۱) در مواد اولیه و یا محصولات واکنش‌ها است.



ΔG° در ۳۰۰ درجه کلوین برای هر دو واکنش (۶) و (۷) مثبت و به ترتیب برابر با ۸۴ و ۷۴ کیلوژول است. با افزایش دما تا دمای ۱۳۶۷ کلوین، ΔG° اندکی کاهش می‌یابد و بعد از آن با شبیب نسبتاً زیادی افزایش می‌یابد. مثبت بودن مقادیر ΔG° برای هر دو واکنش (۶) و (۷) در محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۲۸۰۰ درجه کلوین دلالت بر این نکته دارد که این واکنش‌ها از نظر ترمودینامیکی محتمل نمی‌باشند. از سوی دیگر مطابق با شکل ۳-ب تغییرات گرمای تشکیل استاندارد هر دو واکنش در دمای محیط مقداری مثبت بوده (واکنش گرمائی) و برای واکنش (۶) برابر ۸۷ و برای واکنش (۷) برابر ۷۹ کیلوژول است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ΔH° از دمای محیط تا دمای ۱۳۶۷ درجه کلوین (دمای تبخیر منیزیم) با شبیب بسیار کمی کاهش می‌یابد اما همچنان مقداری مثبت دارد. با رسیدن به دمای ۱۳۶۷ درجه

با توجه به مباحث عنوان شده می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که امکان احیای اکسید تیتانیوم توسط کربن و در دماهای قابل سنتز توسط اجاق ماکروویو خانگی وجود ندارد. لذا استفاده از یک عامل احیاکننده قوی‌تر، ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به نمودار اینگهایم، از بین گزینه‌های در دسترس (که هم ارزان بوده و هم امکان استفاده عملی از آن‌ها وجود دارد) Al یا Mg مناسب به نظر می‌رسند [۲۰]. از نقطه نظر تئوریک، استفاده از Mg دارای برتری‌های زیر است:

- Mg از قدرت احیاکننده بیشتری برخوردار است.
- محصول جانبی حاصل از احیا (MgO) به راحتی توسط اسیدشویی قابل حذف بوده و امکان سنتز محصول نهایی با خلوص بالا وجود دارد.

با توجه به اینکه افزودن Mg به سیستم TiO₂-C می‌تواند سبب انجام برخی واکنش‌های نامطلوب گردد در ابتدا و قبل از انجام آزمایش‌های عملی، نسبت به بررسی ترمودینامیکی اثر حضور Mg در سیستم اقدام شد. نتایج حاصل در ادامه ارائه گردیده است.

۲-۲-۳- ترمودینامیک سیستم Mg-C

پس از انتخاب Mg به عنوان عامل احیاکننده، بررسی احتمال واکنش این فلز با کربن ضروری است تا اطمینان حاصل گردد که منیزیم تنها وظیفه احیا تیتانیوم را بر عهده خواهد داشت و با کربن واکنش نخواهد داد. شکل ۳-ب



انتظار می‌رود که گرمای آزادشده سبب افزایش دمای سیستم گردد. همان طور که از شکل ۳-پ برمی‌آید دمای آدیاباتیک برای واکنش مزبور در دمای محیط برابر 20°C درجه کلوین است که بر طبق معیار مرزانوف، نشان از احتراقی بودن واکنش دارد [۲۱]. با توجه به اینکه با افزایش دما، بر گرمایی واکنش (۸) افزوده می‌شود لذا انتظار می‌رود که در دماهای بالاتر، دمای آدیاباتیک بیشتری حاصل شود. شکل ۳-پ درستی این پیش‌بینی را نشان می‌دهد. دمای آدیاباتیک در محدوده 1370 تا 2230 ثابت مانده که مربوط به انجام استحالة فازی تبخیر تیتانیوم است. نظر به اینکه واکنش (۸) در دمای بیشتر از 2230 درجه کلوین از نظر ترمودینامیکی غیرممکن می‌شود لذا محاسبه دمای آدیاباتیک در دماهای بیش از 2230 درجه بی‌معنی خواهد بود.

۴-۲-۳- ترمودینامیک سیستم Ti-C

مطابق با محاسبات ترمودینامیکی، در سیستم $\text{TiO}_2\text{-Mg-C}$ منیزیم صرف احیای اکسید تیتانیوم و سنتز Ti عنصری می‌شود. در این قسمت از بررسی‌های ترمودینامیکی، احتمال سنتز TiC از واکنش مابین Ti و C موجود در سیستم (واکنش (۵)) بررسی می‌شود. شکل ۳-ت نتایج حاصل از این محاسبات ترمودینامیکی را ارائه نموده که در آن، پله‌های موجود در منحنی‌ها ناشی از وقوع استحالة فازی (مطابق با جدول ۱) در مواد اولیه و یا محصولات واکنش‌ها است. همان طور که مشاهده می‌گردد ΔG° واکنش (۸) در دمای محیط برابر -248 کیلوژول است که حکایت از میل زیاد سیستم به انجام این واکنش در دمای محیط دارد. با افزایش دما مقدار ΔG° افزایش می‌یابد، تا این که در دمای 2230 درجه کلوین ΔG° مقداری مثبت به خود می‌گیرد و واکنش از نظر ترمودینامیکی غیرممکن می‌گردد. تغییرات گرمای تشکیل واکنش (۸) در دمای محیط برابر با -258 است. با افزایش دما این مقدار کاهش می‌یابد و بر گرمایی واکنش افزوده می‌شود. با توجه به مقدار گرمای زیاد آزادشده در سیستم،

کلوین، نمودار مربوط به ΔH° برای هر دو واکنش دچار افت شدید شده و واکنش از حالت گرمایی به گرمایی تبدیل می‌شود. در ادامه با افزایش دمای پیش گرم، هرچند که مقدار ΔH° هر دو واکنش افزایش می‌یابد ولی مقدار آن منفی بوده و واکنش‌ها همچنان گرمایی باشند. با توجه به نتایج حاصل از بررسی‌های ترمودینامیکی چنین نتیجه‌گیری می‌شود که در سیستم Mg-C خطر انجام واکنش و ایجاد ترکیب بین این دو عنصر وجود ندارد. در نتیجه منیزیم افزوده شده احتمالاً با اکسید تیتانیوم واکنش خواهد داد. در ادامه صحت این امر از نظر ترمودینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲-۳- ترمودینامیک سیستم $\text{TiO}_2\text{-Mg}$

واکنش محتمل در این سیستم عبارت است از:



شکل ۳-پ نتایج حاصل از محاسبات ترمودینامیکی سیستم $\text{TiO}_2\text{-Mg}$ را ارائه می‌نماید. پله‌های موجود در منحنی‌ها ناشی از وقوع استحالة فازی (مطابق با جدول ۱) در مواد اولیه و یا محصولات واکنش‌ها است. همان طور که مشاهده می‌گردد ΔG° واکنش (۸) در دمای محیط برابر -248 کیلوژول است که حکایت از میل زیاد سیستم به انجام این واکنش در دمای محیط دارد. با افزایش دما مقدار ΔG° افزایش می‌یابد، تا این که در دمای 2230 درجه کلوین ΔG° مقداری مثبت به خود می‌گیرد و واکنش از نظر ترمودینامیکی غیرممکن می‌گردد. تغییرات گرمای تشکیل واکنش (۸) در دمای محیط برابر با -258 است. با افزایش دما این مقدار کاهش می‌یابد و بر گرمایی واکنش افزوده می‌شود. با توجه به مقدار گرمای زیاد آزادشده در سیستم،



طبق معیار مرزانوف، واکنش از نوع احتراقی خواهد بود. از سوی دیگر مطابق با شکل ۳-ت، در کلیه محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۲۸۰۰ درجه کلوین، مقدار ΔG° برای واکنش (۵) مقداری منفی است و با افزایش دما بر گرمایشی واکنش افزوده می‌شود. لذا به سادگی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در نبود عامل بازدارنده سینتیکی، سنتز TiC از نظر ترمودینامیکی امکان‌پذیر است.

۲-۵- جمع‌بندی مباحث ترمودینامیکی

هدف از این پژوهش سنتز فاز TiC طی یک واکنش سنتز احتراقی فعال شده با حرارت دهی ماکروویوی است. مطابق با نتایج حاصل از محاسبات ترمودینامیکی، سنتز TiC توسط حرارت دهی مخلوط $TiO_2:3C$ مقدور نبوده و بایستی که از یک عامل احیاکننده (در این پژوهش Mg) کمک گرفته شود. محاسبات انجام شده نشان داد که Mg به راحتی اکسید تیتانیوم را طی یک واکنش احتراقی احیا می‌نماید. Ti سنتزی نیز در ادامه با C واکنش کرده و TiC سنتز خواهد شد. واکنش کلی به صوت واکنش (۹) است:



تغییرات ΔH° و ΔG° و T_{ad} واکنش (۹) بر حسب دما در شکل ۳-ث نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که انرژی آزاد استاندارد گیبس این واکنش به شدت منفی بوده و به عبارت دیگر احتمال انجام واکنش بسیار بالا است. از سوی دیگر واکنش (۹) به شدت گرمایشی بوده و نوع آن طبق معیار مرزانوف، احتراقی است. به طور خلاصه، محاسبات ترمودینامیکی نشان می‌دهند که احتمال سنتز پودر کامپوزیتی TiC-MgO (طبق واکنش (۹)) طی یک واکنش احتراقی بسیار زیاد است. در ادامه این پژوهش، این امر به

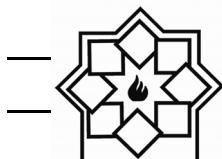
صورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۳- حرارت دهی ماکروویوی مخلوط $TiO_2:2Mg:C$

الگوی XRD نمونه با ترکیب $TiO_2:2Mg:C$ قبل و بعد از انجام واکنش احتراقی (۲۲ ثانیه حرارت دهی) در شکل ۴ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که الگوی XRD کاملاً دگرگون شده است. این امر به همراه مشاهده تجربی وقوع انفجار در حین حرارت دهی نمونه، نشان‌دهنده انجام واکنش احتراقی در سیستم است [۲۲]. امری که در تطابق کامل با پیش‌بینی‌های ترمودینامیکی قرار دارد. در این شکل پیک‌های مربوط به کاربید تیتانیوم و اکسید منیریم قابل مشاهده هستند که حاکی از انجام واکنش (۹) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پودر کامپوزیتی $TiC-MgO$ طی یک واکنش احتراقی در سیستم سه‌تایی TiO_2-Mg-C با موفقیت سنتز شده است.

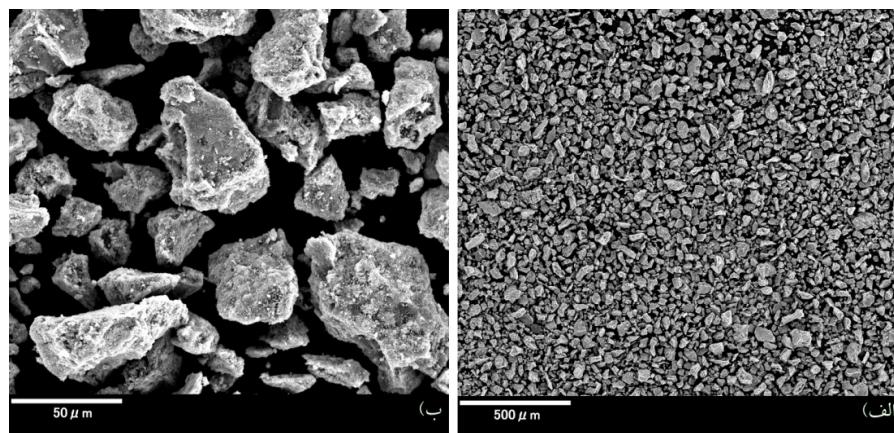
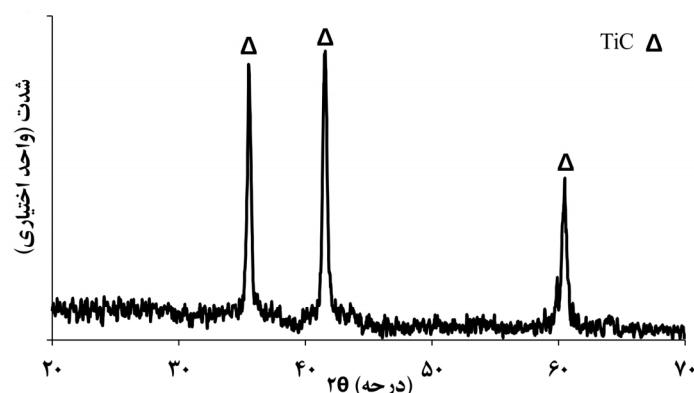
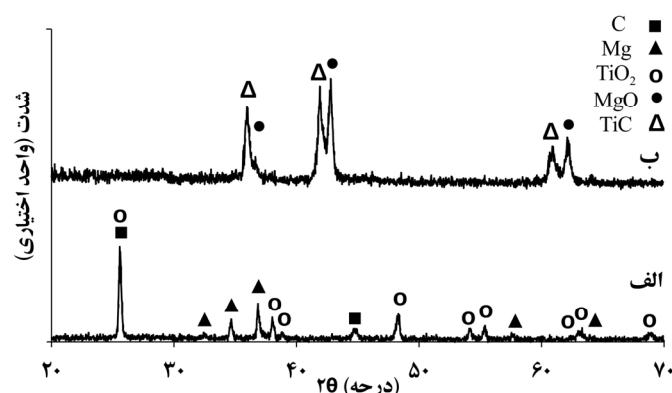
۴-۳- اسید شویی محصول حاصل از حرارت دهی ماکروویوی مخلوط $TiO_2:2Mg:C$ و بررسی پودر حاصل

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش، سنتز پودر TiC است از اسیدشویی در HCl رقیق به منظور حذف O از MgO از کامپوزیت سنتز شده استفاده شد [۲۳]. شکل ۵ الگوی XRD نمونه سنتز شده را پس از اسیدشویی نشان می‌دهد. در این شکل، تنها پیک‌های مربوط به فاز TiC مشخص بوده و هیچ‌گونه فاز اضافی در محصول وجود ندارد. چنین نتیجه‌گیری می‌شود که اسید شویی محصول توانسته است سبب سنتز فاز TiC با خلوص بالا گردد. شکل ۶ نیز تصاویر SEM از پودر سنتزی در این پژوهش را نشان می‌دهد. وجود ذرات زمخت در این تصاویر ناشی از این امر



لذا ذرات به هم جوش خورده و زخت می‌گردند [۲۴].

است که همان طور که محاسبات ترمودینامیکی نشان می‌دهند، دمای مجموعه در حین واکنش بسیار بالا بوده و





- synthesis of titanium carbide using ultrafine titania powders”, Journal of Materials Science, vol. 32 pp. 3101-3111 (1997).
- [3] A. Biedunkiewicz, W. Jasiński, S. Lenart, “Synthesis and growth of TiC coatings from the sol-gel process” Vacuum, vol. 50 pp. 65-68 (1998).
- [4] M. Ali, P. Basu, “Mechanochemical synthesis of nano-structured TiC from TiO_2 powders”, Journal of Alloys and Compounds, vol. 500 pp. 220–223 (2010).
- [5] S. Mohapatra, D. K. Mishra, S. K. Singh, “Microscopic and spectroscopic analyses of TiC powder synthesized by thermal plasma technique”, Powder Technology, vol. 237 pp. 41–45 (2013).
- [6] M. S. Song, B. Huang, M. X. Zhang, J. G. Li, “Study of formation behavior of TiC ceramic obtained by self-propagating high-temperature synthesis from Al-Ti-C elemental powders”, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, vol. 27 pp. 584–589 (2009).
- [7] C. Benoit, H. Ellen, K. Nikhil, V. Dominique, D. Sylvain, “TiC

۴- نتیجه‌گیری

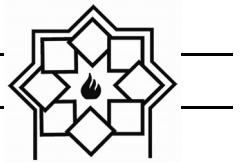
در این پژوهش امکان تولید فاز TiC طی انجام یک واکنش احتراقی در حین حرارت‌دهی ماکروویوی مخلوط سه‌تایی TiO_2 -Mg-C مورد بررسی قرار گرفت. ملاحظه شد که استفاده از عامل احیاکننده Mg در سیستم TiO_2 -C برای سنتز محصول نهایی الزامی است. مطالعات ترمودینامیکی نشان داد که منیزیم مصرفی تنها صرف احیا TiO_2 خواهد شد. نتایج تجربی بدست آمده نشان دادند که حرارت دهی مخلوط سه‌تایی فوق منجر به انجام یک واکنش احتراقی و سنتز کامپوزیت TiC-MgO می‌گردد. فاز TiC خالص، براحتی و طی فرآیند اسیدشوبی در HCl رقیق حاصل گردید. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پودر سنتزی حاکی از زخت بودن ذرات مخصوص سنتزی داشت که ناشی از دمای بالای سیستم طی انجام واکنش احتراقی است. در این پژوهش تطابق خوبی بین نتایج حاصل از بررسی‌های ترمودینامیکی و نتایج تجربی مشاهده گردید.

مراجع

- [1] S. K. Mishra, Khusboo, V. A. Sherbakov, “Fabrication of in-situ Ti-Si-C fine grained composite by the self-propagating high temperature synthesis (SHS) process”, Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 29 pp. 209–213 (2011).
- [2] R. Koc, J. S. Folmer, “Carbothermal



- metal carbides”, PhD thesis, School of Chemistry, University of Nottingham (2009).
- [14] S. W. Kingman, N. A. Rowson, “Microwave treatment of minerals-a review”, Minerals Engineering, vol. 11 pp. 1081-1087 (1998).
- [15] M. Kitiwan, D. Atong, “Synthesis and characterization of microwave and conventional combustion synthesized alumina-titanium carbide powders”, JSME International Journal Series A, vol. 49 pp. 85-90 (2006).
- [16] G. Golkar, S. M. Zebarjad, J. V. Khaki, “Role of nano-size TiO₂ particles on the crystallite size of microwave-Combustion synthesized Al₂O₃/TiC composite”, Journal of Alloys and Compounds, vol. 504 pp. 566-572 (2010).
- [17] K. E. Haque, “Microwave energy for mineral treatment processes-a brief review”, International Journal of Mineral Processing, vol. 57 pp. 1-24 (1999).
- [۱۸] ح. رونقی ممقانی، ع. طبیعی فرد، ا. کاظمیزاده، ل. نیکزاد، ”بررسی چگالش پودر نانو کامپوزیت SiC-B₄C حاصل از سنتز احتراقی فعال شده مکانیکی با استفاده از روش سیتر قوس پلاسما (MASHS) nucleation/growth processes during SHS reactions”, Powder Technology vol. 157 pp. 92 – 99 (2005).
- [8] I. Borovinskaya, “Chemical classes of the SHS processes and materials”, Pure and Applied Chemistry, vol. 64 pp. 919-940 (1992).
- [9] G. Zuccaro, G. Lapenta, G. Maizza, “Particle in cell simulation of combustion synthesis of TiC nanoparticles”, Computer Physics Communications, vol. 162 pp. 89–101 (2004).
- [۱۰] د. پزشکی، م. رجبی، م. ربیعی، غ. ر. خیاطی، ”اثر اندازه ذره و فعالسازی مکانیکی بر سنتز احتراقی کامپوزیت پایه آلمینیا”， علم و مهندسی سرامیک، جلد سوم شماره دوم، ۱۰-۱، ۱۳۹۳.
- [۱۱] ا. ر. امینی، ع. ر. ذاکری، م. ش. بافقی، م. کربیم زوار چهارطاق، ”سنتز کامپوزیت از WC-Al₂O₃ از طریق گرمایش ماکروویوی مخلوط فعال شده مکانیکی WO₃-Al-C”， علم و مهندسی سرامیک، جلد دوم شماره چهارم، ۳۱-۲۱، ۱۳۹۲.
- [۱۲] ن. یزدانی، م. محمد باقرزاده، ع. ر. ذاکری، ”سنتز ماکروویوی کاربید سیلیسیم از خاکستر پوسته برنج فعال شده”， علم و مهندسی سرامیک، جلد سوم شماره چهارم، ۲۷-۱۹، ۱۳۹۳.
- [13] S. Vallance, “Microwave synthesis and mechanistic examination of the transition



SHS process”, Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 44 pp. 142–147 (2014).

”علم و مهندسی سرامیک، جلد سوم شماره ۴۵-۳۵، ۱۳۹۳.

[19] www.factsage.com.

[20] D. R. Gaskell, “Introduction to the thermodynamics of materials”, 4th Edition, CRC Press (2008).

[21] A. G. Merzhanov, “Self-propagating high-temperature synthesis” in: combustion and plasma synthesis of high temperature materials. Z. A. Munir, J. B. Holt, New York: VCH Publication (1990).

[۲۲] م. ش. ش. بافقی، م. سکاکی، ا. کریمزاده بهنامی، م. حمیدی، ”سنتز احتراقی خود پیش‌رونده کاربید سیلیسیوم در سیستم $\text{SiO}_2\text{-Mg-C}$ توسط گرمایش ماکروویوی”， علم و مهندسی سرامیک، جلد دوم شماره سوم، ۹-۱، ۱۳۹۲.

[23] S. Niyomwas, “In Situ Synthesis of Silicon-Silicon Carbide Composites from $\text{SiO}_2\text{-C-Mg}$ System via Self-Propagating High-Temperature Synthesis”, in: EPD Congress pp. 777-784, (2009).

[24] M. Sakaki, A. Karimzadeh Behnami, M. Sh. Bafghi, “An investigation of the fabrication of tungsten carbide-alumina composite powder from WO_3 , Al and C reactants through microwave-assisted