

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
السلامة



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

توسعه‌ی پوشش پاشش حرارتی ترکیبات بین‌فلزی Mo-Si-B به کمک فرایند آلیاژسازی مکانیکی بر اساس شاخص‌های سطحی

رساله دکتری مهندسی مواد

سعیدرضا بخشی

اساتید راهنما
دکتر مهدی صالحی
دکتر حسین ادريس



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

رساله دکتری رشته مهندسی مواد آقای سعیدرضا بخشی

تحت عنوان

**توسعه‌ی پوشش پاشش حرارتی ترکیبات بین فلزی Mo-Si-B به کمک فرایند آلیاژسازی
مکانیکی بر اساس شاخص‌های سطحی**

در تاریخ ۱۳۸۷/۱۲/۱۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| دکتر مهدی صالحی | ۱ – استاد راهنمای پایان‌نامه |
| دکتر حسین ادريس | ۲ – استاد راهنمای پایان‌نامه |
| دکتر غلام‌حسین برهانی | ۳ – استاد مشاور پایان‌نامه |
| دکتر فرزاد محبوبی | ۴ – استاد داور |
| دکتر علی‌رضا صبور روح‌ا قدم | ۵ – استاد داور |
| دکتر محمدحسین عنایتی | ۶ – استاد داور |
| دکتر مرتضی شمعیان اصفهانی | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

شکر و سپاس

خدای احد و رحمان را که به حقیر صحت و سلامتی عطا نمود تا بتوانم این تلاش ناچیز را به جامعه علمی میهن عزیزم تقدیم نمایم.

و بعد،

شکر و قدردانی از

- اساتید بزرگوار راهنما، جناب آقای دکتر صالحی و جناب آقای دکتر ادريس که در طول فعالیت‌های این تحقیق، همواره اینجانب را حمایت و هدایت نمودند.
- استاد محترم مشاور، جناب آقای دکتر برهانی که بی‌شک مشاوره‌ها و راهنمایی‌های ایشان، کمک‌های شایانی در جهت تحقق اهداف تحقیقاتی این پژوهش بوده است.
- اساتید بزرگوار دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان که در طول تحصیل همواره از محضر این عزیزان بهره‌ها برده‌ام.
- معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی مالک اشتر به جهت برخی حمایت‌های مالی صورت گرفته.
- همکاران و کارشناسان آزمایشگاه‌های دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، به ویژه آقای دکتر قاسمی، آقای مهندس هاشمی و آقای مهندس عادل‌مقدم که در ایجاد بستر فعالیت‌های آزمایشگاهی اینجانب از هیچ کوششی فروگذار نبودند.
- مسئولین محترم آزمایشگاه‌های اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی، به ویژه سرکار خانم صرامی که حقیر را در به انجام رساندن آزمون‌های مربوطه یاری نمودند.
- همکار بزرگوار جناب آقای مهندس والفی، مسئول محترم آزمایشگاه پاشش حرارتی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، که زحمات فراوانی در به انجام رساندن فرایندهای پوششی متقبل شدند.
- کارشناسان و مدیریت محترم عامل شرکت پودر افشان که تلاش‌های زیادی در انجام فرایندهای پاششی اولیه انجام دادند.

و در نهایت،

- پدر و مادر بزرگوارم که با تلاش‌های فراوان خود، این حقیر را در مسیر علم و تحقیق قرار دادند و
- همسرگرامی‌ام که بی‌شک بدون صبر و تحمل او در طول این مدت، نتیجه‌ی فعلی حاصل نمی‌گردید.

پروودگارا، همه‌ی این بزرگواران را شمول عنایت ویژه‌ی خود گردان؛ آمین.

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

تقدیم بہ

یگانہ منجی عالم بشریت کہ نجات دہندہ ہی امروز

بشر از مشکلات بی شمارش، تنها و تنها اوست.

امید کہ این اثر لایق باشد.

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
ده	فهرست شکل‌ها
شانزده	فهرست جدول‌ها
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۵	فصل دوم: مطالعات مروری
۵	۱-۲- ترکیبات بین‌فلزی
۶	۲-۲- آلیاژسازی مکانیکی
۱۱	۳-۲- فرایند پاشش حرارتی
۱۴	۴-۲- مولیدن و ترکیبات بین‌فلزی سیلیسایدی بر پایه‌ی آن
۲۵	۵-۲- خواص ترکیبات بین‌فلزی سیلیسایدی بر پایه‌ی مولیدن
۳۲	۶-۲- چالش‌های موجود در توسعه‌ی ساختارهای تعادلی Mo-Si-B
۳۳	۷-۲- روش‌های ساخت ترکیبات بین‌فلزی Mo-Si-B
۳۵	فصل سوم: مواد و روش انجام تحقیق
۳۵	۱-۳- مواد اولیه و ترکیب پودرهای انتخابی
۳۸	۲-۳- طراحی و ساخت دستگاه آلیاژسازی مکانیکی
۴۰	۳-۳- عملیات حرارتی
۴۰	۴-۳- فشرده‌سازی و خرد کردن پودر آلیاژسازی مکانیکی شده
۴۱	۵-۳- آگلومره کردن پودر آلیاژسازی مکانیکی شده
۴۱	۶-۳- پاشش حرارتی
۴۳	۷-۳- تعیین ترکیب شیمیایی مواد و شناسایی فازها
۴۴	۸-۳- تعیین اندازه و توزیع دانه‌ها و ذرات پودر
۴۵	۹-۳- ارزیابی‌های ریزساختاری، ضخامت، ریزسختی، زبری و چسبندگی
۴۵	۱۰-۳- آنالیز حرارتی
۴۶	۱۱-۳- ارزیابی اکسایش پیوسته در دمای بالا
۴۶	۱۲-۳- ارزیابی‌های تریبولوژیکی

۴۸	فصل چهارم: نتایج و یافته‌های تحقیق
۴۸	۴-۱ - مواد اولیه
۵۳	۴-۲ - تولید پودر Mo-Si-B
۷۳	۴-۳ - پاشش حرارتی APS
۸۰	۴-۴ - اکسایش پیوسته در دمای بالا
۸۲	۴-۵ - ضخامت، زبری، ریزسختی و استحکام چسبندگی
۸۴	۴-۶ - رفتار تریبولوژیکی
۹۰	فصل پنجم: بحث بر روی یافته‌ها
۹۰	۵-۱ - مواد اولیه
۹۰	۵-۲ - تولید پودر Mo-Si-B
۱۰۰	۵-۳ - فرایندهای پاشش حرارتی
۱۰۲	۵-۴ - اکسایش پیوسته در دمای بالا
۱۰۵	۵-۵ - رفتار تریبولوژیکی
۱۱۰	فصل ششم: نتیجه‌گیری
۱۱۲	پیشنهادات جهت انجام فعالیت‌های آینده
۱۱۳	پیوست ۱: روش‌های ارزیابی اکسایش در دمای بالا
۱۱۵	مراجع

فهرست شکل‌ها

فصل دوم: مطالعات مروری

- شکل ۲-۱: وضعیت انرژی تئیه مواد در شرایط شبه تعادلی از طریق انرژی دهی و سریع سردی (کوئچ کردن). ۶
- شکل ۲-۲: طرحواره‌ای از یک آسیاب با محفظه‌ی ثابت. ۸
- شکل ۲-۳: دسته‌بندی روش‌های مختلف پاشش حرارتی بر اساس منبع انرژی. ۱۱
- شکل ۲-۴: تصویری از یک نازل پاشش پلاسمایی. ۱۳
- شکل ۲-۵: طرحواره‌ای از توزیع دمای محیط پلاسمای. ۱۳
- شکل ۲-۶: معیار پایداری ساختار مکعب مرکزدار در گروه فلزات انتقالی با توجه به نسبت e/a ، $(z=e/a)$. ۱۶
- شکل ۲-۷: دیاگرام فازی دو تایی Mo-Si. ۱۷
- شکل ۲-۸: ساختار کریستالی $MoSi_2$. ۱۸
- شکل ۲-۹: ساختار کریستالی Mo_5Si_3 . ۱۹
- شکل ۲-۱۰: ساختار کریستالی Mo_3Si . ۱۹
- شکل ۲-۱۱: نمایش سه‌بعدی ساختار A15، نشان‌دهنده‌ی فاصله‌ی نزدیک اتم‌های Mo-Mo. ۲۰
- شکل ۲-۱۲: مقطع هم‌دما نمودار تعادلی سه‌تایی Mo-Si-B در دمای $1600^\circ C$ بر اساس تحقیقات نوتنی و همکارانش. ۲۱
- شکل ۲-۱۳: بخش غنی از مولیبدن دیاگرام سه‌تایی Mo-Si-B در دمای $1600^\circ C$ بر اساس تحقیقات اخیر صورت گرفته؛ منطقه‌ی بین دو خط چین، منطقه‌ی دوفازی $Mo(ss)+T_2$ و مثلث، نشان‌دهنده‌ی حضور فاز استوکیومتر T_2 می‌باشد. ۲۲
- شکل ۲-۱۴: الف) نمایش هندسی فاز T_2 به صورت ساختار کریستالی حاصله از سه نوع لایه‌ی متفاوت: لایه‌ی از اتم‌های Mo، لایه‌ی Mo+B و لایه‌ی از اتم‌های Si؛ ب) ترتیب اتمی لایه‌ی که از اتم‌های Mo تشکیل شده و لایه‌ی A نام دارد. ۲۳
- شکل ۲-۱۵: نمایشی از لایه‌ی A که با چرخشی به اندازه‌ی نصف قطر یک چهاروجهی در طول محور $\langle 110 \rangle$ و ایجاد لایه‌ی دیگری به نام لایه $A_{1/2/1/2}$ ، یک‌سری فضاهای خالی منشورگونه‌ی چهاروجهی جهت استقرار اتم‌های Si حاصل می‌کند. ۲۴
- شکل ۲-۱۶: نمایشی سه‌بعدی از ساختار کریستالی Mo_5SiB_2 . ۲۴
- شکل ۲-۱۷: افزایش تافنس شکست آلیاژهای Mo-Si-B و تعویق رشد ترک به دلیل حضور فاز انعطاف‌پذیر α -Mo. فلش‌ها نشان‌دهنده‌ی ذرات α -Mo می‌باشند که از پیوستگی ترک‌ها ممانعت به عمل می‌آورند. ۲۵
- شکل ۲-۱۸: تغییرات انرژی آزاد تشکیل اکسیدهای مختلف بر حسب دمای مطلق برای یک مول اکسیژن. ۲۶
- شکل ۲-۱۹: ثابت سرعت رشد سهمی پوسته‌های اکسیدی مختلف در دماهای گوناگون. ۲۶
- شکل ۲-۲۰: تصویر میکروسکوپی الکترونی (BSE) لایه‌ی اکسیدی $MoSi_2$ ، بعد اکسایش در دمای $1200^\circ C$. ۲۹
- شکل ۲-۲۱: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی الف) یک آلیاژ ریختگی Mo-Si-B همراه با جدایش شدید حاصل از انجماد؛ در این ریزساختار، از لحاظ تعادلی فقط دو فاز $Mo+T_2$ می‌توانند وجود داشته باشند، اما به دلیل جدایش، فازهای Mo، T_2 ، Mo_2B و Mo_3Si در ریزساختار ریختگی دیده می‌شود؛ ب) آلیاژ Mo-Si-B با انجماد سریع و آنیل بعدی که در آن تنها دو فاز Mo و T_2 وجود دارند. ۳۳

فصل سوم: مواد و روش انجام تحقیق

- شکل ۳-۱: مقطع هم‌دما غنی از مولیبدن دیاگرام سه‌تایی Mo-Si-B در دمای 1600°C . ۳۶
- شکل ۳-۲: مقطع هم‌دما نمودار تعادلی سه‌تایی Mo-Si-B در دمای 1600°C ، نشان‌دهنده‌ی موقعیت ترکیب MSB2 و MSB3 در مقایسه با ترکیب MSB1. ۳۷
- شکل ۳-۳: نمای واقعی سیستم طراحی و ساخته شده برای انجام فرایند آلیاژسازی مکانیکی. الف) نمای کلی دستگاه، ب) نمایی از جزئیات استفاده شده در دستگاه آسیاب. ۳۸
- شکل ۳-۴: شمایی از سیستم طراحی و ساخته شده برای انجام فرایند آلیاژسازی مکانیکی: الف) نمای جانبی؛ ب) نمای از بالا. ۳۹
- شکل ۳-۵: شمایی از سیستم طراحی و ساخته شده برای گردنده یا ایمپلر؛ ب) ابعاد داخلی محفظه‌ی آسیاب. ۴۰
- شکل ۳-۶: نمای واقعی نازل به کار گرفته شده برای فرایند پاشش حرارتی پلاسمایی همراه با دوش آرگنی. ۴۲
- شکل ۳-۷: دوش آرگنی ساخته شده برای نازل فرایند پاشش حرارتی پلاسمایی: الف) نمای واقعی؛ ب) نقشه قسمت پشت؛ ج) نقشه قسمت جلو. ۴۳
- شکل ۳-۸: شمایی کلی از دستگاه اکسایش پیوسته در دمای بالا؛ ب) محفظه درونی کوره. ۴۶
- شکل ۳-۹: شماتیکی از فرایند سایشی بین روی صفحه به صورت رفت و برگشتی؛ ب) سطوح درگیر در آزمون سایش به صورت غیرهم‌شیب یا متمرکز. ۴۷

فصل چهارم: نتایج و یافته‌های تحقیق

- شکل ۴-۱: نمودار تفرق اشعه ایکس پودر مولیبدن خالص؛ ب) مقایسه‌ی پیک‌های نمونه با نمونه‌ی مرجع. ۴۸
- شکل ۴-۲: نمودار توزیع و تجمعی اندازه ذرات پودر مولیبدن خالص به کمک پردازشگر لیزری اندازه ذرات. ۴۹
- شکل ۴-۳: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر مولیبدن خالص در دو بزرگنمایی مختلف. ۴۹
- شکل ۴-۴: نمودار تفرق اشعه ایکس پودر سیلیسیم خالص؛ ب) مقایسه‌ی پیک‌های نمونه با نمونه‌ی مرجع. ۵۰
- شکل ۴-۵: نمودار توزیع و تجمعی اندازه ذرات پودر سیلیسیم خالص به کمک پردازشگر لیزری اندازه ذرات. ۵۰
- شکل ۴-۶: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر سیلیسیم خالص در دو بزرگنمایی مختلف. ۵۱
- شکل ۴-۷: نمودار تفرق اشعه ایکس پودر بور خالص؛ ب) مقایسه‌ی پیک‌های نمونه با نمونه‌ی مرجع. ۵۱
- شکل ۴-۸: نمودار توزیع و تجمعی اندازه ذرات پودر بور خالص به کمک پردازشگر لیزری اندازه ذرات. ۵۲
- شکل ۴-۹: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر بور خالص در دو بزرگنمایی مختلف. ۵۲
- شکل ۴-۱۰: نمودارهای پراش پرتو ایکس پودر مولیبدن خالص در زمان‌های مختلف فرایند آسیاب‌کاری مکانیکی. ۵۳
- شکل ۴-۱۱: نمودارهای تعیین پارامتر شبکه‌ی مولیبدن با توجه به تابع نلسون-ریلی در زمان‌های مختلف آسیاب. الف) بدون عملیات آسیاب، ب) بعد از ۵ ساعت فرایند آسیاب، ج) بعد از ۲۰ ساعت فرایند آسیاب، د) بعد از ۲۵ ساعت فرایند آسیاب؛ ه) تغییرات پارامتر شبکه با توجه به زمان آسیاب. ۵۴
- شکل ۴-۱۲: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر مولیبدن پس از ۲۵ ساعت آسیاب. ۵۵
- شکل ۴-۱۳: نمودارهای پراش پرتو ایکس پودر ترکیبی MSB1 در زمان‌های مختلف فرایند آلیاژسازی مکانیکی. ۵۵
- شکل ۴-۱۴: الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و آنالیز عنصری (EDX) و ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (مد SE) همراه با نقشه‌ی آنالیز عنصری اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی پودر MSB1، قبل از آلیاژسازی مکانیکی. ۵۶

- (نقاط روشن، نشان‌دهنده‌ی غلظت‌های مرتبط با مولیدن یا سیلیسیم می‌باشد؛ ج) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر MSB1 پس از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی.
- شکل ۴ - ۱۵: نمودار توزیع ذرات پودر MSB1 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی با پردازشگر لیزری اندازه ذرات. ۵۶
- شکل ۴ - ۱۶: نمودارهای تعیین پارامتر شبکه برای پودر MSB1 در زمان‌های مختلف آلیاژسازی مکانیکی: الف) بدون عملیات آسیاب، ب) بعد از ۵ ساعت فرایند آسیاب، ج) بعد از ۱۰ ساعت فرایند آسیاب، د) بعد از ۲۰ ساعت فرایند آسیاب. ۵۷
- شکل ۴ - ۱۷: مقایسه‌ی پارامتر شبکه پودر مولیدن خالص با پودر MSB1 (با توجه به شکل ۴ - ۱۶)، در زمان‌های آسیاب گوناگون. ۵۷
- شکل ۴ - ۱۸: الف) نمودارهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های پودری MSB1 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی و سپس آنیل نفوذی خنثی در دمای 1100°C ، در زمان‌های متفاوت؛ ب) شناسایی پیک‌های نمودار پراش پرتو ایکس برای زمان ۱۰ ساعت آنیل. ۵۸
- شکل ۴ - ۱۹: نمودار پراش پرتو ایکس نمونه‌ی MSB1 بدون فرایند آلیاژسازی مکانیکی، بعد از ۱۰ ساعت آنیل در دمای 1100°C . ۵۹
- شکل ۴ - ۲۰: تغییرات پارامتر شبکه مولیدن در ترکیب پودری MSB1، در زمان‌های مختلف عملیات آنیل و در دمای ثابت 1100°C (بر اساس نمودارهای پراش پرتو ایکس شکل ۴ - ۱۸ الف). ۵۹
- شکل ۴ - ۲۱: نمودارهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های پودری MSB1 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی و آنیل نفوذی خنثی در دماهای 1490°C و 1600°C درجه سانتیگراد در زمان‌های متفاوت. ۶۰
- شکل ۴ - ۲۲: نمودار پراش پرتو ایکس نمونه‌ی پودری MSB1 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی و آنیل خنثی در دمای 1600°C درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت (شکل ۴ - ۲۱ ج). ۶۰
- شکل ۴ - ۲۳: قرص‌های حاصله از پودرهای MSB1: الف) بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی و فشرده‌سازی؛ ب) بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی، فشرده‌سازی و زینتر کردن در دمای 1100°C به مدت ۱۰ ساعت در محیط خنثی. ۶۱
- شکل ۴ - ۲۴: ذرات خرد شده‌ی حاصله از قرص‌های فشرده شده و زینتر شده‌ی MSB1: الف) قبل از دانه‌بندی نهایی؛ ب) بعد از دانه‌بندی نهایی. ۶۱
- شکل ۴ - ۲۵: الف) نمودارهای پراش پرتو ایکس پودرهای خرد شده‌ی MSB1 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی و فشرده‌سازی در نیروهای فشاری گوناگون و سپس آنیل در دمای 1100°C به مدت ۱۰ ساعت؛ ب) شناسایی پیک‌های حاصل شده در شکل الف. ۶۲
- شکل ۴ - ۲۶: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر MSB1 بعد از ۲۰ ساعت فرایند آلیاژسازی مکانیکی و آگلومره شدن. الف) بزرگنمایی کم و تعداد قابل توجهی از ذرات؛ ب) بزرگنمایی بالا و یک ذره‌ی آگلومره شده. ۶۳
- شکل ۴ - ۲۷: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (مد SE) و نقشه‌ی آنالیز عنصری (EDX) یک ذره‌ی MSB1 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی و آگلومراسیون (نقاط روشن، نشان‌دهنده‌ی غلظت‌های مرتبط با مولیدن یا سیلیسیم می‌باشد). ۶۳
- شکل ۴ - ۲۸: نمودار پراش پرتو ایکس ذرات MSB1 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی و پس از فرایند آگلومراسیون. ۶۴
- شکل ۴ - ۲۹: نمودارهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های پودری MSB1 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی، آگلومره شدن و آنیل در دمای 1100°C درجه سانتیگراد در زمان‌های متفاوت. ۶۴
- شکل ۴ - ۳۰: نمودارهای پراش پرتو ایکس پودر MSB2 قبل و بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی. ۶۵

- شکل ۴-۳۱: تصاویر میکروسکوپی الکترونی عبوری ذرات MSB2 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی؛ الف) تصویر میدان تاریک در بزرگنمایی کم و ب) تصویر میدان روشن در بزرگنمایی بالاتر.
- شکل ۴-۳۲: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (مد SE) و نقشه‌ی آنالیز عنصری (EDX) یک ذره‌ی MSB2 بعد از آلیاژسازی مکانیکی و آگلومراسیون (نقاط روشن، نشان‌دهنده‌ی غلظت‌های مرتبط با مولیبدن یا سیلیسیم می‌باشد).
- شکل ۴-۳۳: نمودار پراش پرتو ایکس پودر MSB2 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی و سپس آنیل در 1000°C ، بدون توقف.
- شکل ۴-۳۴: نمودار پراش پرتو ایکس پودر MSB2 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی و سپس عملیات حرارتی در 1100°C ، به مدت ۱۰ ساعت.
- شکل ۴-۳۵: تصاویر میکروسکوپی الکترونی عبوری ذرات MSB2 بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی در 1100°C به مدت ۱۰ ساعت در دو بزرگنمایی مختلف.
- شکل ۴-۳۶: تغییرات انرژی حرارتی و وزن بر حسب دمای اعمالی در پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB2 به کمک دستگاه آنالیز حرارتی (سرعت گرمایش: $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ؛ محیط: گاز آرگن؛ بوتله: آلومینا).
- شکل ۴-۳۷: تغییرات انرژی حرارتی و وزن بر حسب دمای اعمالی در پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB2 به کمک دستگاه آنالیز حرارتی (سرعت گرمایش: $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ؛ محیط: گاز آرگن؛ بوتله: آلومینا).
- شکل ۴-۳۸: تغییرات انرژی حرارتی بر حسب دمای اعمالی در پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB2 به کمک دستگاه آنالیز حرارتی در سرعت‌های گرمایشی متفاوت (محیط: گاز آرگن؛ بوتله: آلومینا).
- شکل ۴-۳۹: تصویری از حالت اسفنجی شدن پودر MSB2 بعد از عملیات حرارتی در 1100°C ، به مدت ۱۰ ساعت، که از خود، فرایند SHS نشان داده است.
- شکل ۴-۴۰: نمودار پراش پرتو ایکس پودر MSB2 بعد از آلیاژسازی مکانیکی به مدت ۲۰ ساعت و سپس عملیات حرارتی در 1100°C ، به مدت ۱۰ ساعت، که از خود، فرایند SHS نشان داده است.
- شکل ۴-۴۱: نمودارهای پراش پرتو ایکس پودر آلیاژسازی مکانیکی شده MSB2 به مدت ۲۰ ساعت؛ الف) آگلومره و سپس عملیات حرارتی در 1100°C به مدت ۱۰ ساعت بدون فرایند SHS (شکل ۴-۳۴)، ب) بعد از فشرده‌سازی در فشار 340MPa و عملیات حرارتی در 1100°C به مدت ۱۰ ساعت بدون فرایند SHS.
- شکل ۴-۴۲: نمودارهای پراش پرتو ایکس پودر MSB3 قبل و بعد از ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی.
- شکل ۴-۴۳: نمودار پراش پرتو ایکس پودر آلیاژسازی مکانیکی شده‌ی MSB3 به مدت ۲۰ ساعت بعد از: الف) عملیات حرارتی در 1000°C ، بدون توقف؛ ب) عملیات حرارتی در 1100°C ، به مدت ۱۰ ساعت، بدون انجام فرایند SHS.
- شکل ۴-۴۴: مسیرهای مختلف تولید پودر ترکیبی Mo-Si-B.
- شکل ۴-۴۵: نمودار پراش پرتو ایکس؛ الف) پودر آلیاژسازی مکانیکی شده‌ی MSB1 به مدت ۲۰ ساعت و قبل از فرایند پاشش حرارتی؛ ب) سطح پوشش پاشش حرارتی فرایند A (بدون استفاده از دوش آرگنی) برای پودر با آنالیز شکل الف).
- شکل ۴-۴۶: الف) نمودارهای پراش پرتو ایکس سطح پوشش پاششی فرایند A (بدون استفاده از دوش آرگنی) برای پودر آلیاژسازی مکانیکی شده‌ی MSB1 به مدت ۲۰ ساعت، قبل و بعد از عملیات حرارتی زیرلایه همراه با پوشش در دماهای مختلف و زمان ثابت ۳ ساعت و در محیط خنثی، ب) نمودار مجزای پراش پرتو ایکس در دمای 1000°C به مدت ۳ ساعت، جهت شناسایی پیک‌ها.

- شکل ۴ - ۴۷: نمودار پراش پرتو ایکس سطح پوشش پاشش حرارتی فرایند A (بدون استفاده از دوش آرگنی) برای پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB1.
- شکل ۴ - ۴۸: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح پوشش پاشش حرارتی فرایند A (بدون استفاده از دوش آرگنی) برای پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB1.
- شکل ۴ - ۴۹: تصاویر نوری از ریزساختارهای مقطع پوشش پاشش حرارتی فرایند A برای پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB1؛ الف و ب) بدون استفاده از دوش آرگنی، در بزرگنمایی‌های مختلف، ج و د) با استفاده از دوش آرگنی، در بزرگنمایی‌های مختلف؛ راستای آنالیز خطی عنصری مربوط به شکل ۴ - ۵۰ است (جهت پاشش از چپ به راست می‌باشد).
- شکل ۴ - ۵۰: آنالیز خطی عنصری در مقطع پوشش پاشش حرارتی فرایند A (با استفاده از دوش آرگنی) برای پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB1 (منطبق بر شکل ۴ - ۴۹ ج)، (جهت پاشش از چپ به راست می‌باشد).
- شکل ۴ - ۵۱: نمودارهای پراش پرتو ایکس سطح پوشش پاششی فرایند A (بدون استفاده از دوش آرگنی) برای پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB1 پس از عملیات حرارتی زیرلایه همراه با پوشش در دمای 1100°C و زمان‌های گوناگون.
- شکل ۴ - ۵۲: نمودارهای پراش پرتو ایکس سطح پوشش پاشش حرارتی دو فرایند B و C (با استفاده از دوش آرگنی) برای پودر آلیاژسازی مکانیکی شده (به مدت ۲۰ ساعت)، فشرده شده در 340MPa ، زینتر و خردشده‌ی MSB1.
- شکل ۴ - ۵۳: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح پوشش پاشش حرارتی فرایند B برای پودر آلیاژسازی مکانیکی شده (به مدت ۲۰ ساعت)، فشرده شده در 340MPa ، زینتر و خردشده‌ی MSB1؛ الف و ب) بدون استفاده از دوش آرگنی در بزرگنمایی‌های مختلف، ج و د) با استفاده از دوش آرگنی در بزرگنمایی‌های مختلف (جهت پاشش از بالا به پایین می‌باشد).
- شکل ۴ - ۵۴: نمودار پراش پرتو ایکس سطح پوشش پاشش حرارتی فرایند B (با استفاده از دوش آرگنی) برای پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB2.
- شکل ۴ - ۵۵: نمودار پراش پرتو ایکس سطح پوشش پاشش حرارتی فرایند A (با استفاده از دوش آرگنی) برای پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB2 پس از عملیات حرارتی خنثی در دمای 1100°C به مدت ۱۰ ساعت.
- شکل ۴ - ۵۶: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از الف) سطح و ب) مقطع پوشش پاشش حرارتی فرایند A (با استفاده از دوش آرگنی)، برای پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB2، پس از عملیات حرارتی خنثی در دمای 1100°C به مدت ۱۰ ساعت (جهت پاشش در شکل ب، از بالا به پایین می‌باشد).
- شکل ۴ - ۵۷: آنالیز خطی عنصری پوشش پاشش حرارتی فرایند A (با استفاده از دوش آرگنی)، برای پودر آلیاژسازی مکانیکی (به مدت ۲۰ ساعت) و آگلومره شده‌ی MSB2، پس از عملیات حرارتی خنثی در 1100°C به مدت ۱۰ ساعت، منطبق بر راستای نشان داده شده در شکل ۴ - ۵۶ ب؛ (جهت پاشش، از چپ به راست می‌باشد).
- شکل ۴ - ۵۸: نمودارهای اکسایش پیوسته در دمای 1000°C برای زیرلایه‌ی فولاد، با و بدون پوشش‌های مختلف (نسبت سطح پوشش به کل سطح برای نمونه‌های پوشش دار، برابر با ۳۷٪ می‌باشد).
- شکل ۴ - ۵۹: نمودارهای اکسایش پیوسته در دمای 1000°C برای زیرلایه‌ی فولادی بدون پوشش و پوشش دار و ترکیب MSB2 بدون زیرلایه (نسبت سطح پوشش به کل سطح برای نمونه‌ی پوشش دار، برابر با ۶۵٪ می‌باشد).
- شکل ۴ - ۶۰: نمودارهای پراش پرتو ایکس سطح پوشش، قبل و بعد از فرایند اکسایش در حالت‌های مختلف ترکیب.
- شکل ۴ - ۶۱: نمودارهای اکسایش پیوسته در دمای 1000°C برای زیرلایه‌ی نیکل، با و بدون پوشش MSB2 حاوی

- ترکیب بین‌فلزی (نسبت سطح پوشش به کل سطح برای نمونه‌ی پوشش‌دار، برابر با ۳۷٪ می‌باشد).
- شکل ۴-۶۲: نمودار پراش پرتو ایکس بعد از فرایند اکسایش در سطح نیکل: الف) بدون پوشش و ب) با پوشش. ۸۲
- شکل ۴-۶۳: نتایج زبری‌سنجی زیرلایه‌های فولادی و نیکلی به همراه پوشش‌های MSB1 با فرایندهای پاششی A و C و MSB2 با فرایندهای پاششی A و B در دو زیرلایه‌ی فولادی و نیکلی. ۸۳
- شکل ۴-۶۴: نتایج ریزسنجی زیرلایه‌های فولادی و نیکلی به همراه پوشش‌های MSB1 و MSB2 با فرایند پاششی A. ۸۳
- شکل ۴-۶۵: نتایج آزمون بارپذیری زیرلایه‌ها، با و بدون پوشش (در مسافت ثابت ۱۰۰ متر برای هر بار اعمالی)؛ Fe: زیرلایه‌ی فولاد بدون پوشش؛ Ni: زیرلایه‌ی نیکل بدون پوشش؛ MSB1-Fe: زیرلایه‌ی فولاد با پوشش MSB1؛ MSB2-Fe: زیرلایه‌ی فولاد با پوشش MSB2؛ MSB2-Ni: زیرلایه‌ی نیکل با پوشش MSB2 (فرایند پاشش در تمام موارد: A). ۸۴
- شکل ۴-۶۶: نتایج آزمون سایش زیرلایه‌ها، با و بدون پوشش در بار اعمالی ثابت: الف) ۱۸ N و ب) ۲۷ N. ۸۵
- شکل ۴-۶۷: نتایج ثبت صدای ایجاد شده (به صورت دسی‌بل) در طی آزمون سایش زیرلایه‌ها، با و بدون پوشش در بارهای اعمالی ثابت ۱۸ N و ۲۷ N. ۸۵
- شکل ۴-۶۸: نتایج سایش سطح ساینده‌ی مقابل به نمونه‌ها (پین) در طی آزمون بارپذیری و بارهای اعمالی ثابت ۱۸ N و ۲۷ N. ۸۶
- شکل ۴-۶۹: الف و ب) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح سایش زیرلایه‌ی فولادی (Fe)؛ ج) ذرات سایش. ۸۷
- شکل ۴-۷۰: الف و ب) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح سایش زیرلایه‌ی نیکلی (Ni)؛ ج) ذرات سایش. ۸۷
- شکل ۴-۷۱: الف و ب) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح سایش پوشش MSB1 بر زیرلایه‌ی فولادی (MSB1-Fe)؛ ج و د) ذرات سایش. ۸۸
- شکل ۴-۷۲: الف، ب و ج) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح سایش پوشش MSB2 بر زیرلایه‌ی فولادی (MSB2-Fe)؛ د) ذرات سایش. ۸۸
- شکل ۴-۷۳: الف و ب) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح سایش پوشش MSB2 بر زیرلایه‌ی نیکلی (MSB2-Ni)؛ ج و د) ذرات سایش. ۸۹

فهرست جدول‌ها

فصل دوم: مطالعات مروری

- جدول ۲-۱: انحراف از حالت تعادلی در فرایندهای غیرتعادلی گوناگون. ۷
- جدول ۲-۲: کاربردهای فرایند آلیاژسازی مکانیکی. ۷
- جدول ۲-۳: مقایسه‌ی فرایندهای مختلف پاشش حرارتی. ۱۲
- جدول ۲-۴: طبقه بندی مواد قابل استفاده در دماهای بالا. ۱۴
- جدول ۲-۵: خواص مهم مولیبدن در دمای اتاق. ۱۵
- جدول ۲-۶: برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سیلیساید‌های مولیبدن. ۲۰
- جدول ۲-۷: نتایج مطالعات صورت گرفته بر روی رفتار اکسایش $MoSi_2$ در محدوده‌های دمایی متفاوت. ۲۸
- جدول ۲-۸: نتایج آزمایش‌های اکسایش Mo_5Si_3 و Mo_5Si_3-B در محدوده‌های دمایی مختلف. ۳۰
- جدول ۲-۹: نتایج آزمایش‌های اکسایش آلیاژهای Mo-Si-B در محدوده‌های دمایی مختلف. ۳۱

فصل سوم: مواد و روش انجام تحقیق

- جدول ۳-۱: برخی مشخصات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی عناصر مولیبدن، سیلیسیم و بور. ۳۵
- جدول ۳-۲: ترکیبات اولیه‌ی هر یک از پودرهای انتخاب شده برای انجام فرایندهای مختلف تحقیق. ۳۷
- جدول ۳-۳: ترکیب شیمیایی زیرلایه‌های استفاده شده برای فرایند پاشش حرارتی پودرها، بر اساس آنالیز طیف نگاری نشر جرقه‌ای. ۳۸
- جدول ۳-۴: پارامترهای مختلف در نظر گرفته شده برای فرایند پاشش حرارتی پلاسمایی. ۴۲
- جدول ۳-۵: شرایط آزمایش طیف‌سنجی جذب اتمی با توجه به پودرهای مختلف. ۴۴

فصل چهارم: نتایج و یافته‌های تحقیق

- جدول ۴-۱: نتایج ارزیابی طیف‌سنجی جذب اتمی پودر مولیبدن خالص. ۴۹
- جدول ۴-۲: نتایج ارزیابی اندازه ذرات پودر مولیبدن خالص به کمک پردازشگر لیزری اندازه ذرات با توجه به شکل ۴-۲. ۴۹
- جدول ۴-۳: نتایج ارزیابی طیف‌سنجی جذب اتمی پودر سیلیسیم خالص. ۵۰
- جدول ۴-۴: نتایج ارزیابی اندازه ذرات پودر سیلیسیم خالص به کمک پردازشگر لیزری اندازه ذرات با توجه به شکل ۴-۵. ۵۱
- جدول ۴-۵: نتایج ارزیابی طیف‌سنجی جذب اتمی پودر بور خالص. ۵۱
- جدول ۴-۶: نتایج ارزیابی اندازه ذرات پودر بور خالص به کمک پردازشگر لیزری اندازه ذرات با توجه به شکل ۴-۸. ۵۲
- جدول ۴-۷: مقادیر ضریب اصطکاک زیرلایه‌ها، با و بدون پوشش. ۸۶

فصل پنجم: بحث بر روی یافته‌ها

- جدول ۵-۱: مکانیزم‌های سایشی غالب در زیرلایه‌ها، با و بدون پوشش. ۱۱۰

چکیده

در این تحقیق، ترکیبات پودری $Mo-14Si-10B$ ، $Mo-57Si-10B$ و $Mo-47Si-23B$ (درصد اتمی) به کمک آسیاب سایشی با سرعت ۳۶۵ rpm در محیطی خنثی و آبگرد و نسبت وزنی ساچمه به پودر ۲۰ در زمان‌های مختلف، آلیاژسازی مکانیکی شده و در دماها و زمان‌های گوناگون تحت عملیات آنیل قرار گرفتند. همچنین برخی پودرهای به دست آمده در قالب فولادی استوانه‌ای تحت فشارهای مختلف فشرده شده و قرص‌های حاصله، پس از عملیات آنیل در محیط خنثی، خرد و دانه‌بندی شدند؛ ضمن آن‌که پودرهای ریز به دست آمده از فرایندهای قبلی تحت عملیات آگلومراسیون نیز قرار گرفته و دانه‌بندی شدند. سپس پودرهای تهیه شده، به کمک روش پاشش حرارتی پلاسمایی در شرایط حفاظت شده و حفاظت نشده، بر روی زیرلایه‌هایی از فولاد معمولی و نیکل قرار گرفتند.

خصوصیات فازی و ساختاری پودرها و نمونه‌ها با کمک میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و عبوری، میکروسکوپ نوری، تفرق سنج اشعه‌ی ایکس، طیف‌سنج جذب اتمی، پردازشگر لیزری اندازه ذرات و دستگاه آنالیز حرارتی تجزیه و تحلیل شدند و پارامتر شبکه با کمک تابع نلسون-ریلی در شرایط مختلف حاصل گردید. همچنین ارزیابی‌های اکسایش پیوسته در دمای بالا و آزمون‌های سایش خشک بر روی پوشش‌ها انجام شد.

نتایج حاصله نشان داد بعد از فرایند آلیاژسازی مکانیکی، هیچ‌گونه ترکیب بین‌فلزی از $Mo-Si-B$ تشکیل نمی‌شود، اما پودر به دست آمده، بسیار ریزدانه (در حد نانومتر) و همگن (از لحاظ توزیع عناصر) خواهد شد؛ مواد اولیه‌ی غنی از مولیبدن، پس از فرایند آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی، عمدتاً محلول جامد فوق اشباع مولیبدن و به صورت محدود، فازهای جدید دوتایی $Mo-Si$ حاصل می‌کنند، اما مواد اولیه‌ی غنی از سیلیسیم، ترکیبات بهینه‌ای از سیستم سه‌تایی $Mo-Si-B$ را در پی دارند؛ این در حالی است که به کمک بایندر آلی کربوکسی‌متیل سلولز، می‌توان ذرات بسیار ریز $Mo-Si-B$ را جهت استفاده در فرایندهای پاششی، به ذرات آگلومره شده‌ی میکرونی تبدیل نمود. همچنین، پوشش‌های پاشش حرارتی $Mo-Si-B$ فاقد ترکیبات بین‌فلزی، علی‌رغم افزایش قابل توجه خواص تریبولوژیکی زیرلایه، مقاومت به اکسایش آن‌را چندان بهبود نمی‌بخشند، اما پوشش‌های پاشش حرارتی $Mo-Si-B$ حاوی ترکیبات بین‌فلزی، ضمن بهبود نسبی خواص تریبولوژیکی زیرلایه، افزایش قابل توجه مقاومت به اکسایش را نیز در پی دارند؛ هر چند تأثیر دقیق این موارد، بستگی زیادی به جنس زیرلایه دارد.

کلمات کلیدی

سیلیساید‌های مولیبدن، $Mo-Si-B$ ، شناسایی فازی، آلیاژسازی مکانیکی، پاشش حرارتی پلاسمایی.

فصل اول: مقدمه

به منظور بازدهی انرژی در کاربردهای گوناگون صنعتی و نظامی، نیاز روزافزون و اساسی به موادی با مقاومت خوب در دمای بالا وجود دارد. از میان این کاربردها می‌توان به اجزاء کوره‌های صنعتی، قطعات و سامانه‌های تولید نیرو، مؤلفه‌های مهندسی بخش گرم موتورهای توربین هواپیما نظیر پره‌ها، کمپرسورها و نازل‌ها اشاره نمود [۱]. این گونه قطعات و مواد که نیاز به کار در دمای بالا دارند، باید علاوه بر حفظ بسیاری از خواص مکانیکی و فیزیکی لازم، مقاومت به اکسایش عالی، مقاومت به خزش و هدایت الکتریکی مطلوب همانند شبه فلزات نیز داشته باشند. به منظور ایجاد تعادل بین تمام این خواص بهینه، بخش قابل توجهی از تحقیقات بر روی توسعه مواد جدید متمرکز شده است. در این رابطه ترکیبات کامپوزیتی چندفازی، شاخص اهداف تحقیقاتی محسوب گردیده است [۲].

در چندین دهه‌ی اخیر بخش زیادی از پژوهش بر روی آلومیناید نیکل و آلومیناید تیتانیم متمرکز بوده است [۳-۶]. این ترکیبات، علی‌رغم داشتن انعطاف‌پذیری مطلوب در دمای اتاق، صرفاً در دماهای زیر 1000°C تحمل مقاومت به اکسایش دارند و از این بابت نمی‌توانند در دماهای کاری خیلی زیاد مفید واقع گردند [۷ و ۸]. بررسی‌ها نشان داده است که برای کاربردهای استحکامی و اکسایش بیش از 1000°C ، سرامیک‌های بر پایه‌ی سیلیسیم و اصولاً ترکیبات بین‌فلزی حاوی سیلیسیم نقش مطلوبی از خود ایفا می‌کنند [۹-۱۱].

امروزه به دلیل نیاز به موادی با کاربردهای ویژه - یعنی استفاده از موادی که بتواند عملکرد مطلوبی در دماهای بین 1100°C تا 1500°C در محیط هوا یا اکسیدکننده داشته باشد - محققین و دانشمندان را به سوی توسعه و تحقیق بر

روی سیلیساید‌های مولیبدن هدایت کرده است [۱۲-۱۴]. همچنین نسبت جالب "خواص به هزینه" در این مواد، آن‌ها را برای ساخت قطعات مکمل پره‌ها^۱ [۱۵]، لانس‌های فلزات مذاب^۲ [۱۶]، غلاف‌های محافظ^۳ در سنسورهای دمای بالا (ترموکوپل‌ها) [۱۷] و مشعل‌های گاز قابل استفاده در صنایع [۱۸] برجسته و قابل توجه ساخته است؛ به نحوی که حضور ترکیبات بین‌فلزی بر روی آلیاژها، سختی و مقاومت به سایش را بهبود قابل توجه خواهد داد [۱۹].

بررسی‌های مختلف در چند ساله‌ی اخیر نشان داده است که آلیاژی کردن سیلیساید‌های مولیبدن با عنصر بور، تا حد زیادی مقاومت به اکسایش آن‌ها را بهبود می‌بخشد [۲۰]. علاوه بر آن، برخی خواص مکانیکی نیز افزایش قابل توجه می‌یابد [۲۱]. بنابراین تلاش‌های زیادی در خصوص توسعه‌ی آلیاژهای سه‌تایی Mo-Si-B انجام شده است [۲۲-۲۵]. تولید و سنتز ترکیبات چندفازی بر پایه‌ی Mo-Si-B به روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است که از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به روش ذوب و انجماد [۲۶ و ۲۷]، فشرده‌سازی پودر و استفاده از فرایند پرس ایزواستاتیک داغ [۹]، سیلیکونایزینگ مولیبدن و سپس برونایزینگ ترکیب حاصله [۲۸] اشاره نمود. نکته‌ی قابل توجه آن که این گونه روش‌ها، علاوه بر پیچیدگی‌های تکنولوژیکی و تجهیزاتی، غالباً مراحل آزمایشگاهی خود را پشت سر می‌گذارند و مهم‌تر آن که در این موارد، عموماً روش‌های تعادلی برای تولید بدنه‌ی^۴ قطعات از مواد Mo-Si-B گزارش شده است.

استفاده از روش آلیاژسازی مکانیکی^۵ برای تولید ترکیبات دو تایی Mo-Si با موفقیت‌های نسبی همراه بوده است [۲۹-۳۲]؛ در صورتی که برای سنتز ترکیبات سه‌تایی Mo-Si-B به روش آلیاژسازی مکانیکی تلاش‌های بسیار محدودی صورت گرفته است [۳۳]. همچنین در خصوص استفاده از ترکیبات سه‌تایی Mo-Si-B به صورت پوشش جهت افزایش مقاومت به اکسایش و سایش زیرلایه به کمک روش‌های مناسب پاشش حرارتی، گزارش شاخصی ارائه نشده است.

در پژوهش حاضر، نخست مروری اجمالی بر ترکیبات بین‌فلزی، فرایندهای آلیاژسازی مکانیکی و پاشش حرارتی ارائه خواهد شد و سپس در ادامه‌ی این فصل، به منظور شناخت بهتر و عمیق‌تر مولیبدن و ترکیبات بین‌فلزی بر پایه‌ی آن، مطالبی در خصوص ویژگی‌های مولیبدن، ترکیبات بین‌فلزی دو تایی Mo-Si و سه‌تایی Mo-Si-B، رفتار مکانیکی و خواص اکسایش در دمای بالای این گونه ترکیبات، چالش‌های موجود در توسعه‌ی ساختارهای تعادلی و روش‌های ساخت ترکیبات فوق بیان شده است.

^۱- The blade outer air seal (BOAS)

^۲- Molten metal lances

^۳- Protective sheaths

^۴- Bulk

^۵- Mechanical alloying (MA)

در فصل سوم، پس از معرفی مواد اولیه و ترکیب پودرهای انتخاب شده، مختصری در خصوص فرایندهای آلیاژسازی مکانیکی و پاشش حرارتی استفاده شده در این تحقیق همراه با فرایندهای مکمل هر یک، توضیحاتی بیان شده است. همچنین با توجه به ریزی بیش از حد اندازه‌ی ذرات پس از آلیاژسازی مکانیکی و عدم کیفیت لازم پودرها جهت استفاده در فرایند پاشش حرارتی بعدی، بحث مهم آگلومراسیون پودرها و تعیین پارامترهای مطلوب جهت آگلومره کردن، فشرده‌سازی و دانه‌بندی پودرهای ترکیبی بیان شده است. در ادامه‌ی این فصل نیز، کلیه‌ی روش‌های ارزیابی پودرها، ریزساختارها و پوشش‌ها، به ویژه از نظر آنالیز مواد حاصله، خواص اکسایشی و مقاومت به سایش توضیح داده شده‌اند.

در فصل چهارم، نتایج و یافته‌های تحقیق منطبق بر روش‌های ارائه شده در فصل سوم به تفصیل ارائه گردیده‌اند و در فصل پنجم، نتایج و یافته‌های فوق مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به آن که هدف اصلی از انجام این تحقیق، ایجاد پوشش پاشش حرارتی Mo-Si-B بر روی زیرلایه‌هایی مناسب از فولاد (زیرلایه‌ای با خواص اکسایشی بسیار نامطلوب [۳۴] و خواص سایشی نسبتاً مطلوب [۱۹]) و نیکل (زیرلایه‌ای با خواص اکسایشی مطلوب [۳۴] و خواص سایشی بسیار نامطلوب [۳۵]) بوده و بر این اساس، لازم است پودرهای مناسب (به عنوان مواد اولیه‌ی فرایند APS) تهیه شوند، بنابراین در ابتدای فصل پنجم در خصوص چگونگی تولید انواع پودرهای تهیه شده با سه ترکیب متفاوت در این تحقیق، توضیحات لازم ارائه شده است. در ادامه، با توجه به نتایج و مباحث صورت گرفته در مبحث قبل، پوشش‌های پاششی دو نوع از پودرهای تهیه شده با فرایندهای متنوع پاشش پلاسمایی مورد بحث قرار گرفته‌اند و در نهایت، ارزیابی‌های کاربردی اکسایشی و سایشی پوشش‌های فوق بر روی دو زیرلایه‌ی فولاد ساده و نیکل بررسی شده‌اند. در فصل ششم نیز جمع‌بندی خلاصه‌ای از کل نتایج دریافت شده در این پژوهش آورده شده است.

فصل دوم: مطالعات مروری

۲-۱ - ترکیبات بین فلزی

ترکیب بین فلزی به گروهی از آلیاژهای فلز- فلز یا فلز- شبه فلز اطلاق می‌گردد که در آن، اتم‌ها از نظم خاصی برخوردارند. هر ترکیب بین فلزی می‌تواند از یک نسبت دقیق^۱ و غیر قابل تغییر اجزاء سازنده [۳۶] و یا محدوده‌ای از ترکیب شیمیایی برخوردار باشد. ماهیت منظم ترکیبات بین فلزی باعث شده است تا این دسته از مواد، خواص قابل توجهی مانند استحکام و سفتی^۲ بالا و مقاومت به اکسایش - خوردگی عالی در دماهای بالا از خود نشان دهند. دلیل این امر، تحرک ناچیز نابجایی‌ها و نفوذپذیری پائین این گونه ترکیبات گزارش شده است. از سوی دیگر تحرک ناچیز نابجایی‌ها باعث شده است ترکیبات بین فلزی در دمای محیط از انعطاف‌پذیری و چقرمگی شکست پائین برخوردار باشند به نحوی که این موضوع، کاربردهای ترکیبات بین فلزی را در مقیاس صنعتی با محدودیت مواجه ساخته است.

تولید ترکیبات بین فلزی به روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است که از آن جمله می‌توان به فرایندهای ذوب، فشردن پودری^۳، تولید از فاز بخار و آبکاری الکتریکی اشاره نمود. در اکثر این روش‌ها، ترکیبات بین فلزی به صورت تعادلی و با ساختار نهایی تولید می‌شوند [۳۷]؛ این، در حالی است که با توجه به ماهیت این گونه ترکیبات و انعطاف‌پذیری پایین آن‌ها در ساختارهای تعادلی، لازم است تلاش‌هایی در جهت بهبود آن به عمل آید. بر این اساس، عمده‌ترین اقداماتی را که می‌توان انجام داد، عبارتند از: (۱) کاهش اندازه دانه، (۲) بی‌نظم کردن شبکه جهت

¹- Rigid

²- Stiffness

³- Powder consolidation