

ساخت کامپوزیت مکس فاز Ti_3SiC_2-SiC به روش سنتز درجا و غیر درجا

نوع مقاله: علمی پژوهشی

شیدا حاجی امیری^۱، مهدی قاسمی کاکرودی^{۲*}، ناصر پورمحمدی وفا^۳^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مواد - سرامیک^۲ استاد گروه مهندسی مواد^۳ دانشجوی دکتری مهندسی مواد

* mg_kakroudi@tabrizu.ac.ir

چکیده:

اخیرا دسته‌ای از ترکیب‌های سه‌تایی با ترکیب $M_{n+1}AX_n$ که به مکس فازها معروف هستند، به عنوان یک ماده نوین مورد توجه قرار گرفتند. یکی از ویژگی‌های مهم مکس فازها، خاصیت خود ترمیم‌شوندگی آنها است. دلیل اصلی مورد توجه قرار گرفتن مکس فازها، مجموعه منحصر به فردی از خواص غیر معمول شامل خواص فلزی، سرامیکی، فیزیکی، مکانیکی آنها است. یکی از این مکس فازها، ترکیب سه‌تایی Ti_3SiC_2 است. خواص مکانیکی این نوع مکس فاز را می‌توان با استفاده از تقویت‌کننده‌های مختلفی همچون کاربیدی‌ها (مانند کاربید سیلیسیم) بهبود بخشید. سختی، دمای ذوب، استحکام مکانیکی و مدول الاستیسیته بالا از ویژگی‌های بارز کاربید سیلیسیم است. همچنین مقاومت به اکسیداسیون کاربید سیلیسیم به خاطر شکل‌گیری لایه اکسید سیلیسیم بالا است. کامپوزیت Ti_3SiC_2-SiC را می‌توان از سنتز درجای مخلوط Si و TiC با نسبت استوکیومتری مناسب به روش پرس گرم تولید کرد. در این پژوهش، هدف اصلی بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت Ti_3SiC_2-SiC ساخته شده به روش درجا و مقایسه آن با کامپوزیت ساخته شده به روش غیر درجا است. از این رو، کامپوزیت‌های Ti_3SiC_2-SiC به روش درجا و غیردرجا به وسیله پرس گرم در محدوده دمایی 1400 تا 1600 °C تحت فشار 30 تا 40 MPa برای 30 تا 60 دقیقه ساخته شدند و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن شامل چگالی، سختی، استحکام خمشی و چقرمگی شکست مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. برای شناسایی فازهای تشکیل شده از الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) و بررسی ریزساختاری از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد.

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۲ دی ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۰ آبان ۱۳۹۸

کلید واژه:

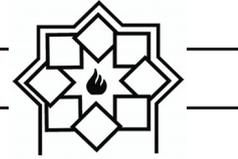
مکس فاز، کاربید تیتانیوم سیلیسیم، پرس گرم، خواص مکانیکی، سنتز درجا

۱- مقدمه

مکس فازها با فرمول عمومی $M_{n+1}AX_n$ ، نیتربدها و کاربیدهای هگزاگونال و لایه‌ای فلزات واسطه سمت چپ جدول تناوبی هستند که برای اولین بار در سال ۲۰۰۰

توسط محققى به نام بارسوم^۱ مطرح شد. در واقع عبارت MAX خلاصه شده فرمول عمومی است که در فرمول عمومی حرف M نشان دهنده یک فلز واسطه (گروه ۳ تا

^۱ Barsoum



ایزوتروپ هستند [۱]. پیوند فازهایی مانند MX ترکیبی از پیوندهای فلزی، کوالانسی و یونی است. در بیشتر مکس فازها پیوند M-A نسبتاً ضعیفتر از پیوند M-X است. به دلیل تشابه بین پیوندهای اتمی در فازهای MAX و MX، برخی از ویژگی‌ها آنها از جمله رسانایی الکتریکی، پایداری حرارتی و ضریب انبساط حرارتی کم یکسان است [۲]. از لحاظ پلیمریک فاز ۲۱۱، یک پلیمر (α)، فاز ۳۱۲، دو پلیمر (α و β) و فاز ۴۱۳، سه پلیمر (α و β و γ) دارد. تا به امروز بیش از ۶۰ نوع مکس فاز شناسایی شده است [۳]. شبکه کریستالی Ti_3SiC_2 ، یک ساختار لایه لایه شش ضلعی هگزاگونال با پارامترهای شبکه $a = 3/0665 \text{ \AA}$ و $c = 17/67 \text{ \AA}$ که شامل لایه‌های صفحه‌ای Si همراه با لایه‌های یک‌درمیان Ti فشرده نزدیک به هم که اتم‌های کربن را در مکان‌های هشت‌وجهی^۲ در بر گرفته است. شبکه کریستالی و نوع پیوندهای این ترکیب را به یک سرامیک انعطاف‌پذیر تبدیل کرده است [۴ و ۵]. دمای پایداری حرارتی Ti_3SiC_2 در اتمسفر خنثی و یا در خلاء حداقل 1700°C است [۶]. نمونه‌های پلی کریستال Ti_3SiC_2 در دمای اتاق مانند سایر سرامیک‌ها ترد و شکننده هستند، اما نمونه‌های تک کریستال این ترکیب به دلیل تغییر شکل بوسیله تشکیل باندهای کینک^۳، شکل‌پذیر هستند. کاربرد سه‌تایی Ti_3SiC_2 دارای چگالی نسبتاً کم در حدود $4/53 \text{ g/cm}^3$ و دارای رفتار مکانیکی و الکتریکی پایدار در درجه حرارت بالا است. Ti_3SiC_2 تغییر شکل پلاستیک در دمای بالا دارد. مواد پایه Ti_3SiC_2 مانند سرامیک‌های پلاستیک رفتار می‌کنند و پدیده پلاستیک را در دمای اتاق

۶، حرف A عنصری از گروه A (عمدتاً از گروه سیزده و چهارده) و X می‌تواند کربن یا نیتروژن باشد. اندیس n یکی از مقادیر یک تا سه را می‌تواند اختیار کند. به این ترتیب ترکیب‌ها M_2AX (سری ۲۱۱)، M_3AX_2 (سری ۳۱۲)، M_4AX_3 (سری ۴۱۳) شناسایی شده‌اند [۲ و ۱]. در این نوع ترکیب‌ها، لایه‌های نزدیک به هم و فشرده M توسط لایه‌هایی از عناصر گروه A از هم جدا شده و اتم‌های x بین لایه‌های M، مکان‌های اکتهدرال را پر کرده‌اند. دلیل اصلی برای میزان جلب توجه مکس فازها مجموعه‌ای از خواص منحصر به فرد شامل خواص فلزی، سرامیکی، فیزیکی، مکانیکی و کاربرد آنها است که با استفاده از پیوند کووالانسی و فلزی و مشخصات ساختاری می‌توان به آنها پی برد. از جمله خواص مکس فازها می‌توان به قابلیت ماشین‌کاری عالی، رسانایی حرارتی و الکتریکی فوق‌العاده، چگالی نسبتاً کم در حدود $4-5 \text{ g/cm}^3$ اشاره کرد. این خواص از ساختار لایه‌ای و پیوندهای کووالانسی و فلزی مکس فازها سرچشمه می‌گیرد. بنابراین از مکس فازها به دلیل ویژگی‌های دما بالایشان در صنعت هوا و فضا به عنوان سپر حرارتی استفاده می‌شود. همچنین از مکس فازها در کاربردهای الکتروشمیایی، کاربردهای دما بالا، به عنوان یک ماده زیست‌سازگار برای ارتوپدی، ایمپلنت و کاشت در دندان پزشکی، پوشش‌های محافظ، جایگزین کربن در دمای بالا، سنسور و کاربردهای دیگر استفاده می‌شود. مکس فازها خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای در دماهای بالاتر از 1000°C دارند. برخی نیز مانند Ti_3SiC_2 و Ti_4AlN_3 دارای ایزوتروپی^۱ خواص مکانیکی به همراه ویژگی‌های حرارتی

^۲ Octahedral

^۳ Kink band

^۱ Anisotropy



جدول ۱- مشخصات پودرهای تجاری استفاده شده برای

ساخت کامپوزیت مکس فاز Ti_3SiC_2-SiC

شرکت سازنده	اندازه ذرات	خلوص (درصد)	ساختار بلوری	پودر
Sigma-Aldrich	$45 \mu m$	$\geq 98\%$	هگزاگونال	Ti_3SiC_2
Merck. Co	$\leq 0.5 \mu m$	$\geq 99\%$	معکبی	SiC

در ابتدا برای تهیه مخلوط‌های پودری، پودرها با درصدهای حجمی مشخص شده در جدول ۲ وزن شده و به منظور پراکنده‌سازی مخلوط، پودرهای وزن شده به همراه اتانول با استفاده از حمام التراسونیک، پراکنده و سپس درون ظرف پلی‌اتیلنی ریخته و به همراه گلوله‌های آلومینایی به مدت یک ساعت و با سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه آسیاب شد. سپس دوغاب حاصله در خشک‌کن در دمای $70^\circ C$ به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. مخلوط پودری توسط پرس گرم تحت شرایط اتمسفر خلاء ($5 \times 10^{-2} Pa$)، دمای $1550^\circ C$ ، با زمان نگهداری ۳۰ دقیقه و فشار تک محوری ۴۰ MPa اعمال شد. پس از اتمام فرآیند گرمایش، کوره پرس گرم تا دمای محیط به صورت طبیعی سرد شد و نمونه‌ها از قالب خارج و ورقه‌های گرافیتی از آنها جدا شدند. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای ارزیابی فیزیکی و مکانیکی بر روی نمونه‌ها فرآیند پرداخت کاری مکانیکی انجام شد.

برای اندازه‌گیری چگالی و تخلخل از روش ارشمیدوس استفاده شد. برای آنالیز فازی از الگوی پراش اشعه ایکس^۵ و بررسی ریزساختاری از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۶ بهره گرفته شد. همچنین ویژگی‌های مکانیکی همچون سختی ویکرز^۷، استحکام

آشکار می‌سازند [۹-۷ و ۲]. در سال ۱۹۶۷، گروه نووتنی اولین دو فاز از رده 312 یعنی Ti_3SiC_2 و Ti_3GeC_2 را کشف کرد، که هر دوی آنها از لحاظ ساختاری مربوط به فازهای H بودند. با این وجود ساخت نمونه‌های تک فاز، بالک و متراکم Ti_3SiC_2 بسیار دشوار بود. تلاش برای سنتز آنها به صورت بالک همیشه منجر به نمونه‌هایی شد که در اغلب موارد حاوی TiC و گاهی اوقات SiC به عنوان فاز کمکی و فازهای ناخواسته جانبی وجود داشت [۶-۷ و ۱]. در سال ۲۰۱۵ ژئی^۱ و همکارانش [۱۰] با استفاده از روش پرس گرم و در سال ۲۰۱۷ جای^۲ و همکارانش [۱۱] با استفاده از روش پرس گرم واکنشی کامپوزیت مکس فاز Ti_3SiC_2-SiC را به صورت غیر درجا سنتز کردند. در سال ۲۰۱۱ لیانگ^۳ و همکارانش [۱۲] با استفاده از روش پرس گرم واکنشی و در سال ۲۰۱۲ لی^۴ و همکارانش [۱۳] با استفاده از روش پرس گرم کامپوزیت مکس فاز Ti_3SiC_2-SiC را به صورت درجا سنتز کردند. تفاوت این دو کامپوزیت در روش سنتز آنها است. کامپوزیت مکس فاز Ti_3SiC_2-SiC در روش درجا با استفاده از پودرهای TiC و Si و در روش غیر درجا با استفاده از پودرهای Ti_3SiC_2 و SiC سنتز می‌شود.

۲- مواد و روش تحقیق

در پژوهش حاضر، برای ساخت کامپوزیت مکس فاز Ti_3SiC_2-SiC به روش غیر درجا از پودرهای Ti_3SiC_2 ، SiC استفاده شد که مشخصات آنها مانند ساختار بلوری، میانگین اندازه ذرات و خلوص در جدول ۱ خلاصه شده است.

⁵ Siemens D 5000: Cu lamp, $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$, 40 kV, 30 mA و

BRUKER advance D8: Cu lamp, $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$, 40 kV, 40 mA

⁶ Scanning Electron Microscopy, (SEM: Mira3, Tescan, Czech Republic)

⁷ SCTMC, Micro Vickers Hardness Tester, HV-1000Z

¹ CAI Yan-zhi

² Yanzhi Cai

³ Baoyan Liang

⁴ Shi-Bo Li



نمونه مکس فاز خالص (Ti_3SiC_2)، تنها دارای فازهای Ti_3SiC_2 و TiC می‌باشد و هیچ فاز قابل مشاهده دیگری وجود ندارد. برای نمونه حاوی ۵ درصد حجمی کربن (Ti_3SiC_2-C) 5vol% C)، تنها فازهای شناسایی شده TiC و $TiSi_2$ و SiC است و پیک مربوط به فاز Ti_3SiC_2 قابل مشاهده نیست. فازهای شناسایی شده برای نمونه حاوی ۵ درصد حجمی کربن و سیلیسیم ($Ti_3SiC_2-5vol\%C-5vol\%Si$)، TiC ، Ti_3SiC_2 و SiC هستند. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه حاوی ۵ درصد حجمی آلومینیوم و کربن (Ti_3SiC_2-Al) 5vol% C-5vol% Al) دارای فازهای TiC و $TiSi_2$ و Ti_3SiC_2 است. فازهای شناسایی شده برای نمونه مکس فاز با ۵ درصد حجمی کربن، سیلیسیم و آلومینیوم (Ti_3SiC_2-Al) 5vol% C-5vol% Si-5vol% Al) شامل Ti_3SiC_2 ، SiC ، $Al_2Ti_4C_2$ و Si واکنش نکرده است. نتایج به دست آمده از مطالعات فازی نمونه‌های مکس فاز شامل درصدهای مختلف کربن، آلومینیوم و سیلیسیم حاکی از آن است که نمونه مکس فاز خالص (Ti_3SiC_2) تحت پرس گرم در شرایط ذکر شده (دمای $1550^\circ C$ ، فشار 40MPa و زمان 30 دقیقه) دارای کمترین فاز ناخالصی بوده و پرس گرم به حذف عوامل واکنش نکرده موجود در پودر اولیه می‌انجامد. بدین منظور برای ساخت کامپوزیت مکس فاز Ti_3SiC_2-SiC ، درصدهای مختلف SiC به پودر تهیه شده مکس فاز طبق جدول ۲ افزوده شده و تحت فرآیند پرس گرم قرار گرفت.

الگوی حاصل از پراش اشعه ایکس کامپوزیت Ti_3SiC_2-SiC 20vol% (شکل ۳)، فازهای Ti_3SiC_2 ، TiC و SiC را نشان می‌دهد که پیک اصلی این نمونه مربوط به فازهای TiC و SiC هستند. با توجه به الگوی پراش اشعه ایکس نمونه

خمشی سه نقطه‌ای^۱ و چقرمگی شکست به روش اندازه‌گیری مستقیم طول ترک با میکروسکوپ نوری^۲ اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- ترکیب پودر مواد اولیه

درصد حجمی		پودرهای اولیه
SiC	Ti ₃ SiC ₂	
۰	۱۰۰	T
۱۰	۹۰	TS10
۱۵	۸۵	TS15
۲۰	۸۰	TS20
۲۵	۷۵	TS25

۳- نتایج و بحث

پودر Ti_3SiC_2 مورد استفاده در این پژوهش، به صورت آماده تهیه شده که نتایج الگوی پراش اشعه ایکس آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

در الگوی پراش پرتو ایکس علاوه بر پیک اصلی مربوط به Ti_3SiC_2 ، فاز TiC ، فازهای Ti و Si به صورت واکنش نداد و همچنین فاز $TiSi$ دیده می‌شود. دلیل وجود چنین فازهایی را می‌توان به کامل نبودن واکنش‌های شیمیایی و فرآیند سنتز و همچنین دمای کم فرآیند نسبت داد. برای به دست آوردن پودر Ti_3SiC_2 با خلوص بالا و حذف فازهای Ti و Si کم‌کم زینترهای کربن، سیلیسیم و آلومینیوم با درصدهای متفاوت به پودر تهیه شده اضافه شدند. بدین منظور نمونه‌ها زیر فشار 40MPa در دمای $1550^\circ C$ به مدت 30 دقیقه پرس گرم شدند. بر پایه الگوی پراش پرتو اشعه ایکس مشاهده شده در شکل ۲،

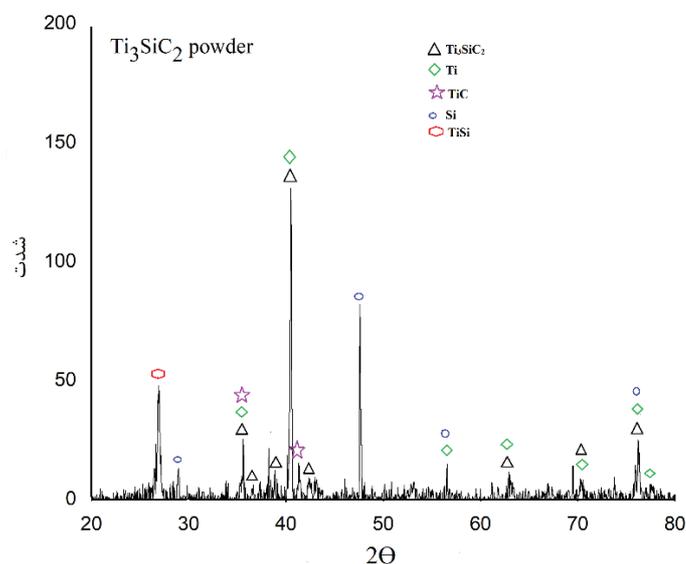
^۱ Zwich roel

^۲ مدل MA10 Eclips

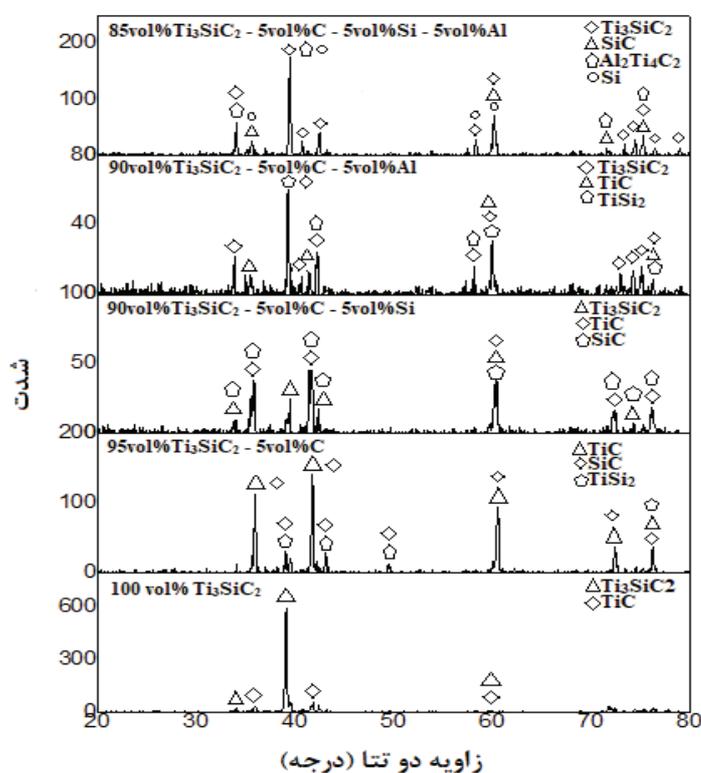


شده است. این امر نشان دهنده آن است که مقداری از Ti_3SiC_2 تجزیه شده و فاز TiC تشکیل شده است.

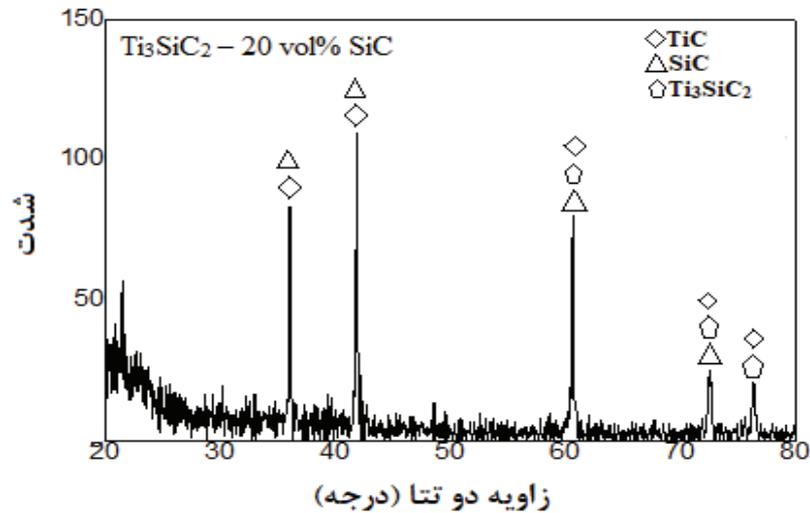
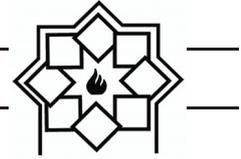
مکس فاز خالص می توان نتیجه گرفت که از شدت پیک های Ti_3SiC_2 کاسته شده و بر شدت پیک های TiC و SiC افزوده



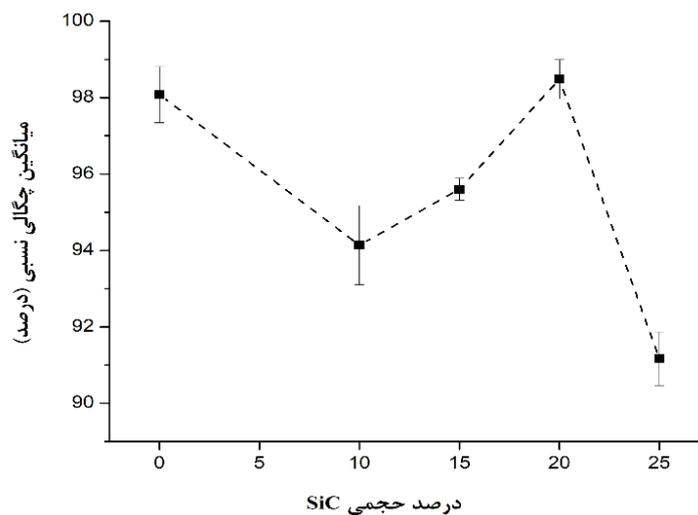
شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس پودر مکس فاز Ti_3SiC_2 خریداری شده



شکل ۲- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه های پرس گرم شده Ti_3SiC_2 با افزودنی کربن، سیلیسیم و آلومینیوم



شکل ۳- الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت $Ti_3SiC_2 - 20 \text{ vol\% SiC}$ پرس گرم شده در دمای $1550^\circ C$



شکل ۴- میانگین چگالی نسبی Ti_3SiC_2 یکپارچه و کامپوزیت $Ti_3SiC_2 - SiC$ بر حسب درصد حجمی SiC

تجزیه بخشی از Ti_3SiC_2 به TiC دانست. کاهش چگالی در نمونه حاوی ۲۵ درصد حجمی SiC را می‌توان به آگلومریزاسیون^۱ SiC و همچنین به دلیل ترک‌های ایجاد شده در اثر اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین Ti_3SiC_2 و SiC و ایجاد تخلخل نسبت داد. در جدول ۳ ویژگی‌های مکانیکی اندازه‌گیری شده برای

چگالی نسبی کامپوزیت‌های پایه Ti_3SiC_2 با درصدهای مختلف SiC در شکل ۴ نشان داده شده است. چگالی نسبی برای نمونه مکس فاز خالص برابر ۹۸ درصد اندازه‌گیری شد در حالی که بیشینه مقدار چگالی نسبی برای کامپوزیت‌های Ti_3SiC_2-SiC ، برای نمونه حاوی ۲۰ درصد حجمی SiC و برابر ۹۹ درصد به دست آمد. افزایش چگالی نسبی برای ترکیب ۱۵ و ۲۰ درصد را می‌توان ناشی از

¹ Agglomeration



را می‌توان با چگالش بالای نمونه مرتبط دانست. شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست کامپوزیت $Ti_3SiC_2-20vol\%SiC$ با دو بزرگنمایی مختلف را نشان می‌دهد که دانه‌های کشیده Ti_3SiC_2 با ساختار لایه‌لایه‌ای به راحتی قابل مشاهده است.

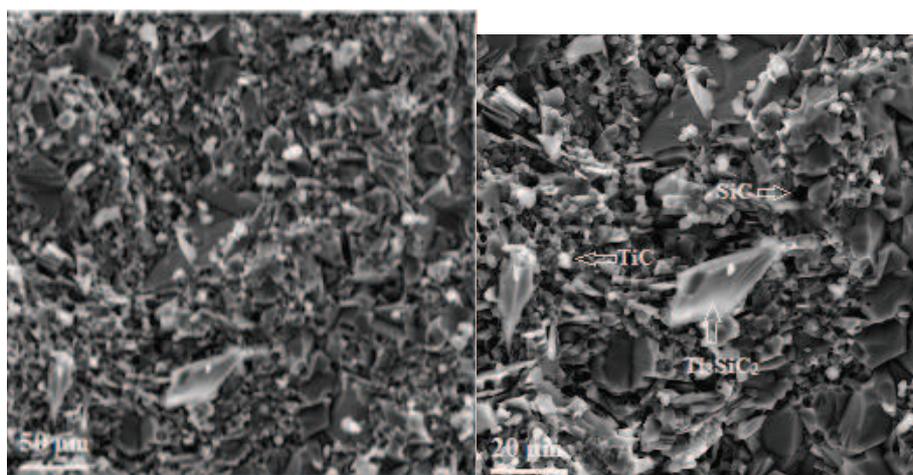
۴- نتیجه‌گیری

برای به دست آوردن پودر Ti_3SiC_2 با خلوص بالا و حذف فازهای Ti و Si باقیمانده، ترکیب‌های مختلفی با استفاده از کمک زینترهای کربن، سیلیسیم و آلومینیوم سنتز شده است.

کامپوزیت‌های $Ti_3SiC_2 - SiC$ شامل سختی و استحکام خمشی گزارش شده است. سختی نمونه مکس فاز خالص در حدود ۷ GPa است که با افزودن SiC به Ti_3SiC_2 سختی افزایش پیدا کرده و به مقداری در حدود ۱۴ می‌رسد. دلیل اصلی افزایش سختی را می‌توان به حضور ذرات SiC و TiC، که هر دو ذراتی با سختی بالا هستند، نسبت داد. بیشترین مقدار سختی مربوط به کامپوزیت $Ti_3SiC_2-20vol\%SiC$ است و همچنین این نمونه با توجه به شکل ۴ دارای بیشینه چگالی نسبی است که دلیل آن را می‌توان به وجود فاز ثانویه TiC که در اثر تجزیه حرارتی در این نمونه به وجود آمده است، نسبت داد. با توجه به جدول ۳، بیشترین مقدار استحکام خمشی مربوط به کامپوزیت $Ti_3SiC_2-15vol\% SiC$ و برابر ۲۲۲ MPa است که دلیل آن

جدول ۳- مقادیر سختی و یکرز و استحکام خمشی کامپوزیت‌های $Ti_3SiC_2 - SiC$

ترکیب	سختی (GPa)	استحکام خمشی (GPa)
Ti_3SiC_2	7.046 ± 0.073	179.86 ± 16.30
$Ti_3SiC_2 - 10vol\% SiC$	10.25 ± 1.01	127.57 ± 29.22
$Ti_3SiC_2 - 15vol\% SiC$	10.74 ± 0.45	222.08 ± 25.53
$Ti_3SiC_2 - 20vol\% SiC$	13.88 ± 1.50	142.22 ± 8.01
$Ti_3SiC_2 - 25vol\% SiC$	7.09 ± 1.36	121.60 ± 14.61



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع شکست کامپوزیت $Ti_3SiC_2-20vol\%SiC$ در دو بزرگنمایی مختلف



- Abe, "Ternary Compound Ti_3SiC_2 : Part II. Deformation and Fracture Behavior at Different Temperatures," *MATERIALS TRANSACTIONS*, vol. 43, pp. 432-435, 2002.
- [6] N. Atazadeh, M. Saeedi Heydari, H. R. Baharvandi, N. Ehsan, "Reviewing the effects of different additives on the synthesis of the Ti_3SiC_2 MAX phase by mechanical alloying technique," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 61, pp. 67-78, 2016.
- [7] I. Kero, " Ti_3SiC_2 Synthesis by Powder Metallurgical Methods," Luleå, Sweden, 2007.
- [8] F. Meng, B. Liang, M. Wang, "Investigation of formation mechanism of Ti_3SiC_2 by self-propagating high-temperature synthesis," *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 41, pp. 152-161, 2013.
- [9] J. Lis, Y. Miyamoto, R. Pampuch, K. Tanihata, " Ti_3SiC_2 -based materials prepared by HIP-SHS techniques," *Materials Letters*, vol. 22, pp. 163-168, 1995.
- [10] C. Yan-zhi, Y. Xiao-wei, Y. Hong-feng, "Effects of SiC amount on phase compositions and properties of Ti_3SiC_2 -based composites," *J. Cent. South University*, vol. 22, pp. 14-22, 2015.
- [11] Y. Cai, L. Cheng, H. Yin, X. Yin, Y. Tian, J. Chen, N. Wang, "Preparation and mechanical properties of Ti_3SiC_2/SiC functionally graded materials," *Ceramics International*, pp. 1-33, 2017.
- [12] B. LIANG, M. WANG, X. LI, Y. MU, "Fabrication and characterization of Ti_3SiC_2-SiC nanocomposite by in situ reaction synthesis of TiC/Si/Al powders," *Indian Academy of Sciences*, vol. 34, pp. 1309-1311, 2011.
- [13] Sh. Li, G. M. Song, Y. Zhou, "A dense and fine-grained $SiC/Ti_3Si(Al)C_2$ composite and its high-temperature oxidation behavior," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 32, pp. 3435-3444, 2012.

نتایج به دست آمده نشان داد که مکس فاز Ti_3SiC_2 تحت پرس گرم در دمای $1550^\circ C$ و فشار $40 MPa$ دارای فاز ناخالص کمتری است. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه حاوی 20% درصد حجمی SiC نشان دهنده فازهای Ti_3SiC_2 ، TiC و SiC است. حضور فاز TiC را می توان به حضورش در پودر اولیه Ti_3SiC_2 و تجزیه بخشی از Ti_3SiC_2 نسبت داد. بیشترین چگالی نسبی و سختی و یکپارچگی مربوط به کامپوزیت $Ti_3SiC_2-20vol\% SiC$ به دست آمد که دلیل آن را می توان به وجود فاز ثانویه TiC نسبت داد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست کامپوزیت ها، دانه های کشیده Ti_3SiC_2 با ساختار لایه لایه را نشان دادند.

مراجع

- [1] K. Kozak, M. Bucko, L. Chlubny, J. Lis, G. Antou, Th. Chotard, "Influence of composition and grain size on the damage evolution in MAX phases investigated by acoustic emission," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 743, pp. 114-122, 2019.
- [2] P. Tatarko, V. Casalegno, Ch. Hu, M. Salvo, M. Ferraris, "Joining of CVD-SiC coated and uncoated fibre reinforced ceramic matrix composites with pre-sintered Ti_3SiC_2 MAX phase using Spark Plasma Sintering," *JOURNAL OF THE EUROPEAN CERAMIC SOCIETY*, vol. 36, no. 16, pp. 3957 - 3967, 2016.
- [3] M. Radovic, M. W. Barsoum, "MAX phases: Bridging the gap between metals and ceramics," *AMERICAN CERAMIC SOCIETY BULLETIN*, vol. 92, no. 3, pp. 20-27, 2013.
- [4] X. Liu, H. Zhang, Y. Jiang, Y. He, "Characterization and application of porous Ti_3SiC_2 ceramic prepared through reactive synthesis," *Materials & Design*, vol. 79, pp. 94-98, 2015.
- [5] Z. M. Sun, Zh. Zhang, H. Hashimoto, T.