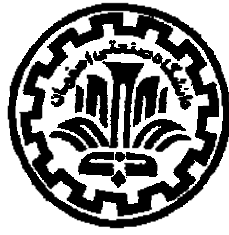


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

روکش کاری نیکل با روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز با پودرهای  
نانو کامپوزیتی Mo-Si-B تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی

رساله دکتری مهندسی مواد

علیرضا عباسی

استاد راهنما

دکتر مرتضی شمعیان

# سپاس فراوان ایزد تبارک و تعالی را که هر دم و بازدمی پویا به لطف اوست

و با تشکر از:

استاد ارجمندم جناب آقای دکتر شمعانیان به سبب راهنمایی و مساعدت در تمام مراحل انجام  
این پایان نامه و درس های بزرگی که در سایه صفات والای ایشان آموختم.

استاد علم و اخلاق جناب آقای دکتر ساعتچی

پدر و مادر عزیزم که همواره مشوق و پشتیبانم بوده اند

و

همسر دوست داشتنی و مهربانم مریم که در تمامی مراحل انجام پایان نامه همراه، مشوق، پشتیبان  
و سنگ صبورم بوده است.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج  
مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای  
ناشی از تحقیق موضوع این رساله  
متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان  
است.

تقديم به

همسر بسیار عزیزم

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هفت
فهرست شکل ها	نه
فهرست جدول ها	سیزده
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	۲
<b>فصل دوم: مرور مطالعاتی</b>	
۱-۲ بررسی دیاگرام فازی سیستم Mo-Si	۶
۲-۲ خواص مکانیکی سیلیساید های مولیبدن	۱۰
۳-۲ رفتار اکسیداسیون سیلیساید های مولیبدن	۱۶
۴-۲ کامپوزیت های MoSi <sub>2</sub>	۲۰
۱-۴-۲ خواص مکانیکی کامپوزیت های MoSi <sub>2</sub>	۲۳
۲-۴-۲ رفتار اکسیداسیون کامپوزیت های MoSi <sub>2</sub>	۲۶
۵-۲ بررسی سیستم Mo-Si-B	۲۸
۱-۵-۲ محدوده های فازی در آلیاژ های چند فازی Mo-Si-B	۲۹
۲-۵-۲ خواص مکانیکی آلیاژ های Mo-Si-B	۳۲
۳-۵-۲ رفتار اکسیداسیون آلیاژ های Mo-Si-B	۳۶
۶-۲ روکش کاری جوشی	۳۹
۱-۶-۲ روکش کاری به وسیله فرایند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز	۴۱
۲-۶-۲ ایجاد روکش های جوشی از کامپوزیت ها و ترکیبات بین فلزی	۴۲
<b>فصل سوم: مواد و روش انجام آزمایش ها</b>	
۱-۳ مواد اولیه و ترکیب پودر های انتخابی	۴۵
۲-۳ آلیاژ سازی مکانیکی و عملیات حرارتی	۴۷
۳-۳ روکش کاری جوشی	۴۸
۴-۳ بررسی رفتار اکسیداسیونی پوشش ها	۵۰
۵-۳ بررسی های ساختاری	۵۰
۶-۳ ریزسختی سنجی	۵۲
<b>فصل چهارم: نتایج و بحث</b>	
۱-۴ تولید پودر Mo-۱۲/۵ %at. Si-۲۵ %at. B	۵۴
۱-۱-۴ آلیاژ سازی مکانیکی مستقیم مخلوط پودری	۵۴
۲-۱-۴ عملیات حرارتی پودرها بعد از آلیاژ سازی مکانیکی مستقیم	۶۵
۳-۱-۴ آلیاژ سازی مکانیکی دو مرحله ای مخلوط پودری M-SB و عملیات حرارتی متعاقب	۷۵
۴-۱-۴ آلیاژ سازی مکانیکی دو مرحله ای مخلوط پودری B-MS و عملیات حرارتی متعاقب	۸۹

۹۶	..... ۲-۴ روکش کاری جوشی
۹۶	..... ۱-۲-۴ روکش کاری جوشی پودرهای با ترکیب P۱
۱۲۴	..... ۲-۲-۴ روکش کاری جوشی پودرهای با ترکیب P۱۲
۱۳۱	..... ۳-۲-۴ روکش کاری جوشی پودرهای با ترکیب P۲ و P۲۲
۱۳۹	..... ۳-۴ اکسایش پیوسته در دمای بالا
۱۵۸	..... فصل پنجم: نتیجه گیری
۱۶۰	..... مراجع

## فهرست شکل ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۷	شکل ۱-۲ نمودار فازی سیستم Mo-Si
۷	شکل ۲-۲ سلول واحد شبکه MoSi <sub>2</sub> پارامترهای شبکه $a = 0.3202 \text{ nm}$
۸	شکل ۳-۲ (الف) ساختار بلوری واقعی MoSi <sub>2</sub> وقتی که با اتم های Si در
۹	شکل ۴-۲ شبکه بلوری Mo <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>
۱۰	شکل ۵-۲ شبکه بلوری Mo <sub>3</sub> Si
۱۱	شکل ۶-۲ تنش های تسلیم تک بلورهای MoSi <sub>2</sub> بر حسب دما و جهت
۱۲	شکل ۷-۲ تنش تسلیم چندبلوری MoSi <sub>2</sub> با اندازه دانه درشت و مقدار کم
۱۳	شکل ۸-۲ نرخ خزش چندبلوری MoSi <sub>2</sub> به صورت تابعی از اندازه دانه
۱۳	شکل ۹-۲ اثر اضافه کردن کربن بر چقرمگی شکست دمای بالای MoSi <sub>2</sub>
۱۴	شکل ۱۰-۲ وابستگی تنش تسلیم Mo <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> به دما برای چهار جهت مختلف
۱۵	شکل ۱۱-۲ مدول ینگگ ویژه سیلیساید های کاربردی در دمای بالا
۱۶	شکل ۱۲-۲ منحنی ریزسختی و چقرمگی شکست Mo <sub>3</sub> Si بر حسب جهت
۲۰	شکل ۱۳-۲ مقطع همدمای محاسبه شده برای سیستم سه تایی Mo-Si-O
۲۲	شکل ۱۴-۲ ضرایب انبساط حرارتی برای زمینه ها و تقویت کننده های
۲۴	شکل ۱۵-۲ نرخ خزش کامپوزیت های MoSi <sub>2</sub> با کسرهای حجمی مختلف
۲۵	شکل ۱۶-۲ مقایسه نرخ خزش مواد بر پایه MoSi <sub>2</sub> با ترکیبات بین فلزی و
۲۵	شکل ۱۷-۲ اثر تنش و کسر حجمی Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> بر خزش کامپوزیت های MoSi <sub>2</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
۲۷	شکل ۱۸-۲ منحنی های اکسیداسیون پیوسته پوشش های مختلف از نوع
۲۹	شکل ۱۹-۲ منحنی های اکسیداسیون پیوسته Mo <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> فاقد بور و Mo <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>
۳۰	شکل ۲۰-۲ مقطع همدمای نمودار فازی سه تایی سیستم Mo-Si-B در
۳۱	شکل ۲۱-۲ بخش غنی از مولیبدن نمودار فازی اصلاح شده سه تایی
۳۲	شکل ۲۲-۲ (الف) ساختار بلوری Mo <sub>5</sub> SiB <sub>2</sub> که از روی هم قرار گرفتن
۳۳	شکل ۲۳-۲ مقایسه نرخ خزش نمونه های Mo <sub>5</sub> SiB <sub>2</sub> چندبلوری و تک بلور
۳۵	شکل ۲۴-۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از یک آلیاژ دو فازی
۳۸	شکل ۲۵-۲ نمودار گرانیوی بوروسیلیکات B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> شیشه ای بر حسب
۳۸	شکل ۲۶-۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و آنالیز عنصری توسط
۴۲	شکل ۲۷-۲ شماتیک دستگاه جوشکاری قوسی تنگستن تحت پوشش گاز
۴۶	شکل ۱-۳ بخش غنی از مولیبدن نمودار فازی سه تایی سیستم Mo-Si-B
۵۰	شکل ۲-۳ شماتیکی از فرایند روکش کاری جوشی با استفاده از فرایند
۵۵	شکل ۱-۴ (الف) الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودری
۵۶	شکل ۲-۴ تغییرات پارامتر شبکه مولیبدن با افزایش زمان آلیاژسازی مکانیکی
۵۸	شکل ۳-۴ (الف) الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودری
۵۹	شکل ۴-۴ نمودار فازی ارایه شده برای Mo-Mo <sub>5</sub> SiB <sub>2</sub>
۶۰	شکل ۵-۴ تغییرات اندازه دانه و کرنش شبکه ای مولیبدن
۶۱	شکل ۶-۴ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات پودری عناصر



- شکل ۴-۷ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات مخلوط پودری..... ۶۲
- شکل ۴-۸ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی ذرات..... ۶۴
- شکل ۴-۹ تغییرات ریزسختی ذرات مخلوط پودری در حین آلیاژسازی..... ۶۵
- شکل ۴-۱۰ الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای آلیاژسازی مکانیکی شده..... ۶۶
- شکل ۴-۱۱ موقعیت پیک های  $Mo_5SiB_2$  در الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای..... ۶۷
- شکل ۴-۱۲ شماتیک مقطع  $Mo_{(ss)}-Mo_5SiB_2$  با تغییرات ترکیب با دما..... ۷۰
- شکل ۴-۱۳ تغییرات پارامتر شبکه مولیبدن در حین آلیاژسازی مکانیکی و..... ۷۱
- شکل ۴-۱۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی ذرات پودر..... ۷۲
- شکل ۴-۱۵ الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای MSB20 بعد از عملیات حرارتی..... ۷۳
- شکل ۴-۱۶ تغییرات شدت پیک های الف) (۱۱۰) Mo و ب)  $(213) Mo_5SiB_2$ ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۷ الف) الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودری  $Si-66\%/atm.B$ ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۸ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی ذرات پودری..... ۷۶
- شکل ۴-۱۹ آنالیز نقطه ای طیف سنجی انرژی پرتو ایکس فازهای..... ۷۷
- شکل ۴-۲۰ نمودار فازی سیلیسیم - بور..... ۷۷
- شکل ۴-۲۱ الف) پهن شدن و جابجایی پیک  $(111) Si$  در حین مرحله اول..... ۷۸
- شکل ۴-۲۲ الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودری M-SB بعد از زمان های..... ۷۹
- شکل ۴-۲۳ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی ذرات پودری..... ۸۰
- شکل ۴-۲۴ آنالیز نقطه ای طیف سنجی انرژی پرتو ایکس فاز تیره مشاهده شده..... ۸۰
- شکل ۴-۲۵ تغییرات پارامتر شبکه مولیبدن در حین مرحله دوم آلیاژسازی مکانیکی..... ۸۱
- شکل ۴-۲۶ تغییرات شدت پیک  $(110) Mo$  در حین مرحله دوم آلیاژسازی مکانیکی..... ۸۲
- شکل ۴-۲۷ مورفولوژی ذرات پودری پس از ۱۰ ساعت از مرحله دوم آلیاژسازی..... ۸۲
- شکل ۴-۲۸ تغییرات پهنای پیک  $(110) Mo$  در حین مرحله دوم آلیاژسازی مکانیکی..... ۸۴
- شکل ۴-۲۹ الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودری  $Mo-12.5\%/at. Si-25\%/at. B$ ..... ۸۴
- شکل ۴-۳۰ الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی شده..... ۸۵
- شکل ۴-۳۱ مقایسه شدت پیک های  $\alpha-MoSi_2$  در پودرهای مختلف آلیاژسازی..... ۸۶
- شکل ۴-۳۲ مقایسه شدت پیک های  $Mo_3Si$  در پودرهای مختلف آلیاژسازی..... ۸۶
- شکل ۴-۳۳ تغییرات انرژی آزاد ناشی از تشکیل فازهای  $Mo_3Si$  و  $\alpha-MoSi_2$  با دما..... ۸۷
- شکل ۴-۳۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع عرضی ذرات پودر..... ۸۸
- شکل ۴-۳۵ الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودری  $Mo-17\%/atm.Si$  در..... ۹۰
- شکل ۴-۳۶ تغییرات شدت پیک  $(110) Mo$  با افزایش زمان مرحله اول آلیاژسازی..... ۹۰
- شکل ۴-۳۷ مورفولوژی ذرات مخلوط پودری  $Mo-17\%/atm.Si$  پس از ۲ ساعت..... ۹۰
- شکل ۴-۳۸ الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط های پودری B-MS بعد از ۲۰ ساعت..... ۹۱
- شکل ۴-۳۹ تغییرات پارامتر شبکه مولیبدن در حین مرحله اول و دوم آلیاژسازی..... ۹۲
- شکل ۴-۴۰ تغییرات پهنای پیک  $(110) Mo$  در حین مرحله اول و دوم آلیاژسازی..... ۹۳
- شکل ۴-۴۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی ذرات پودری..... ۹۳
- شکل ۴-۴۲ الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای آلیاژسازی مکانیکی شده B-MS..... ۹۵
- شکل ۴-۴۳ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع عرضی ذرات پودر..... ۹۶

- شکل ۴-۴۴ الف) تصویر میکروسکوپی نوری مقطع عرضی پوشش ایجاد شده از..... ۹۷
- شکل ۴-۴۵ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نواحی نزدیک به سطح..... ۹۸
- شکل ۴-۴۶ نمودار فازی نیکل - مولیبدن..... ۹۹
- شکل ۴-۴۷ نمودار فازی نیکل - سیلیسیم..... ۱۰۰
- شکل ۴-۴۸ الگوی پراش پرتو ایکس روکش حاصل از مخلوط پودری P۱..... ۱۰۰
- شکل ۴-۴۹ آنالیز و گارد برای تعیین درصد مولیبدن موجود در محلول جامد نیکل..... ۱۰۰
- شکل ۴-۵۰ نقشه آنالیز عنصری پرتو ایکس در نواحی نزدیک سطح روکش..... ۱۰۲
- شکل ۴-۵۱ الف) تصویر میکروسکوپی نوری مقطع عرضی روکش..... ۱۰۴
- شکل ۴-۵۲، آنالیز پراش پرتو ایکس روکش ایجاد شده با استفاده از یک لایه..... ۱۰۵
- شکل ۴-۵۳ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نواحی نزدیک به سطح..... ۱۰۵
- شکل ۴-۵۴ مقطع همدمای سیستم Mo-Ni-Si را در دمای ۹۵۰°C..... ۱۰۸
- شکل ۴-۵۵ تفکیک رنگ انجام شده به وسیله نرم افزار Image Tools..... ۱۰۹
- شکل ۴-۵۶ نقشه آنالیز عنصری پرتو ایکس پوشش ایجاد شده با استفاده از یک..... ۱۱۰
- شکل ۴-۵۷ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مناطق نزدیک به سطح..... ۱۱۱
- شکل ۴-۵۸ الگوی پراش پرتو ایکس پوشش MM-MSB..... ۱۱۲
- شکل ۴-۵۹ نقشه آنالیز عنصری پرتو ایکس پوشش MM-MSB..... ۱۱۳
- شکل ۴-۶۰ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح مقطع عرضی پوشش P۱..... ۱۱۵
- شکل ۴-۶۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نواحی نزدیک به سطح پوشش P۱..... ۱۱۶
- شکل ۴-۶۲ الگوی پراش پرتو ایکس سطح پوشش P۱..... ۱۱۷
- شکل ۴-۶۳ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس فاز زمینه در ریزساختار..... ۱۱۸
- شکل ۴-۶۴ تغییرات خطی غلظت عناصر نیکل، مولیبدن و سیلیسیم در اطراف فاز C..... ۱۲۰
- شکل ۴-۶۵ نقشه آنالیز عنصری پرتو ایکس پوشش P۱..... ۱۲۱
- شکل ۴-۶۶ آنالیز خطی عنصری از زیر لایه تا نواحی نزدیک به سطح پوشش P۱..... ۱۲۳
- شکل ۴-۶۷ الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط‌های پودری مختلف پس از ۲۰ ساعت..... ۱۲۵
- شکل ۴-۶۸ الگوی پراش پرتو ایکس پودر آلیاژسازی مکانیکی شده P۱۲ پس از..... ۱۲۶
- شکل ۴-۶۹ موقعیت پیک‌های مرجع  $Mo_5SiB_2$  و تطابق کامل آن با الگوی پراش..... ۱۲۶
- شکل ۴-۷۰ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نواحی نزدیک به سطح پوشش P۱۲..... ۱۲۷
- شکل ۴-۷۱ الگوی پراش پرتو ایکس سطح روکش P۱۲..... ۱۲۸
- شکل ۴-۷۲ الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودری P۱۳ پس از ۵ ساعت عملیات حرارتی..... ۱۳۰
- شکل ۴-۷۳ مقایسه شدت پیک‌های  $Mo_5SiB_2$  در پودرهای HP۱۲ و HP۱۳..... ۱۳۰
- شکل ۴-۷۴ مقایسه شدت پیک‌های MoB در پودرهای HP۱۲ و HP۱۳..... ۱۳۱
- شکل ۴-۷۵ الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای آلیاژسازی مکانیکی شده P۲ پس از..... ۱۳۱
- شکل ۴-۷۶ الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای آلیاژسازی مکانیکی شده P۲۲ پس از..... ۱۳۲
- شکل ۴-۷۷ مقایسه شدت پیک‌های  $Mo_5Si_3$  در الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای..... ۱۳۲

- شکل ۴-۷۸ مقایسه شدت پیک‌های  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  در الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای ..... ۱۳۳
- شکل ۴-۷۹ الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای آلیاژ سازی مکانیکی شده P۲۳ پس از ..... ۱۳۴
- شکل ۴-۸۰ مقایسه شدت پیک‌های  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  در الگوی پراش پرتو ایکس پودرهای ..... ۱۳۴
- شکل ۴-۸۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نواحی نزدیک به سطح پوشش P۲ ..... ۱۳۵
- شکل ۴-۸۲ الگوی پراش پرتو ایکس سطح پوشش P۲ ..... ۱۳۶
- شکل ۴-۸۳ نقشه توزیع عنصری پرتو ایکس پوشش P۲ ..... ۱۳۶
- شکل ۴-۸۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نواحی نزدیک به سطح پوشش P۲۲ ..... ۱۳۷
- شکل ۴-۸۵ نقشه توزیع عنصری پرتو ایکس پوشش P۲۲ ..... ۱۳۸
- شکل ۴-۸۶ الگوی پراش پرتو ایکس سطح پوشش P۲۲ ..... ۱۳۸
- شکل ۴-۸۷ نمودار اکسایش پیوسته در دمای  $1000^\circ\text{C}$  برای زیرلایه نیکل ..... ۱۴۰
- شکل ۴-۸۸ ریزش پوسته اکسیدی در حین اکسیداسیون نیکل ..... ۱۴۰
- شکل ۴-۸۹ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی لایه اکسیدی ..... ۱۴۱
- شکل ۴-۹۰ مکانیزم تشکیل منطقه متخلخل در نتیجه جدایش فلز-پوسته ..... ۱۴۲
- شکل ۴-۹۱ نمودار اکسایش پیوسته در دمای  $1000^\circ\text{C}$  برای پوشش MM-MSB ..... ۱۴۳
- شکل ۴-۹۲ نمودار اکسایش پیوسته در دمای  $1000^\circ\text{C}$  برای پوشش P۱ ..... ۱۴۳
- شکل ۴-۹۳ نمودار اکسایش پیوسته در دمای  $1000^\circ\text{C}$  برای پوشش P۱۲ ..... ۱۴۳
- شکل ۴-۹۴ نمودار اکسایش پیوسته در دمای  $1000^\circ\text{C}$  برای پوشش P۲ ..... ۱۴۴
- شکل ۴-۹۵ نمودار اکسایش پیوسته در دمای  $1000^\circ\text{C}$  برای پوشش P۲۲ ..... ۱۴۴
- شکل ۴-۹۶ مقایسه نمودارهای اکسایش پیوسته پوشش‌های مختلف در دمای  $1000^\circ\text{C}$  ..... ۱۴۴
- شکل ۴-۹۷ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح پوسته اکسیدی تشکیل شده ..... ۱۴۵
- شکل ۴-۹۸ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی پوشش MM-MSB ..... ۱۴۶
- شکل ۴-۹۹ الگوی پراش پرتو ایکس سطح پوشش MM-MSB پس از ۳۰ ساعت ..... ۱۴۷
- شکل ۴-۱۰۰ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح پوسته اکسیدی تشکیل ..... ۱۴۸
- شکل ۴-۱۰۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی پوشش P۱ ..... ۱۴۹
- شکل ۴-۱۰۲ آنالیز خطی عنصری از سطح لایه اکسیدی تا داخل پوشش P۱ ..... ۱۴۹
- شکل ۴-۱۰۳ الگوی پراش پرتو ایکس سطح پوشش P۱ پس از ۳۰ ساعت ..... ۱۵۰
- شکل ۴-۱۰۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح پوشش P۱۲ پس از ..... ۱۵۱
- شکل ۴-۱۰۵ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح مقطع عرضی پوشش ..... ۱۵۲
- شکل ۴-۱۰۶ الگوی پراش پرتو ایکس سطح پوشش P۱۲ پس از ۳۰ ساعت ..... ۱۵۲
- شکل ۴-۱۰۷ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح پوشش‌های P۲ و ..... ۱۵۴
- شکل ۴-۱۰۸ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح مقطع عرضی ..... ۱۵۵
- شکل ۴-۱۰۹ آنالیز خطی عنصری از سطح لایه اکسیدی تا داخل پوشش P۲ ..... ۱۵۶
- شکل ۴-۱۱۰ الگوی پراش پرتو ایکس سطح پوشش P۲ پس از ۳۰ ساعت ..... ۱۵۶
- شکل ۴-۱۱۱ تصویر نمونه P۲ پس از ۱۰۰ ساعت قرارگیری در دمای  $1000^\circ\text{C}$  ..... ۱۵۷

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۸	جدول ۱-۲ خواص فیزیکی و مکانیکی ترکیبات بین فلزی متداول.....
۱۵	جدول ۲-۲ داده های انبساط حرارتی ترکیبات بین فلزی کاربردی دمای بالا از نوع تتراگونال.....
۲۶	جدول ۳-۲ چقرمگی شکست دمای اتاق کامپوزیت‌های MoSi <sub>2</sub> .....
۳۴	جدول ۲-۴ مدول بالک (K)، مدول برشی (G)، مدول یانگ (E) و دمای دبای برای Mo <sub>5</sub> SiB <sub>2</sub> .....
۴۵	جدول ۱-۳ مشخصات پودرهای مورد استفاده.....
۴۶	جدول ۲-۳ ترکیب مخلوط‌های پودری انتخاب شده برای انجام فرایندهای مختلف تحقیق.....
۴۷	جدول ۳-۳ ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) زیرلایه‌ی نیکلی استفاده شده برای.....
۴۸	جدول ۳-۴ خلاصه‌ای از روش‌های مختلف آلیاژسازی مکانیکی انجام شده برای.....
۴۹	جدول ۵-۳ متغیرهای جوشکاری مورد استفاده برای روکش کاری جوشی لایه‌های مختلف.....
۶۸	جدول ۴-۴ مقادیرهای $\alpha$ ، $\gamma$ ، $\lambda$ و $\sin^2\theta$ برای هر یک از خط‌های Mo <sub>5</sub> SiB <sub>2</sub> در الگوی پراش.....
۶۹	جدول ۲-۴ مقادیرهای $\alpha$ ، $\gamma$ ، $\lambda$ و $\sin^2\theta$ برای هر یک از خط‌های Mo <sub>5</sub> SiB <sub>2</sub> در الگوی پراش.....
۹۸	جدول ۳-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس فازهای مشخص شده بر روی.....
۱۰۱	جدول ۴-۴ ثابت شبکه نیکل بر حسب درصد وزنی مولیدن حل شده در نیکل.....
۱۰۶	جدول ۵-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس فازهای مشخص شده بر روی.....
۱۰۷	جدول ۶-۴ اطلاعات ساختاری فازهای دوتایی و سه‌تایی موجود در سیستم مولیدن-سیلیسیم-نیکل.....
۱۱۱	جدول ۷-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس فازهای مشخص شده در شکل ۴-۵۷ ب.....
۱۲۰	جدول ۸-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس فازهای موجود در ریزساختار روکش P۱.....
۱۲۳	جدول ۹-۴ آنالیز منطقه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس لایه‌های مختلف روکش P۱.....
۱۲۸	جدول ۱۰-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس فازهای روکش P۱۲.....
۱۳۵	جدول ۱۱-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس فازهای روکش P۲.....
۱۳۹	جدول ۱۲-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس فازهای روکش P۲۲.....
۱۳۹	جدول ۱۳-۴ متوسط ریزسختی نواحی نزدیک به سطح در نمونه‌های مختلف.....
۱۴۷	جدول ۱۴-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس لایه‌های خارجی و داخلی پوسته اکسیدی MM-MSB.....
۱۴۹	جدول ۱۵-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس لایه‌های خارجی و داخلی پوسته اکسیدی P۱.....
۱۵۲	جدول ۱۶-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس پوسته اکسیدی و منطقه متاثر از اکسیداسیون پوشش P۱۲.....
۱۵۵	جدول ۱۷-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس پوسته اکسیدی و منطقه متاثر از اکسیداسیون پوشش P۲.....
۱۵۵	جدول ۱۸-۴ آنالیز نقطه‌ای طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس پوسته اکسیدی و منطقه متاثر از اکسیداسیون پوشش P۲۲.....

## چکیده:

هدف اصلی این پژوهش ایجاد پوشش‌هایی از ترکیبات مختلف Mo-Si-B حاوی فاز  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  روی نیکل با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز می‌باشد. در این راستا، روکش کاری جوشی در حالت‌های مختلف نظیر استفاده از مخلوط پودرهای عنصری، استفاده از مخلوط پودرهای عنصری به‌همراه استفاده از لایه میانی مولیبدنی و در نهایت استفاده از پودرهای آلیاژی به‌همراه استفاده از لایه میانی مولیبدنی انجام شد. نتایج نشان داد که بدون استفاده از لایه میانی مولیبدنی، به‌علت مشارکت زیاد نیکل از زیرلایه در ترکیب پوشش، ساختار پوشش انحراف زیادی از ساختار هدف دارد. استفاده از دو لایه میانی مولیبدنی منجر به کاهش قابل توجه مقدار نیکل در ترکیب پوشش شد. نوع فازهای تشکیل‌شده در پوشش در حین روکش کاری جوشی، به‌میزان قابل توجهی وابسته به وضعیت اولیه پودرها بود. با استفاده از مخلوط پودرهای غیرآلیاژی، فاز مهم  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  در ساختار پوشش ایجاد نشد. درحالی‌که استفاده از پودرهای آلیاژی منجر به تشکیل فازهای مهم  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  و  $\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si}$  در ساختار پوشش شد. برای تهیه پودرهای آلیاژی از ترکیبات مختلف Mo-Si-B، از فرایند آلیاژسازی مکانیکی به‌همراه عملیات حرارتی متعاقب آن استفاده شد. با مطالعات انجام گرفته روی سیستم Mo-Si-B، از دو مخلوط پودری با ترکیب‌های  $\text{Mo}-12/5\text{Si}-25\text{B}$  (P1) و  $\text{Mo}-25\text{Si}-10\text{B}$  (P1) (درصد اتمی) به‌عنوان مخلوط‌های پودری مینا استفاده شد. همچنین، از چهار ترکیب دیگر نیز با در نظر گرفتن کاهش مقدار مولیبدن و ثابت نگه داشتن نسبت سیلیسیم به بور در ترکیب مخلوط‌های پودری مینا استفاده شد. نتایج نشان داد که فازهای ایجاد شده در حین آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی مخلوط پودری P1، به‌نحو قابل توجهی وابسته به روش انجام آلیاژسازی مکانیکی، زمان آلیاژسازی مکانیکی و زمان عملیات حرارتی می‌باشند. در نهایت انجام ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی مستقیم به‌همراه ۵ ساعت عملیات حرارتی متعاقب آن در دمای  $1100^\circ\text{C}$ ، بهترین عملیات برای دستیابی به پودرهای آلیاژی پایدار از ترکیبات مختلف Mo-Si-B و حاوی فاز  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  تعیین شد. فازهای تشکیل دهنده این پودرها وابسته به ترکیب شیمیایی مخلوط‌های پودری بود. روکش کاری جوشی پودرهای آلیاژی فوق منجر به ایجاد پوشش‌هایی چندفازی شامل فاز زمینه‌ی  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2 + \text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si}$  شد. ریزساختار پوشش نهایی، نوع و درصد فازهای ایجاد شده در پوشش در حین روکش کاری جوشی به‌میزان زیادی وابسته به فازهای تشکیل‌دهنده پودر آلیاژی و درصد آنها در پودر آلیاژی بود. نتایج آزمون‌های اکسیداسیون در دمای  $1000^\circ\text{C}$  نشان داد که حضور فاز  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  در ریزساختار پوشش، منجر به بهبود مقاومت به اکسیداسیون پوشش می‌شود، ولیکن میزان تاثیر آن به ریزساختار پوشش و ترکیب شیمیایی پوشش وابسته است. ریزساختار چند فازی و حضور فازهای غیرمقاوم نظیر  $\text{Mo}_2\text{B}$  در ریزساختار پوشش‌های بر پایه‌ی P1 سبب تشکیل پوسته اکسیدی کمپلکس چند فازی در حین اکسیداسیون و ورقه‌ای شدن پوسته اکسیدی شد. درحالی‌که ریزساختار فشرده و حضور فاز پیوسته‌ی  $(\text{Mo},\text{Ni})_5(\text{Si},\text{B})_3$  در ریزساختار پوشش‌های بر پایه‌ی P2 سبب تشکیل لایه پیوسته‌ی  $\text{SiO}_2$  در حین اکسیداسیون و ایجاد مقاومت به اکسیداسیون مناسب این پوشش‌ها شد.

## کلمات کلیدی:

روکش کاری جوشی، Mo-Si-B،  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$ ، آلیاژسازی مکانیکی، ریزساختار، اکسیداسیون.

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱ مقدمه

فرایندهای دما بالا در جامعه صنعتی امروزی بیش از پیش در حال گسترش هستند. این فرایندها، نیازمند مواد فوق‌العاده‌ای هستند که بتوانند بیشینه دمای کاری اجزایی نظیر المنت‌های حرارتی، مبدل‌های گرمایی و توربین‌های گازی را افزایش دهند [۱]. مواد بنیادی که در محیط‌های دما بالا استفاده می‌شوند بایستی استحکام کافی، مقاومت به اکسیداسیون عالی، مقاومت به خزش فوق‌العاده و چقرمگی شکست مناسبی داشته باشند. لذا، برای دستیابی به همه‌ی این خواص مطلوب بایستی مواد جدیدی توسعه پیدا کنند [۲ و ۳].

برای چند دهه، قسمت عظیمی از تحقیقات روی آلومینایدهای نیکل و آلومینایدهای تیتانیوم مثل  $Ni_3Al$ ،  $TiAl$ ،  $FeAl$  و تا حدودی  $NiAl$  متمرکز شده بود. این مواد در مقایسه با دیگر ترکیبات بین‌فلزی، انعطاف‌پذیری دمای اتاق مناسبی را از خود نشان می‌دهند و برای کاربردهای دمای پایین و متوسط مناسب می‌باشند. ولیکن متأسفانه به دلیل استحکام و مقاومت به خزش محدودشان، دمای کاربرد آنها به طور معمول به دماهای پایین‌تر از  $1000^{\circ}C$  محدود می‌شود. همچنین این مواد هیچ مزیت قابل توجهی نسبت به سوپرآلیاژهای پایه نیکل ندارند. بنابراین برای کاربردهای دمای فوق‌العاده بالا مناسب نمی‌باشند [۴ و ۵].

دی‌سیلیسایدمولیبدن ( $MoSi_2$ ) به علت داشتن نقطه‌ی ذوب بالا و مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون مناسب در

محیطهای اکسیدی و سولفیدی، یک نامزد مناسب برای کاربرد در دماهای بالای  $1000^{\circ}\text{C}$  به شمار می آید. ولیکن،  $\text{MoSi}_2$  چقرمگی شکست پایینی در دمای اتاق دارد، مقاومت به خزش آن در دماهای بالا مطلوب نیست و در دماهای متوسط ( $600-800^{\circ}\text{C}$ ) به علت پدیده‌ی اکسیداسیون تخریبی<sup>۱</sup> مقاومت به اکسیداسیون ضعیفی دارد [۹-۶]. بنابراین، استفاده از  $\text{MoSi}_2$  در کاربردهای بنیادی با محدودیت‌هایی روبرو شده است.

$\text{Mo}_5\text{Si}_3$ ، یکی دیگر از سیلیساید‌هایی است که برای کاربردهای دما بالا مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه این ماده دارای مقاومت به خزش بسیار بالاتری نسبت به  $\text{MoSi}_2$  می‌باشد، اما مقاومت به اکسیداسیون آن ضعیف است [۱۰]. میر<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۱-۱۳] دریافتند که اضافه کردن مقدار کمی بور (کمتر از ۲ درصد وزنی) به  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ ، می‌تواند مقاومت به اکسیداسیون آن را به میزان قابل توجهی افزایش دهد، همچنین، پدیده اکسیداسیون تخریبی در دماهای متوسط را متوقف سازد. بنابراین، در سال‌های اخیر توجهات به سمت سیستم  $\text{Mo-Si-B}$  جلب شده است.

وقتی بور به سیستم مولیبدن-سیلیسیم اضافه شود، مولیبدن، سیلیسیم و بور می‌توانند یک فاز سه‌تایی به نام T2 با ترکیب  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  را ایجاد کنند.  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  خواص مطلوبی نظیر نقطه‌ی ذوب بالا، مقاومت به اکسیداسیون عالی و خواص مکانیکی فوق‌العاده در دماهای بالا را ارائه می‌نماید [۱۵ و ۱۴]. از آنجایی که  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  دارای یک ساختار تتراگونالی پیچیده (ساختار D8<sub>1</sub>) است، دارای مقاومت به خزش فوق‌العاده‌ای در دماهای بالا است [۱۶]. همچنین، گزارش شده است که تک‌بلور  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  استحکام فوق‌العاده‌ای را در دمای  $1773\text{ K}$  و در بعضی جهت‌ها از خود نشان می‌دهد [۱۷-۲۰]. ایتو<sup>۳</sup> و همکارانش، خواص خزشی و استحکام دما بالای  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  تک‌بلور را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها گزارش کردند که  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  خواص مکانیکی دما بالای بسیار عالی‌تری را نسبت به  $\text{MoSi}_2$  و  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$  تک‌بلور و کامپوزیت‌های آنها دارد [۲۰ و ۲۱]. تحقیقات نشان می‌دهد که  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  به واسطه تشکیل پوسته بوروسیلیکات شیشه‌ای در هنگام اکسیداسیون، دارای مقاومت به اکسیداسیون عالی می‌باشد [۲۲]. اما، چالش اصلی هنوز در تردی ذاتی<sup>۴</sup>  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  است [۳].

باتوجه به خواص مطلوب  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$ ، در سیستم  $\text{Mo-Si-B}$  جهت‌گیری به سمت گسترش آلیاژهای چندفازی حاوی فاز  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2$  سوق پیدا کرده است. در میان آلیاژهای چندفازی مختلف قابل دست‌یابی در سیستم  $\text{Mo-Si-B}$ ، تمرکز محققین روی دو سیستم آلیاژی بوده است. دسته اول، آلیاژهایی که شامل سه فاز بین‌فلزی  $\text{Mo}_5\text{SiB}_2(\text{T}2)\text{-Mo}_5\text{Si}_3(\text{T}1)\text{-Mo}_3\text{Si}$  می‌باشند. این آلیاژها دارای مقاومت به اکسیداسیون دمای بالای قابل رقابت با  $\text{MoSi}_2$  بوده، اکسیداسیون مخرب را در محدوده دماهای متوسط ( $800$  تا  $1000^{\circ}\text{C}$ ) از خود نشان نمی‌دهند و مقاومت

<sup>۱</sup> Pest oxidation

<sup>۲</sup> Meyer

<sup>۳</sup> Ito

<sup>۴</sup> Inherent brittleness

به خزش آنها بسیار بهتر از  $\text{MoSi}_2$  می‌باشد. ولیکن، چقرمگی شکست دمای اتاق آنها پایین است. دسته دوم، آلیاژهای سه فازی  $\alpha\text{-Mo-Mo}_5\text{SiB}_2(\text{T2})\text{-Mo}_3\text{Si}$  می‌باشند. این دسته از آلیاژها نسبت به آلیاژهای دسته اول، مقاومت به اکسیداسیون پایین‌تری دارند، ولی چقرمگی شکست آنها بالاتر است. میزان تاثیر فاز  $\alpha\text{-Mo}$  در بهبود چقرمگی شکست این آلیاژها، شدیداً به درصد این فاز و نحوه توزیع آن در ریزساختار وابسته است [۲۳].

نیکل به‌عنوان یکی از پایه‌های سوپرآلیاژها می‌باشد. این فلز دارای مقاومت به اکسیداسیون خوبی در دماهای متوسط می‌باشد (تا  $600^\circ\text{C}$ ). اما استحکام و سختی آن پایین بوده و در دماهای بالا مقاومت به اکسیداسیون مناسبی ندارد. به‌همین دلیل، کاربرد آن در دماهای بالا بسیار محدود شده است. با توجه به خواص مطلوب آلیاژهای  $\text{Mo-Si-B}$ ، به‌نظر می‌رسد که ایجاد روکشی از این آلیاژها بر روی نیکل بتواند سختی و مقاومت به اکسیداسیون نیکل را به‌میزان قابل توجهی افزایش دهد و زمینه‌ی کاربرد آن را در دماهای بالاتر از  $1000^\circ\text{C}$  فراهم آورد.

در دهه‌ی اخیر، روکش کاری جوشی<sup>o</sup> با استفاده از فرایندهایی نظیر جوشکاری قوسی تنگستن-گاز<sup>۱</sup> (GTAW)، جوشکاری قوسی زیرپودری<sup>y</sup> (SAW) و لیزر مورد توجه قرار گرفته است. در این روش‌ها، عموماً پودر آلیاژی با ترکیب دلخواه و یک لایه‌ی سطحی نازک از زیرلایه به‌طور هم‌زمان ذوب می‌شوند و سپس سریعاً برای تشکیل یک پوشش چگال که دارای پیوندهای متالورژیکی با زیرلایه است، منجمد می‌شوند. مزیت اصلی پوشش‌های ایجاد شده با این روش وجود پیوند متالورژیکی با زمینه است. این موضوع موجب می‌شود که پوشش چسبندگی مناسبی با زیرلایه داشته باشد و بتواند در شرایط مختلف، اتصال خود را با زیرلایه حفظ نماید. همچنین با استفاده از این روش می‌توان پوشش‌هایی با ضخامت بالا روی زیرلایه‌های مختلف ایجاد کرد. در روکش کاری با استفاده از جوشکاری قوسی زیرپودری محدودیت‌هایی نظیر محدود بودن روکش کاری به وضعیت تخت و افقی، رقت بالا و حرارت ورودی بالا وجود دارد. ضمن اینکه مواد روکش بایستی حتماً به‌صورت سیم جوش و به‌همراه فلاکس‌های مخصوص مورد استفاده قرار گیرند. مشکل اصلی در روکش کاری با لیزر، اختلاف در نرخ جذب اشعه‌ی لیزر توسط پودرهای مختلف موجود در مخلوط پودری مورد استفاده برای روکش کاری است، همچنین در مقایسه با روکش کاری با استفاده از جوشکاری قوسی تنگستن-گاز، تجهیزات آن گران‌تر است و محدودیت‌هایی در وضعیت روکش کاری وجود دارد. در روکش کاری با استفاده از جوشکاری قوسی تنگستن-گاز، قوس الکتریکی آرام، پایدار و متمرکز است که منجر به ایجاد پوششی با کیفیت مطلوب می‌شود. این روش روکش کاری می‌تواند به‌صورت کاملاً اتوماتیک انجام شود و محدودیتی از نظر وضعیت روکش کاری وجود ندارد. در زمینه ایجاد روکش‌های جوشی از سیلیساید‌های مولیبدن تحقیقات ناچیزی صورت گرفته است و با استفاده از روش روکش کاری با لیزر، پوشش‌هایی

<sup>o</sup> Cladding

<sup>۱</sup> Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

<sup>y</sup> Submerged Arc Welding (SAW)



از  $\text{MoSi}_2$ ،  $\text{MoSi}_2\text{-SiC}$  و  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  روی زیرلایه‌های مختلف ایجاد و خواص آنها مورد بررسی قرار گرفته است [۲۷-۲۴]. ولیکن، در زمینه‌ی ایجاد روکش‌های جوشی از ترکیبات Mo-Si-B تاکنون موردی گزارش نشده است.

هدف اصلی این پژوهش ایجاد پوشش‌هایی از ترکیبات Mo-Si-B روی زیرلایه‌ی نیکل با استفاده از فرایند روکش‌کاری جوشی قوسی تنگستن-گاز می‌باشد. برای ایجاد این روکش‌ها، لازم است که ابتدا پودرهای آلیاژی از ترکیبات Mo-Si-B تهیه شود. روش آلیاژسازی مکانیکی یک روش حالت جامد است که می‌تواند برای ایجاد ترکیبات بین‌فلزی که دمای ذوب بالایی دارند، مورد استفاده قرار گیرد. در طی دهه گذشته، مواد آمورف، بلوری و نانوبلوری زیادی با استفاده از این روش سنتز شده‌اند. اگرچه، مطالعات زیادی در مورد آلیاژسازی مکانیکی ترکیبات سیستم دو تایی Mo-Si صورت گرفته است، ولیکن، اطلاعات بسیار کمی در مورد آلیاژسازی مکانیکی ترکیبات سه تایی Mo-Si-B وجود دارد [۲۸ و ۲۹]. بنابراین در این پژوهش ابتدا آلیاژسازی مکانیکی ترکیبات سه تایی Mo-Si-B به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از پودرهای آلیاژی تهیه شده با روش آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی متعاقب آن و با کمک فرایند روکش‌کاری جوشی قوسی تنگستن-گاز<sup>۱</sup>، روکش‌هایی از پودرهای فوق روی نیکل ایجاد شده و ریزساختار و رفتار اکسیداسیونی روکش‌های فوق مورد بررسی قرار گرفته است.

---

<sup>۱</sup> GTAW-Cladding

## فصل دوم

### مرور مطالعاتی

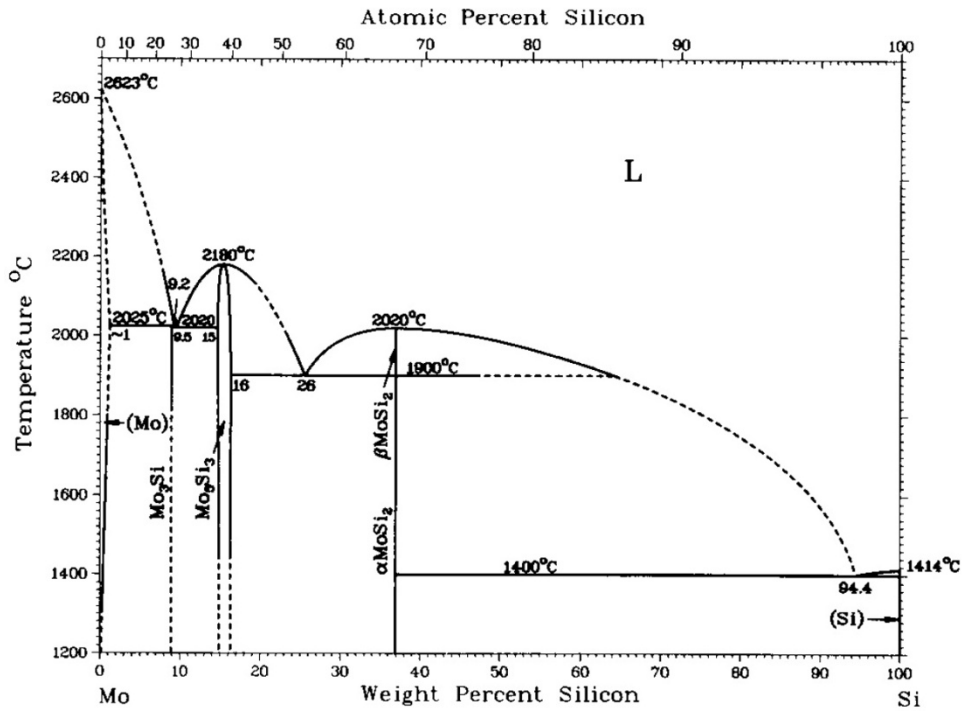
#### ۱-۲ بررسی نمودار فازی سیستم Mo - Si

شکل ۱-۲ نمودار فازی سیستم Mo-Si را نشان می‌دهد. طبق نمودار فازی، سه ترکیب بین فلزی سیلیساید مولیبدن شامل  $\text{Mo}_3\text{Si}$ ،  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$  و  $\text{MoSi}_2$  در این سیستم وجود دارد [۳۰].

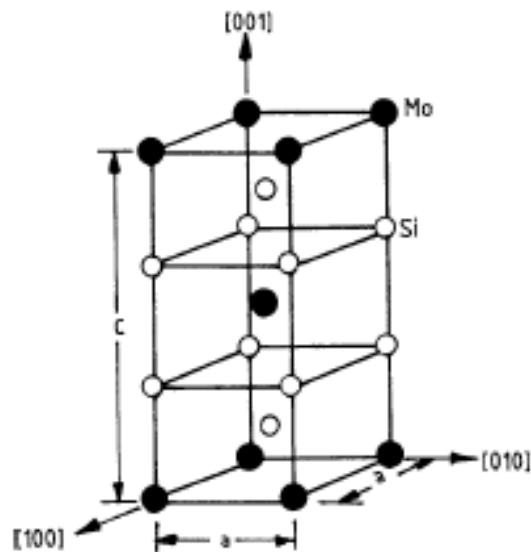
دی سیلیساید مولیبدن ( $\text{MoSi}_2$ ) دارای نقطه ذوب  $2020^\circ\text{C}$  و چگالی نسبتاً پائین  $6/24 \text{ g/cm}^3$  است [۳۱].  $\text{MoSi}_2$  در نمودار فازی مولیبدن-سیلیسیم به صورت یک ترکیب بین فلزی پایدار با حد خلالت نزدیک به صفر است که تا دمای  $1900^\circ\text{C}$  به شکل  $\alpha\text{-MoSi}_2$  و دارای سلول واحد تتراگونال مرکزدار است. شکل ۲-۲ سلول واحد  $\alpha\text{-MoSi}_2$  را نشان می‌دهد [۳۲]. این سلول واحد دارای پارامترهای شبکه‌ی  $a = 0/3202 \text{ nm}$  و  $c = 0/7845 \text{ nm}$  با نسبت  $c/a = 2/45$  است. این ساختار از روی هم قرار گرفتن سه ساختار bcc و فشرده شدن در طول محور C ایجاد شده است، به طوری که اتم‌های Mo و Si به طور متناوب در مرکز سلول واقع شده‌اند. موقعیت اتم‌های Mo،  $(0, 0, 0)$  و  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$  و موقعیت اتم‌های Si،  $(0, \frac{2}{3}, \frac{1}{3})$ ،  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{6})$  و  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{5}{6})$  است [۳۱ و ۳۲]. هارادا<sup>۹</sup> و همکارانش طی آزمایش‌های خود دریافته‌اند که موقعیت اتم‌های Si درست در مکان  $(0, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$  نیست، بلکه مقدار Z برابر  $0/3355$  است (شکل ۲-۳). آنها با بررسی ساختار الکترونی  $\alpha\text{-MoSi}_2$  به این نتیجه رسیدند که چگالی الکترونی بین اتم‌های

<sup>9</sup>Harada

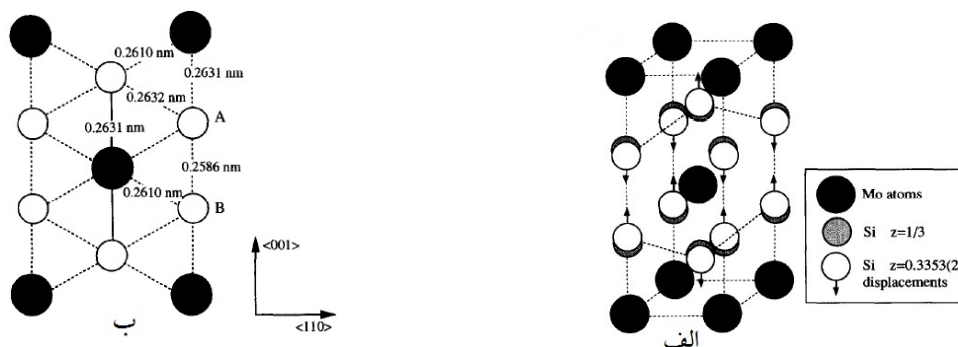
در Si-Si فاصله کوتاه ۰/۲۵۸۶ nm بسیار بالا است و این به این معنی است که استحکام پیوند شیمیایی بین آنها به واسطه جابجایی اتم‌های Si از موقعیت  $Z = \frac{1}{3}$  افزایش یافته است و از وجود پیوند قوی کووالانت بین اتم‌های Si در MoSi<sub>2</sub> حکایت دارد [۳۱].



شکل ۱-۲ نمودار فازی سیستم Mo-Si [۳۰].



شکل ۲-۲ سلول واحد شبکه MoSi<sub>2</sub> پارامترهای شبکه  $a = 0.3202$  nm و  $c = 0.7845$  nm [۳۲].



شکل ۳-۲ الف) ساختار بلوری واقعی  $\text{MoSi}_2$  وقتی که با اتم‌های Si در موقعیت  $Z = 1/3$  مقایسه می‌شوند، اتم‌های Si اندکی در جهت فلش جابجا شده‌اند، ب) فاصله‌های بین‌فلزی روی صفحه اتمی (۱۰۰) [۳۱].

$\alpha\text{-MoSi}_2$  در دمای  $1900^\circ\text{C}$ ، تحت استحاله فازی قرار می‌گیرد و  $\beta\text{-MoSi}_2$  شکل می‌گیرد که دارای ساختار هگزاگونال است. بنابراین محدوده کاربرد  $\text{MoSi}_2$  معمولاً تا زیر دمای  $1700^\circ\text{C}$  است [۳۲].  $\text{MoSi}_2$  می‌تواند بهترین توصیف برای ترکیبی در حد واسط فلز-سرامیک باشد. مشخصه عمومی یک سرامیک این است که سرامیک یک جامد یونی-کووالانسی است، از آنجایی که  $\text{MoSi}_2$  فقط به خاطر پیوندهای اتمی اش که ترکیبی از فلزی-کووالانسی است با سرامیک‌ها تفاوت دارد، مشابه سرامیک‌ها مقاومت به اکسیداسیون بالایی دارد، و از طرف دیگر هدایت الکتریکی آن مشابه فلزات است [۳۳]. در جدول ۱-۲، خواص فیزیکی و مکانیکی  $\text{MoSi}_2$  با ترکیب‌های بین‌فلزی کاربردی متداول مقایسه شده است [۳۴].

جدول ۱-۲ خواص فیزیکی و مکانیکی ترکیبات بین‌فلزی متداول [۹۵].

NiAl	Ni <sub>3</sub> Al	MoSi <sub>2</sub>	Al <sub>3</sub> Ti	TiAl	Ti <sub>3</sub> Al	مشخصات
۱۶۳۸	۱۳۹۷	۲۰۲۰	۱۳۵۰	۱۴۸۰	۱۶۸۰	دمای ذوب ( $^\circ\text{C}$ )
۵/۹	۷/۴	۶/۲	۳/۴-۴	۳/۸-۴	۴/۱-۴/۷	چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )
۱۹۰	۲۰۰	۳۸۰-۴۴۰	۲۱۵	۱۴۰-۱۷۵	۱۲۰-۱۴۵	مدول یانگ (GPa)
۱۷۵-۳۰۰	۲۰۰-۹۰۰	۲۰۰-۴۰۰	۱۲۰-۴۲۵	۴۰۰-۷۷۵	۷۰۰-۹۹۰	استحکام کششی دمای اتاق (MPa)
۰-۶	۱-۵۴	۱>	۰/۱-۰/۵	۱-۴	۲-۱۰	تغییر طول کششی دمای اتاق (درصد)
۸۵۰-۱۲۵۰	۸۵۰-۱۱۵۰	>۱۲۰۰	<۱۰۰۰	۶۰۰-۸۵۰	۶۰۰-۷۰۰	حداکثر دمای کاربردی ( $^\circ\text{C}$ )
خوب	خوب	عالی	خیلی ضعیف	.....	ضعیف	مقاومت در برابر اکسیداسیون