

سنتز و آماده سازی پودر MoSi_2 جهت استفاده در فرآیند پاشش حرارتی

محمد عرفان منش^۱، سعیدرضا بخشی^۲، پژمان رضائی طالقانی^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، گروه مواد، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، گروه مواد، اصفهان، ایران

Erfanmanesh@mut-es.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۱/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۰۱)

چکیده

در این تحقیق به منظور تولید ترکیب بین فلزی دی سیلیساید مولیبدن (MoSi_2)، پودر مولیبدن و سیلیسیم به نسبت استوکیومتری ۱ به ۲ با هم مخلوط شدند و به مدت ۲۰ ساعت با استفاده از آسیاب سایشی آسیاب شده و سپس در کوره تحت اتمسفر آرگون در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد در زمان‌های مختلف تحت عملیات حرارتی آنیل، قرار گرفتند. نتایج حاصله از بررسی آنالیزهای تفرق اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان می‌دهد که با آسیاب کاری به مدت ۲۰ ساعت و سپس عملیات حرارتی به مدت ۷ ساعت در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد می‌توان به ترکیب دی سیلیساید مولیبدن نسبتاً خالص دست یافت. از آنجایی که پودرهای بدست آمده بسیار ریز بوده، برای پاشش حرارتی مناسب نبودند. پودرهای عملیات حرارتی شده به وسیله بایندر کربوکسی متیل سلولز تحت عملیات آگلومراسیون قرار گرفته و دانه‌بندی شدند. نتایج نشان می‌دهد پودرهای آگلومره شده سیالیت مناسبی داشته و جهت استفاده در فرآیند پاشش حرارتی از شرایط مطلوبی برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی:

دی سیلیساید مولیبدن، آلیاژ سازی مکانیکی، عملیات حرارتی آنیل کردن، پاشش حرارتی، آگلومراسیون.

۱- مقدمه

احتراقی و پرس داغ است، قابل تولید می‌باشد [۴]. بررسی‌های اخیر نشان داده است که استفاده از روش آلیاژسازی مکانیکی برای تولید ترکیبات MoSi_2 با موفقیت همراه بوده است. آلیاژسازی مکانیکی (MA) یک روش مؤثر برای تولید این چنین ترکیبات بین فلزی است. آلیاژ سازی مکانیکی یک روش پودر حالت جامد شامل جوش خوردن مکرر و شکست و دوباره جوش خوردن ذرات پودر در یک آسیاب انرژی بالا است [۴]. در یک تحقیق صورت گرفته با استفاده از آلیاژسازی مکانیکی

ترکیب بین فلزی MoSi_2 دارای خواص ویژه‌ای نظیر نقطه ذوب بالا (2030°C)، مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی عالی در دمای بالا، هدایت الکتریکی و حرارتی خوب و چگالی نسبتاً پایین است [۱]. از جمله کاربردهای آن می‌توان به قطعات مکمل پره‌ها [۲]، مشعل‌های گاز قابل استفاده در صنایع و المان‌های حرارتی اشاره نمود [۳]. دی سیلیساید مولیبدن به روش‌های مختلفی از جمله روش‌های شیمیایی، ذوب قوسی و متالورژی پودر که شامل آلیاژسازی مکانیکی، زیت‌رینگ، سنتز خود

آلیاژسازی مکانیکی و توسط آسیاب سیاره‌ای یا آسیاب پرنرژی گلوله‌ای- ارتعاشی SPEX8000 تولید شده است [۵-۱۳]. بدلیل حجم کم آسیاب‌های سیاره‌ای (۴۵-۵۰۰ گرم) و آسیاب‌های گلوله‌ای- ارتعاشی (۲۰-۱۰ گرم)، این آسیاب‌ها دارای کاربرد صنعتی نبوده و برای کاربردهای صنعتی از آسیاب‌های سایشی با محفظه ثابت^۱ (۴۰۰۰۰-۵۰ گرم) استفاده می‌شود [۱۴]. در این تحقیق به منظور تشکیل ترکیب‌های دوتایی Mo-Si، پودرهای مولیبدن و سیلیسیم مخلوط شده و بوسیله آسیاب سایشی، آسیاب شده و در زمان‌های مختلف تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند و از آنجایی که پودرهای بدست آمده برای پاشش حرارتی مناسب نبودند، پودرهای حاصل تحت عملیات آگلومراسیون قرار گرفته و دانه‌بندی شدند.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق به منظور تولید پودر MoSi_2 ، پودرهای خالص مولیبدن با خلوص بالاتر از ۹۶ درصد و متوسط اندازه ذرات کمتر از ۱۲ میکرومتر و پودرهای خالص سیلیسیم با خلوص بالاتر از ۹۸ درصد و متوسط اندازه ذرات کمتر از ۱۰ میکرومتر به نسبت استوکیومتری ۱ به ۲ و وزن کلی ۴۰ گرم با هم مخلوط شده و به مدت ۲۰ ساعت تحت عملیات آلیاژسازی مکانیکی قرار گرفتند. آلیاژسازی مکانیکی با استفاده از یک آسیاب سایشی با محفظه ثابت و آبگرد و از جنس فولاد زنگ نزن با قطر ۹ و عمق ۱۰ سانتی‌متر، ساچمه‌هایی از جنس فولاد ابزار با قطر ۱۰ میلی‌متر و سختی ۸۰۰ ویکرز، نسبت وزنی ساچمه به پودر ۲۰ به ۱، سرعت گردش ۳۶۵ دور بر دقیقه و تحت اتمسفر آرگون انجام شد.

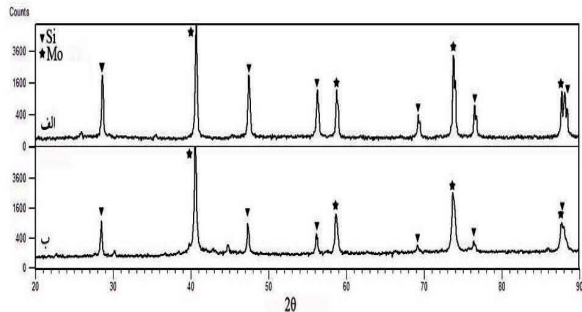
به منظور جلوگیری از چسبیدن پودرها به جداره داخلی محفظه آسیاب و ساچمه‌ها و همچنین تسریع عملیات آلیاژسازی مکانیکی و ریزتر شدن پودرها از اسید استتاریک به میزان ۱ درصد وزنی به عنوان کنترل کننده فرآیند استفاده شد [۱۴]. برای انجام عملیات حرارتی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، در زمان‌های ۳، ۵ و ۷ ساعت از کوره مقاوم‌تی لوله‌ای با کنترل

پودرهای مولیبدن و سیلیسیم، فاز $\alpha\text{-MoSi}_2$ مستقیماً در حین آلیاژسازی مکانیکی با یک واکنش احتراقی تشکیل شد، در ادامه با عملیات حرارتی این سیستم در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به کامل شدن واکنش و تشکیل $\alpha\text{-MoSi}_2$ تک فاز گردید [۵]. در تحقیقی دیگر مخلوط Si و Mo به همراه ۱۰ درصد اتمی مس به منظور تولید MoSi_2 تحت عملیات آلیاژسازی مکانیکی قرار گرفتند و با ۱۲۰ دقیقه آسیاب کاری توانستند فاز $\alpha\text{-MoSi}_2$ را تشکیل دهند. با افزایش زمان آسیاب کاری فاز شبه پایدار $\beta\text{-MoSi}_2$ بوجود آمده و با ۱۷ ساعت کار مکانیکی، آلیاژسازی تمام شده و تمام Si و Mo به فاز $\beta\text{-MoSi}_2$ تبدیل شد. در حضور مس سیستم Mo-Si از حالت ترد- ترد به حالت نرم- ترد تغییر می‌کند و مس به عنوان تنها فاز نرم موجود در سیستم، ذرات مولیبدن و سیلیسیم را در مراحل اولیه آلیاژسازی در بر گرفته، ذرات را به هم می‌چسباند و محدوده وسیعی از اندازه ذرات را بوجود می‌آورد [۶]. در موارد دیگر برای سنتز دی سیلیسید مولیبدن به روش آلیاژسازی مکانیکی، فعال‌سازی مکانیکی بر روی تک تک اجزاء پودر عناصر مولیبدن و سیلیسیم به صورت جداگانه در زمان‌های مختلف انجام گرفته و سپس پودر عنصر دوم (مولیبدن یا سیلیسیم) افزوده شده و کار مکانیکی ادامه یافته است.

به طوری که در این مورد با انجام آزمایش در دو حالت، موثرتر بودن فعال‌سازی مکانیکی بر روی Si نسبت به Mo برای سنتز دی سیلیسید مولیبدن مشخص گردید. علت اصلی موثرتر بودن فعال‌سازی مکانیکی بر روی Si، ترد بودن آن و داشتن ساختار کریستالی الماسی آن است، به طوری که پودر ذرات سیلیسیم سریع شکسته و اندازه کریستالیت‌ها کوچک می‌شود و سطح تماس افزایش یافته و در نهایت دی سیلیسید مولیبدن به وجود می‌آید [۷]. در یک مورد با احیای اکسیدهای MoO_3 و SiO_2 با آلومینیم کامپوزیت $\text{MoSi}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ در یک آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای سنتز شد به طوری که هر دو فاز α و β مولیبدن دی سیلیسید بعد از ۳ ساعت آسیاب تشکیل شدند [۸].

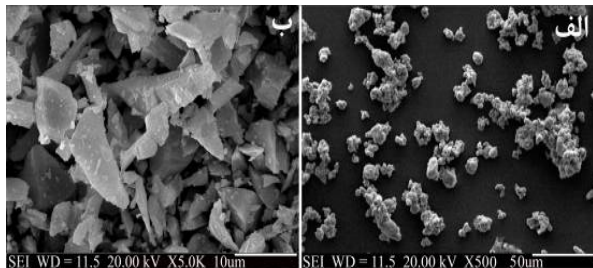
در اکثر تحقیقات، پودر دی سیلیسید مولیبدن به روش

و محفظه افزایش یافته در حالیکه تاثیر چندانی بر ریزتر شدن و فعال شدن پودرها ندارد [۱۷].



شکل (۱): الگوی پراش اشعه X پودرهای اولیه: الف) قبل از آسیاب کاری و ب) بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری

شکل (۲) مورفولوژی پودرهای Si و Mo را قبل و بعد از آسیاب کاری نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان ملاحظه نمود که پودرهای مولیبدن دارای اندازه ذرات کمتر از ۱۲ میکرون و پودرهای سیلیسیم دارای اندازه ذرات کمتر از ۱۰ میکرومتر هستند و در اثر آسیاب کاری مکانیکی اندازه متوسط این ذرات پس از ۲۰ ساعت تقریباً برابر ۳۰۰ نانومتر است.



شکل (۲): تصاویر (SEM): الف) پودر مولیبدن خالص، ب) پودر سیلیسیم خالص و ج) پودر آسیاب شده.

با توجه به این که بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری ترکیب MoSi_2

کننده‌های هریوس (Heraeus) و جومو (Jomo) استفاده گردید، به طوری که جریان مداوم گاز آرگون در طی فرآیند و در درون لوله‌ای از جنس کوارتز، ادامه داشت. برای درشت کردن ذرات بسیار ریز و مناسب سازی آن‌ها جهت استفاده در فرآیندهای پاششی، تکنیک‌ها و روش‌های مختلفی ارائه شده است [۱۵ و ۱۶]. در این تحقیق، استفاده از بایندر کربوکسی متیل سلولز (CMC) به میزان ۱٪ وزنی، پودر Mo-Si عملیات حرارتی شده به میزان ۱۲٪ وزنی و مابقی آب دیونیزه، همراه با هم زدن مغناطیسی و سپس خشک کردن سوسپانسیون در آون و نهایتاً دانه‌بندی محصول در محدوده اندازه $150 - 75 \mu\text{m}$ بوسیله غربال، بهترین نتیجه را برای تولید ذرات آگلومره در پی داشت. جهت بررسی آنالیز فازی پودرهای حاصل از آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی و همچنین ذرات آگلومره از آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. بدین منظور از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل PW-1877 ساخت شرکت فیلیپس، استفاده شد به طوری که اشعه مورد استفاده، اشعه تکفام $\text{CuK}\alpha$ با طول موج ۱.۵۴۲ آنگستروم بود. زمان هر گام ۱ ثانیه، اندازه گام ۰.۰۵ درجه و محدوده مورد بررسی ۱۰-۰ درجه انتخاب گردید. جهت بررسی مورفولوژی و ساختار پودر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل AIS-2100 ساخت شرکت Seron Technology با ولتاژ ۲۰ کیلوولت استفاده شد.

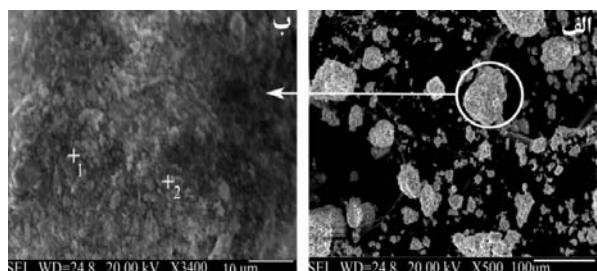
۳- نتایج و بحث

شکل (۱) الگوی پراش اشعه X پودرهای اولیه قبل و بعد از آسیاب کاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هیچ‌گونه ترکیب بین فلزی در الگوی پراش مشاهده نشده و تنها پیک‌های جدید نسبت به پیک‌های مرجع پهن تر شده است، که می‌تواند به دلیل ریزتر شدن ذرات و تنش ایجاد شده در پودر باشد، این نشان دهنده آن است که تنها اثر آسیاب کاری، مخلوط شدن، ریز شدن و فعال شدن پودرهای اولیه است. در صورتی که زمان آسیاب کاری افزایش یابد، آلودگی در اثر سایش ساچمه‌ها

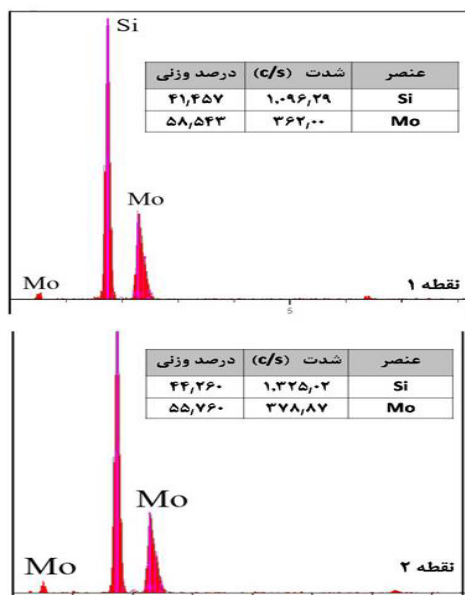
است [۱۸].



شکل (۴) تصویر SEM پودر عملیات حرارتی شده به مدت ۷ ساعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در قسمت (الف) مشخص است بعضی از ذرات آسیاب شده، در اثر عملیات حرارتی در دمای بالا زینتر شده و به دانه‌هایی با اندازه بزرگتر تبدیل شده‌اند. شکل (۴-ب) ذره مشخص شده در شکل (الف) را با بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد. از دو نقطه نشان داده شده در شکل (۴-ب) آنالیز EDS گرفته شد و نتایج آن در شکل (۵) نشان داده شده است.

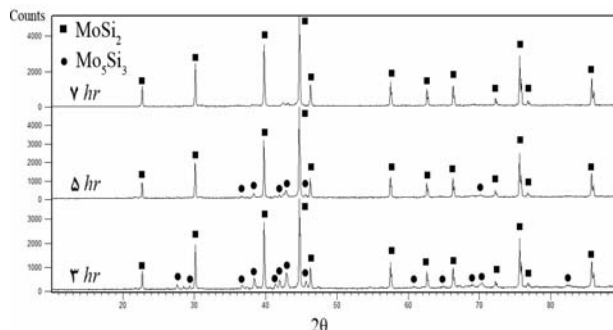


شکل (۴): تصویر SEM پودر آسیاب کاری شده و عملیات حرارتی شده به مدت ۷ ساعت در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (الف): بزرگنمایی ۵۰۰، (ب): بزرگنمایی ۳۴۰۰



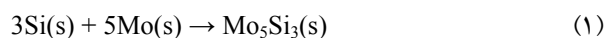
شکل (۵): نتایج حاصل از آنالیز EDS مربوط به نقاط ۱ و ۲ نشان داده شده در شکل (۴-ب)

تشکیل نشد، پودرهای آسیاب شده در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های ۳، ۵ و ۷ ساعت عملیات حرارتی شدند، شکل (۳) الگوی پراش اشعه ایکس این پودرها را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.

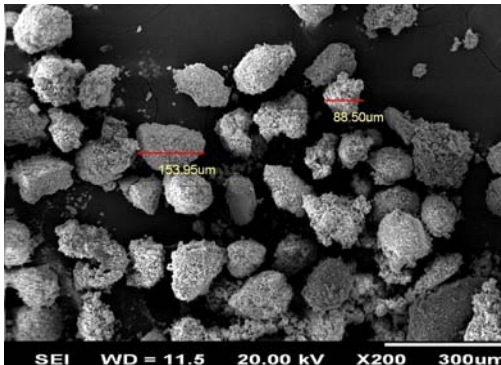


شکل (۳): الگوی پراش اشعه ایکس پودرهای ۲۰ ساعت آسیاب کاری و عملیات حرارتی شده در ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف

همان‌طور که از شکل پیداست ترکیبات بین فلزی MoSi_2 و Mo_5Si_3 پس از ۳ ساعت عملیات حرارتی در دمای ۱۱۰۰ تشکیل شده و با افزایش زمان عملیات حرارتی شدت پیک MoSi_2 در الگوی پراش اشعه ایکس افزایش یافته و از شدت پیک Mo_5Si_3 کاسته می‌شود و پس از ۷ ساعت عملیات حرارتی تنها پیک MoSi_2 در الگوی پراش اشعه ایکس مشاهده می‌شود و در نتیجه پس از ۷ ساعت عملیات حرارتی پودر Mo-Si آسیاب کاری شده در دمای ۱۱۰۰ می‌توان به MoSi_2 خالص دست یافت. در نتایج سایر محققین نیز با افزایش زمان عملیات حرارتی مقدار فاز Mo_5Si_3 کاهش یافته و مقدار فاز MoSi_2 افزایش می‌یابد [۹]. دلیل آن این است که وقتی نرخ گرمایش کم است (کمتر از ۱۰۰/min)، واکنش حالت جامد بین پودرهای اولیه رخ می‌دهد و فاز Mo_5Si_3 طبق واکنش زیر تشکیل می‌شود [۱۸].



از آنجایی که این واکنش گرمازا است، سیلیسیم از گرمای تشکیل Mo_5Si_3 ذوب شده و Mo_5Si_3 با سیلیسیم مذاب واکنش می‌دهد و سرانجام MoSi_2 جامد تشکیل می‌شود (واکنش ۲). این پدیده تحت عنوان عمل خود تصفیه‌ای در دمای بالا شناخته شده



شکل (۶): تصویر SEM ذرات پودر Mo-Si بعد از ۲۰ ساعت فرآیند آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی به مدت ۷ ساعت در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد و سپس آگلومره شدن

۴- نتیجه گیری

۱- آسیاب کاری بوسیله آسیاب سایشی مخلوط مولیبدن و سیلیسیم خالص به مدت ۲۰ ساعت، تنها منجر به ریز شدن، فعال شدن و مخلوط شدن می گردد و هیچ گونه فاز جدیدی تشکیل نمی شود.

۲- با عملیات حرارتی پودر آسیاب کاری شده در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد، ترکیبات MoSi_2 و Mo_5Si_3 تشکیل می شوند.

۳- با آسیاب کاری به مدت ۲۰ ساعت بوسیله آسیاب سایشی و عملیات حرارتی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۷ ساعت می توان به MoSi_2 خالص دست یافت.

۴- فرآیند آگلومراسیون سیالیت پودرهای عملیات حرارتی شده را به شدت افزایش و آن ها را جهت استفاده در فرآیند پاشش حرارتی مناسب می سازد.

۵- مراجع

- [1] H. Zhang, X. Liu, "Analysis of Milling In Synthesis and Formation Mechanism of Molybdenum Disilicide By Mechanical Alloying", International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 19, pp. 203-208, 2001.
- [2] M. G. Hebsur, "Development and Characterization of $\text{SiC(f)/MoSi}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{(p)}$ Hybrid Composites", Materials Science and Engineering A, Vol. 261, pp. 24-37, 1999.

نتایج حاصل از EDS در شکل (۵) نشان می دهد که پودر آسیاب و عملیات حرارتی شده به مدت ۷ ساعت در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد حدود ۶۰ درصد وزنی مولیبدن و ۴۰ درصد وزنی سیلیسیم دارد که با ترکیب دی سیلیساید مولیبدن خالص (۶۳ درصد وزنی مولیبدن و ۳۷ درصد وزنی سیلیسیم) تقریباً مطابقت دارد. نتایج اخیر مشخص کننده خلوص بالای ترکیب حاصله، آلیاژسازی و عملیات حرارتی مناسب می باشد.

یکی از اهداف اصلی این تحقیق، تولید پودرهایی با سیالیت مناسب برای فرآیند پاشش حرارتی است، از آنجایی که پودرهای آسیاب کاری و عملیات حرارتی شده دارای مورفولوژی کاملاً غیر یکنواخت بوده و هیچگونه سیالیتی از خود نشان نمی دهند، لذا این گونه ذرات قابلیت مطلوبی برای فرآیند پاشش حرارتی ندارند و بخش زیادی از پودر، علاوه بر اکسیداسیون قابل توجه، به هنگام قرار گرفتن در نازل دستگاه پاشش حرارتی به صورت گرد در هوا معلق شده و به سمت زیر لایه پرتاب نمی شوند، بر این اساس ذرات پودر بعد از فرآیند آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی به مدت ۷ ساعت در دمای ۱۱۰۰ با استفاده از بایندر CMC و آب دیونیزه به صورت یک سوسپانسیون درآمدند و پس از خشک شدن آن در آون و دانه بندی محصول خشک شده، ذرات آگلومره با اندازه $75-150\mu\text{m}$ تولید شد که تصویر SEM این ذرات در شکل (۶) آورده شده است، همان طور که از این شکل پیداست ذرات آگلومره شده دارای مورفولوژی شبه کروی هستند که نسبت به حالت آگلومره نشده شکل (۴) از مورفولوژی یکنواخت تری برخوردارند و با توجه به انجام آزمایش تعیین سرعت سیلان پودر آگلومره شده رابطه (۱) مطابق استاندارد ASTM B0213-03، مشخص شد که ذرات آگلومره از سرعت حرکت نسبی خوبی برخوردار هستند:

$$\text{سرعت سیلان} = w(\text{gr})/t(\text{sec}) = 50/102 = 0.49 \text{ gr/sec} \quad (1)$$

- Materials Science and Engineering A, Vol. 345, pp. 270-277, 2003.
- [12] H. Saage, M. Kruger, et al, "Ductilization of Mo-Si solid Solutions Manufactured by Powder Metallurgy", Journal of Acta Materialia, Vol. 57, pp. 3895-3901, 2009.
- [13] L. Liu, F. Padella, W. Guo, M. Maginit, "Solid State Alloying Reactions Include by Mechanical in Metal-Silicon Systems", Journal of Acta Metal, Vol. 43, No. 10, pp. 3755-3761, 1995.
- [14] C. Suryanarayana, Mechanical "Alloying and Milling", pp. 13-29, Marcel Dekker, New York, 2004.
- [15] P. R. Strutt, B. H. Kear, R. F. Boland, "Methods of Manufacture of Nanostructured Feeds", US Patent, 6025034, 2000.
- [16] L. E. McCandlish, B. H. Kear, S. J. Bhatia, "Spray Conversion Process for the Production of Nanophase Composite Powders", US patent, 5352269, 1994.
- [17] ع. طوقیان چهارسوقی، م. صالحی و غ. برهانی، "سنترز درجای ترکیب بین فلزی $MoSi_2$ از مخلوط پودری فعال شده Si و Mo در حین پاشش پلاسمایی"، دهمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۸۸.
- [18] م. کلانتر، سرامیک‌های سازه‌ای دما بالا، انتشارات دانشگاه یزد، ۱۳۸۷.
- [3] R. Mitra, "Mechanical Behavior and Oxidation Resistance of Structural Silicides", International Materials Reviews, Vol. 51, pp. 13-64, 2006.
- [4] K. Zuo, S. Xi, J. Zhou, "Structure Evolution and Thermodynamics Analysis of $MoSi_2$ during mechanical Alloying", Materials Science and Engineering A, Vol 445- 446, pp. 48-53, 2007.
- [۵] م. ذاکری، "سنترز پودر $MoSi_2$ نانوکریستال با روش آلیاژسازی مکانیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه مواد و انرژی، ۱۳۸۴.
- [۶] ف. جاوید، ع. سعیدی، م. ح. عباسی و م. ص. خوشخو، "بررسی تغییرات ریزساختار حین آلیاژ سازی مکانیکی برای تولید $MoSi_2$ در حضور مس"، دهمین کنگره سالانه انجمن مهندسیین متالورژی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، انجمن مهندسیین متالورژی، ۱۳۸۵.
- [۷] ب. قاسمی، ج. و. خاکی و م. گودرزی، " بررسی و مقایسه تاثیر فعال سازی مکانیکی بر روی Si و Mo برای سنترز دی سیلیسید مولیبدن"، نشریه امیرکبیر (مهندسی عمران، معدن، متالورژی)، سال ۱۸ شماره ۱، ص. ۵۷-۶۴، بهار و تابستان ۱۳۸۶.
- [۸] م. ذاکری، ر. یزدانی، م. ر. رحیمی پور و م. ح. غنایتی، " سنترز کامپوزیت $MoSi_2-Al_2O_3$ با روش آلیاژ سازی مکانیکی"، نهمین کنگره سالانه انجمن مهندسیین متالورژی ایران، دانشگاه شیراز، انجمن مهندسیین متالورژی، ۱۳۸۴.
- [9] P. kang, Z. Yin, "Phase Formation During Annealing as-Milled powders of Molybdenum Disilicide", Journal of Materials Letters, Vol. 57, pp. 4412-4417, 2003.
- [10] L. Liu, K. Cui, "Mechanical Alloying of Refractory Metal- Silicon Systems", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 138, pp. 394-398, 2003.
- [11] M. Sannia, R. Orru, J. E. Garay, G. Cao, Z. A. Munir, "Effect of Phase Transformation During High Energy Milling of Field Activated Synthesis of Dense $MoSi_2$ ",

۶- پی نوشت

1- فاز نترراگونال ($\alpha-MoSi_2$) در دماهای کمتر از ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار بوده و در دماهای بالاتر از آن فاز ($\beta-MoSi_2$) هگزگونال فاز پایدار است.

2- Attritor ball mil