مروری بر سنتز مکس فاز Ti_3SiC_2 به روش آلیاژسازی مکانیکی

نوید عطازاده، مینا سعیدی حیدری، حمیدرضا بهاروندی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر



مهندس نوید عطازاده مولف اصلی این مقاله، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر می‌باشند.

Atazadeh_navid@yahoo.com

چکیده: تیتانیوم سیلیکون کاربید (Ti_3SiC_2) به علت ریزساختار نانولایه‌ای و خواص منحصر به فرد دارای امتیازات هر دو سرامیک‌ها و فلزات می‌باشد و بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مکس فاز Ti_3SiC_2 مشابه سرامیک‌ها دارای دانسیته کم، خواص مکانیکی دما بالای عالی و نقطه ذوب و پایداری حرارتی بالایی است و مشابه فلزات نسبتاً نرم، قابل ماشین‌کاری، مقاوم در برابر شوک حرارتی و دارای هدایت حرارتی و الکتریکی خوبی است. روش‌های بسیاری برای سنتز این ماده به کار گرفته شده است که در این بین روش آلیاژسازی مکانیکی برتری‌های بسیاری دارد. در این مقاله سعی شده است تا متغیرهای سنتز و تأثیر افزودنی‌های مختلف بر آلیاژسازی مکانیکی مکس فاز Ti_3SiC_2 مورد بررسی قرار گیرد.

کلمات کلیدی: سنتز، مکس فاز، Ti_3SiC_2، آلیاژسازی مکانیکی

۱- مقدمه

مکس فاز Ti_3SiC_2 یکی از رایج‌ترین فازهای مکس است که به فاز ۳۱۲ تعلق دارد و توسط جیتسکو[1] و نوتنی[2] در سال ۱۹۶۰ به‌صورت پودر سنتز شده است [۱, ۲]. این ماده دارای ساختار هگزاگونال است و برخی از خواص فلزات و سرامیک‌ها مانند مقاومت به اکسیداسیون عالی، مدول الاستیک و استحکام بالا، پایداری شیمیایی، مقاومت در برابر شوک حرارتی عالی، قابلیت ماشین‌کاری خوب و نسبت تافنس شکست به استحکام بالایی را دارا می‌باشد. سنتز این ماده با استفاده از روش‌های بسیاری مانند رسوب شیمیایی بخار، روش قوس، پرس ایزواستاتیک گرم یا پرس گرم، سینتر جرقه پلاسما و ... صورت گرفته است [۳, ۴]. یکی از برترین روش‌هایی که برای سنتز ترکیبات سرامیکی در دمای اتاق به کار می‌رود روش آلیاژسازی مکانیکی[3] می‌باشد [۵]. این فرآیند که اولین بار توسط بنجامین[4] [۶] در سال ۱۹۷۰ ارائه شده در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است و به‌طور موفقیت آمیزی برای سنتز انواع مختلف مواد نظیر محلول‌های جامد، مواد بین فلزی، آلیاژهای آمورف و کامپوزیت‌های سرامیکی استفاده شده است [۷]. روش آلیاژسازی مکانیکی یک فرایند متالورژی پودر رایج و مناسب است که دارای مزایایی مانند هزینه تولید کم و کنترل آسان ترکیبات می‌باشد [۸, ۹]. اخیراً این فرآیند توسط محققان بسیاری برای سنتز مکس فاز Ti_3SiC_2 اعمال شده است و در نهایت پودر Ti_3SiC_2 با خلوص فازی بالا و به شکل موفقیت آمیزی سنتز شده است [۱۰]. با توجه به اینکه در فرایند آلیاژسازی مکانیکی عوامل مختلفی نظیر سرعت آسیاکاری، زمان آسیاکاری، اندازه گلوله‌ها و ... دارای اهمیت بسیاری می‌باشند در این مقاله سعی شده است تا گزارشی از کلیه فعالیت‌هایی که در خصوص سنتز مکس فاز Ti_3SiC_2 با استفاده از آلیاژسازی مکانیکی صورت گرفته است انجام گیرد.

---

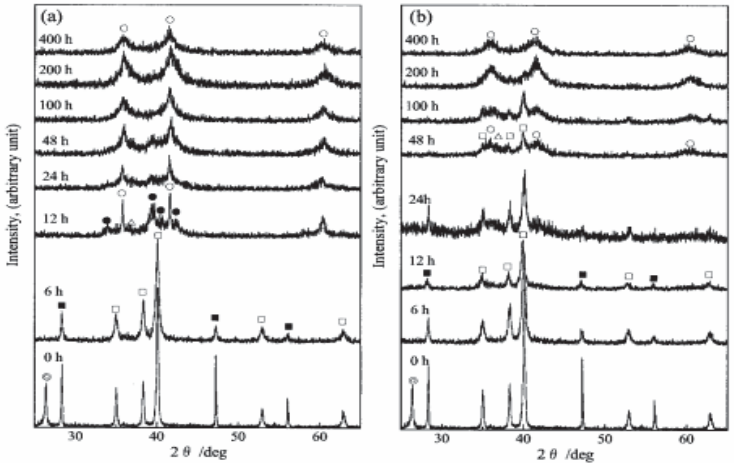
[1] Jeitschko
[2] Nowotny
[3] Mechanical alloying
[4] Benjamin

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.3.4.7]

۲- سنتز مکس فاز Ti_3SiC_2 به روش آلیاژسازی مکانیکی

لی[1] و همکارانش [۱۰, ۱۱] اثر زمان و اندازه‌های مختلف گلوله‌های آسیاب را بر سنتز پودر Ti_3SiC_2 به روش آلیاژسازی مکانیکی مورد بررسی قرار داده‌اند. این محققان پودرهای Ti، Si و C را با نسبت وزنی محاسبه شده از ترکیب استوکیومتری Ti_3SiC_2 به‌عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار داده‌اند. پودرهای مخلوط شده با استفاده از یک دستگاه آسیاب ارتعاشی با دامنه ارتعاش ۴ میلی‌متر و فرکانس ارتعاش ۱۴۴۰ rpm آلیاژسازی مکانیکی شده است. گلوله‌ها با دو قطر متفاوت با نسبت گلوله به پودر ۱۰۰:۱ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج بیانگر آن است که تشکیل مکس فاز Ti_3SiC_2 به‌شدت تحت تأثیر اندازه گلوله بوده است. آلیاژسازی مکانیکی با استفاده از گلوله‌های بزرگ (قطر ۲۰/۶ میلی‌متر) تشکیل Ti_3SiC_2 را افزایش داده است که احتمالاً به دلیل ایجاد یک واکنش احتراقی در طول آلیاژسازی مکانیکی می‌باشد (شکل ۱). همچنین مشاهده می‌شود که با استفاده از گلوله‌های کوچک (قطر ۱۲/۷ میلی‌متر)، فاز Ti_3SiC_2 تنها با فرایند آلیاژسازی مکانیکی سنتز نشده و نیازمند به عملیات حرارتی می‌باشد که با آنیل کردن پودر آلیاژسازی مکانیکی شده در دماهای نسبتاً کم پودرهای ریز شامل ۹۵/۸ درصد حجمی Ti_3SiC_2 به دست آمده است [۱۰].



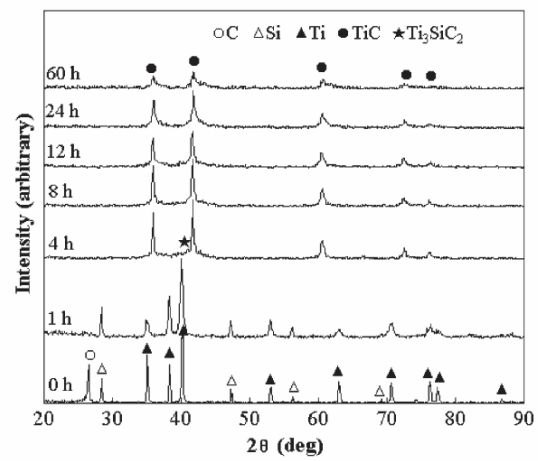
شکل ۱- الگوهای XRD پودرهای آلیاژسازی مکانیکی شده با استفاده از یک دستگاه آسیاب ارتعاشی با (a) گلوله‌های بزرگ (d = 20.6 mm) و (b) گلوله‌های کوچک (d = 12.7 mm): (●) Ti_3SiC_2، (○) TiC، (△) Ti_5Si_3، (□) Ti، (■) Si، (O) C [۱۰].

با افزایش زمان آسیاب در آلیاژسازی مکانیکی با استفاده از گلوله‌های کوچک، اندازه ذرات به‌طور یکنواختی کاهش یافته است؛ در حالی که زمانی که از گلوله‌های بزرگ استفاده شده است، با افزایش زمان آسیاب از ۱۲ تا ۴۸ ساعت اندازه ذرات افزایش یافته‌اند. چنین افزایش غیر عادی در اندازه ذرات ناشی از تشکیل گرانوله‌های بزرگ Ti_3SiC_2 است [۱۰].

لی[2] و همکارش [۱۲] از اندازه گلوله‌های متفاوت برای تشکیل Ti_3SiC_2 با استفاده از آلیاژسازی مکانیکی استفاده نموده‌اند. این محققان آلیاژسازی مکانیکی پودرهای Ti، Si و C را در یک آسیاب سیاره‌ای با سرعت ۲۵۰ rpm و در دمای اتاق مورد بررسی قرار داده‌اند. ۴۰۰ گلوله با قطر ۶ میلی‌متر، ۱۰۰ گلوله با قطر ۱۰ میلی‌متر و ۸ گلوله با قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده و نسبت گلوله به پودر ۲۰:۱ بوده است. شکل ۲ الگوهای XRD پودرهای مخلوط شده Ti، Si و C را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. پس از تنها ۱ ساعت آسیاب پیک‌های گرافیت از الگوهای XRD ناپدید شده‌اند، چرا که یا کربن آمورف تشکیل شده و یا در مرز دانه‌های Ti توزیع شده است. پس از ۱ ساعت آسیاب، پیک‌های پراش Ti و Si هر دو پهن شده و شدت آن‌ها کاهش یافته است که این نشان دهنده کاهش اندازه متوسط کریستالیت و ایجاد عیوب و نواقص و تشکیل کرنش‌های داخلی می‌باشد. پس از ۴ ساعت آسیاب، فاز TiC و فاز مطلوب Ti_3SiC_2 با پیک‌های ضعیف حاصل شده‌اند. پس از ۸ ساعت آسیاب پیک متعلق به Ti_3SiC_2 به‌طور کامل ناپدید شده و این نشان دهنده این است که فاز Ti_3SiC_2 به یک فاز آمورف یا نانوکریستالیت تبدیل شده است. با افزایش بیشتر زمان آسیاب، تمامی پیک‌های TiC پهن و شدت آن‌ها کاهش یافته است.

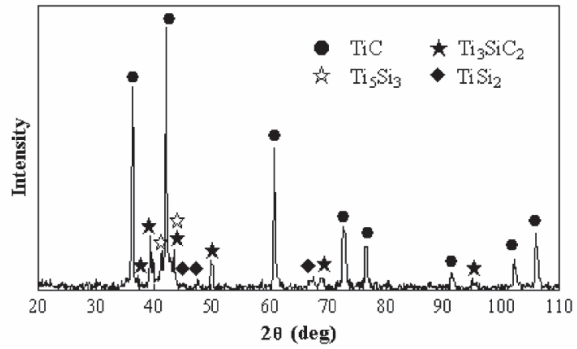
[1] Li
[2] Li

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.3.4.7]



شکل ۲- الگوهای پراش اشعه X پودرهای مخلوط شده پس از زمان‌های مختلفی از آسیاب [۱۲].

الگوی XRD پودرهای اولیه پس از ۱/۵ ساعت آسیاب در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود علاوه بر فاز Ti_3SiC_2، پیک‌های Ti_5Si_3، $TiSi_2$ و TiC نیز حضور دارند.



شکل ۳- الگوی پراش اشعه X پودرهای اولیه پس از آسیاب به مدت زمان ۱/۵ ساعت [۱۲].

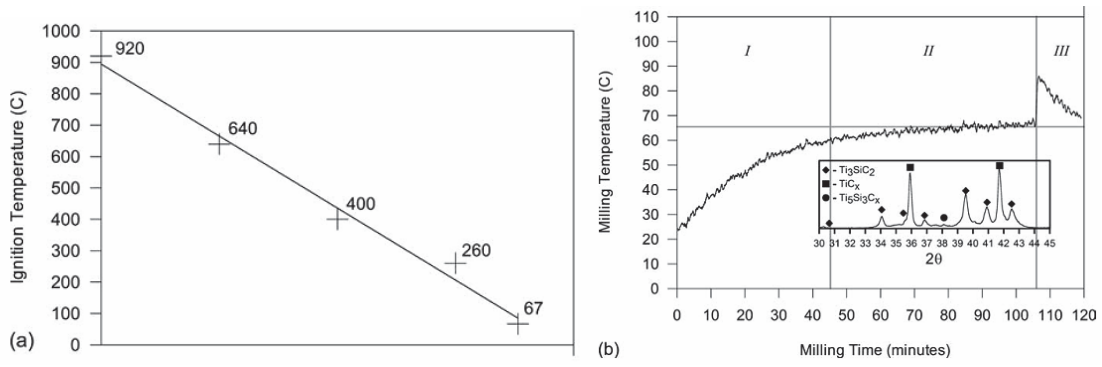
رایلی[1] و همکارانش [۱۳] تأثیر آلیاژسازی مکانیکی با انرژی بالا را روی سنتز خود احتراقی دما بالای مکس فاز Ti_5Si_3 مورد بررسی قرار داده‌اند. پراکندگی دمای احتراقی SHS به عنوان تابعی از زمان آسیاب مشاهده شده است. بعد از ۱۰۷ دقیقه آسیاب، واکنش احتراقی خودبه خودی درون محفظه آسیاب در دمای $^{\circ}C$ ۶۷ رخ داده است که با یک افزایش ۲۵ درجه سانتی‌گرادی در دمای محفظه همراه است. نمونه‌های متراکم 3Ti+SiC+C بدون اینکه تحت آسیاب قرار بگیرند دمای احتراق SHS $^{\circ}C$ ۲۰±۹۲۰ را نشان داده‌اند [۱۴].

نمونه‌هایی که به ترتیب به مدت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه آسیاب شده‌اند، دمای احتراق SHS آن‌ها $^{\circ}C$ ۲۰±۶۴۰، $^{\circ}C$ ۲۰±۴۰۰ و $^{\circ}C$ ۲۰±۲۶۰ بوده است (شکل ۴-a). با افزایش زمان آسیاب به بیشتر از ۱۰۵ دقیقه یک واکنش SHS فعال‌سازی مکانیکی شده در محفظه آسیاب رخ می‌دهد. پروفایل دمایی این واکنش نشان دهنده این است که یک واکنش گرماده در دمای $^{\circ}C$ ۲۰±۶۷ رخ داده است (شکل ۴-b). در شکل ۴-b سه منطقه مجزا قابل مشاهده هستند. در منطقه I (۴۵-۰ دقیقه) یک افزایش سریع دمایی به علت واکنش آسیاب وجود دارد. در منطقه II (۱۰۵-۴۵ دقیقه) دمای محفظه همچنان افزایش می‌یابد اگرچه که سرعت آن به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است که به علت افزایش اتلاف انرژی به اطراف است.

منطقه III (۱۲۰-۱۰۵ دقیقه) با یک افزایش دمای ناگهانی حدود $^{\circ}C$ ۲۵ بعد از ۱۰۷ دقیقه آسیاب آغاز می‌شود که نشان دهنده وقوع یک واکنش گرماده در محفظه آسیاب است. این دمای ناگهانی پس از ۱۵ دقیقه کاهش می‌یابد. پراش اشعه ایکس محصول دو فاز اصلی Ti_3SiC_2 و TiC غیر استوکیومتری را نشان می‌دهد که درون شکل ۴-b نشان داده شده است. مقدار بسیار کمی هم از فازهای سیلیسید و $Ti_5Si_3C_x$ قابل مشاهده است [۱۳].

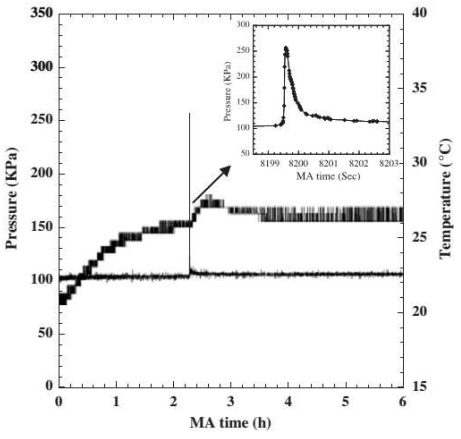
[1] Riley

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.3.4.7]

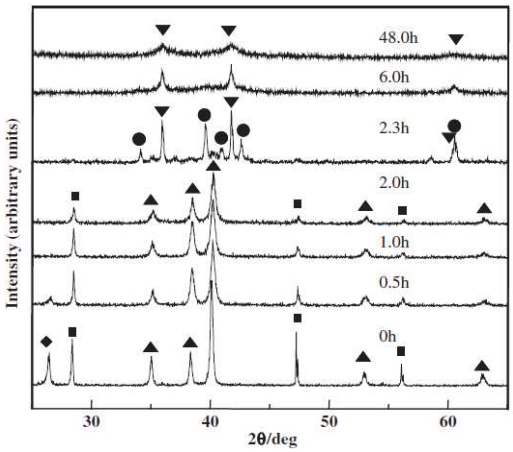


شکل ۴- a) دمای احتراق برای حالت احتراق همزمان واکنش SHS فعال‌سازی مکانیکی شده (و واکنش آلیاژسازی مکانیکی)، b) پروفایل دمایی محفظه آسیاب در طول واکنش آلیاژسازی مکانیکی [۱۳].

لی[1] و همکارانش [۱۵] روش آلیاژسازی مکانیکی را برای سنتز Ti_3SiC_2 با ترکیب استوکیومتری مواد عنصری Ti، Si و C استفاده کرده‌اند. آن‌ها در کار خود از یک آسیاب سیاره‌ای مجهز به محفظه نگهدارنده پودر با امکان اندازه گیری لحظه‌ای دما و فشار گاز در حین فرایند آلیاژسازی مکانیکی بهره برده‌اند. هنگامی که فرایند آلیاژسازی برای یک دوره مشخص انجام شد، دما و فشار گاز به‌طور ناگهانی افزایش یافته و در نتیجه مقادیری از ذرات Ti_3SiC_2 سنتز شده‌اند. در این پژوهش نشان داده شد که واکنش احتراق با فرایند آلیاژسازی مکانیکی نیز قابل انجام است. شکل ۵ تغییرات اندازه گیری شده در فشار و دمای گاز در جارمیل را به هنگام آلیاژسازی مکانیکی با سرعت ۲۰۰ rpm نشان می‌دهد. بعد از فرایند آلیاژسازی مکانیکی به مدت ۲/۳ ساعت، فشار گاز ناگهان افزایش یافته و دمای گاز نیز به میزان حدود ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. در مقایسه با تغییر دما، تغییر فشار آشکارتر است و باید توجه شود که تغییر ناگهانی فشار دقیقاً قبل از تغییر دما حاصل شده است و تغییر فشار نسبت به دما چشمگیرتر است. شکل ۶ الگوهای XRD مخلوط پودرهایی را که در زمان‌های مختلف تحت آلیاژسازی مکانیکی بوده‌اند نشان می‌دهد. پیک کربن در زمان کم آسیا به علت آمورف شدن ناپدید شده است [۱۶]. شدت پیک‌های Ti و Si نیز با افزایش زمان آسیا کاهش یافته است. فازهای جدید TiC و Ti_3SiC_2 بعد از آسیاب به مدت ۲/۳ ساعت حاصل شده‌اند. این نتایج تأیید می‌کند که تغییرات ناگهانی فشار و دما که در شکل ۵ نشان داده شده است بر اثر واکنش‌های شیمیایی در طول فرایند آلیاژسازی مکانیکی حاصل شده است.



شکل ۵- مثالی از تغییرات دما و فشار گاز در طول فرایند آلیاژسازی مکانیکی [۱۵].



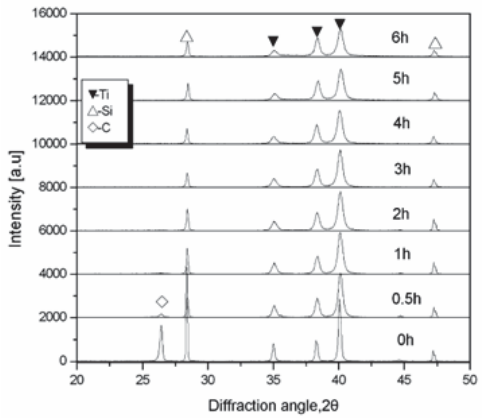
شکل ۶- الگوهای XRD مخلوط‌های پودر که در زمان‌های مختلف تحت آلیاژسازی مکانیکی قرار گرفته‌اند ((●) Ti3SiC2، (▼) TiC، (▲) Ti، (■) Si، (◆) C) [۱۵]

[1] Li

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.3.4.7]

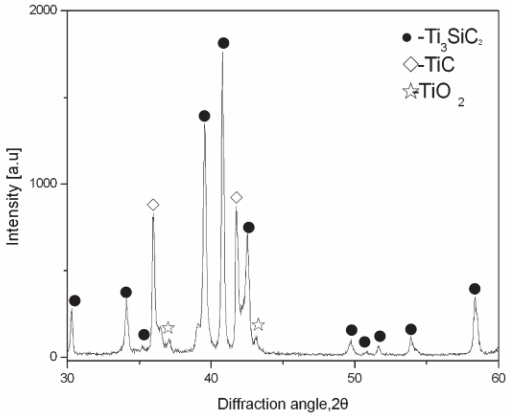
۳- بررسی اثر افزودنی‌های مختلف بر سنتز مکس فاز Ti_3SiC_2 به روش آلیاژسازی مکانیکی

لیانگ[1] و همکارانش [۱۷, ۱۸] سنتز Ti_3SiC_2 را در هوا و با استفاده از فعال شدن مکانیکی پودر 3Ti/Si/2C مورد بررسی قرار داده‌اند. این محققان از پودرهای Ti، Si، C (گرافیت) و مقدار ناچیزی Al اضافی به‌منظور افزایش سنتز Ti_3SiC_2 استفاده کردند. آلیاژسازی مکانیکی در یک آسیاب سیاره‌ای با بدنه و گلوله‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن انجام شده است. سرعت آسیاب ۳۰۰rpm، نسبت جرمی گلوله به پودر ۱۰:۱ بود. آلیاژسازی مکانیکی، ذرات پودر 3Ti/Si/2C را ریز نموده و سبب ایجاد اعوجاج شبکه‌ای شدیدی شده است که فعالیت‌های واکنشی پودرها را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشیده است. شکل ۷ الگوهای XRD مخلوط پودرهای عنصری آلیاژسازی مکانیکی شده در مدت زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. پس از آسیاب به مدت زمان ۲ ساعت پیک گرافیت به دلیل اینکه به‌آسانی آمورف می‌شود ناپدید شده است. به دلیل کاهش اندازه کریستالی و اعوجاج شبکه در طول فرایند آلیاژسازی مکانیکی هر دوی پیک‌های پراش Ti و Si پهن شده و شدت آن‌ها کاهش یافته است. به وضوح مشخص است که با افزایش زمان آسیاب از ۳ تا ۶ ساعت، شدت پیک‌های پراش Ti و Si دچار تغییر نشده‌اند.



شکل ۷- الگوی XRD پودرهایی که به‌صورت مکانیکی فعال‌سازی شده‌اند [۱۷].

زمانی که این پودر در معرض هوا قرار گرفته است، به‌طور خود به خودی مشتعل شده که به دلیل سنتز خود احتراقی دمای بالای تیتانیوم سیلیکون کاربید (Ti_3SiC_2) می‌باشد. حاصل این امر یک محصول متخلخل بوده که سطح آن لایه‌ای از TiO_2 و لایه داخلی آن مخلوطی از Ti_3SiC_2 و TiC بوده است. شکل ۸ الگوی XRD حاصل از نمونه پودر شده را نشان می‌دهد. این شکل نشان دهنده آن است که فاز اصلی TiC و Ti_3SiC_2 بوده‌اند. علاوه بر این پیک‌های ضعیف TiO_2 نیز مشاهده می‌شوند. مقدار Ti_3SiC_2 محصول wt% ۸۳ تخمین زده شده که در مقایسه با مقدار چاپ شده در مقالات نسبتاً بالا است [۱۲, ۱۵, ۱۹].



شکل ۸- الگوی XRD محصول احتراقی [۱۷].

[1] Liang

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.3.4.7]

جین[1] و همکارانش [۲۰] نیز اثر افزودن Al بر روی خلوص فازی $Ti_3Si(Al)C_2$ سنتز شده بـه روش آلیاژسـازی مکـانیکی را مـورد بررسی قرار داده‌اند. این محققان با استفاده از مواد اولیه شامل مخلـوط پـودر (3Ti:Si:2C:xAl (x = 0, 0.1, 0.2, 0.3 ترکیـب پایـه Ti_3SiC_2 را به روش آلیاژسازی مکانیکی سنتز کردنـد. نتـایج نـشان داد کـه بـا اسـتفاده از دسـتگاه آسـیاب گلولـه‌ای پـر انـرژی (سرعت:rpm ۳۰۰، قطر گلوله: mm ۱۰، نسبت گلوله به پودر: ۱۰:۱) مخلوط پودر 3Ti:Si:2C بـه مـدت زمـان ۱۰ سـاعت هـر دو شکل پودر و بالک محصولات TiC، $TiSi_2$ و Ti_3SiC_2 با Ti_3SiC_2 به‌عنوان فاز اصلی را تولید نمودند. آن‌ها بـا افـزودن یـک مقـدار کوچکی از Al نسبت Ti_3SiC_2 را در محصولات آلیاژسازی مکانیکی شده (در هر دو شکل پودر و بالک) به‌طور قابل‌توجهی افزایش دادند. زمانی که x=0.1، پس از ۱۰ ساعت اختلاط با آسیاب گلوله‌ای مقدار Ti_3SiC_2 در دو شکل پودر و بالک به ترتیب به ۷۶/۸ و ۸۵/۹ رسید، با این وجود افزودن بیش از حد Al میزان Ti_3SiC_2 را در محصولات آسیاب شده کاهش داد. در طـول سـنتز Ti_3SiC_2 به‌وسیله آلیاژسازی مکانیکی، دمای میانگین در محیط آسیای گلوله‌ای بسیار بالا نیست. بعـضی از مقـالات تغییـرات دمـایی را در طول آلیاژسازی مکانیکی بررسی کرده‌اند، آن‌ها ذکر کرده‌اند که هنگامی‌که واکنش خود احتراقی القا شـده بـه‌صـورت مکـانیکی (MSR) در ناحیه میکرون رخ می‌دهد دما بـه انـدازه کـافی بـالا اسـت. در جـدول ۱ دمـای آدیاباتیـک و آنتـالپی تـشکیل بـرای واکنش‌های انتخابی آورده شده است. تشکیل فاز Ti_3SiC_2 به وسیله آلیاژسازی مکـانیکی را بایـد بـه دمـای آدیاباتیـک و آنتـالپی تشکیل بالا نسبت داد. دو واکنش گرماده Ti-C و Ti-Si در سیستم Ti-Si-C برای تشکیل فاز Ti_3SiC_2 سودمند هستند.

جدول ۱- دمای آدیاباتیک و آنتالپی تشکیل واکنش‌های انتخابی [۲۰].

Reaction system	$-\Delta H$ (kJ mol^{-1})	T_a (°C)	References
Ti + C	185	3017	4
3Ti + 2C + Si	547	3000	4
Ti + 2Si	133.9	1557	15

۴- نتیجه‌گیری

محققان بسیاری سنتز مکس فاز Ti_3SiC_2 را به روش آلیاژسازی مکانیکی بررسی نموده‌اند. در این بین علاوه براینکه نوع دسـتگاه آسیاکاری از نظر سیاره‌ای، گلوله‌ای و ... بسیار اثر گذار است؛ سرعت آسیاکاری، مدت زمان آسیاکاری، اندازه گلولـه‌هـا و ... دارای اهمیت بسیاری است. برخی از محققان توانسته‌اند با استفاده از روش آلیاژسازی مکانیکی مکس فاز Ti_3SiC_2 را سنتز نمایند با این حال بسیاری دیگر از محققان پس از آلیاژسازی مکانیکی از یک مرحله عملیات حرارتی نیز استفاده نمـوده‌انـد تـا بتواننـد درصـد بیشتری از این ماده را سنتز نمایند.

مراجع

[1] M. Radovic, M. W. Barsoum, MAX phases: bridging the gap between metals and ceramics, American Ceramics Society Bulletin, Vol. 92, No. 3, pp. 20-27, 2013.

[2] M. W. Barsoum, M. Radovic, Elastic and mechanical properties of the MAX phases, Annual review of materials research, Vol. 41, pp. 195-227, 2011.

[3] M. Xue, H. Tang, C. Li, Synthesis of Ti3SiC2 Through Pressureless Sintering, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 53, No. 7-8, pp. 392-398, 2014/11, 2014.

[4] K. Sato, M. Mishra, H. Hirano, C. Hu, Y. Sakka, Pressureless Sintering and Reaction Mechanisms of Ti3SiC2 Ceramics, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 97, No. 5, pp. 1407-1412, 2014.

[5] H. Abderrazak, M. Abdellaoui, Synthesis and characterization of nanostructured silicon carbide, Materials Letters, Vol. 62, No. 23, pp. 3839-3841, 2008.

[6] J. S. Benjamin, Dispersion strengthened superalloys by mechanical alloying, Metallurgical transactions, Vol. 1, No. 10, pp. 2943-2951, 1970.

[7] J. Xue, D. Wan, S. E. Lee, J. Wang, Mechanochemical synthesis of lead zirconate titanate from mixed oxides, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 82, No. 7, pp. 1687-1692, 1999.

[8] H. Abderrazak, F. Schoenstein, M. Abdellaoui, N. Jouini, Spark plasma sintering consolidation of nanostructured TiC prepared by mechanical alloying, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 29, No. 2, pp. 170-176, 2011.

[1] Jin

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.3.4.7]

[9] A. Teber, F. Schoenstein, F. Têtard, M. Abdellaoui, N. Jouini, Effect of SPS process sintering on the microstructure and mechanical properties of nanocrystalline TiC for tools application, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 30, No. 1, pp. 64-70, 2012.
[10] J. F. Li, T. Matsuki, R. Watanabe, Mechanical‐Alloying‐Assisted Synthesis of Ti3SiC2 Powder, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 85, No. 4, pp. 1004-1006, 2002.
[11] J.F. Li, T. Matsuki, R. Watanabe, Fabrication of highly dense Ti3SiC2 ceramics by pressureless sintering of mechanically alloyed elemental powders, Journal of materials science, Vol. 38, No. 12, pp. 2661-2666, 2003.
[12] S. B. Li, H. X. Zhai, Synthesis and reaction mechanism of Ti3SiC2 by mechanical alloying of elemental Ti, Si, and C powders, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 88, No. 8, pp. 2092-2098, 2005.
[13] D. P. Riley, E. H. Kisi, D. Phelan, SHS of Ti 3 SiC 2: ignition temperature depression by mechanical activation, Journal of the European Ceramic Society, Vol. 26, No. 6, pp. 1051-1058, 2006.
[14] D. P. Riley, E. H. Kisi, T. C. Hansen, A. W. Hewat, Self‐Propagating High‐Temperature Synthesis of Ti3SiC2: I, Ultra‐High‐Speed Neutron Diffraction Study of the Reaction Mechanism, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 85, No. 10, pp. 2417-2424, 2002.
[15] J. F. Li, T. Matsuki, R. Watanabe, Combustion reaction during mechanical alloying synthesis of Ti3SiC2 ceramics from 3Ti/Si/2C powder mixture, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 88, No. 5, pp. 1318-1320, 2005.
[16] X. Yang, Z. Huang, Y. Wu, H. Ye, HREM observation of the synthesized process of nano-sized SiC by ball milling of Si and C mixed powders, Acta Metallurgica Sinica(China)(China), Vol. 36, No. 7, pp. 684-688, 2000.
[17] B. Liang, M. Wang, J. Sun, X. Li, Y. Zhao, X. Han, Synthesis of Ti 3 SiC 2 in air using mechanically activated 3Ti/Si/2C powder, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 474, No. 1, pp. L18-L21, 2009.
[18] B. Liang, M. Wang, Synthesis of Ti3SiC2 by mechanically induced self-sustaining reaction: Some mechanistic aspects, International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Vol. 21, No. 3, pp. 172-177, 2012.
[19] H. Orthner, R. Tomasi, Reaction sintering of titanium carbide and titanium silicide prepared by high-energy milling, Materials Science and Engineering: A, Vol. 336, No. 1, pp. 202-208, 2002.
[20] S. Jin, B. Liang, J.-F. Li, L. Ren, Effect of Al addition on phase purity of Ti 3 Si (Al) C 2 synthesized by mechanical alloying, Journal of materials processing technology, Vol. 182, No. 1, pp. 445-449, 2007.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.3.4.7]