

ارزیابی فازی ترکیبات آلیاژی و کامپوزیتی شده‌ی دی سیلیساید مولیبدن با آلومینیوم و کاربید تیتانیوم

پوریا صفایی*، غلامحسین برهانی و سعیدرضا بخشی
دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۴/۱۲ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۰۸/۲۵)

MoSi₂/20Vol% TiC

MoSi₂

MoSi₂-xAl/20Vol%TiC

MoSi₂-x Al

چکیده-

Mo(Si,Al)₂

واژگان کلیدی:

Phase Evaluation of Alloyed and Composed Molybdenum disilicide by Al and TiC

P. Safaie*, G. H. Borhani and S. R. Bakhshi

Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology

Abstract: In this study, pure powders such as molybdenum, silicon, aluminum and titanium carbide were utilized to produce MoSi₂ compound, MoSi₂ /20 Vol % TiC composite, MoSi₂-x Al alloyed compound and MoSi₂-x Al/20 Vol % TiC alloyed composite. The initial powders were mixed in specified ratios, and then, were activated by mechanical milling. Milled powders were compacted, synthesized and sintered in the temperature range of 1100 -1400 °C. SEM was used to investigate the microstructural change and XRD for identification of phases. Effect of aluminum addition on phase formation was investigated. Addition of aluminum by over 9 atomic percent resulted in the formation of Mo(Si,Al)₂ in alloyed matrix.

Keywords: Molybdenum disilicide, Composite, Aluminum, Titanium carbide.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: pouriadaneshjo@gmail.com

۱- مقدمه

برخی از اتم های Si با Al در ترکیب MoSi_2 وجود دارد. در این حالت فاز $\text{Mo}(\text{Si},\text{Al})_2$ با ساختار هگزاگونال C40 تشکیل می شود [۱۹ و ۲۰]. بسته به میزان آلومینیم جانشین شده به جای سیلیسیم، فاز زمینه می تواند ساختار تتراگونال C11_b یا هگزاگونال C40 و یا ترکیبی از این دو فاز را داشته باشد [۲۱]. حضور کاربید تیتانیوم در زمینه MoSi_2 نیز سبب بهبود استحکام خمشی، چقرمگی شکست و سختی کامپوزیت های $\text{MoSi}_2\text{-TiC}$ در مقایسه با ترکیب MoSi_2 شده است [۹]. با وجود تاثیرات مثبت افزودن Al و TiC بر MoSi_2 گزارشی در خصوص افزودن هم زمان این دو ماده وجود ندارد. در این تحقیق اثر افزودن هم زمان آلومینیم و کاربید تیتانیوم بر MoSi_2 بررسی شد.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از پودرهای خالص مولیبدن، سیلیسیم و آلومینیم مطابق با جدول (۱) استفاده شد. پودرها با نسبت های وزنی مشخص مطابق با ترکیبات استکیومتری نشان داده شده در جدول (۲) با یکدیگر مخلوط شده و توسط دستگاه آسیاب کاری مکانیکی آسیاب شدند. عملیات آسیاب با سرعت ۶۵ دور بر دقیقه، نسبت گلوله به پودر ۱:۲۰، مدت زمان ۲۰ ساعت و تحت اتمسفر گاز آرگون در دمای محیط صورت گرفت. از پودر اسید استاریک خشک به میزان ۰/۵ درصد وزنی به عنوان روان کار برای جلوگیری از کلوخه شدن ذرات و کنترل جوش سرد در کلیه مخلوط های پودری استفاده شد. پودرهای آسیاب شده در داخل کوره ی تحت خلاء 10^{-2} تور^۱ و در مدت زمان ۱/۵ ساعت و در دمای ۳۵۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد، گاز زدایی و سپس در فشار ۵۵۰ مگاپاسکال به نمونه هایی به شکل دیسک به ضخامت ۵ میلی متر و قطرهای ۱۵ و ۲۵ میلی متر تبدیل شدند. نمونه های پرس شده به مدت ۷ ساعت در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد با نرخ گرمایش ۱۱ درجه سانتی گراد بر دقیقه، تحت تأثیر گاز محافظ آرگون، در کوره نگه داری

ترکیب بین فلزی MoSi_2 دارای خواص ویژه ای نظیر نقطه ذوب بالا (۲۰۳۰ درجه سانتی گراد)، مقاومت به اکسیداسیون عالی در دمای بالا تشکیل لایه محافظ و چسبندگی SiO_2 ، مقاومت سایشی خوب به دلیل سختی و مدول الاستیک بالا [۱]، هدایت الکتریکی و گرمایی بالا، چگالی نسبتاً پایین (۶/۲۴ گرم بر سانتی متر مکعب) [۲]، انعطاف پذیری خوب در دمای بالا [۳] و ضریب انبساط حرارتی نسبتاً پایین است [۴-۶]. اما مشابه سایر ترکیبات بین فلزی در دماهای زیر ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد استحکام و چقرمگی شکست و در دماهای بالای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد مقاومت به خزش آن پایین است [۷]. هم چنین مقاومت به اکسیداسیون این ماده در محدوده ۶۰۰-۴۰۰ درجه سانتی گراد کم بوده و ممکن است کل ماده به یکباره تخریب شود [۵]. در دهه های گذشته تحقیقات زیادی برای بهبود این محدودیت ها انجام گرفته است. اضافه کردن تقویت کننده ها برای دست یابی به یک ریز ساختار چند فازی یکی از راه های بهبود خواص می باشد. در همین راستا گزارش های زیادی مبنی بر بهبود خواص کامپوزیت های پایه ی MoSi_2 تقویت شده توسط تقویت کننده های سرامیکی گزارش شده است [۸-۱۰]. استفاده از افزودنی های فلزی و جانشین شدن آنها در موقعیت اتم های Si و Mo در شبکه ی بلوری و آلیاژی کردن ترکیب MoSi_2 ، یکی دیگر از راه های بهبود خواص آن است. از جمله ای این افزودنی ها می توان به عناصر V, Al, Mg, Nb اشاره کرد [۱۱-۱۴]. در این میان Al بیش تر مورد توجه قرار گرفته است [۱۵-۱۷]. فاز MoSi_2 با ساختار C40 یک فاز پایدار در دمای محیط نیست، ولی احتمال پایدار شدن این فاز با اضافه شدن V, Cr, Nb, Ta و Al وجود دارد [۱۸]. با ارزیابی ترمودینامیکی سیستم Mo-Si-Al می توان انتظار داشت که حضور Al و نفوذ آن در ترکیب MoSi_2 سبب ایجاد خواص بهینه شود. در صورت مخلوط سازی نسبت مشخصی از مواد اولیه مولیبدن، سیلیسیم و آلومینیم امکان جایگزینی

جدول ۱- متوسط اندازه دانه مواد اولیه

نوع پودر	متوسط اندازه دانه
سیلیسیم	۶ میکرون
مولیبدن	۵ میکرون
آلمینیم	۲۷ میکرون
کاربید تیتانیوم	۹ میکرون

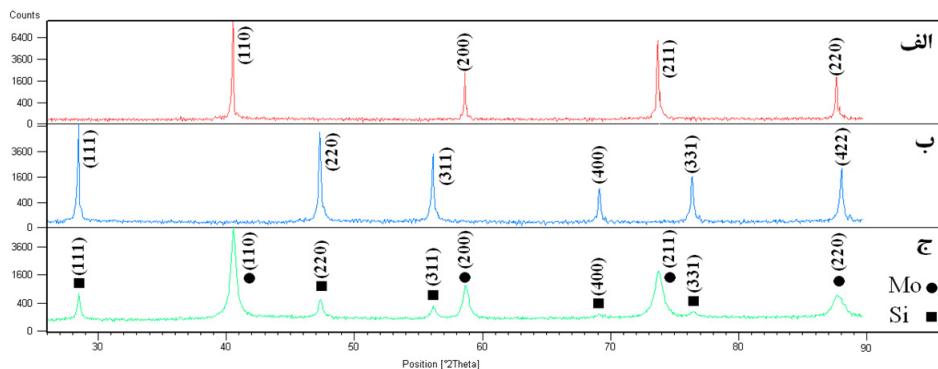
جدول ۲- ترکیب شیمیایی نمونه‌های مورد بررسی

شماره نمونه	ترکیب شیمیایی نمونه‌ها بر حسب درصد وزنی	ترکیب شیمیایی مورد نظر بر اساس ترکیب استوکیومتری
۱	63Mo-37Si	MoSi ₂
۲	61.45Mo-36.1Si-2.45Al	MoSi ₂ -4.5at%Al
۳	59.85Mo-35.15Si-5Al	MoSi ₂ -9at%Al
۴	58.175Mo-34.15Si-7.675Al	MoSi ₂ -13.5at % Al
۵	49.538Mo-29.094Si-21.368TiC	MoSi ₂ /20Vol%TiC
۶	48.149Mo-28.286 Si-1.92Al-20.645TiC	MoSi ₂ -4.5at%Al/20Vol%TiC
۷	46.721Mo-27.439 Si-3.903Al-21.937TiC	MoSi ₂ -9at%Al/20Vol % TiC
۸	45.246Mo-26.56 Si -5.969Al -22.225TiC	MoSi ₂ -13.5at % Al/20Vol % TiC

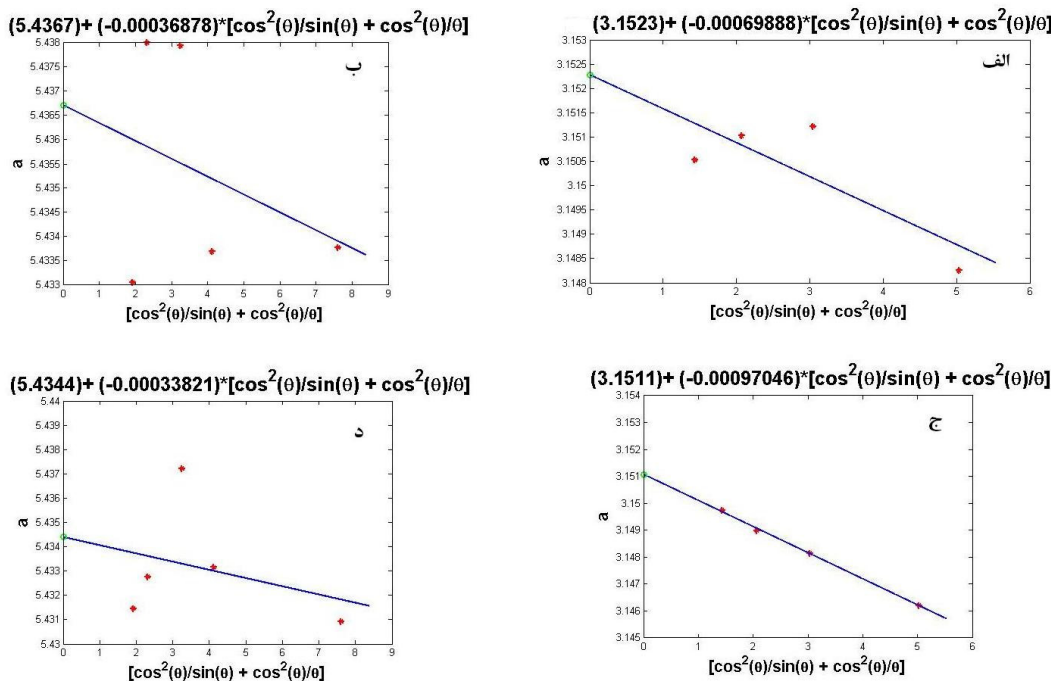
۳- نتایج و بحث

در شکل (۱) الگوی پراش پرتو ایکس پودر اولیه مولیبدن، پودر اولیه سیلیسیم و مخلوط پودری MoSi₂-4.5at%Al بر حسب درصد وزنی پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری نشان داده شده است. مشخص است که آسیاب کاری مکانیکی موجب کاهش شدت و افزایش عرض پیک‌های هر دو عنصر Mo و Si شده که توسط سایر محققان نیز گزارش شده است [۲۲]. کاهش ارتفاع پیک‌های سیلیسیم بیشتر از پیک‌های مولیبدن اتفاق افتاده است، به طوری که پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری تمامی پیک‌های مولیبدن کاملاً واضح‌تر به نظر می‌رسند. پارامتر شبکه مولیبدن و سیلیسیم قبل و بعد آسیاب کاری از معادله‌ی نلسون-ریلی تعیین شد که نتایج این محاسبات در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به رفتار پیک‌ها جابه‌جایی در آن‌ها صورت

شدند تا عمل سنتز و بخشی از سینتر در نمونه‌ها انجام شود. نمونه‌های سنتز شده در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد دوباره با نرخ گرمایش ۲۲ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در اتمسفر گاز محافظ آرگون و به مدت ۳ ساعت تحت عملیات سینتر تکمیلی قرار گرفتند. برای بررسی فازهای تشکیل شده در نمونه‌ها از دستگاه پراش پرتوی ایکس با اشعه‌ی تک فام Cu K α در طول موج ۱/۵۴۲ انگستروم استفاده شد. زمان هر گام یک ثانیه و اندازه‌ی هر گام ۰/۰۵ درجه است و محدوده‌ی مورد بررسی از ۲۰ تا ۱۰۰ درجه انتخاب شد. پارامتر شبکه مولیبدن و سیلیسیم قبل و بعد آسیاب کاری توسط معادله‌ی نلسون-ریلی تعیین شد. به منظور مشاهده و بررسی ریزساختار و تعیین اندازه‌ی ذرات پودرهای اولیه و محصولات آسیاب کاری شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.



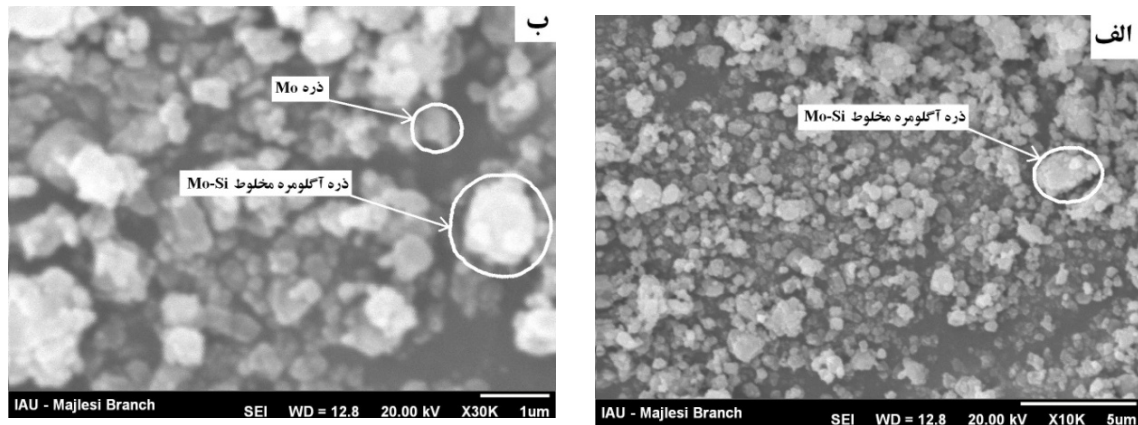
شکل ۱- الگوهای پراش پرتو ایکس (الف) پودر مولیبدن اولیه (ب) پودر سیلیسیم اولیه و (ج) مخلوط پودری Mo-35.15Si-5Al به صورت وزنی پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری مکانیکی



شکل ۲- نمودار تعیین پارامتر شبکه با توجه به معادله‌ی نلسون-ریلی (الف) مولیبدن اولیه (ب) سیلیسیم اولیه (ج) مولیبدن پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری و (د) سیلیسیم پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری

مولیبدن ۰/۱۳۶۳ نانومتر و سیلیسیم ۰/۱۳۲ نانومتر گزارش شده [۲۳]. با توجه به اختلاف شعاع اتمی، در صورت انحلال و ورود سیلیسیم به شبکه‌ی مولیبدن پیک‌های آن باید به

نگرفته و پارامتر شبکه سیلیسیم و مولیبدن تغییر نکرده است که این نشان می‌دهد که در طول آسیاب کاری مکانیکی هیچ گونه انحلالی در سیستم اتفاق نیفتاده است. شعاع اتمی



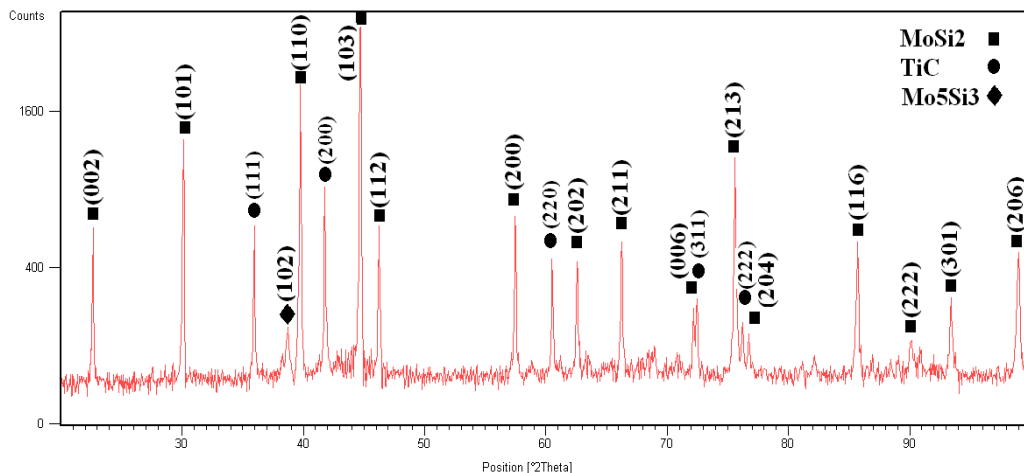
شکل ۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مخلوط پودری $37\% \text{ Si} - 63\% \text{ wt Mo}$ پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری مکانیکی در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت

دارد [۲۶]. در شکل (۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مخلوط پودری مولیبدن و سیلیسیم با نسبت استوکیومتری MoSi_2 پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری مکانیکی را نشان می‌دهد. توزیع مناسب ذرات و کاهش اندازه‌ی ذرات نسبت به پودرهای اولیه به وضوح قابل مشاهده است. به طور پراکنده یک سری از ذرات به صورت آگلومره‌اند. هر چه ذرات ریزتر شوند امکان آگلومره شدن آنها بیش‌تر می‌شود [۲۷]. متوسط اندازه ذرات پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری در حدود یک میکرون اندازه‌گیری شد. شکل (۳-ب)) ریزساختار ذرات را با ابعاد بزرگ‌تر نشان داده است که هر ذره نشانه‌ای از مجموعه ذرات ریزتر است و این حالت مخصوص ذرات پس از آسیاب کاری است. به عبارتی شکل (۳-ب) آستانه‌ی آلیاژ شدن یا ترکیب ذرات بسیار ریز را نشان می‌دهد.

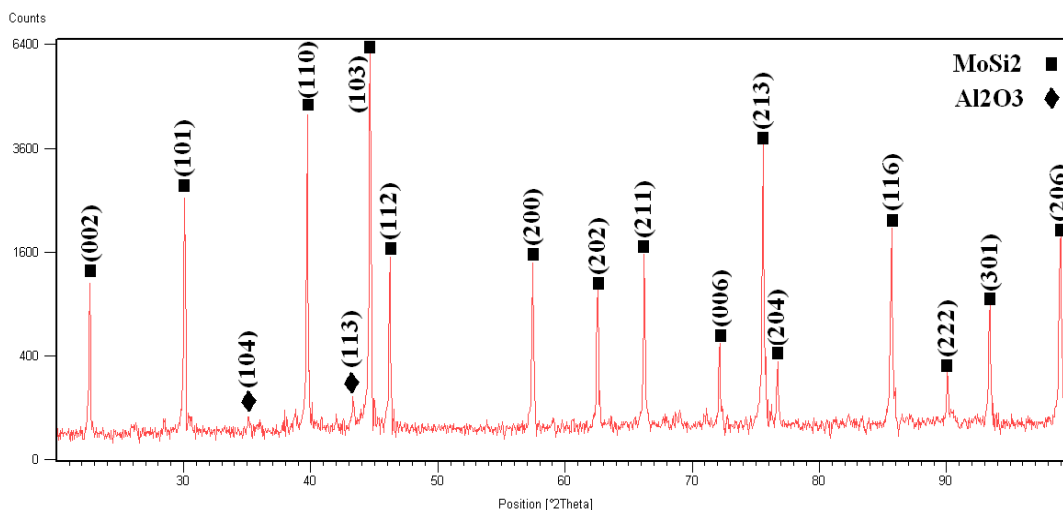
در شکل (۴) الگوی پراش پرتو ایکس کامپوزیت $\text{TiC} / 20\text{Vol} \% \text{MoSi}_2$ ارائه شده است. پیک‌های مربوط به فازهای MoSi_2 با ساختار تتراگونال C11_b و TiC با ساختار مکعبی به وضوح مشخص شده است. پیک‌های مربوط به عناصر Si و Mo کاملاً از بسین رفته، فاز MoSi_2 در

سمت زوایای بیش‌تر جابه‌جا می‌شد. تنها اثر آسیاب کاری می‌تواند در کوچک کردن اندازه دانه‌ها و همگن سازی پودرها باشد.

از الگوی پراش پرتو ایکس به نظر می‌رسد کاهش ارتفاع پیک‌های سیلیسیم بیش‌تر از پیک‌های مولیبدن اتفاق افتاده است، به طوری که پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری تمامی پیک‌های مولیبدن کاملاً واضح‌تر به نظر می‌رسند. دلیل این را می‌توان به بالا بودن ضریب جذب مولیبدن نسبت به سیلیسیم و ایجاد روکشی از مولیبدن بر روی سیلیسیم در حین آسیاب کاری نسبت داد که منجر به جذب بیش‌تر پرتو ایکس توسط مولیبدن می‌شود [۲۴]. از آنجایی که در مقادیر کم‌تر از ۶٪ وزنی نمی‌توان پیک‌های واضحی از عنصر یا ترکیب در تحلیل پرتو ایکس را مشاهده کرد [۲۵]، عنصر Al نیز در الگوی پراش پرتو ایکس قابل شناسایی نیست. سیلیسیم یک فاز ترد و مولیبدن فازی نرم است و مولیبدن فاز نرم موجود در سیستم از همان ابتدا در معرض ضربه و تغییر شکل قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد در آغاز آسیاب کاری مرحله‌ی اول ذرات پودر مولیبدن در اثر نیروی فشاری ناشی از برخورد گلوله‌ها مسطح می‌شوند و در ادامه‌ی عملیات آسیاب، کاهش جوش سرد بین ذرات و ریز شدن بیشتر ذرات را به همراه



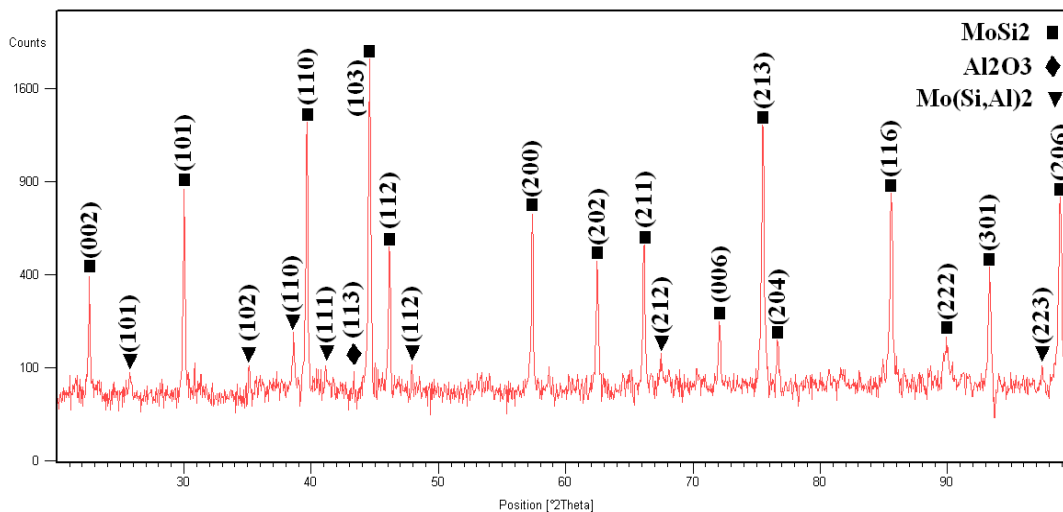
شکل ۴- الگوی پراش پرتو ایکس کامپوزیت $\text{MoSi}_2/20 \text{ vol\% TiC}$ پس از عملیات سینتر تکمیلی



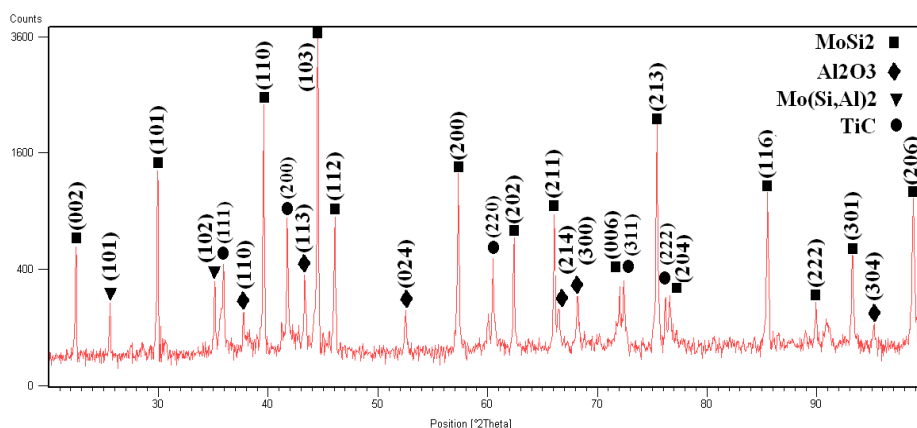
شکل ۵- الگوی پراش پرتو ایکس آلیاژ $\text{MoSi}_2 - 4.5 \text{ at\% Al}$ پس از عملیات سینتر تکمیلی

$\text{MoSi}_2/20\text{Vol\% TiC}$ مشاهده نشد. کتون و همکارانش [۳۰] مشاهده کرده اند که SiO_2 به صورت یک فاز شیشه‌ای (آمورف) در MoSi_2 تشکیل می‌شود. وجود پیک Mo_3Si_5 با شدت بسیار کم بیان‌گر تشکیل این فازها به میزان بسیار ناچیز در این کامپوزیت است. هم‌چنین مشخص شده است که در صورت وجود مقدار کمی SiO_2 در مخلوط پودری، در نهایت پس از تف جوشی MoSi_2 مقدار ناچیزی Mo_3Si_5 نیز تولید

کامپوزیت $\text{MoSi}_2/20\text{Vol\% TiC}$ تشکیل شده است. فاز TiC در طی سیکل‌های گرمایی کاملاً پایدار مانده است. زیهو و همکارانش [۲۸] نیز تشکیل فاز MoSi_2 با مصرف کامل Mo و Si در کنار TiC را گزارش کرده‌اند. محاسبات ترمودینامیکی نشان می‌دهد که TiC و MoSi_2 تا دمای 2000°C درجه کلونین با یکدیگر واکنشی ندادند، در کنار هم کاملاً پایدار می‌مانند [۲۹]. پیک‌های SiO_2 در الگوی پراش پرتو ایکس کامپوزیت



شکل ۶- الگوی پراش پرتو ایکس آلیاژ 9 at% Al - MoSi₂ پس از عملیات سینتر تکمیلی

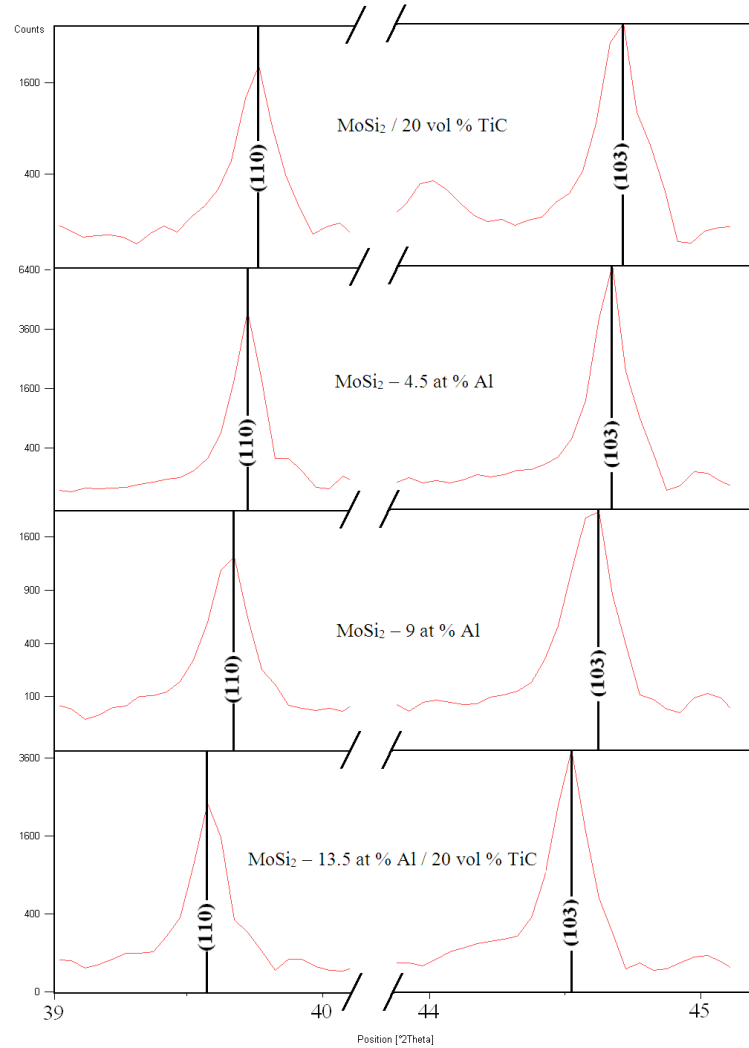


شکل ۷- الگوی پراش پرتو ایکس آلیاژ 13.5 at% Al / 20 vol% TiC - MoSi₂ پس از عملیات سینتر تکمیلی

علاوه بر پیک‌های فازهای MoSi₂ با ساختار C11_b و Al₂O₃ می‌توان پیک‌های مربوط به فاز Mo(Si,Al)₂ با ساختار C40 را نیز مشاهده کرد. میترا و همکارانش [۳۲] نیز وجود فاز Mo(Si,Al)₂ را در مقادیر نه درصدی اتمی آلومینیم و بالاتر را گزارش کرده‌اند. آلومینوم توانایی حل شدن در شبکه MoSi₂ را دارا بوده و زمانی که به مقدار زیاد حل شود، می‌تواند تشکیل فاز Mo(Si,Al)₂ را موجب شود [۲۰].

می‌شود [۲۸]. مینگ و همکارانش [۳۱] نیز وجود مقدار ناچیزی SiO₂ و Mo₅Si₃ را در قطعات ساخته شده MoSi₂ و کامپوزیت MoSi₂/TiC گزارش کرده‌اند.

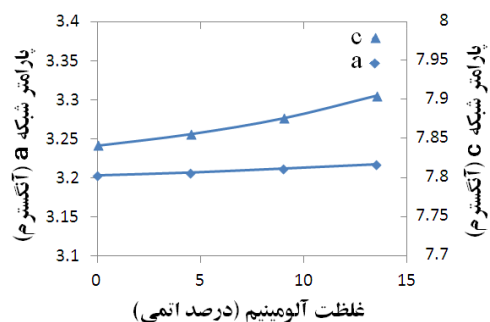
در الگوی تفرق اشعه‌ی ایکس آلیاژ 4.5 at% MoSi₂ - Al، شکل (۵) پیک‌هایی از فاز MoSi₂ با ساختار C11_b و فاز Al₂O₃ دیده می‌شود. این درحالی است که در الگوی پراش پرتو ایکس آلیاژهای MoSi₂-9at% Al، (شکل (۶)) و آلیاژ کامپوزیتی MoSi₂-13.5 at% Al/20Vol% TiC، (شکل (۷))،



شکل ۸- موقعیت پیک‌های (110) و (103) فاز MoSi₂ در کامپوزیت MoSi₂/20Vol%TiC ،
 آلیاژهای MoSi₂-4.5at %Al و MoSi₂-9 at%Al و کامپوزیت آلیاژی MoSi₂-13.5at%Al/20Vol%TiC
 (به ترتیب مربوط به نمونه‌های شماره‌ی ۵، ۲، ۳ و ۸) در الگوی پراش پرتو ایکس

نشان دهنده‌ی افزایش حجم تولید این ترکیب با افزایش غلظت Al در سیستم بوده، هم‌چنین احتمال تشکیل Al₂O₃ نیز وجود دارد. در شکل (۸) موقعیت پیک‌های (110) و (103) فاز MoSi₂ در کامپوزیت MoSi₂/20Vol%TiC، آلیاژهای MoSi₂-4.5at%Al و MoSi₂-9at%Al و کامپوزیت

در آلیاژهای MoSi₂ - 9 at% Al و MoSi₂ - 4.5 at% Al پیک‌های Al₂O₃ به طور شاخص مشخص نیست چرا که آنها احتمالاً اندازه‌ی خیلی کوچک‌تری در مقایسه با پیک‌های MoSi₂ و TiC دارند. از طرفی خیلی از پیک‌های Al₂O₃ با پیک‌های Mo(Si, Al)₂ هم پوشانی دارد [۳۲]. شدت پیک‌های Mo(Si, Al)₂ با زیاد شدن غلظت Al افزایش یافته است که



شکل ۹- تغییرات پارامتر شبکه‌ی a و c بر حسب غلظت Al

جدول ۳- مقادیر پارامتر شبکه‌ی a و c بر حسب آنگسترم برای ترکیبات مختلف

c	a	ترکیب شیمیایی نمونه
۷/۸۴۲۱	۳/۲۰۳۴	MoSi ₂ /20Vol%TiC
۷/۸۵۶۷	۳/۲۰۷۰	MoSi ₂ -4.5at%Al
۷/۸۷۶۸	۳/۲۱۲۱	MoSi ₂ -9at%Al
۷/۹۰۵۴	۳/۲۱۷۵	MoSi ₂ -13.5at%Al/20Vol% TiC

Al و ۳/۱ درصد اتمی Al به صورت محلول جامد در MoSi₂ وجود خواهد داشت [۳۲]. به نظر می‌رسد، اتم‌های Al جایگزین اتم‌های Si در MoSi₂ شده، تشکیل یک محلول جامد را می‌دهند. شعاع اتم‌های Al در پیوندهای کوالانسی ۱/۲۶ Å است، درحالی که شعاع اتم Si در همان پیوند ۱/۱۷ Å است. این موضوع باعث تغییر فاصله‌ی بین صفحات اتمی و در نتیجه جابه‌جایی پیک‌ها می‌شود بدون این که ساختار C11_b تغییر کند [۳۳]. در نتیجه مقادیر پارامتر شبکه‌ی a₀ , c₀ مطابق شکل (۹) تغییر می‌کند و منجر به افزایش حجم سلول واحد می‌شود. با استفاده از روش استاندارد داخلی و الگوی پراش پرتو ایکس مقادیر فازهای موجود در نمونه محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۴) گزارش شده است. مشاهده می‌شود که در حضور Al فاز Mo₅Si₃ تشکیل نشده است. واکنش Al و SiO₂ منجر به تشکیل Al₂O₃ و مصرف SiO₂ می‌شود. در عدم حضور SiO₂ شرایط برای تشکیل Mo₅Si₃ فراهم نمی‌شود. هم‌چنین با

آلیاژی MoSi₂-13.5 at % Al/20Vol % TiC (به ترتیب مربوط به نمونه‌های شماره‌ی ۵، ۲، ۳، ۸) در الگوی پراش پرتو ایکس آنها نشان داده شده است. مقایسه‌ی موقعیت پیک‌های الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها نشان می‌دهد که یک جابه‌جایی در موقعیت پیک‌های MoSi₂ آلیاژی شده با مقادیر مختلف Al نسبت به پیک‌های MoSi₂ در کامپوزیت MoSi₂/20Vol%TiC وجود دارد. این جابه‌جایی و تغییر در پارامتر شبکه دلالت بر این دارد که Al به صورت محلول جامد در شبکه حل شده، پارامتر شبکه را تغییر می‌دهد. پارامترهای شبکه با استفاده از روش کم‌ترین مجموع مربعات محاسبه شد [۲۵]. تغییرات پارامتر شبکه‌ی a₀ , c₀ بر حسب غلظت Al در شکل (۹) نشان داده شده است. مقادیر پارامتر c و a برای کامپوزیت MoSi₂/20Vol%TiC، آلیاژهای MoSi₂-4.5at%Al و MoSi₂-9at%Al و کامپوزیت آلیاژی MoSi₂-13.5 at % Al/20Vol % TiC در جدول (۳) ارائه شده است. گزارش شده است که با افزودن ۲/۸ ، ۵/۵ و ۹ درصد اتمی Al به ترکیب MoSi₂، به ترتیب مقادیر ۲/۵ ، ۵/۵ و ۲/۵

جدول ۴- درصد وزنی فاز های موجود در نمونه ها

درصد وزنی فازهای					ترکیب شیمیایی نمونه ها
Mo ₅ Si ₃	Al ₂ O ₃	Mo(Si,Al) ₂	TiC	MoSi ₂	
۶	-	-	۲۳	۷۱	MoSi ₂ %20Vol%TiC
-	۱	-	-	۹۹	MoSi ₂ -4.5at%Al
-	۵	۵	-	۹۰	MoSi ₂ -9 at%Al
-	۷	۳	۱۶	۷۴	MoSi ₂ -13.5at%Al/20Vol%TiC

۴. در فرایند آلیاژسازی مکانیکی اضافه کردن ۴/۵ الی ۹ درصد اتمی آلومینیم به مخلوط پودری Mo و Si و عملیات حرارتی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد موجب آلیاژی شدن دی سیلیساید مولیبدن و افزایش پارامتر شبکه شد.

۵. افزایش آلومینیم بالاتر از ۹ درصد اتمی به مخلوط پودری Mo و Si در فرایند آلیاژ سازی مکانیکی و عملیات حرارتی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد، علاوه بر آلیاژی شدن دی سیلیساید مولیبدن، فاز Mo(Si,Al)₂ نیز تشکیل شد.

افزایش درصد Al مجموع درصد وزنی دو فاز Al₂O₃ و Mo(Si,Al)₂ افزایش یافته است.

۴- نتیجه گیری

۱. آسیاب کاری مکانیکی مخلوط پودری سیلیسیم، مولیبدن و آلومینیم پس از ۲۰ ساعت، تنها منجر به ریز شدن و توزیع یکنواخت ذرات می شده و هیچ گونه انحلالی رخ نداده یا ترکیب جدیدی حاصل نمی شود.
۲. اندازه‌ی متوسط ذرات پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری در حدود ۱ میکرون اندازه گیری شد.
۳. ترکیب دی سیلیساید مولیبدن و هم چنین Mo(Si,Al)₂ پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری و عملیات حرارتی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد حاصل شد.

واژه نامه

1. torr

مراجع

1. Vasudevan, A.K., and Petrovic, J.J., "A Comparative Overview of Molybdenum Desilicide Composites", *Materials Science and Engineering*, Vol. A155, pp. 1-17, 1992.
2. Mitra, R., "Mechanical Behavior and Oxidation Resistance of Structural Silicides", *International Materials Reviews*, Vol. 51, pp. 13-64, 2006.
3. Yao, Z., Stiglich, J., and Sudarshan, T. S., "Molybdenum Silicide Based Materials and Their Properties", *Materials Engineering and Performance*, Vol. 8, pp. 291-304, 1999.
4. Hvizdos, P., and Dusza, J., "Creep Behavior of MoSi₂ and MoSi₂+SiC Composite", *Material Science*, Vol. 39, pp. 4073-4077, 2004.
5. Liu, Y. Q., Shao, G., and Tsakiroopoulos, P., "On the Oxidation Behavior of MoSi₂", *Intermetallics*, Vol. 9, pp. 125-136, 2001.
6. Courtright, E. L., "A Comparison of MoSi₂ Matrix Composites with Other Silicon-Base Composite System", *Material Science and Engineering*, Vol. A261, pp. 53-63, 1999.
7. Hvizdos, P., Besterceci, M., Balloková, B., Scholl, R., and Bohm, A., "Creep Behaviour of MoSi₂-SiC and MoSi₂-HfO₂", *Materials Letters*, Vol. 51, pp. 485-489, 2001.
8. Newman, A., Sampath, S., and Herman, H., "Processing and Properties of MoSi₂-SiC and MoSi₂-Al₂O₃", *Materials Science and Engineering*, Vol. A261, pp. 252-260, 1999.
9. Sun, L., and Pan, J., "Fabrication and Characterization

- of TiC-Particulate-Reinforced MoSi₂ Composites”, *Journal of the European Ceramic society*, Vol. 22, pp. 791-796, 2002.
10. Sun, L., and Pan, J., “Fabrication and Characterization of TiC_w/MoSi₂ and SiC_w/MoSi₂ Composites”, *Materials letters*, Vol. 52, pp. 223-228, 2002.
 11. Petrovic, J. J., “Toughening Strategies for MoSi₂-Based High Temperature Structural Silicides”, *Intermetallics*, Vol. 8, pp. 1175-1182, 2000.
 12. Shrif, A. A., Misra, A., Petrovic, J. J., and Mitchell, T. E., “Alloying of MoSi₂ for Improved Mechanical Properties”, *Intermetallics*, Vol. 9, pp. 869-873, 2001.
 13. Zhang, H., Lng, C., Chen, P., Tang, G., and Liu, X., “Synthesis and Properties of MoSi₂ Alloyed with Aluminum”, *International Journal of Refractory metals & Hard materials*, Vol. 21, pp. 75-79, 2003.
 14. Krakhmaler, P.V., Strom, E., and li, C., “Microstructure and Properties Stability of Al-Alloyed MoSi₂ Matrix Composites”, *Intermetallics*, Vol. 12, pp. 225-233, 2004.
 15. Zhang, G. J., Yue, X. M., and Watanabe, T., “Synthesis of Mo(Si,Al)₂ Alloy by Reactive Hot Pressing at Low Temperatures for a Short time” , *Materials Science and Engineering*, Vol. 34, pp. 593-597, 1999.
 16. Bhattacharya, A. K., and Ramasesha, S. K., “Effect of Temperature and Soaking Time on the Synthesis of Mo(Al,Si)₂”, *Ceramics International*, Vol. 27, pp. 829-831, 2001.
 17. Ramberg, C. E., and Worrel, W. L., “Fabrication and High Temperature Phase Stability of Mo(Si,Al)₂-MoSi₂ Intermetallics”, *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 83, pp. 946-948, 2000.
 18. Harada, Y., Murata, Y., and Morinaga, M., “Solid Solution Softening and Hardening in Alloyed MoSi₂” *Intermetallics*, Vol. 6, pp. 529-535, 1998.
 19. Liu, Y., Shao, G., and Tsakiroopoulos, P., “Thermodynamic Reassessment of Mo-Si and Al-Mo-Si Systems”, *Intermetallics*, Vol. 8, pp. 953-962, 2000.
 20. Nowotny, H., “A contribution to Mo-Si-Al Ternary System”, *Monatsh Chem*, Vol. 90, pp. 313-318, 1960.
 21. Kaufman, M. J., “Intermetallic Matrix Composites Via In-Situ Displacement Reactions”, *Office of Naval Research/DARPA*, Grant No. N00014-91-J-4132, 1997.
 22. Kang, P., and Yin, Z., “Phase Formation During Annealing As-Milled powders of Molybdenum Disilicide”, *Material Letters*, Vol. 57, pp. 4412-4417, 2003.
 23. Zuo, K., Xi, S., and Zhuo, J., “Structure Evaluation and Thermodynamics Analysis of MoSi₂ During Mechanical Alloying”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 445-446, pp. 48-53, 2007.
 24. Liu, L., Padella, F., Guo, W., and Magini, M., “Solid State Reactions Induced by Mechanical Alloying in Metal-Silicon (metal=Mo, Nb) Systems”, *Acta Metallurgical Material*, Vol. 43, pp. 3755-3761, 1995.
 25. Cullity, B. D., *Elements of x-Ray Diffraction*, 2th ed., Addison-Wesley, California, 1978.
۲۶. طوقیان، ع.، “ارزیابی رفتار سایشی ترکیب بین فلزی MoSi₂ پاشش گرمایی فعال‌سازی شده توسط آسیاب‌کاری مکانیکی”، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۷.
27. Suryanarayana, C., “Mechanical Alloying and Milling”, *Materials Science*, Vol. 46, pp. 13-19, 2001.
 28. Zhu, Q., Shobu, K., Zeng, Y., and Watanabe, T., “Oxidation Behavior of Hot-Pressed MoSi₂-TiC composite”, *Journal of Materials Science*, Vol. 36, pp. 313-319, 2001.
 29. Jayashankar, S., “Structure/Properties/Processing Relationships in Molybdenum Disilicide/Silicon Carbide Composites”, Ph.D. Thesis, University of Florida, 1996.
 30. Cotton, J. D., Kim, Y. S., and Kaufman, M. J., “Effect of Second Particles on the Mechanical Properties of MoSi₂”, *Materials Science and Engineering*, Vol. A144, pp. 287-291, 1991.
 31. Meng, J., Lu, J., Wang, J., and Yang, S., “Preparation and Properties of MoSi₂ Composites Reinforced by TiC, TiCN, and TiB₂”, *Materials Science and Engineering*, Vol. A396, pp. 277-284, 2005.
 32. Mitra, R., Rama, V. V., and Venugopal, A., “Effect of Small Aluminum Additions on Microstructure and Mechanical Properties of Molybdenum Di-Silicide”, *Intermetallics*, Vol. 7, pp. 213-232, 1999.
 33. Kittel, C., *Introduction to Solid State Physics*, 5th ed., John Wiley and Sons, New Delhi, 1987.