فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۸، شماره‌ی ۳، پاییز ۱۳۹۸

ساخت کامپوزیت مکس‌فاز 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

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۲ دی ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۰ آبان ۱۳۹۸

کلید واژه:

مکس‌فاز، کاربید تیتانیوم سیلیسیم، پرس گرم، خواص مکانیکی، سنتز درجا

چکیده:

اخیرا دسته‌ای از ترکیب‌های سه‌تایی با ترکیب $M_{n+1}AX_n$ که به مکس‌فازها معروف هستند، به عنوان یک ماده نوین مورد توجه قرار گرفتند. یکی از ویژگی‌های مهم مکس‌فازها، خاصیت خود ترمیم‌شوندگی آنها است. دلیل اصلی مورد توجه قرار گرفتن مکس‌فازها، مجموعه منحصر به فردی از خواص غیرمعمول شامل خواص فلزی، سرامیکی، فیزیکی، مکانیکی آنها است. یکی از این مکس‌فازها، ترکیب سه‌تایی Ti_3SiC_2 است. خواص مکانیکی این نوع مکس‌فاز 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 ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ °C تحت فشار ۳۰ تا ۴۰ MPa برای ۳۰ تا ۶۰ 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.

۱- مقدمه

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

[1] Barsoum

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.3.7.2]

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 [۱و۲]. 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 اکتاهدرال را پر کرده‌اند. دلیل اصلی برای میزان جلب توجه مکس‌فازها 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 مکس‌فازها می‌توان به قابلیت ماشین‌کاری عالی، رسانایی حرارتی و الکتریکی فوق‌العاده، چگالی نسبتا کم در حدود $4-5 g/cm^2$ اشاره کرد. این خواص از ساختار لایه‌ای و پیوندهای کووالانسی و فلزی مکس‌فازها سرچشمه می‌گیرد. بنابراین از مکس‌فازها به دلیل ویژگی‌های دما بالایشان در صنعت هوا و فضا به عنوان سپر حرارتی استفاده می‌شود. همچنین از مکس‌فازها در کاربردهای الکتروشیمیایی، کاربردهای دما بالا، به عنوان یک ماده زیست سازگار برای ارتوپدی، ایمپلنت و کاشت در دندان‌پزشکی، پوشش‌های محافظ، جایگزین کربن در دمای بالا، سنسور و کاربردهای دیگر استفاده می‌شود. مکس‌فازها خواص مکانیکی فوق العاده‌ای در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰°C دارند. برخی نیز مانند Ti_3SiC_2 و Ti_4AlN_3 دارای انیزوتروپی[1] خواص مکانیکی به همراه ویژگی‌های حرارتی ایزوتروپ هستند [۱]. پیوند فازهایی مانند MX ترکیبی از پیوندهای فلزی، کوالانسی و یونی است. در بیشتر مکس‌فازها 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 رسانای الکتریکی، پایداری حرارتی و ضریب انبساط حرارتی کم یکسان است [۲]. از لحاظ پلیمرفیک فاز ۲۱۱، یک پلیمرف (α)، فاز ۳۱۲، دو پلیمرف (α وβ) و فاز ۴۱۳، سه پلیمرف (α وβ و γ) دارد. تا به امروز بیش از ۶۰ نوع مکس‌فاز شناسایی شده است [۳]. شبکه کریستالی Ti_3SiC_2، یک ساختار لایه لایه شش ضلعی هگزاگونال با پارامترهای شبکه $a = 3/0665\ A^o$ و $c = 17/67\ A^o$ که شامل لایه‌های صفحه‌ای Si همراه با لایه های یک‌درمیان Ti فشرده نزدیک به هم که اتم‌های کربن را در مکان‌های هشت‌وجهی[2] در بر گرفته است. شبکه کریستالی و نوع پیوندها 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 ۱۷۰۰°C است [۶]. نمونه‌های پلی کریستال Ti_3SiC_2 در دمای اتاق مانند سایر سرامیک‌ها ترد و شکننده هستند، اما نمونه‌های تک‌کریستال این ترکیب به دلیل تغییر شکل بوسیله تشکیل باندهای کینک[3]، شکل‌پذیر هستند. کاربید سه‌تایی Ti_3SiC_2 دارای چگالی نسبتا کم در حدود $4/53 g/cm^2$ 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

[1] Anisotropy

[2] Octahedral
[3] Kink band

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.3.7.2]

آشکار می‌سازند [۹-۷ و ۲]. در سال ۱۹۶۷، گروه نووتنی اولین دو فاز از رده ۳۱۲ 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 ژی[1] و همکارانش [۱۰] با استفاده از روش پرس گرم و در سال ۲۰۱۷ جای[2] و همکارانش [۱۱] با استفاده از روش پرس گرم واکنشی کامپوزیت مکس‌فاز Ti_3SiC_2-SiC را به صورت غیر درجا سنتز کردند. در سال ۲۰۱۱ لیانگ[3] و همکارانش [۱۲] با استفاده از روش پرس گرم واکنشی و در سال ۲۰۱۲ لی[4] و همکارانش [۱۳] با استفاده از روش پرس گرم کامپوزیت مکس‌فاز Ti_3SiC_2-SiC را به صورت درجا سنتز کردند. تفاوت این دو کامپوزیت در روش سنتز آنها است. کامپوزیت مکس‌فاز 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 مکس‌فاز 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.

جدول ۱- مشخصات پودرهای تجاری استفاده شده برای ساخت کامپوزیت مکس‌فاز Ti_3SiC_2-SiC

پودر	ساختار بلوری	خلوص (درصد)	اندازه ذرات	شرکت سازنده
Ti_3SiC_2	هگزاگونال	≥٪۹۸	۴۵ μm	Sigma-Aldrich
SiC	معکبی	≥٪۹۹	≤ ۰/۵ μm	Merck. Co

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 ۷۰°C به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. مخلوط پودری توسط پرس گرم تحت شرایط اتمسفر خلاء (5×10^{-2} Pa)، دمای ۱۵۵۰°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 پرداخت‌کاری مکانیکی انجام شد.

برای اندازه‌گیری چگالی و تخلخل از روش ارشمیدوس استفاده شد. برای آنالیز فازی از الگوی پراش اشعه ایکس[5] و بررسی ریزساختاری از میکروسکوپ الکترونی روبشی[6] بهره گرفته شد. همچنین ویژگی‌های مکانیکی همچون سختی ویکرز[7]، استحکام

[1] CAI Yan-zhi
[2] Yanzhi Cai
[3] Baoyan Liang
[4] Shi-Bo Li

[5] Siemens D 5000: Cu lamp, λ = 1.54 Å, 40 kV, 30 mA و BRUKER advance D8: Cu lamp, λ = 1.54 Å, 40 kV, 40 mA
[6] Scanning Electron Microscopy, (SEM: Mira3, Tescan, Czech Republic)
[7] SCTMC, Micro Vickers Hardness Tester, HV-1000Z

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.3.7.2]

خمشی سه نقطه‌ای[1] و چقرمگی شکست به روش اندازه‌گیری مستقیم طول ترک با میکروسکوپ نوری[2] اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- ترکیب پودر مواد اولیه

پودرهای اولیه	درصد حجمی	
	Ti_3SiC_2	SiC
T	۱۰۰	۰
TS10	۹۰	۱۰
TS15	۸۵	۱۵
TS20	۸۰	۲۰
TS25	۷۵	۲۵

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 Si و Ti به صورت واکنش نداده 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 کمک زینترهای کربن، سیلسیم و آلومینیوم با درصدهای متفاوت به پودر تهیه شده اضافه شدند. بدین منظور نمونه‌ها زیر فشار ۴۰MPa در دمای ۱۵۵۰°C به مدت ۳۰ دقیقه پرس گرم شدند. بر پایه الگوی پراش پرتو اشعه ایکس مشاهده شده در شکل ۲، نمونه مکس‌فاز 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_2-5vol%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_2-5vol%C-5vol%Al) دارای فازهای TiC و $TiSi_2$ و Ti_3SiC_2 است. فازهای شناسایی شده برای نمونه مکس‌فاز با ۵ درصد حجمی کربن، سیلیسیم و آلومینیوم (Ti_3SiC_2-5vol%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 مکس‌فاز شامل درصدهای مختلف کربن، آلومینیوم و سیلیسیم حاکی از آن است که نمونه مکس‌فاز خالص (Ti_3SiC_2) تحت پرس گرم در شرایط ذکر شده (دمای ۱۵۵۰ °C، فشار ۴۰MPa و زمان ۳۰ دقیقه) دارای کمترین فاز ناخالصی بوده و پرس گرم به حذف عوامل واکنش نکرده موجود در پودر اولیه می‌انجامد. بدین منظور برای ساخت کامپوزیت مکس‌فاز Ti_3SiC_2-SiC، درصدهای مختلف SiC به پودر تهیه شده مکس‌فاز طبق جدول ۲ افزوده شده و تحت فرآیند پرس گرم قرار گرفت.

الگوی حاصل از پراش اشعه ایکس کامپوزیت Ti_3SiC_2–20vol%SiC (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

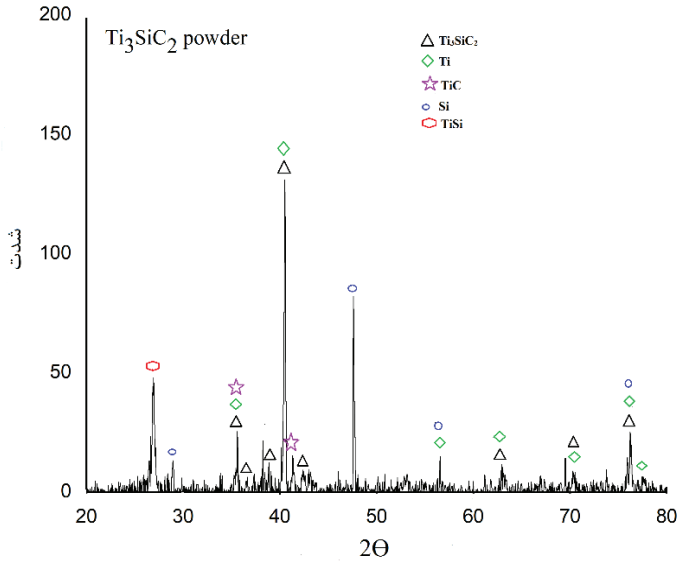
[1] Zwich roel

[2] مدل Eclips MA10

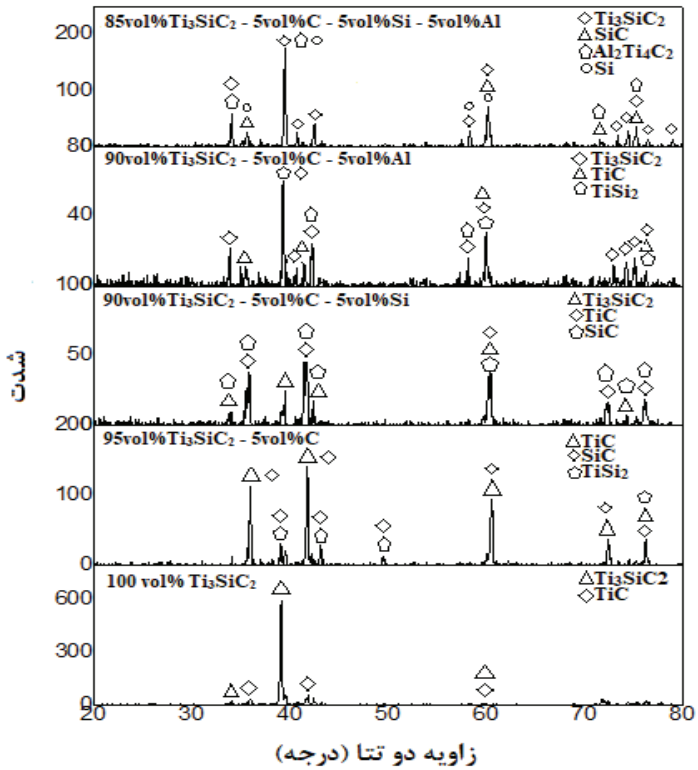
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.3.7.2]

مکس‌فاز خالص می‌توان نتیجه گرفت که از شدت پیک‌های Ti_3SiC_2 کاسته شده و بر شدت پیک‌های TiC و SiC افزوده شده است. این امر نشان دهنده آن است که مقداری از Ti_3SiC_2 تجزیه شده و فاز TiC تشکیل شده است.



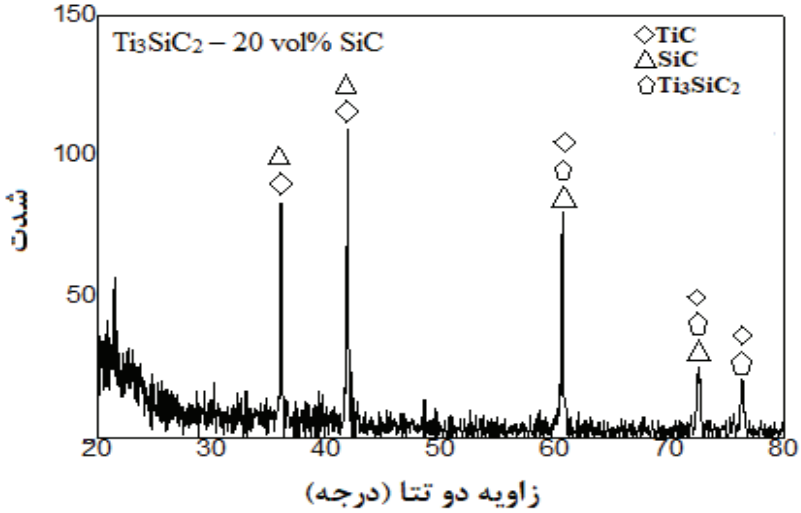
شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس پودر مکس‌فاز Ti_3SiC_2 خریداری شده



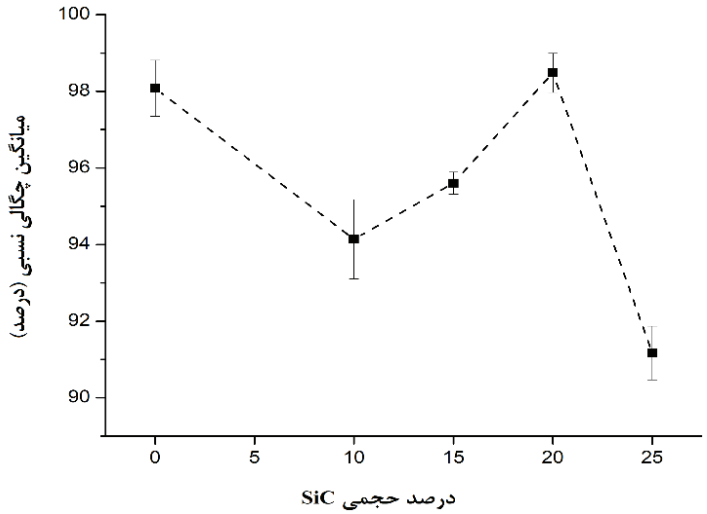
شکل ۲- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های پرس گرم شده Ti_3SiC_2 با افزودنی کربن، سیلسیم و آلومینیوم

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.3.7.2]



شکل ۳- الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت Ti_3SiC_2 – 20 vol% SiC پرس گرم شده در دمای ۱۵۵۰ °C



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

چگالی نسبی کامپوزیت‌های پایه Ti_3SiC_2 با درصدهای مختلف SiC در شکل ۴ نشان داده شده است.

چگالی نسبی برای نمونه مکس‌فاز خالص برابر ۹۸ درصد اندازه‌گیری شد در حالی‌که 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 تجزیه بخشی از Ti_3SiC_2 به TiC دانست. کاهش چگالی در نمونه حاوی ۲۵ درصد حجمی SiC را می‌توان به آگلومریزاسیون[1] SiC و همچنین به‌دلیل 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

[1] Agglomeration

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.3.7.2]

کامپوزیت‌های Ti_3SiC_2 – SiC شامل سختی و استحکام خمشی گزارش شده است. سختی نمونه مکس‌فاز خالص در حدود GPa ۷ 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 را می‌توان با چگالش بالای نمونه مرتبط دانست.

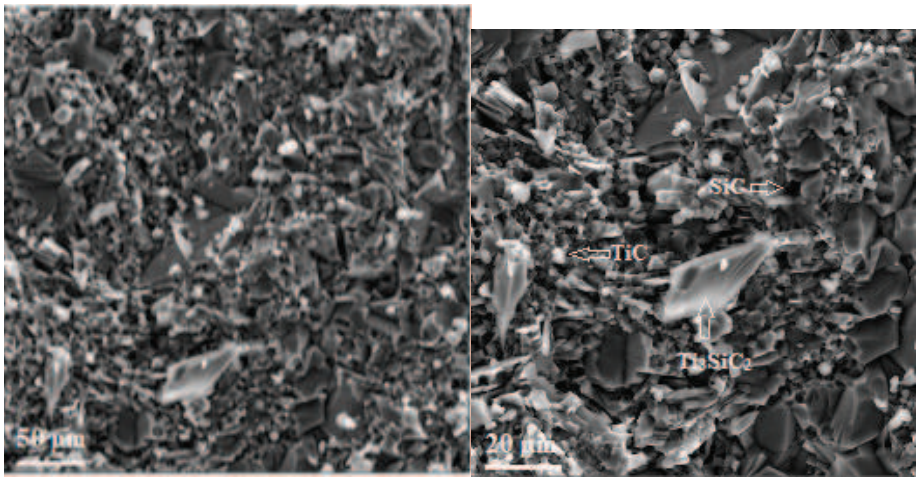
شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست کامپوزیت Ti_3SiC_2-20vol%SiC با دو بزرگنمایی مختلف را نشان می‌دهد که دانه‌های کشیده Ti_3SiC_2 با ساختار لایه‌لایه‌ای به راحتی قابل مشاهده است.

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، سیلسیم و آلومینیوم سنتز شده است.

جدول ۳- مقادیر سختی ویکرز و استحکام خمشی کامپوزیت‌های Ti_3SiC_2 – SiC

ترکیب	سختی (GPa)	استحکام خمشی (GPa)
Ti_3SiC_2	۷/۰۴۶ ± ۰/۷۳	۱۷۹/۸۶ ± ۱۶/۳۰
Ti_3SiC_2 – 10vol% SiC	۱۰/۲۵ ± ۱/۰۱	۱۲۷/۵۷ ± ۲۹/۲۲
Ti_3SiC_2 – 15vol% SiC	۱۰/۷۴ ± ۰/۴۵	۲۲۲/۰۸ ± ۲۵/۵۳
Ti_3SiC_2 – 20vol% SiC	۱۳/۸۸ ± ۱/۵۰	۱۴۲/۲۲ ± ۸/۰۱
Ti_3SiC_2 – 25vol% SiC	۷/۰۹ ± ۱/۳۶	۱۲۱/۶۰ ± ۱۴/۶۱



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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.3.7.2]

نتایج به دست آمده نشان داد که مکس‌فاز Ti_3SiC_2 تحت پرس گرم در دمای ۱۵۵۰°C و فشار ۴۰MPa دارای فاز ناخالص کمتری است. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه حاوی ۲۰ درصد حجمی SiC نشان دهنده فازهای Ti_3SiC_2، TiC و SiC است. حضور فاز TiC را می‌توان به حضورش در پودر اولیه Ti_3SiC_2 و تجزیه بخشی از Ti_3SiC_2 نسبت داد. بیشترین چگالی نسبی و سختی ویکرز مربوط به کامپوزیت Ti_3SiC_2–20vol% SiC به دست آمد که دلیل آن را می‌توان به وجود فاز ثانویه TiC نسبت داد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست کامپوزیت‌ها، دانه‌های کشیده Ti_3SiC_2 با ساختار لایه‌لایه 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. 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.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.3.7.2]