بررسی تاثیر کاربید تیتانیوم برریزساختار و خواص نهایی کامپوزیت‌های آلومینیوم-کاربید سیلیسیم تهیه شده به روش‌های حرارت‌دهی معمولی و مایکروویو

سید احسان غسالی، رحیم یزدانی‌راد*، کیوان اسدیان، تورج عبادزاده

پژوهشگاه مواد و انرژی

تاریخ ثبت اولیه: ۹۲/۱/۲۷، **تاریخ دریافت نسخهٔ اصلاح‌شده:** ۹۲/۴/۲۲، **تاریخ پذیرش قطعی:** ۹۲/۴/۲۵

چکیده در این پژوهش تأثیر افزودنی کاربید تیتانیوم و همچنین پارامترهای سینتر بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم- کاربید سیلیسیم مورد مطالعه قرار گرفت. ذرات کاربید تیتانیوم با متوسط اندازه دانه ۵ میکرومتر و به میزان ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی به کامپوزیت آلومینیوم - ۱۵ درصد وزنی کاربید سیلیسیم اضافه شدند. نمونه‌های استحکام توسط پرس تک محور در فشار ۲۴۰ مگاپاسکال پرس و در دماهای ۶۵۰، ۷۵۰، ۸۵۰ و۹۵۰ درجه سانتیگراد در کوره معمولی به مدت ۱ ساعت و کوره مایکروویو به مدت ۱ دقیقه در بستر گرافیت سینتر شدند. چگالی نمونه ها به روش ارشمیدس محاسبه و از نمونه‌ها تست استحکام خمشی گرفته شد و در پایان الگوی پراش پرتو ایکس و مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد افزودن ذرات کاربید تیتانیوم به میزان ۷ درصد وزنی موجب افزایش استحکام خمشی به روش سینتر معمولی و سینتر مایکروویو به میزان ۱۴۰ و ۲۱۵ مگاپاسکال به ترتیب، می‌شود. نمونه‌های سینتر شده در کوره مایکروویو با توجه به صرفه جویی در زمان و انرژی، ریزساختار همگن‌تر و چگالی بیشتر را نشان می‌دهند؛ همچنین مطالعات ریزساختاری نشان‌دهنده توزیع مناسب ذرات تقویت کننده در زمینه آلومینیوم است.

کلمات کلیدی: کامپوزیت‌های آلومینیوم – کاربید سیلیسیم، کاربید تیتانیوم، سینتر مایکروویو.

The effect of TiC additive on microstructure and final properties of microwave and conventional sintered Al-SiC composite

S.E.Ghasali, R.Yazdani-rad*, K.Asadian, T.Ebadzadeh

Materials and Energy Research Center

Abstract Al-SiC-TiC composites have been produced via conventional and microwave sintering. The initial composition as: SiC 15 wt%, TiC 1, 3, 5 and 7 wt% and Al balance, were compacted with uniaxial press at 240 MPa. Green samples were subjected to sintering at 650, 750, 850 and 950°C for 1 h and 1 min in a conventional sintering method and a microwave ,respectively. Results indicated that the optimum bending strength corresponded to the sintering at 950°C for samples with 7 wt% and were 140 MPa and 215MPa for conventional and microwave sintered samples, respectively. The microwave sintered specimens showed more uniform distribution of reinforcement particles and higher density than conventional sintered ones concurrent time and energy saving. SEM studies revealed a homogeneous distribution of carbide phases within the Al matrix.

Keywords: Aluminum, Metal matrix composite, Silicon carbide, Titanium carbide, Microwave sintering.

* **عهده دار مکاتبات**

نشانی: کرج، پژوهشکده نیمه هادیها، پژوهشگاه مواد و انرژی، صندوق پستی ۳۱۷۸۷/۳۱۶

تلفن: ۰۱۹۲۶۵۸۴۹۲۵، **دورنگار:** -، **پیام‌نگار:** ryazdani@yahoo.com

۱- مقدمه

نقش مواد مهندسی در توسعه و پیشرفت فناوری غیر قابل انکار بوده بنحوی که پیدایش فناوری‌های جدید مستلزم استفاده از مواد نو است [۱]. کامپوزیت‌ها از جمله مواد مهندسی هستند که پتانسیل کاربرد در صنایع مختلف را دارا هستند؛ در چند سال اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تهیه، ساخت و توسعه کامپوزیت‌های زمینه فلزی صورت گرفته است. از جمله کامپوزیت‌های زمینه فلزی، می‌توان به کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم اشاره کرد که به دلیل خواصی چون استحکام بالا، سبکی وزن، هزینه و دمای تولید نسبتاً پایین و ... مورد توجه صنایع مختلف مانند صنایع اتومبیل سازی، صنایع هوا فضا و صنایع نظامی قرار گرفته‌اند [۲]. فلز آلومینیوم دارای مزایایی همچون انعطاف‌پذیری، سبکی، شکل پذیری و هدایت حرارتی بالا است که در کنار این مزایا، استحکام نسبتاً پایینی دارد؛ استفاده از ذرات فاز تقویت‌کننده سرامیکی همانند کاربید سیلیسیم، کاربید تنگستن، اکسید آلومینیوم و ... در زمینه آلومینیوم می‌تواند منجر به ایجاد یک ساختار سبک با استحکام بالا شود [۳].

تاکنون روش‌های مختلفی ازجمله مجموعه روش‌های ریخته‌گری، آلیاژسازی مکانیکی، متالورژی پودر و ... برای ساخت این دسته از کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۴-۶]. یکی از نکات مهم در تهیه کامپوزیت‌های زمینه فلزی، توزیع یکنواخت ذرات فاز تقویت‌کننده در فاز زمینه است که عمدتاً استفاده از روش‌های متالورژی پودر می‌تواند منجر به توزیع همگن ذرات تقویت‌کننده در فاز زمینه شود [۷-۸]. از جمله روش‌های نوین حرارت‌دهی و پخت، سینتر توسط امواج مایکروویو می‌باشد که با توجه به مزایایی همچون حرارت‌دهی همگن و صرفه جویی در مصرف انرژی و زمان، نتایج مطلوب‌تری را نسبت به سایر روش‌های مرسوم حرارت‌دهی دارد [۹].

تاکنون، پژوهش متمرکزی درمورد تأثیر همزمان ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیوم و کاربید سیلیسیم بر خواص نهایی کامپوزیت‌های آلومینیوم صورت نگرفته است که در این پژوهش خواص نهایی کامپوزیت آلومینیوم – کاربید سیلیسیم – کاربید تیتانیوم تحت دو روش حرارت‌دهی معمولی و مایکروویو مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- نحوه آزمایش

۲-۱-مواد اولیه

در این پژوهش، از پودر آلومینیوم خالص(Suvchem-901005) با خلوص ۹۹/۵ درصد و متوسط اندازه ذرات ۴۵ میکرومتر به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شد؛ همچنین ذرات فاز تقویت‌کننده مورد استفاده در این کامپوزیت پودر کاربید سیلیسیم (Aldrich-378097) با خلوص ۹۹ درصد و اندازه ذرات ۳۲ تا ۷۴ میکرومتر و کاربید تیتانیوم (Fluka-89480) با خلوص ۹۹/۵ درصد و متوسط اندازه ذرات ۲ میکرومتر بودند.

۲-۲-تهیه کامپوزیت

پودرهای اولیه با نسبت‌های وزنی ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی کاربید تیتانیوم، ۱۵ درصد وزنی کاربید سیلیسیم و بقیه آلومینیوم توسط دستگاه اسپکس (Spex-Mixer Mill 8000D) در محیط الکل مخلوط شدند که میزان مواد استفاده شده جهت تهیه این کامپوزیت در جدول (۱) نشان داده شده است؛ همچنین به منظور خروج الکل، نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد حرارت دهی و نمونه‌های مکعب مستطیلی استحکام در ابعاد ۲۵×۵×۵ میلیمتر و در فشار ۲۴۰ مگاپاسکال توسط پرس تک محور تهیه شدند. لازم به اشاره است در این پژوهش به علت فشار بالای اعمال شده توسط پرس تک‌محور و خاصیت پرس‌پذیری بالای آلومینیوم از پرس ایزواستاتیک سرد استفاده نشد.

جدول ۱. نسبت وزنی مواد اولیه جهت اختلاط.

نوع سری	آلومینیوم (درصد وزنی)	کاربید سیلیسیم (درصد وزنی)	کاربید تیتانیوم (درصد وزنی)
سری A	۸۵	۱۵	-
سری B	۸۴	۱۵	۱
سری C	۸۲	۱۵	۳
سری D	۸۰	۱۵	۵
سری E	۷۸	۱۵	۷

۲-۳-فرآیند سینتر کردن

نمونه‌ها در دماهای ۶۵۰، ۷۵۰، ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد در کوره معمولی با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه به مدت ۱ ساعت و در کوره مایکروویو با بسامد ۲/۴۵ گیگاهرتز و سرعت گرمایش ۶۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه به مدت ۱ دقیقه در بستر گرافیت سینتر شدند. جدول ۲ شناسه نمونه‌های تهیه شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲. شناسه نمونه‌ها پس از فرآیند سینتر.

سری E	سری D	سری C	سری B	سری A	دما (°C)	شرایط سینتر
EM-1	DM-1	CM-1	BM-1	AM-1	۶۵۰	کوره مایکروویو
EM-2	DM-2	CM-2	BM-2	AM-2	۷۵۰	
EM-3	DM-3	CM-3	BM-3	AM-3	۸۵۰	
EM-4	DM-4	CM-4	BM-4	AM-4	۹۵۰	
EC-1	DC-1	CC-1	BC-1	AC-1	۶۵۰	کوره معمولی
EC-2	DC-2	CC-2	BC-2	AC-2	۷۵۰	
EC-3	DC-3	CC-3	BC-3	AC-3	۸۵۰	
EC-4	DC-4	CC-4	BC-4	AC-4	۹۵۰	

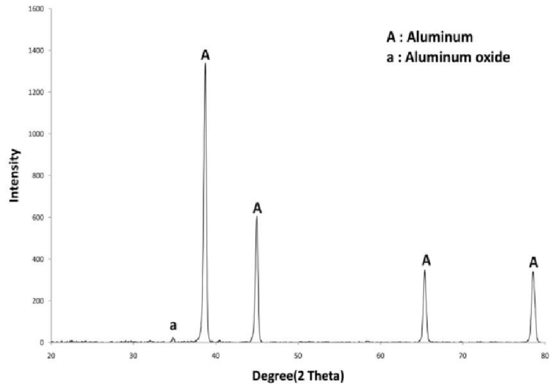
۲-۴-بررسی ویژگی‌های کامپوزیت

چگالی نمونه‌ها از روش غوطه‌وری ارشمیدس (-ASTM B962) اندازه‌گیری و استحکام خمشی نمونه‌ها توسط دستگاه Santam-STm 20 محاسبه شد. لازم به اشاره است جهت کاهش خطای اندازه‌گیری برای هر آزمون از سه نمونه استفاده شد. همچنین از نمونه‌ها آنالیز پراش پرتو ایکس (-Philips pw3710) بعمل آمد و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (Cambridge S360) تهیه گردید. لازم به اشاره است که برای تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از محلول اسید هیدروفلوریک (۰/۵ درصد) جهت اچ کردن نمونه‌ها استفاده شد.

۳-نتایج و بحث

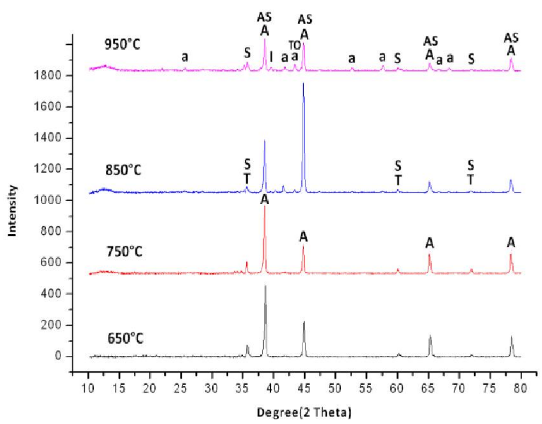
۳-۱-بررسی الگوی پراش پرتو ایکس

الگوی پراش پرتو ایکس پودر اولیه آلومینیوم در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پیک‌های آلومینیوم با شدت بالا و اکسید آلومینیوم با شدت پایین حضور دارند که وجود پیک اکسید آلومینیوم با شدت بسیار کم بیانگر حضور جزئی اکسید آلومینیوم در ماده اولیه است.



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس پودر اولیه آلومینیوم.

الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های سری E سینتر شده در کوره معمولی به علت دارا بودن بیشترین میزان کاربید تیتانیوم در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد در کوره معمولی هیچ‌گونه واکنش خاصی برای ذرات فاز تقویت-کننده با زمینه آلومینیوم وجود ندارد. با توجه به اینکه دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد کمتر از دمای ذوب آلومینیوم(۶۶۰ درجه سانتیگراد) می‌باشد و اینکه سینتر حالت جامد در این دما نوع غالب محسوب می‌شود این نتیجه دور از انتظار نیست.



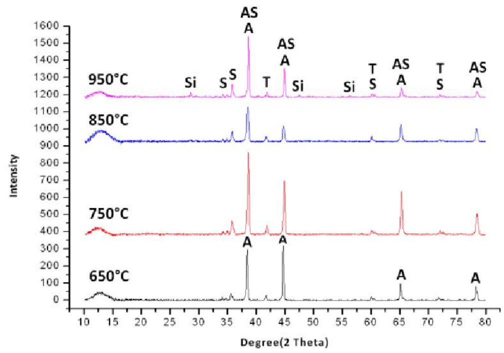
شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های سری E سینتر شده در کوره معمولی در دماهای ۶۵۰، ۷۵۰، ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد (A:آلومینیوم، a:اکسید آلومینیوم، I:کاربید آلومینیوم تیتانیوم-$Al_2Ti_4C_2$، S:کاربید سیلیسیم، AS:ترکیب بین فلزی آلومینیوم سیلیسیم-$Al_{3.21}Si_{0.47}$، T:کاربید تیتانیوم و TO:اکسید تیتانیوم - TiO_2).

با افزایش دمای سینتر، در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد نیز واکنش خاصی بین ذرات فاز تقویت‌کننده و فاز زمینه مشاهده نمی‌شود؛ لازم به اشاره است که با توجه به اینکه آنالیز دقیقی جهت بررسی فازهای موجود به میزان اندک وجود ندارد و آنالیز پراش پرتو ایکس قادر به شناسایی فازها به میزان اندک نیست امکان اظهار نظر قطعی در مورد تشکیل یا عدم تشکیل فازها مقدور نخواهد بود [۱۰]. در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد کاهش شدت پیک مرتبط با فاز آلومینیوم مشاهده می‌شود که این کاهش به دلیل ایجاد فاز بین‌فلزی $Al_{3.21}Si_{0.47}$ است. در این دما مقداری از کاربید سیلیسیم در فصل مشترک با ذرات آلومینیوم تجزیه شده و سیلیسیم حاصل از این واکنش با آلومینیوم فاز بین فلزی فوق‌الذکر را تشکیل می‌دهد[۱۱]. در چند دهه اخیر فعالیت‌های گسترده‌ای بر روی تهیه و ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم صورت گرفته است که با توجه به دمای یکسان فرآیند ساخت محصولات متفاوتی ایجاد شده است؛ K.B.Lee و همکاران محصولات واکنشی کامپوزیت آلومینیوم–کاربید تیتانیوم تهیه شده به روش نفوذ از فاز مذاب بدون فشار (Pressureless infiltration) را بررسی کردند؛ آنها اظهار داشتند که محصولات واکنشی در تهیه کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم علاوه بر دما و زمان فرآیند به پارامترهایی همچون شرایط و روش ساخت، اتمسفر محیط و حتی ترکیب اجزای کامپوزیت از جمله ترکیب آلومینیوم و فاز تقویت‌کننده و ... بستگی داشته و ایجاد محصولات واکنشی بسیار متأثر از روش ساخت است [۱۰]. در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد کاهش شدت پیک در برخی از زوایا و افزایش آن در زوایای دیگر به دلیل همپوشانی پیک‌های مرتبط با ترکیب بین فلزی و آلومینیوم زمینه می‌باشد. با افزایش دمای سینتر در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد با توجه به بهره‌گیری از بستر گرافیت در فرآیند سینتر آلومینیوم و کاربید تیتانیوم اکسید می‌شوند هر چند که ممکن است این اکسیداسیون از دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد به میزان جزیی آغاز شده باشد، ولی شدت بالاتر این پیک‌ها در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد براحتی قابل تشخیص می‌باشد. با توجه به اینکه در سیستم‌های آلومینیوم–کاربید سیلیسیم و آلومینیوم–کاربید تیتانیوم پایداری ذرات کاربید تیتانیوم بیشتر می‌باشد دور از انتظار نخواهد بود که ذرات کاربید تیتانیوم در دمای بالاتری نسبت به ذرات کاربید سیلیسیم تجزیه شده و منجر به ایجاد فاز جدیدی شوند [۱۲–۱۳]. شکل (۲) در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد تشکیل فاز کاربید آلومینیوم تیتانیوم ($Al_2Ti_4C_2$) را به میزان جزیی نشان می‌دهد [۱۴].

شکل (۳) الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های سری E را در کوره مایکروویو نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد همانند کوره معمولی تقریباً واکنش خاصی بین ذرات تقویت‌کننده و آلومینیوم زمینه رخ نداده است و حضور پیک‌های تیز (Sharp) با شدت بالا مشاهده می‌شود. در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد در کوره مایکروویو تجزیه جزیی کاربید سیلیسیم و تشکیل فاز بین‌فلزی $Al_{3.21}Si_{0.47}$ مشخص می‌باشد که با توجه به تفاوت در نوع حرارت‌دهی امواج مایکروویو نسبت به روش مرسوم و همچنین جذب بالای ذارت کاربید سیلیسیم به نظر می‌رسد که در فصل مشترک ذرات کاربید سیلیسیم با ذرات آلومینیوم، دما به صورت موضعی افزایش یافته و در دمای پایین‌تری نسبت به کوره معمولی فاز $Al_{3.21}Si_{0.47}$ تشکیل شده است. در حرارت-دهی توسط امواج مایکروویو بر خلاف حرارت‌دهی مرسوم، حرارت توسط هر یک از ذرات جاذب (کاربید سیلیسیم و کاربید تیتانیوم) تولید شده و شیب حرارتی از مغز به سطح قطعه است که این جذب توسط ذرات، سبب ایجاد یک حرارت‌دهی همگن در نمونه شده و همانطور که در بالا توضیح داده شد منجر به انجام واکنش در سطح ذرات با نیروی محرکه بیشتر در دمای پایین تر نسبت به کوره معمولی می‌شود [۱۵]. با توجه به شکل (۳) در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد نیز واکنش ترکیب بین فلزی $Al_{3.21}Si_{0.47}$ محسوس است؛ در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد تقابلی از تجزیه کاربید سیلیسیم و تشکیل ترکیب بین فلزی $Al_{3.21}Si_{0.47}$ همراه با کاهش میزان آلومینیوم زمینه جهت تشکیل ترکیب بین فلزی مشاهده می‌شود که منجر به کاهش شدت پیک مربوط به این دو ماده می‌گردد. به علت همپوشانی پیک‌های آلومینیوم و ترکیب بین فلزی در زاویه پراش نزدیک به هم، اظهار نظر قطعی در مورد کاهش شدت پیک مقدور نبوده و فقط تقابل تشکیل فاز بین فلزی و کاهش میزان آلومینیوم سبب کاهش شدت پیک‌های مربوطه شده است.

با توجه به شکل (۳) در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد تجزیه کاربید سیلیسیم به میزان بیشتری ادامه داشته است

بنحوی که مقداری از سیلیسیم حاصل از این تجزیه در ساختار کامپوزیت باقی مانده است (پیک‌های مرتبط با فاز سیلیسیم خالص).

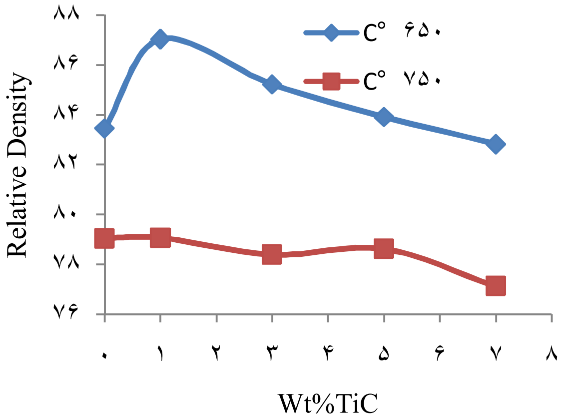


شکل ۳. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های سینتر شده سری E در کوره مایکروویو در دماهای ۶۵۰، ۷۵۰، ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد (A:آلومینیوم، S:کاربید سیلیسیم، AS:ترکیب بین فلزی آلومینیوم سیلیسیم- $Al_{3.21}Si_{0.47}$، T:کاربید تیتانیوم و Si: سیلیسیم – Si).

در این دما (۹۵۰ درجه سانتیگراد) محصولات واکنش سطحی در فصل مشترک آلومینیوم و کاربید سیلیسیم، فلز سیلیسیم نیز می‌باشد که ممکن است در این دما واکنش ایجاد ترکیب بین فلزی $Al_{3.21}Si_{0.47}$ به طور کامل انجام نشده و مقداری از سیلیسیم تجزیه شده در ساختار باقی بماند. با توجه به سرعت گرمایش بالای کوره مایکروویو نسبت به کوره معمولی و زمان سینتر بسیار کمتر، تا دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد تجزیه کاربید تیتانیوم رخ نداده است؛ همچنین همین سرعت بالای فرآیند مانع از اکسیداسیون آلومینیوم زمینه نیز گردیده که این پدیده با توجه به زمان بسیار بالاتر سینتر برای کوره معمولی نسبت به کوره مایکروویو دور از انتظار نیست.

۳-۲-بررسی اثر فرآیند سینتر کردن بر چگالی کامپوزیت

شکل (۴) چگالی نمونه‌های سینتر شده در کوره معمولی را بر حسب تغییرات میزان کاربید تیتانیوم نشان می‌دهد.



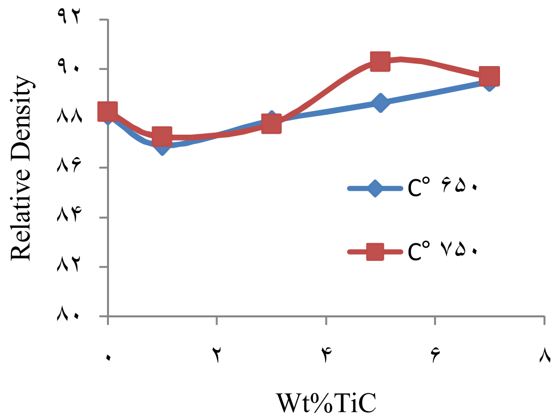
شکل ۴. نمودار چگالی نسبی بر حسب میزان تغییرات کاربید تیتانیوم نمونه‌های سینتر شده در کوره معمولی.

با توجه به تجزیه ذرات تقویت کننده و ایجاد محصولات جدید از ذکر چگالی نسبی برای دماهای ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد خودداری شد. همانطور که شکل (۴) نشان می‌دهد چگالی تمامی نمونه‌های سینتر شده در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد مقادیر بالاتری نسبت به دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد اختیار کرده‌اند. دلیل کاهش میزان چگالی در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد نسبت به دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد ذوب ذرات آلومینیوم در داخل زمینه کامپوزیت و خروج و تجمع آن‌ها در سطح نمونه به صورت قطرات ریز می‌باشد. Moutsatsou و همکاران کامپوزیت آلومینیوم تقویت شده توسط زغال سنگ را در دمای سینتر ۶۰۰ درجه سانتیگراد تهیه و تجمع قطرات مذاب آلومینیوم در سطح نمونه‌های تولیدی را گزارش نمودند [۱۶]. آنها نشان دادند که دلیل ذوب و خروج آلومینیوم از کامپوزیت کاهش دمای سینتر توسط ترکیبات کلسیم‌دار موجود در داخل زغال‌سنگ است. شکل (۵) تصویر تهیه شده از نمونه BC-2 را نشان می‌دهد که حضور قطرات منجمد شده آلومینیوم در سطح نمونه به وضوح آشکار خواهد بود.

شکل ۵. تصویر تجمع قطرات مذاب منجمد شده آلومینیوم در سطح نمونه BC-2.

با توجه به شکل (۴)، افزایش کاربید تیتانیوم به میزان ۱ درصد وزنی در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد افزایش جزیی چگالی نسبی را نسبت به کامپوزیت اولیه آلومینیوم–کاربید سیلیسیم به همراه دارد. با افزایش هرچه بیشتر فاز تقویت‌کننده کاربید تیتانیوم، کاهش مجدد چگالی در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه میزان چگالی نسبی در این دما بطور کلی پایین می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد، دمای مناسبی جهت سینتر این کامپوزیت نبوده و در این دما وجود لایه اکسیدی در سطح ذرات آلومینیوم مانع از انجام فرآیند سینتر به طور کامل می‌شود [۱۷]. به نظر می‌رسد چسبندگی مناسب‌تر ذرات کاربید تیتانیوم با زمینه آلومینیوم در درصدهای پایین (۱ درصد وزنی) منجر به افزایش چگالی نسبی شده و افزایش مجدد آن به علت خاصیت دیرگدازی در درصدهای بالاتر منجر به کاهش چگالی نسبی شده است[۱۰].

شکل (۶) تغییرات چگالی نمونه‌های سینتر شده در کوره مایکروویو بر حسب تغییرات میزان کاربید تیتانیوم در دماهای ۶۵۰ و ۷۵۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ مشخص می‌شود که افزودن کاربید تیتانیوم به میزان ۱ درصد وزنی سبب کاهش چگالی نسبی و افزایش آن تا ۵ درصد وزنی افزایش چگالی نسبی را به همراه دارد. با توجه به تفاوت در حرارت‌دهی توسط امواج مایکروویو نسبت به کوره معمولی و جذب امواج و تولید حرارت توسط ذرات تقویت کننده افزایش کاربید تیتانیوم در درصدهای بالاتر نسبت به کوره معمولی منجر به افزایش چگالی در ۷ درصد وزنی کاربید تیتانیوم در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد شده که این امر ممکن است به دلیل جذب بالای امواج مایکروویو توسط کاربید تیتانیوم باشد. ذرات کاربیدی عمدتاً از جاذب‌های خوب با میزان جذب بالا به شمار می‌روند که جذب توسط این ذرات در زمینه کامپوزیت‌ها شرایط سینتر مناسب تر و نیرو محرکه بیشتری جهت نفوذ اتم‌ها و حتی در مقیاس بزرگ‌تر حرکت و انتقال ماده جهت پر نمودن حفرات را فراهم می‌سازد[۱۸].



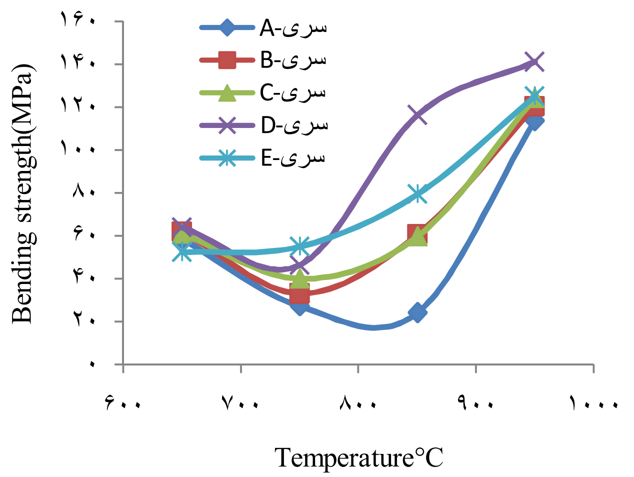
شکل ۶. نمودار چگالی نسبی بر حسب میزان تغییرات کاربید تیتانیوم نمونه‌های سینتر شده در کوره مایکروویو.

در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد با توجه به شکل (۶) بیشترین میزان چگالی نسبی مرتبط با ۵ درصد وزنی افزودنی کاربید تیتانیوم می‌باشد و همچنین مشاهده می‌شود که چگالی نسبی در دمای ۶۵۰ و ۷۵۰ درجه سانتیگراد در برخی از نقاط نمودار مقادیر نزدیک به هم دارند که این امر به دلیل تقابل خروج جزیی مذاب (نسبت به کوره معمولی) از زمینه کامپوزیت و افزایش نیرو محرکه اتم‌ها به دلیل افزایش دمای سینتر می‌باشد. در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد در کوره مایکروویو بر خلاف کوره معمولی و با توجه به زمان بسیار کوتاه فرآیند سینتر فرصت کافی برای سیلان و خروج مذاب آلومینیوم از کامپوزیت وجود ندارد و همین امر موجب بالاتر بودن میزان چگالی نسبی نسبت به کوره معمولی می‌شود؛ هرچند که با توجه به وجود لایه اکسیدی در سطح ذرات آلومینیوم شاید بتوان گفت در فواصل نزدیک به ذرات تقویت کننده، فرآیند سینتر انجام می‌شود ولی در فواصل دور از ذرات جاذب و فصل مشترک ذرات آلومینیوم با یکدیگر لایه اکسیدی مانع از انجام فرآیند سینتر شده و چگال شدن (Densification) در فصل مشترک ذرات آلومینیوم با یکدیگر رخ نمی‌دهد؛ این امر می‌تواند در مجموع پر شدن حفرات توسط فاز مایع را با مشکل مواجه کرده که عدم رسیدن به چگالی نسبی بالا را نتیجه می‌دهد[۱۹–۱۷].

۳-۳-استحکام خمشی سه نقطه‌ای

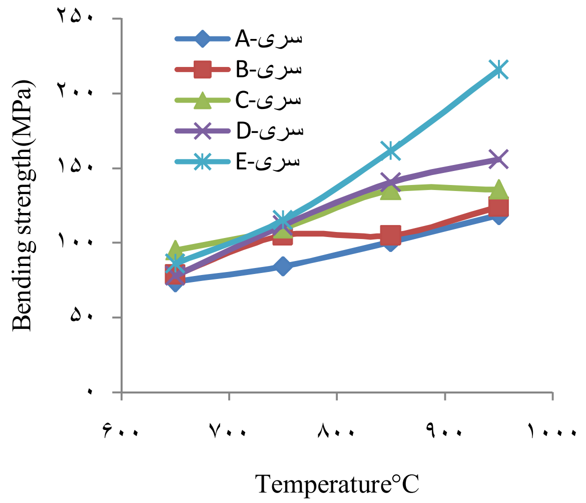
شکل (۷) و (۸) نمودار تغییرات استحکام خمشی را بر حسب دمای سینتر در کوره معمولی و مایکروویو به ترتیب

نشان می‌دهد. با توجه به ۷، افزایش دمای سینتر در کوره معمولی، افزایش استحکام خمشی را به دلیل شکل‌گیری فاز-های کاربید آلومینیوم تیتانیوم و فاز بین فلزی $Al_{3.21}Si_{0.47}$ به همراه دارد. در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد با توجه به خروج مذاب از نمونه کاهش استحکام مطابق با کاهش چگالی می-باشد؛ همچنین در شکل (۷) مشاهده می‌شود افزایش میزان کاربید تیتانیوم تا ۵ درصد وزنی با توجه به خطای اندازه‌گیری (بیشترین میزان خطای اندازه‌گیری ±۵ مگاپاسکال) منجر به افزایش استحکام شده که این مورد نیز منطبق با نتایج سایر پژوهشگران می‌باشد [۵]. با افزایش کاربید تیتانیوم تا ۷ درصد وزنی نسبت به ۵ درصد وزنی کاهش استحکام خمشی مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد این کاهش در کوره معمولی مرتبط با تجمع ذرات فاز تقویت کننده و ایجاد مراکز جوانه زنی و رشد ترک می‌باشد. لازم به اشاره است که افزایش استحکام جزیی در کامپوزیت آلومینیوم-کاربید سیلیسیم توسط فاز تقویت کننده ثانویه در دمای بالا متأثر از عوامل بسیاری همچون میزان کاربید تیتانیوم، فصل مشترک و محصولات واکنش فصل مشترک، تخلل ناشی از فرآیند و ... می‌باشد که بررسی هر یک از این عوامل به تنهایی و بدون در نظر گرفتن عوامل دیگر مقدور نیست پس می‌توان با توجه به شکل (۷)، تقابل و برآیند این عوامل را علت افزایش استحکام خمشی اشاره نمود.



شکل ۷. نمودار تغییرات استحکام خمشی بر حسب دمای سینتر در کوره معمولی.

با توجه به شکل (۸)، افزایش کاربید تیتانیوم با توجه به بیشترین خطای اندازه‌گیری ±۱۰ مگاپاسکال سبب افزایش استحکام خمشی نمونه‌ها شده که به دلیل نوع حرارت‌دهی و جذب امواج مایکروویو توسط ذرات کاربید تیتانیوم (و کاربید سیلیسیم) است. شرایط فرآیند سینتر در حضور فاز مایع در مجاورت ذرات جاذب مناسب‌تر بوده و افزایش مراکز جذب بیشتر منجر به سینتر بهتر و استحکام خمشی بالاتر شده است. همانطور که در بالا ذکر شد افزایش دمای سینتر با توجه به شکل‌گیری محصولات واکنشی استحکام بالاتر را نتیجه داده است.



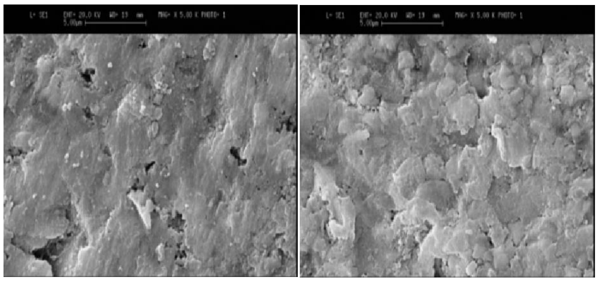
شکل ۸ نمودار تغییرات استحکام خمشی بر حسب دمای سینتر در کوره مایکروویو.

با مقایسه شکل (۷) و (۸) مشاهده می‌شود که استحکام خمشی نمونه‌های سینتر شده در کوره مایکروویو به مراتب بالاتر بوده که با توجه به سرعت بالای فرآیند سینتر توسط امواج مایکروویو و رشد محدود دانه‌ها و خروج کمتر مذاب از زمینه کامپوزیت این اختلاف موجه است.

۳-۴-بررسی تصاویرمیکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل (۹) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه-های DC-4 و EM-4 را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۹) حضور تخلل‌های کمتر در نمونه سینتر شده در کوره مایکروویو نسبت به کوره معمولی مشاهده می‌شود. همچنین اندازه دانه‌های نمونه سینتر شده در کوره مایکروویو به مراتب کوچکتر از نمونه سینتر شده در کوره معمولی بوده که این امر

به دلیل سرعت بالای فرآیند سینتر توسط امواج مایکروویو می‌باشد.



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های EC-4 (چپ) و EM-4 (راست)توسط الکترون ثانویه.

۴-نتیجه گیری

تاثیر کاربید تیتانیوم بر ریزساختار و خواص نهایی کامپوزیت‌های آلومینیوم-کاربید سیلیسیم تهیه شده به دو روش حرارت‌دهی معمولی و مایکروویو بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که افزودن فاز کاربید تیتانیوم به کامپوزیت آلومینیوم-کاربید سیلیسیم سبب بهبود خواص مکانیکی این دسته از کامپوزیت‌ها شده است. بکارگیری امواج مایکروویو جهت حرارت‌دهی منجربه بهبود چگالی و خواص نهایی کامپوزیت فوق الذکر با توجه به صرفه‌جویی در مصرف انرژی و زمان خواهد شد.

مراجع

1. V.Senthilkumar, A.Balaji, H. Ahamed, Effect of secondary processing and nanoscale reinforcement on the mechanical properties of Al-TiC composite, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering.* 10[14] (2011) 1293-1306.
2. C.N.Devi, N.Selvaraj , V.Mahesh, Micro structural aspects of Aluminium Silicon Carbide Metal Matrix Composite, *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research.* 1[2] (2012) 250-254.
3. R.S.Rana, R.Purohit, S.Das, Review of recent Studies in Al matrix composites, *International Journal of Scientific & Engineering Research.* 3[6] (2012) 1-15.
4. M.Singla, D.D.Dwivedi, L.Singh, V.Chawla, Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering.* 8[6] (2009) 455-467.
5. R.Purohit, R.S.Rana, C.S.Verma, Fabrication of Al-SiCp Composites through powder Metallurgy Process and Testing of Properties, *International Journal of Engineering Research and Applications.* 2[3] (2012) 420-437.
6. M.Asif, K.Chandra, P.S. Misra, Development of Aluminium Based Hybrid Metal Matrix Composites for Heavy Duty Applications, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering.* 10[14] (2011) 1337-1344.
7. H. Abdizadeh, M. Ashuri, P.T. Moghadam, A. N. bahadory, H. R Baharvandi, Improvement in physical and mechanical properties of aluminum/zircon composites fabricated by powder metallurgy method , *Materials and Design.* 32 (2011) 4417–4423.
8. J.M.Torralbaa, C.E.da Costab, F.Velascoa, P/M aluminum matrix composites: an overview, *Journal of Materials Processing Technology.* 133 (2003) 203–206.
9. K.Venkateswarlu, S.Saurabh, V. Rajinikanth, R.K.Sahu, A.K.Ray, Synthesis of TiN Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites Through Microwave Sintering, *Journal of Materials Engineering and Performance.* 19[2] (2010) 231-236.
10. K.B.Lee, H.S.Sim, H.Kwon, Reaction products of Al/TiC composite fabricated by the pressureless infiltration technique, *Metallurgical and materials transactions A.* 36 (2005) 2517-2527.
11. H.Wang, R.Zhang, H.Xu, H. Lu, SH.Guan, preparation of Al-based metal matrix composites reinforced by Cu coated SiC particles, *Key Engineering Materials.* 280-283 (2005) 1493-1496.
12. D.j.Lloyd, H.Lagace, A.Mcleod, P.L.Morris, Microstructural aspects of aluminium-silicon carbide particulate composites produced by a casting method, *Materials science and engineering A.* 107 (1989) 73-81.
13. A.R.Kennedy, D.P.Weston, M.I.Jones, Reaction in Al–TiC metal matrix composites, *Materials science and engineering A.* 316 (2001) 32-39.
14. T.S.Suzuki, M.Nagumo, Synthesis of TiAl-$Al_2Ti_4C_2$ composite by reaction milling, *Material science forum.* 189-194 (1995) 189-194.
15. D.E .Clark , W.H. Sutton, Processing materials with microwave energy, *Annual Review of Materials Science.* 26 (1996) 299-321.
16. A.Moutsatsou, G.S.Itskos, N.Koukouzas, P.P.Vounatsos, Synthesis of aluminum-based metal matrix composite (MMCs) with lignite fly ash as reinforcement material, *Word of Coal Ash conference*, USA. (2009) 1-12.
17. N.Chawla, J.J.Williams, R.Saha, Mechanical behavior and microstructure characterization of sinter-forged SiC particle reinforced aluminum matrix composite, journal of light metal. 2 (2002) 215-227.
18. Y.Bao, D.Jiang, L.Tian, J.Gong, Microwave sintering of SiCp/Al composite, *Key Engineering Materials*. 492 (2001) 138-141.
19. Khairaldien W.M, Khalil A.A, Bayoumi, M.R, Production of Aluminum-Silicon Carbide Composites Using Powder Metallurgy at Sintering Temperatures Above the Aluminum Melting Point, Journal of Testing and Evaluation (JTE). 35[6] (2007).