

# تولید کامپوزیت‌های آلومیناید تیتانیوم تقویت شده با $Al_2O_3$ و $Al_2O_3/Ti_2AlC$ به وسیله سنتز انفجاری

ابوالفضل امیر کاوئی<sup>۱\*</sup> و علیرضا گل‌عداز<sup>۲</sup>

۱- مدرس، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران

۲- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، گروه مهندسی مواد، اصفهان، ایران

\*abolfazlamirkaveh@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۱/۲۲)

## چکیده

در این تحقیق تولید کامپوزیت‌های  $TiAl - Al_2O_3 - Ti_2AlC$  و  $TiAl - Al_2O_3 - Ti_2AlC$  به روش سنتز انفجاری مورد مطالعه قرار گرفت. این کامپوزیت‌ها به طور موفقیت آمیزی با استفاده از پودرهای اولیه  $Al$ ،  $TiO_2$ ،  $C$  و  $Al$  سنتز شدند. برای مشخصه‌یابی محصول کامپوزیتی تولید شده از آنالیز تفرق اشعه ایکس (XRD) و جهت بررسی ریزساختار و تأیید فازهای تشکیل شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیز EDS استفاده گردید. نتایج نشان داد که واکنش ترمیتی  $TiO_2$  با  $Al$  باعث تولید درجای کامپوزیت  $TiAl - Al_2O_3$  می‌شود. با افزودن کربن به مخلوط ترمیتی، امکان تولید مستقیم  $Ti_2AlC$  بدون تشکیل محصولات نظیر  $TiC$  حاصل می‌شود. به دلیل وجود مقدار کم کربن در مخلوط ترمیت،  $Ti_2AlC$  از  $TiAl$  مذاب در مجاورت ذرات کربن رسوب می‌کند. تصاویر SEM نشان داد که کامپوزیت  $TiAl - Al_2O_3$  دارای ذرات  $Al_2O_3$  یکنواخت و کوچکتر از  $1 \mu m$  در زمینه آلومیناید تیتانیوم می‌باشد و در مورد کامپوزیت  $TiAl - Al_2O_3 - Ti_2AlC$  یک ریزساختار ورقه‌ای با دانه‌های کشیده حاصل می‌شود.

## واژه‌های کلیدی:

سنتز احتراقی، کامپوزیت  $TiAl - Al_2O_3$ ، کامپوزیت  $TiAl - Al_2O_3 - Ti_2AlC$ ، ریزساختار.

## ۱- مقدمه

نظیر  $Ti_2AlC$  و  $Ti_3AlC_2$  به دلیل ترکیب خواص فلزی و سرامیکی و ارائه خواصی نظیر هدایت حرارتی و الکتریکی خوب، مقاومت به شوک حرارتی، استحکام خمشی مناسب، پایداری حرارتی و مقاومت به اکسیداسیون در دمای بالا از جایگاه خوبی در مواد مهندسی برخوردارند. از طرفی  $Al_2O_3$  یکی از تقویت‌کننده‌های سرامیکی در کامپوزیت‌های مهندسی است که رفتار ترمومکانیکی خوبی از خود نشان می‌دهد.

کامپوزیت‌های بر پایه آلومیناید تیتانیوم  $TiAl$  از جمله مواد مهندسی مناسب برای کاربردهای دما بالا می‌باشند. به دلیل خواصی نظیر چگالی کم، مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی، کامپوزیت‌هایی نظیر  $TiAl - Al_2O_3$  مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته‌اند. آلومیناید تیتانیوم  $TiAl$  چگالی پایین ( $3/8 g/cm^3$ ) و نقطه ذوب بالا (در حدود  $1773 K$ ) دارد. همچنین کاربیدهایی

مشاهدات عینی و همچنین اندازه‌گیری دما، چند نمونه بدون محافظت در اتمسفر کوره قرار داده شد. برای انجام آزمایش نیز از یک کوره موفلی استفاده گردید. اندازه‌گیری دما حین انجام واکنش به کمک سنسورهای دما بالا مدل SensyTempTSH200 متصل به کامپیوتر صورت پذیرفت. پس از تولید کامپوزیت‌ها، ریزساختار و ترکیب فازی به کمک XRD و SEM مجهز به آنالیز EDX مشخصه‌یابی گردید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تولید کامپوزیت $TiAl-Al_2O_3$

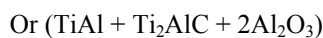
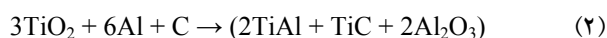
سنتر احتراقی نمونه تهیه شده طبق واکنش (۱) برای تولید کامپوزیت  $TiAl-Al_2O_3$  صورت گرفت. واکنش (۱) گرمازا بوده و دمای آدیاباتیک حدود ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد حاصل می‌کند. هنگامی که نمونه  $3TiO_2 + 7Al$  در یک کوره پیش‌گرم شده قرار گیرد، دمای آدیاباتیک خیلی بیشتر از ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. دمای احتراق اندازه‌گیری شده برای نمونه قرار داده شده در یک کوره با دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، در حدود ۱۸۹۰ درجه سانتی‌گراد بود. شکل (۱) مقایسه بین منحنی تغییر دما برای مطالعه حاضر و نتایج کار قبلی [۸] را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود روند تغییر دما تقریباً مشابه بوده ولی برای دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده در مطالعه حاضر، زمان تکمیل واکنش کمتر از دو دقیقه است. هورویتز<sup>۴</sup> و همکارانش [۸] گزارش کردند که تأخیر در انفجار حرارتی مربوط به تشکیل لایه  $Al_2O_3$  بر روی پودرهای آلومینیوم اولیه حین آسیاب کاری است. این لایه به عنوان یک مانع عمل کرده و واکنش را به تأخیر می‌اندازد. در مقایسه با کار حاضر در این تحقیق مخلوط پودری تحت اتمسفر آرگون و برای زمان کمتری (۵ دقیقه در مقایسه با ۴ ساعت) آسیاب شد که این باعث کاهش تشکیل لایه اکسیدی می‌گردد. همچنین دمای کوره در حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر انتخاب شده که این نیز باعث تسریع واکنش ترمیتی می‌گردد.

اخیراً تولید کامپوزیت‌های مختلفی از جمله  $TiAl-Ti_5Si_3$  و  $TiAlC-Ti_2Al_3$  به وسیله یه<sup>۱</sup> و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است [۳-۱]. سنتز  $Al_2O_3/TiAl/Nb_2O_5$  با استفاده از پرس داغ نیز در مراجع گزارش شده است [۴]. سنتز احتراقی یکی از روش‌های مورد توجه برای تولید کامپوزیت‌های از این دسته بوده است [۵-۸]. با این وجود برای تولید قطعات بالک و بررسی خواص مکانیکی، برخی از محققان از روش سنتز واکنشی به کمک پرس داغ<sup>۲</sup> استفاده کردند [۵ و ۹]. آلیاژسازی مکانیکی نیز یکی از روش‌های تولید پودرهای نانو کامپوزیت  $TiAl/\alpha-Al_2O_3$  [۱۰] و  $Ti_3AlC_2$  [۱۱] بوده است.

در این تحقیق، کامپوزیت‌های  $TiAl-Al_2O_3$  و  $TiAlC-Ti_2Al_3-Al_2O_3$  به روش سنتز انفجاری تولید شدند. مکانیزم تشکیل کامپوزیت‌ها به کمک آنالیز XRD، SEM و EDX مورد مطالعه قرار گرفت.

### ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از پودرهای تجاری  $TiO_2$  (خلوص ۹۹/۹۹٪،  $5 \mu m$ )،  $Al$  (خلوص ۹۹/۹۹٪،  $45 \mu m$ ) و کربن<sup>۳</sup> (خلوص ۹۹٪،  $10 \mu m$ ) برای تولید کامپوزیت‌های ذکر شده استفاده گردید. مخلوط‌های پودری بر طبق واکنش‌های زیر مخلوط شدند:



با توجه به واکنش مقداری از کربن با اکسیژن به دام افتاده در تخلخل نمونه و یا محیط، کربن نمونه به میزان ۱۰٪ وزنی بیشتر از مقدار استوکیومتری در نظر گرفته شد. مخلوط پودری پس از توزین در یک آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای به مدت ۵ دقیقه تحت اتمسفر آرگون مخلوط گردید. برای بهبود تراکم‌پذیری، پودرها با اتانول مخلوط و سپس تحت فشار  $200 \text{ kg/cm}^2$  به نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ mm و ارتفاع ۳۰ mm، پرس سرد شدند. پس از خشک کردن، نمونه در یک کروزه قرار گرفت و برای حفاظت در برابر اتمسفر با پودر آلومینا پوشانده شد. برای

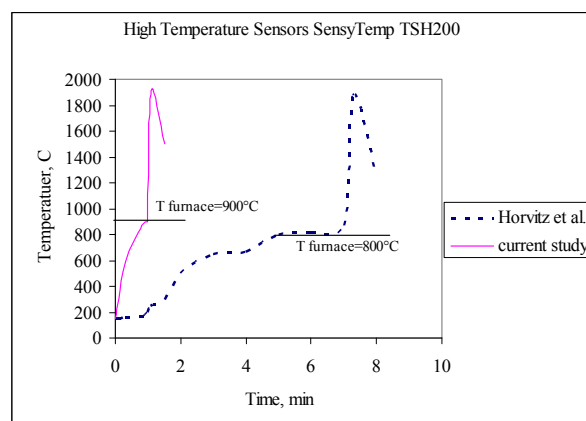
در حالت انفجاری از سنتز احتراقی، کل نمونه در یک لحظه مشتعل شده و واکنش انجام می‌شود. به نظر می‌رسد که پس از تشکیل جزایر مذاب آلومیناید تیتانیوم  $TiAl$ ، فاز جانبی  $Al_2O_3$  به اطراف رانده شده و به صورت ذرات کروی رسوب می‌کند (شکل ۳). به دلیل مواد اولیه ریز دانه، فاز  $Al_2O_3$  تشکیل شده نیز اندازه کوچک و توزیع یکنواخت دارد. همچنین واکنش در جای، نمونه در ایجاد چنین ساختاری سهیم است. به طوری که اگر حالت خود انتشاری (SHS) در آزمایش استفاده می‌شد، ممکن بود که به دلیل حرکت جبهه مذاب یک شکل  $Al_2O_3$  کشیده در راستای حرکت جبهه واکنشی ایجاد گردد. واضح است که فاز  $Al_2O_3$  به صورت کروی و یکنواخت، پتانسیل خواص مکانیکی بهتری را دارد.

### ۳-۲- تولید کامپوزیت $TiAl-Al_2O_3-Ti_2AlC$

سنتز احتراقی نمونه تهیه شده طبق واکنش (۲) جهت تولید کامپوزیت  $TiAl-Al_2O_3-Ti_2AlC$  استفاده شد. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه قبل از واکنش و محصول کامپوزیتی به دست آمده در شکل (۵) نشان داده شده است. پیک اصلی فاز  $Ti_2AlC$  در  $2\theta$  برابر  $39/475^\circ$  مشخص گردید. سایر پیک‌های  $Ti_2AlC$  در زوایای  $13/0^\circ$ ،  $34/12^\circ$ ،  $53/22^\circ$ ،  $60/82^\circ$ ،  $70/60^\circ$  و  $71/92^\circ$  در شکل مشخص شده‌اند. همچنین وجود فازهای  $TiAl$  و  $Al_2O_3$  مشاهده می‌گردد. در شکل (۵) هیچ نشانه‌ای از ایجاد فاز  $TiC$  در محصول وجود ندارد. کربن ناکافی در نمونه واکنشی و همچنین تبدیل مقداری از کربن به فاز گازی می‌تواند دلیلی برای این مسئله باشد. مکانیزم دیگری نیز ممکن است حاکم باشد. یعنی تشکیل  $TiC$  میانی حین واکنش و سپس واکنش با  $TiAl$  و ایجاد  $Ti_2AlC$  طبق واکنش زیر:



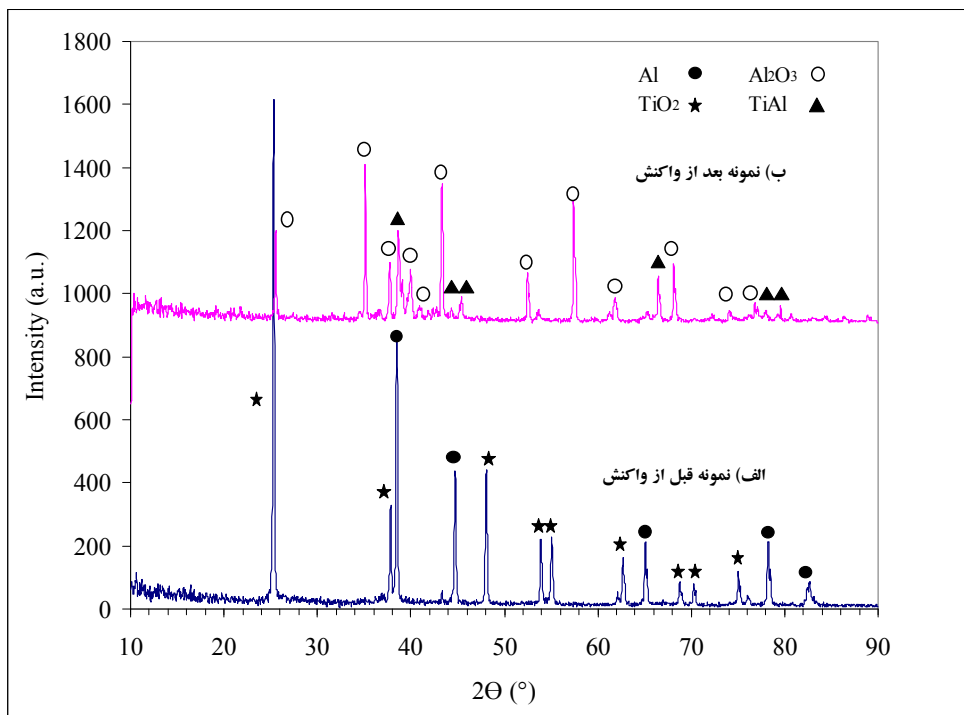
یان-لین<sup>۵</sup> و همکارانش [۹]، بیان کردند که در دمای حدود  $1100^\circ$  درجه سانتی‌گراد، کربن باعث تشکیل  $TiC$  می‌گردد و در همان زمان واکنش (۳) رخ می‌دهد. تیتانیوم با آلومینیوم واکنش کرده و گرمای زیادی حاصل می‌کند. این گرمای بالا باعث واکنش کربن با تیتانیوم واکنش نکرده شده و  $TiC$  تشکیل



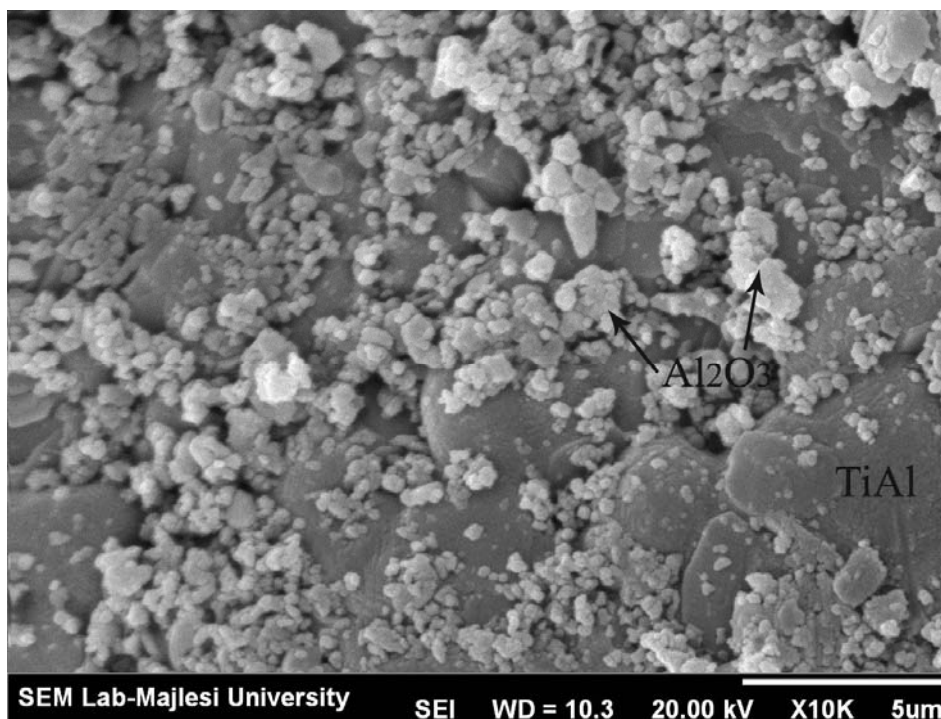
شکل (۱): مقایسه منحنی تغییرات دما برای نمونه  $3TiO_2+7Al$  در تحقیق حاضر با مرجع شماره ۸

حین واکنش،  $TiO_2$  به وسیله آلومینیوم مذاب احیا شده و آلومینیوم اضافی با تیتانیوم فلزی واکنش می‌کند. با واکنش آلومینیوم با تیتانیوم، آلومیناید تیتانیوم  $TiAl$  تشکیل شده و  $Al_2O_3$  به عنوان محصول جانبی حاصل می‌گردد. تشکیل فاز  $TiAl$  به وسیله آنالیز XRD و EDX تأیید گردید. شکل (۲) الگوی پراش اشعه ایکس نمونه اولیه و نمونه واکنش کرده را نشان می‌دهد.

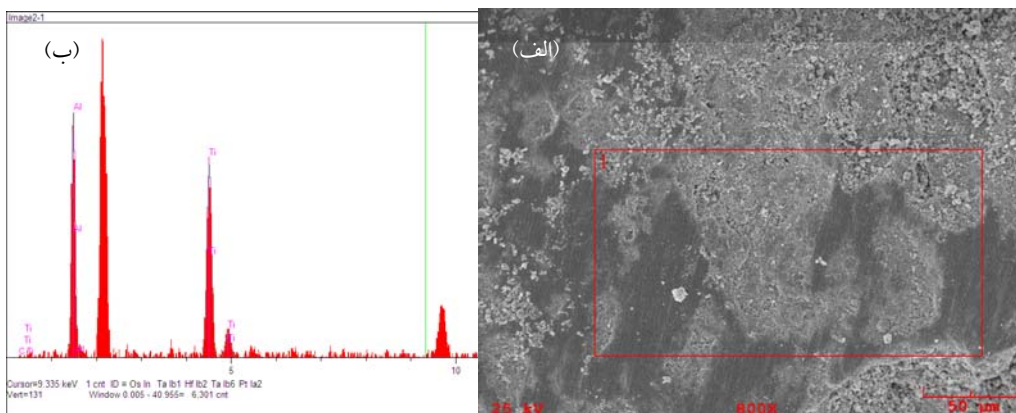
همانطور که مشاهده می‌شود، آلومیناید تیتانیوم  $TiAl$  به طور کامل تشکیل شده و هیچ پیک مربوط به  $TiO_2$  در نمودار پراش اشعه ایکس محصول وجود ندارد. پیک اصلی  $TiAl$  در زاویه  $2\theta$  برابر  $38/825^\circ$  مشخص گردید. پیک اصلی  $TiO_2$  در  $2\theta$  برابر  $25/275^\circ$  ناپدید و یک پیک در مکان نزدیک آن یعنی در زاویه  $25/575^\circ$  ظاهر گردید که مربوط به فاز  $Al_2O_3$  در محصول می‌باشد. بر اساس نتایج پراش اشعه ایکس، هیچ یک از دیگر آلومیناید‌های تیتانیوم نظیر  $Ti_2Al$  در محصول تشکیل نشدند. ریزساختار کامپوزیت به دست آمده  $TiAl-Al_2O_3$  در شکل (۳) نشان داده شده است. ذرات روشن تر  $Al_2O_3$  و نواحی تیره تر  $TiAl$  می‌باشد. بیشتر ذرات  $Al_2O_3$  (کوراندوم) اندازه دانه کوچک‌تر از  $1 \mu m$  داشته و به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. آنالیز EDX از یک ناحیه انتخابی در شکل (۴) نشان داده شده است. این آنالیز نیز تشکیل آلومیناید تیتانیوم را تأیید می‌کند.



شکل (۲): الگوی پراش اشعه ایکس نمونه  $3\text{TiO}_2 + 7\text{Al}$ ، الف) قبل از واکنش و ب) پس از واکنش.

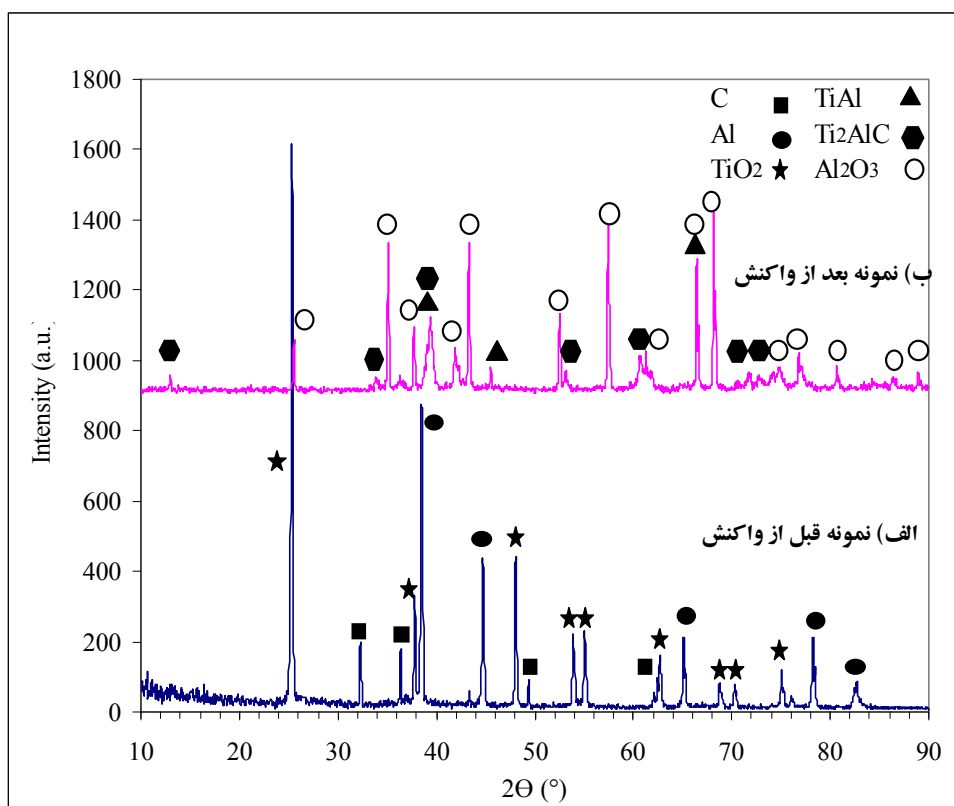


شکل (۳): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از کامپوزیت  $\text{TiAl} - \text{Al}_2\text{O}_3$ .

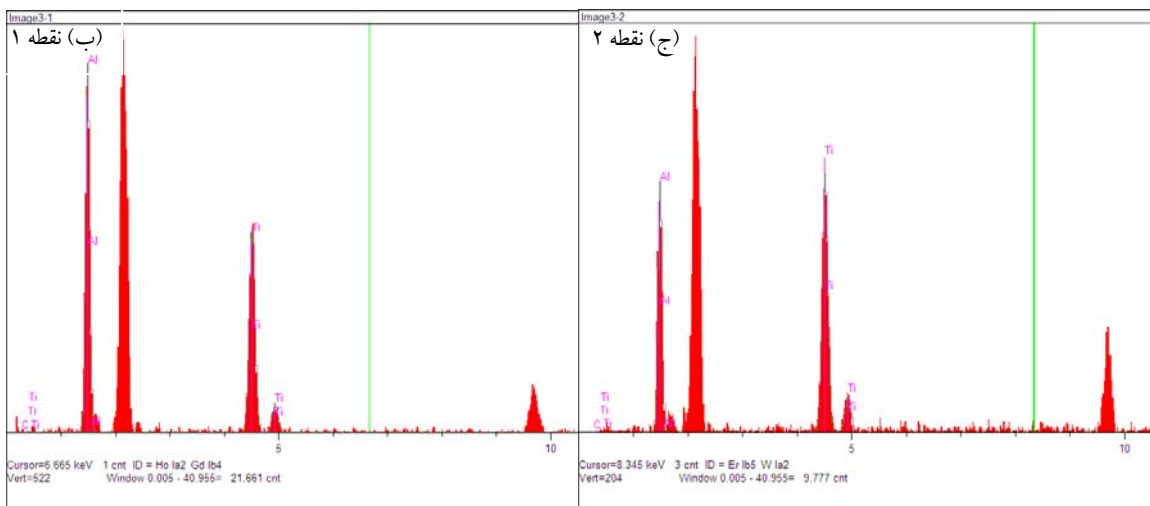
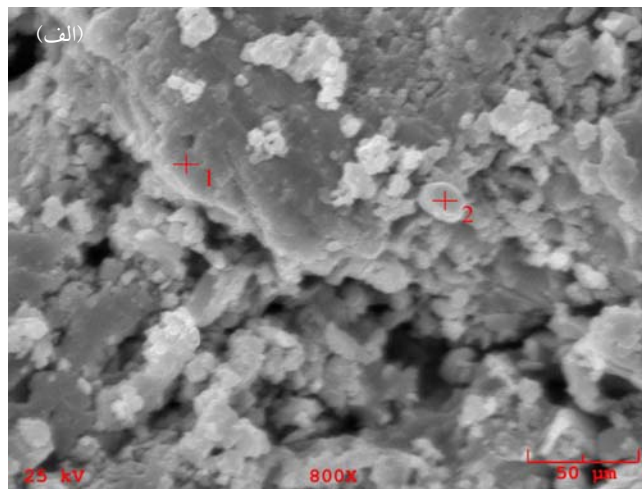


(ج)	Units	Conc	Error sig -2	Intensity (c/s)	Line	.Elt
	%.wt	صفر	صفر	صفر	Ka	C
	%.wt	۵۱/۲۶۰	۶/۱۹۱	۹۵/۸۶	Ka	Al
	%.wt	۴۸/۷۴۰	۶/۴۲۹	۱۰۳/۳۸	Ka	Ti
Total	%.wt	۱۰۰/۰۰۰	-	-	-	-

شکل (۴): (الف) ریزساختار کامپوزیت  $TiAl - Al_2O_3$ ، (ب) آنالیز EDS از ناحیه نشان داده شده در تصویر الف و (ج) ترکیب شیمیایی ناحیه نشان داده شده در تصویر الف.



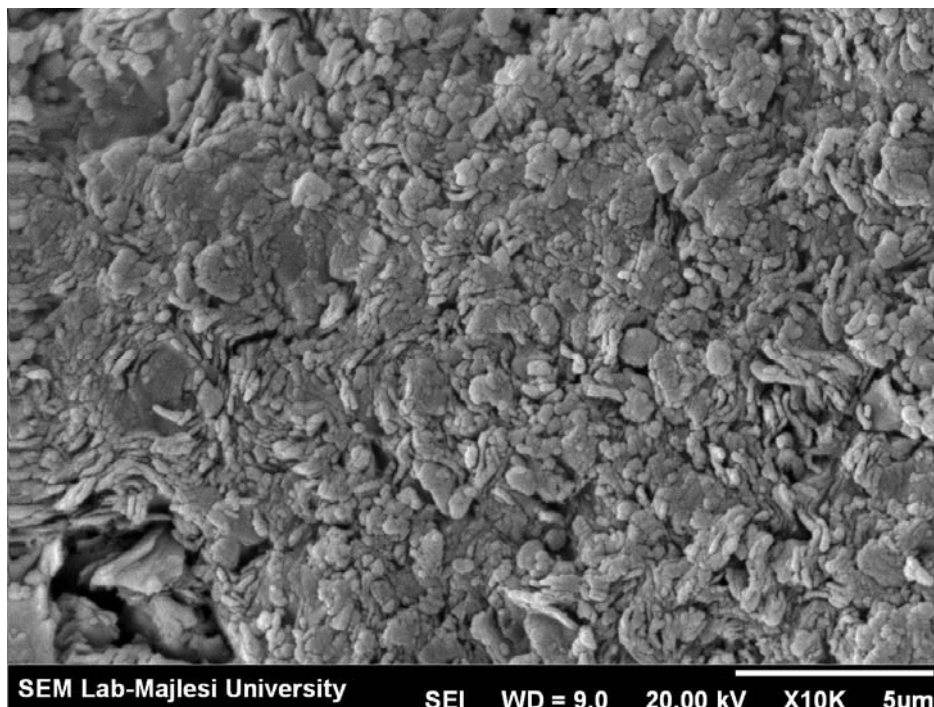
شکل (۵): الگوی پراش اشعه ایکس نمونه  $3TiO_2 + 6Al + C$  (الف) قبل از واکنش و (ب) پس از واکنش.



	Units	Conc	Error sig-2	Intensity (c/s)	Line	.Elt
	%.wt	صفر	صفر	صفر	Ka	C
	%.wt	۴۵/۹۹۴	۷/۰۸۰	۱۲۵/۳۴	Ka	Al
	%.wt	۵۴/۰۰۶	۸/۴۰۶	۱۷۶/۶۵	Ka	Ti
Total	%.wt	۱۰۰/۰۰	-	-	-	-

	Units	Conc	Error sig-2	Intensity (c/s)	Line	.Elt
	%.wt	۶/۲۶۲	۰/۸۳۹	۱/۷۶	Ka	C
	%.wt	۵۴/۳۳۵	۱۳/۷۰۶	۴۶۹/۷۴	Ka	Al
	%.wt	۳۹/۴۰۳	۱۱/۹۵۴	۳۵۷/۳۴	Ka	Ti
Total	%.wt	۱۰۰/۰۰	-	-	-	-

شکل (۶): (الف) ریزساختار کامپوزیت  $TiAl-Al_2O_3-Ti_2AlC$ ، (ب) آنالیز و ترکیب نقطه ۱ تصویر الف متناظر با  $Ti_2AlC$  و (ج) آنالیز و ترکیب نقطه ۲ تصویر الف متناظر با  $TiAl$ .

شکل (۷): تصویر SEM از کامپوزیت  $TiAl-Al_2O_3-Ti_2AlC$ .

و دانه‌های کشیده دارد. این چنین ساختاری مشابه با کامپوزیت  $Al_2O_3-Ti_2AlC$  [۳] می‌باشد.

یکی از دلایل تشکیل چنین ساختاری می‌تواند مربوط به تشکیل گازهای بر پایه کربن حین واکنش و حرکت دادن یا فشار دادن جزایر مذاب باشد که باعث تشکیل این ساختار شبه لایه‌ای با دانه‌های کشیده شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از تحقیق فوق به شرح زیر است:

۱- تولید کامپوزیت‌های  $TiAl-Al_2O_3$  و  $TiAl-Al_2O_3-Ti_2AlC$  با استفاده از پودرهای اولیه  $TiO_2$ ،  $Al$  و کربن به وسیله سنتز انفجاری در ۹۰۰ درجه سانتی گراد امکان پذیر است.

۲- حین واکنش،  $TiO_2$  به وسیله آلومینیوم مذاب احیا شده و در اثر واکنش تیتانیوم فلزی با آلومینیوم،  $TiAl$  تشکیل می‌گردد.  $Al_2O_3$  نیز محصول جانبی واکنش می‌باشد.

۳- با وجود مقادیر کربن کم در مخلوط اولیه، تشکیل مستقیم  $Ti_2AlC$  بدون ایجاد  $TiC$  میانی منطقی به نظر می‌رسد. مکانیزم

می‌گردد. این واکنش باعث افزایش بیشتر دما و انحلال  $TiC$  در زمینه  $TiAl$  می‌گردد و با سرد شدن نمونه فاز  $Ti_2AlC$  رسوب می‌کند [۹].

این مکانیزم ممکن است برای استفاده از پودرهای اولیه  $Ti$ ،  $Al$  و کربن درست باشد اما در این تحقیق حضور  $TiO_2$  و تشکیل  $Al_2O_3$  باعث ایجاد یک مانع برای دسترسی کربن به تیتانیوم و تشکیل  $TiC$  می‌گردد. همچنین همانطور که قبلاً اشاره شد، با وجود کربن کم در مخلوط اولیه، رسوب مستقیم  $Ti_2AlC$  از  $TiAl$  مذاب، در مجاورت ذرات کربن منطقی به نظر می‌رسد.

در توافق با نتایج XRD، آنالیز EDX تشکیل فازهای  $TiAl$  و  $Ti_2AlC$  در کامپوزیت را تأیید کرد (شکل ۶). آنالیز ترکیب شیمیایی از دو نقطه متفاوت در شکل نشان داده شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گیری کرد که کامپوزیت  $TiAl-Al_2O_3-Ti_2AlC$  به وسیله سنتز انفجاری در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد تولید شده است. شکل (۷) نیز ریزساختار کامپوزیت  $TiAl-Al_2O_3-Ti_2AlC$  را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ریزساختار به صورت ورقه‌ای بوده

- [7] R. Ramaseshan, A. Kakitsuji, S. K. Seshadri, N. G. Nair, H. Mabuchi, H. Tsuda, T. Matsui and K. Morii, "Microstructure and Some Properties of TiAl-Ti<sub>2</sub>AlC Composites Produced by Reactive Processing", *Intermetallics*, Vol. 7, pp. 571-577, 1999.
- [8] D. Horvitz, I. Gotman, E. Y. Gutmanas and N. Claussen, "In Situ Processing of Dense Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti Aluminide Interpenetrating Phase Composites", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 22, pp. 947-954, 2002.
- [9] C. Yan-Lin, Y. Ming, S. Yi-Ming, M. Bing-Chu and Z. Jiao-Qun, "The Phase Transformation and Microstructure of TiAl/Ti<sub>2</sub>AlC Composites Caused by Hot Pressing", *Ceramics International*, Vol. 35, pp. 1807-1812, 2009.
- [10] N. Forouzanmehr, F. Karimzadeh and M. H. Enayati, "Synthesis and Characterization of TiAl/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite by Mechanical Alloying", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 478, pp. 257-259, 2009.
- [11] C. Yang, S. Jin, C. Xu and S. Jia, "Fabrication of High-Content Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> Powders by Mechanical Alloying", *Key Engineering Materials*, Vol. 368, pp. 983-985, 2008.

#### ۶- پی نوشت

- 1- Yeh
- 2- Hot Press Aided Reaction Synthesis
- 3- Carbon Black
- 4- Horvitz
- 5- Yan-Lin

پیشنهادی بر این اساس شامل تشکیل TiAl و رسوب Ti<sub>2</sub>AlC از TiAl مذاب در مجاورت ذرات کربن می‌باشد.

۴- تصاویر SEM نشان داد که ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در کامپوزیت TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> اندازه کوچکتر از ۱  $\mu\text{m}$  داشته و به طور یکنواخت در کامپوزیت TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> توزیع شده‌اند. همچنین مشاهده گردید که کامپوزیت TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti<sub>2</sub>AlC دارای ریزساختار لایه‌ای با دانه‌های کشیده است.

#### ۵- مراجع

- [1] C. L. Yeh and R. F. Li, "Formation of TiAl-Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> and TiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in Situ Composites by Combustion Synthesis", *Intermetallics*, Vol. 16, pp. 64-70, 2008.
- [2] C. L. Yeh and Y.G. Shen, "Formation of TiAl-Ti<sub>2</sub>AlC in Situ Composites by Combustion Synthesis", *Intermetallics*, Vol. 17, pp. 169-173, 2009.
- [3] C. L. Yeh, C. W. Kuo and Y. C. Chu, "Formation of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ti<sub>2</sub>AlC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites by Combustion Synthesis in Ti-Al-C-TiO<sub>2</sub> Systems", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 494, pp. 132-136, 2010.
- [4] Ai Taotao, "Microstructure and Mechanical Properties of In-Situ Synthesized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiAl Composites", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 21, pp. 559-564, 2008.
- [5] L. M. Peng, Z. Li, H. Li, J. H. Wang and M. Gong, "Microstructural Characterization and Mechanical Properties of TiAl-Al<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>C<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC in Situ Composites by Hot-Press-Aided Reaction Synthesis", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 414, pp. 100-106, 2006.
- [6] M. J. Mas-Guindal, X. Turrillas, T. Hansen and M. A. Rodríguez, "Time-Resolved Neutron Diffraction Study of Ti-TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites Obtained by SHS", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, pp. 2975-2982, 2008.