

ارزیابی مقاومت به اکسایش پیوسته پوشش پاشش حرارتی Mo-Si-B روی فولاد ساده کربنی

سعیدرضا بخشی*، مهدی صالحی**، حسین ادريس*** و غلامحسین برهانی*

دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۰/۱۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۱/۳۱)

چکیده - () Mo-Si-B Mo-Si-B

Mo₅SiB₂

MoB Mo₅Si₃ MoSi₂

Mo-Si-B

Mo-Si-B

Mo-Si-B

واژگان کلیدی:

Isothermal oxidation behavior of plasma-sprayed Mo-Si-B intermetallic coatings on plain steel

S. R. Bakhshi, M. Salehi, H. Edris, and G. H. Borhani

Department of Materials Engineering, Malek-Ashtar University of Technology

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: In this study, Mo-14Si-10B and Mo-57Si-10B (at%) elemental powders were separately milled using an attritor mill. Mechanically alloyed powders were agglomerated and annealed. Then, powders of Mo-Si-B as alloyed (with composites) and

*** - دانشیار

** - استاد

* - استادیار

agglomerated (without composites) were plasma sprayed onto plain carbon steels. The samples, both coated and non-coated, were subjected to isothermal oxidation tests. Metallurgical characteristics of powders and coatings were evaluated by SEM and XRD. Plasma-sprayed Mo-Si-B coatings (with phases of MoSi₂, Mo₅Si₃, MoB and Mo₅SiB₂) greatly improved the oxidation resistance of the plain steel substrates, but plasma-sprayed Mo-Si-B coatings (without any phases) did not significantly improve the oxidation rate of substrates. Also, the kinetics and composition of the oxide-scale have been found to depend on the alloy composition.

Keywords: Mechanical alloying, Thermal spraying, High temperature oxidation, Molybdenum silicides, Mo-Si-B.

۱- مقدمه

اصولاً در کاربردهای گوناگون صنعتی و نظامی، نیاز روزافزون و اساسی به موادی وجود دارد تا برای بهبود بازدهی انرژی، مقاومت خوبی به دماهای بالا داشته باشند؛ از جمله این کاربردها می‌توان به اجزای کوره‌های صنعتی، قطعات و اجزای تولید نیرو، اجزای بخش گرم موتورهای توربینی هواپیماها نظیر پره‌ها، کمپرسورها و نازلها اشاره کرد. این گونه قطعات و مواد، باید علاوه بر حفظ بسیاری از خواص استحکامی 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 روی توسعه مواد جدید متمرکز شده است؛ به ویژه ترکیبات کامپوزیتی چندفازی، نقطه عطف اهداف تحقیقاتی محسوب شده است. بررسیها نشان داده است که برای کاربردهای استحکامی و اکسایش بیش از ۱۰۰۰°C، سرامیکهای بر پایه سیلیسیم و به ویژه ترکیبات بین فلزی حاوی مولیبدن و سیلیسیم نقش مطلوبی از خود ایفا می‌کنند [۲۰۱].

نمودار فازی دو تایی Mo-Si دارای سه ترکیب بین فلزی MoSi₂ و Mo₅Si₃ و Mo₃Si با نقاط ذوب به ترتیب ۲۰۳۰°C، ۲۱۸۰°C و ۲۰۲۵°C است. MoSi₂ از لحاظ مقاومت به اکسایش، ترکیبی شناخته شده محسوب می‌شود، زیرا لایه‌ای نفوذناپذیر و محافظ از SiO₂ روی آن تشکیل می‌شود. اما از سوی دیگر از آنجا که پوسته SiO₂ نقش محافظت‌کنندگی مطلوبی روی Mo₅Si₃ و Mo₃Si ندارد، این ترکیبات در مقابل اکسایش در دمای بالا آسیب‌پذیرند.

همچنین مشخص شده است که داکتیلیته در دمای اتاق ترکیبات بین فلزی بر پایه سیلیساید مولیبدن و نیز چقرمگی شکست این آلیاژها در دمای اتاق چندان مطلوب نیست [۳]. در اواخر دهه ۱۹۹۰، محققان مختلفی گزارش کردند که آلیاژی کردن Mo₅Si₃ با عنصر بور و اصولاً استفاده از بور در کنار مولیبدن و سیلیسیم، علاوه بر حفظ خواص مطلوب دیگر، تا حد زیادی مقاومت به اکسایش را بهبود می‌بخشد [۴]؛ بنابراین بررسیهای زیادی در خصوص توسعه آلیاژهای سه تایی Mo-Si-B انجام شده است [۵-۷].

تولید ترکیبات چندفازی بر پایه Mo-Si-B به روشهای مختلفی امکانپذیر بوده و گزارشهای گوناگونی در این رابطه ارائه شده است [۸-۱۱]. عمده روشهای ذکر شده در خصوص سنتز ترکیبات چندتایی Mo-Si-B، مبتنی بر استفاده از فناوریهای پیشرفته بوده و علاوه بر آن، محصولات ایجاد شده به صورت توده‌ای (و نه پودری) است. در خصوص سنتز ترکیبات سه تایی Mo-Si-B به روش آلیاژسازی مکانیکی و سپس پاشش حرارتی پودرهای حاصله، تلاشهای ناچیزی صورت گرفته است. در این تحقیق، ترکیبات بین فلزی Mo-Si-B، ایجاد شده به روش آلیاژسازی مکانیکی و فرایند پاشش حرارتی بعدی روی زیرلایه‌های فولادی، در معرض اکسایش در دمای بالا قرار گرفته و نتایج حاصله با فولادهای بدون پوشش مقایسه شده است. اگر چه نمی‌توان فولادهای ساده کربنی را موادی مناسب برای کاربردهای دمای بالا معرفی کرد، اما ارزیابی عملکرد ضد اکسایشی پوششهای Mo-Si-B بر روی زیرلایه غیر مقاوم فولاد، تأثیر قابل توجه این نوع مواد پیشرفته را روشن می‌کند.

۲- روش تحقیق

اکسیدی به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ و پراش پرتو ایکس^۵ تجزیه و تحلیل شدند. دستگاه پراش پرتو ایکس استفاده شده، دارای تیوپ مسی با طول موج $K_{\alpha 1}/5405\text{\AA}$ ، ولتاژ 40 kV و جریان 30 mA در گام روبشی 0.04° و در محدوده 20° از 90° بوده است و تحلیل‌های پراش پرتو ایکس از سطح پوششها به عمل آمده است.

۳- نتایج و بحث

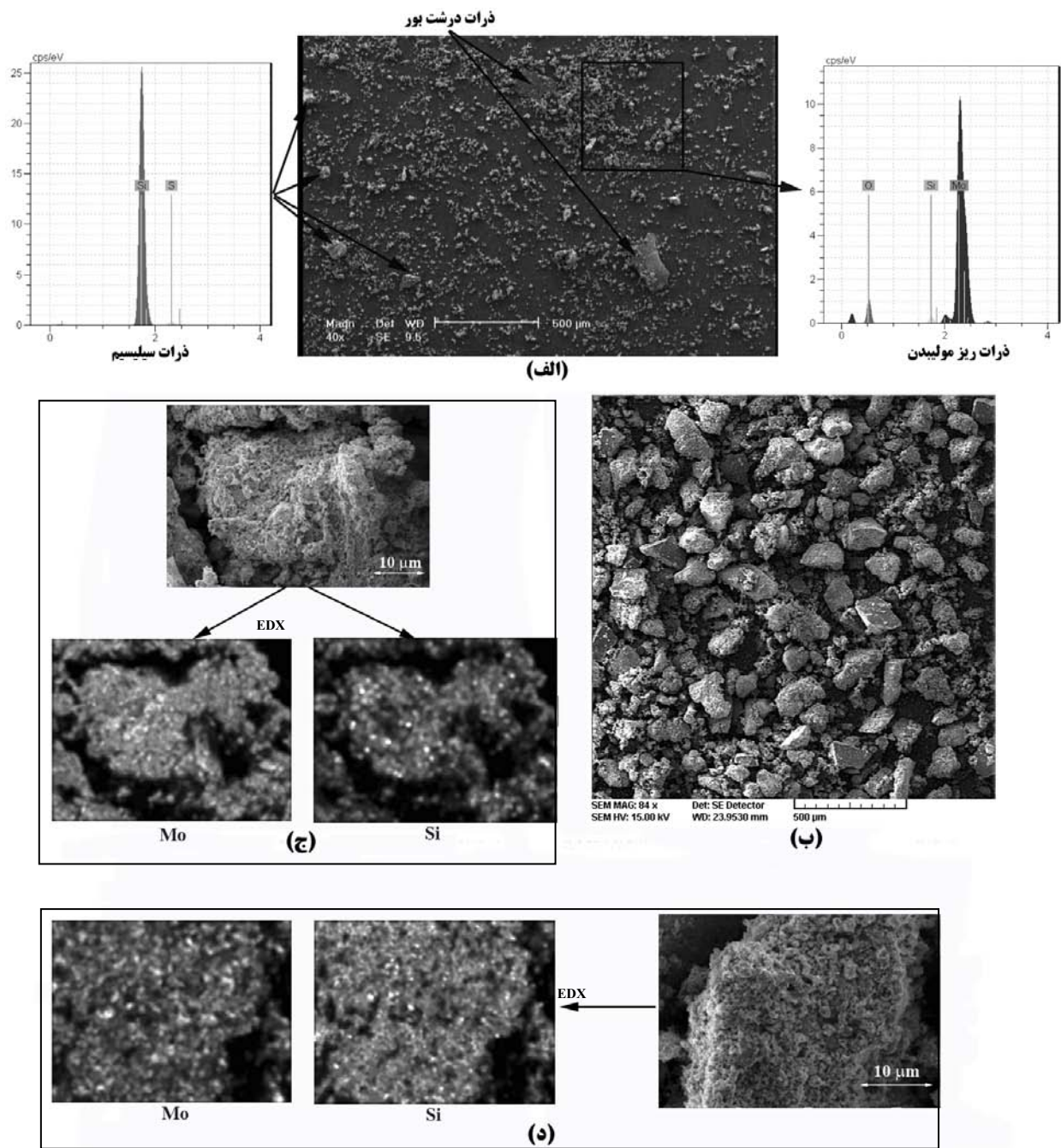
شکل (۱)، تصاویر SEM و تحلیل EDX^۶ ذرات حاوی ترکیب Mo-Si-B را قبل و بعد از آلیاژسازی مکانیکی و آگلومراسیون نشان می‌دهد؛ همان‌طور که از این شکل مشخص است، ذرات آگلومره شده برای استفاده در فرایند پاشش حرارتی، از اندازه و توزیع مناسبی برخوردار بوده و سرعت سیلان مطلوبی در حین فرایند پاشش از خود نشان می‌دهند [۱۱]. ضمن آنکه تحلیل EDX صورت گرفته از ذرات، نشان‌دهنده توزیع مطلوب و کامل مولیبدن و سیلیسیم بعد از فرایند آلیاژسازی مکانیکی، در هر یک از ذرات آگلومره شده MoSiB₁ و MoSiB₂ است. ذکر این نکته نیز ضروری است که با توجه به ماهیت عنصر بور، نمی‌توان آن را به روشهای متداول تحلیل EDX مورد ارزیابی قرار داد؛ بنابراین در شکل‌های (۱-ج) و (۱-د)، صرفاً توزیع مولیبدن و سیلیسیم نشان داده شده است. در شکل (۲)، نمودارهای XRD ترکیب MoSiB₁ و MoSiB₂ بعد از آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی آورده شده‌اند؛ با توجه به این شکل می‌توان دریافت که هنگام استفاده از ترکیب MoSiB₁، ترکیبات بین‌فلزی دوتایی محدودی بعد از فرایند آنیل نفوذی مشاهده می‌شود، ولی با استفاده از ترکیب MoSiB₂ در شرایط مشابه می‌توان به ترتیب، ترکیبات MoSi_2 ، Mo_5Si_3 ، Mo_5Si_2 ، MoB و Mo را دریافت کرد.

در شکل (۳)، تصاویر SEM پوشش پاشش حرارتی MoSiB₁ در بزرگنماییهای مختلف و تحلیل خطی پوششهای MoSiB₁ و MoSiB₂ در راستای مسیر مشخص شده در شکل (۳-الف)

مخلوطی از پودر خالص مولیبدن، سیلیسیم و بور، در محدوده ترکیب اسمی $76\text{Mo}-14\text{Si}-10\text{B}$ (MoSiB₁) و $33\text{Mo}-57\text{Si}-10\text{B}$ (MoSiB₂) (برحسب درصد اتمی) با استفاده از یک آسیاب سایشی^۲ به مدت ۲۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی شد [۱۱]. پودرهای به دست آمده با کمک ترکیب مناسبی از آب دیونیزه و کربوکسی متیل سلولز آگلومره و دانه‌بندی شدند و مقداری از آنها به دلیل حصول ترکیبات بین‌فلزی، تحت فرایند عملیات آنیل نفوذی در دمای 1100°C به مدت ۱۰ ساعت قرار گرفتند [۱۱]. پودرهای تهیه شده در دو حالت ترکیب‌دار و بدون ترکیب، با کمک روش پاشش حرارتی پلاسمایی^۳ بر روی زیرلایه‌هایی از فولاد ساده کربنی با ضخامت حدود $110\text{ }\mu\text{m}$ پوشش داده شدند. با توجه به عدم وجود پوشش در قسمتهایی از زیر لایه، نسبت سطح پوشش به کل سطح، به دو صورت 37% و 65% در نظر گرفته شد. پارامترهای در نظر گرفته شده برای فرایند پاشش حرارتی پلاسمایی عبارت‌اند از ولتاژ: 56 V ؛ جریان اعمالی: 500 A ؛ سرعت سیلان گاز آرگن پلاسمای: 55 lit/min ؛ سرعت سیلان گاز هیدروژن پلاسمای: 9 lit/min ؛ سرعت سیلان گاز آرگن حامل پودر: $2/6\text{ lit/min}$ و فاصله نازل تا زیرلایه: 110 mm . نمونه‌های زیرلایه، قبل از فرایند پاشش توسط ذرات ریز ماسه تحت عملیات سندبلاست قرار گرفتند.

نمونه‌های فولادی در شرایط بدون پوشش و همراه با پوشش، تحت فرایند اکسایش در دمای 1000°C به مدت حداقل 25 ks به صورت پیوسته قرار گرفته و همزمان تغییرات وزن آنها تا دقت 10^{-4} gr ثبت شد. برای این منظور، دستگاه اکسایش پیوسته در دمای بالا منطبق با استاندارد ASTM E1131-03، طراحی و ساخته شد (به شماره ثبت اختراع ۵۴۵۴۴). نمونه‌ها از دمای محیط، درون نگهدارنده آلومینایی کوره قرار گرفته و پس از یک ساعت، دمای 1000°C تأمین می‌شد.

خصوصیات فازی و ساختاری پودرها، پوشش و لایه



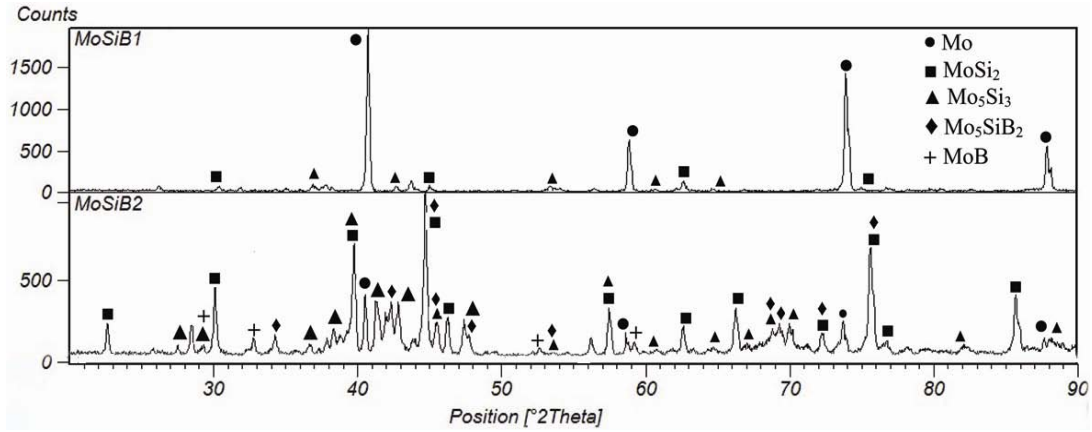
شکل ۱- تصویر SEM و تحلیل EDX ذرات Mo-Si-B (اعم از MoSiB_1 و MoSiB_2):

الف) قبل از فرایند آلیاژسازی مکانیکی،

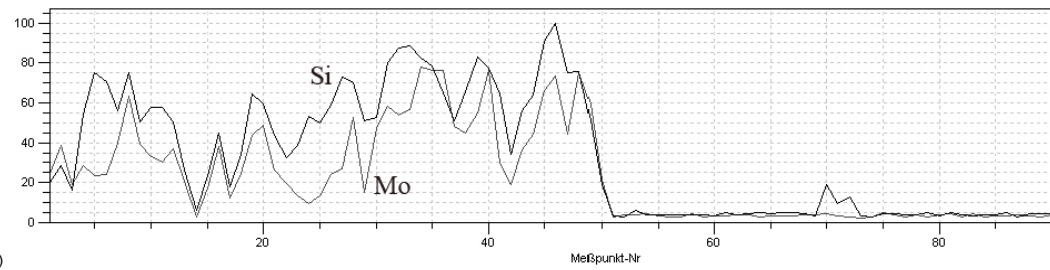
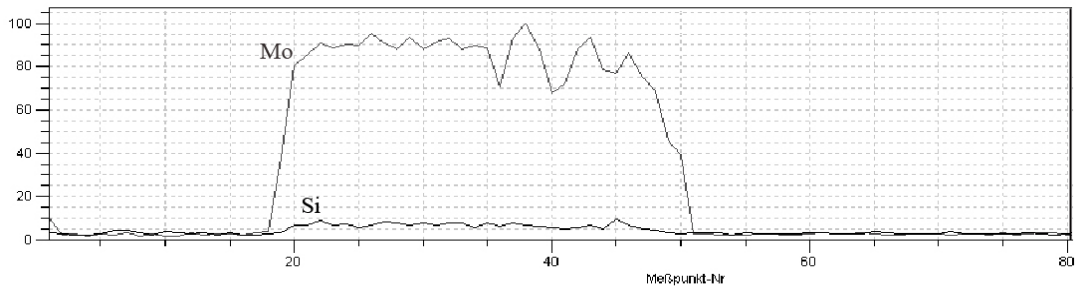
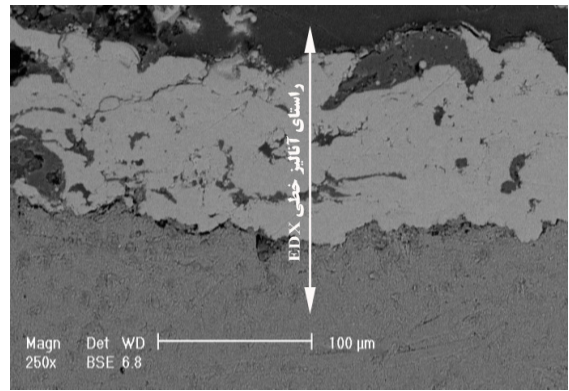
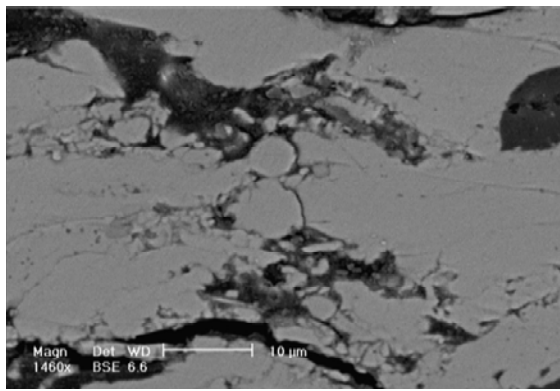
ب) پس از آلیاژسازی مکانیکی و آگلومراسیون؛

ج) نقشه تحلیلی EDX یک ذره MoSiB_1 (د) یک ذره MoSiB_2

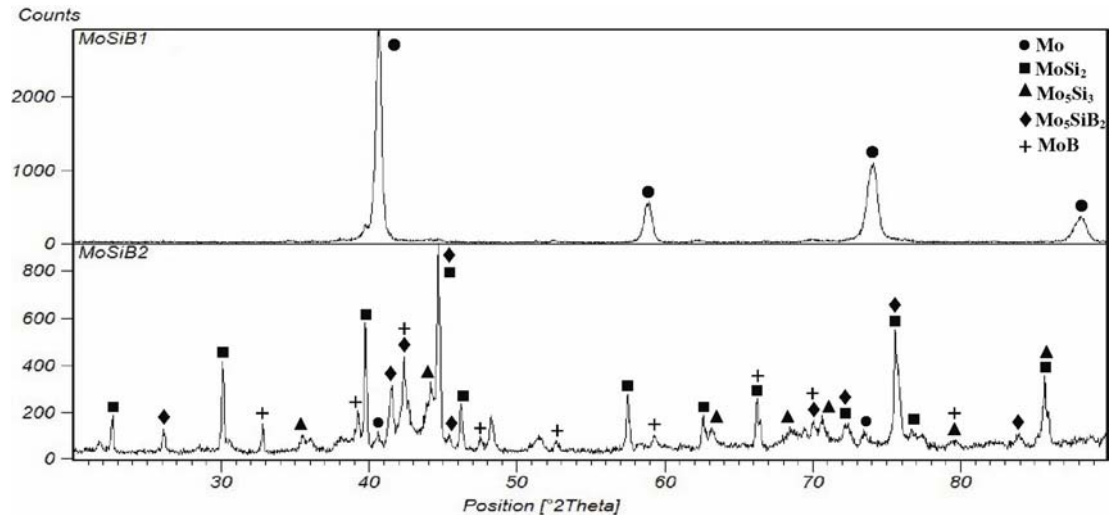
(نقاط روشن، نشان‌دهنده غلظتهای مرتبط با مولیبدن یا سیلیسیم می‌باشد).



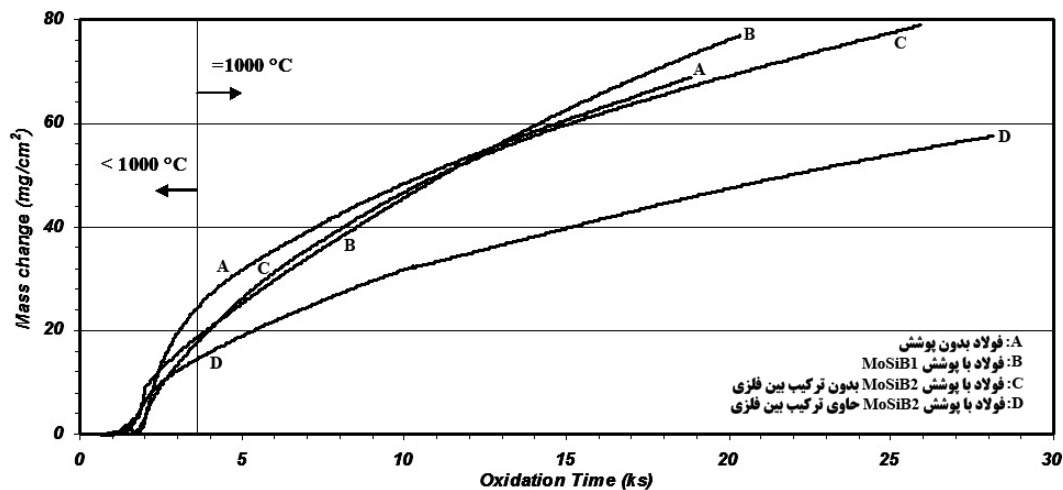
شکل ۲- نمودارهای XRD پودرهای Mo-Si-B بعد از آلیاژسازی مکانیکی و عملیات حرارتی؛ فازهای اصلی مشاهده شده در هر ترکیب به ترتیب عبارتند از MoSiB1: Mo، MoSi2 و Mo5Si3؛ MoSiB2: MoSi2، Mo5Si3، MoSi2، Mo5SiB2، MoSiB2، MoSi2، MoSi2، MoSiB1: Mo و MoB.



شکل ۳- تصاویر SEM پوششهای پاشش حرارتی MoSiB1 (الف) در بزرگنمایی پایین و (ب) در بزرگنمایی بالا (جهت پاشش از بالا به پایین میباشد)؛ تحلیل خطی EDX در راستای مقطع پوشش با ترکیب (ج) MoSiB1 و (د) ترکیب MoSiB2 (سمت چپ نمودار، پوشش و سمت راست، زیرلایه می باشد).



شکل ۴- نمودارهای XRD از سطح پوششهای پاشش شده از ترکیب MoSiB1 و ترکیب MoSiB2 بر روی فولاد.

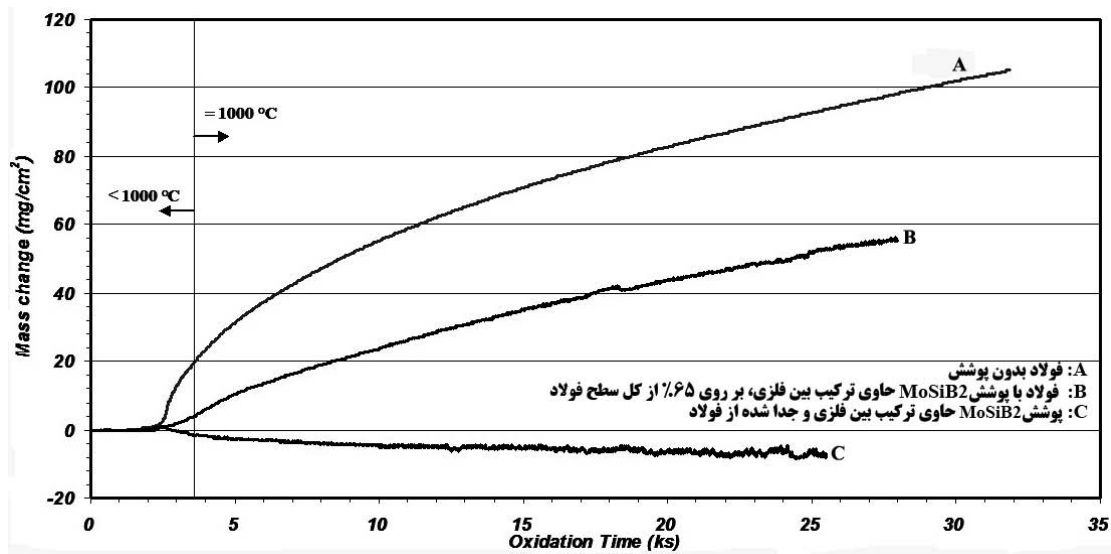


شکل ۵- نمودارهای اکسایش پیوسته در دمای 1000°C برای زیرلایه فولاد، همراه و بدون پوششهای مختلف (نسبت سطح پوشش به کل سطح برای نمونه‌های پوشش دار، برابر با ۳۷٪ می باشد).

MoSiB1 در قبل از پاشش (شکل ۲- نمودار MoSiB1)، پس از پاشش تجزیه شده و چندان حضور قابل توجهی در پوشش ندارند (شکل ۴- نمودار MoSiB1) [۱۱ و ۱۰]، اما درصد عمده‌ای از ترکیبات موجود در MoSiB2 (شکل ۲- نمودار MoSiB2)، در پوشش موجود هستند (شکل ۴- نمودار MoSiB2).

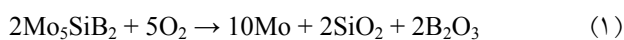
شکل (۵)، نمودارهای اکسایش پیوسته در دمای 1000°C را برای زیرلایه فولادی، زیرلایه حاوی پوشش MoSiB1، زیرلایه حاوی پوشش MoSiB2 بدون عملیات حرارتی (و بنابراین بدون ترکیبات بین فلزی) و زیرلایه حاوی پوشش MoSiB2

آورده شده است؛ قابل ذکر است که پوشش پاشش حرارتی MoSiB2 از نظر ریزساختاری تفاوت خاصی با MoSiB1 ندارد. با توجه به تحلیل خطی دریافت شده، مشخص است که حضور سیلیسیم در پوشش MoSiB1 با توجه به میزان اولیه آن چندان قابل توجه نیست، در حالی که توزیع و مقدار سیلیسیم در پوشش MoSiB2 کاملاً مشهود و مطلوب است؛ نمودارهای XRD پوششهای اعمالی روی فولاد، در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. با مقایسه نمودارهای XRD شکل‌های (۲) و (۴)، مشخص است که ترکیبات محدود حاصل شده در ترکیب



شکل ۶ - نمودارهای اکسایش پیوسته در دمای 1000°C برای زیرلایه فولادی بدون پوشش و پوشش دار و ترکیب MoSiB_2 بدون زیرلایه (نسبت سطح پوشش به کل سطح برای نمونه پوشش دار، برابر با ۶۵٪ می باشد).

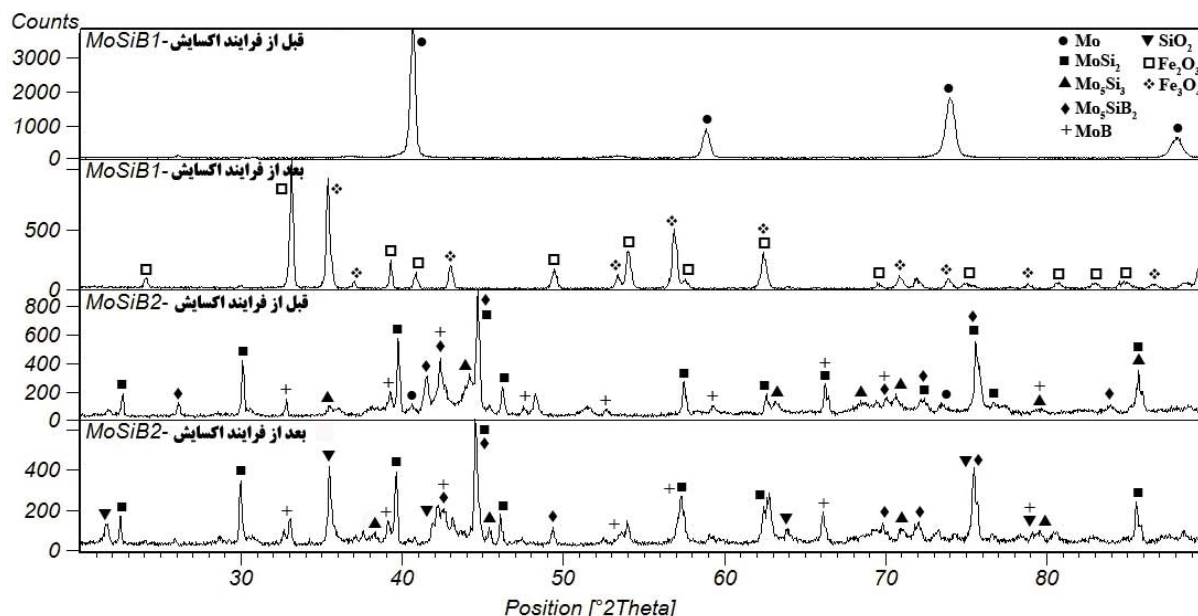
حالت پوشش دار و بدون پوشش، بیشتر می شود. در شکل (۶)، نمودارهای اکسایش در نسبت سطح پوشش به زیرلایه بالاتر، آورده شده است؛ با توجه به این شکل، علاوه بر کاهش بیشتر نرخ اکسایش، می توان دریافت که نرخ اکسایش پوششهای ترکیبی Mo-Si-B (بدون در نظر گرفتن زیرلایه)، با تقلیل وزن محدود همراه است و این نتیجه، در توافق با یافته های محققان دیگر است [۶، ۱۲ و ۱۳]. در بررسیهای اخیر صورت گرفته [۱۳]، مشخص گردیده است که در دماهای نزدیک به 800°C درجه سانتیگراد، تشکیل اکسیدهای MoO_3 و MoO_2 ، کاهش وزن ترکیبات Mo-Si-B را در پی دارد، اما حضور ترکیب بین فلزی Mo_5SiB_2 ، از تقلیل وزن بیش از حد، جلوگیری می کند. مکانیزم عمل بر اساس وقوع واکنش زیر است:



تشکیل لایه ی محافظ SiO_2 موجب جلوگیری از اکسایش بیشتر خواهد شد.

اصولاً برای تشکیل یک پوسته ی محافظ و پیوسته از SiO_2 ، تحقق دو شرط لازم و ضروری است [۱۴]: اول آنکه SiO_2 از پایداری ترمودینامیکی بالاتری نسبت به سایر اکسیدهای فلزی قابل حصول در سیستم آلیاژی مورد نظر، حین اکسایش در

عملیات حرارتی شده (و دارای ترکیبات بین فلزی)، در زمانهای طولانی با یکدیگر مقایسه کرده است؛ بر اساس این نمودارها، مشخص است که نمودار اکسایش در دمای بالای فولاد ساده کربنی از یک شکل سهموی تبعیت می کند (نمودار A) و وجود پوششهای مختلف عاری از ترکیبات بین فلزی بر پایه مولیبدن، تأثیر خاصی بر این نمودار نگذاشته است (نمودارهای B و C)؛ اگرچه این نوع پوششها در زمانهای اولیه، سرعت اکسایش فولاد را نسبت به حالت بدون پوشش کاهش داده اند، اما در زمانهای طولانی تر با تبخیر مولیبدن (به صورت MoO_3 و MoO_2) و از بین رفتن تدریجی آن [۶ و ۱۲]، در پوشش MoSiB_1 ، حتی سرعت اکسایش نسبت به حالت بدون پوشش نیز بیشتر شده است (نمودار B) و با میزان Mo کمتر و Si بیشتر در پوشش MoSiB_2 بدون ترکیب، نهایتاً روند اکسایش، مشابه با زیرلایه خواهد شد (نمودار C). این، درحالی است که نمونه های فولادی پوشش دار حاوی ترکیبات بین فلزی سیلیسایدی، مقاومت به اکسایش قابل توجهی نسبت به نمونه های فوق از خود نشان می دهند (نمودار D) و علاوه بر مقدار تغییر وزن کمتر این نمونه ها، شیب نمودار اکسایش نیز کاهش یافته و با گذشت زمان، تفاوت بین نرخ اکسایش در دو



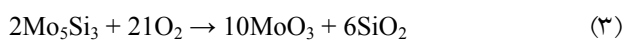
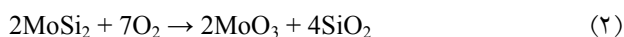
شکل ۷ - نمودارهای XRD سطح پوشش، قبل و بعد از فرایند اکسایش در حالت‌های مختلف ترکیب.

پوسته‌ی محافظ SiO_2 به طور قابل توجه نمی‌تواند بوجود آید، اما تزریق بور، سیالیت مقادیر جزئی آن را افزایش داده و ترک‌ها و حفرات پوسته، مسدود خواهند شد. در دماهای بالا، پوسته‌ی ویسکوز SiO_2 ، نقش حفاظت‌کنندگی را برعهده دارد و استفاده از مقادیر زیاد بور در این حالت، ویسکوزیته‌ی لایه‌ی اکسیدی را کاهش می‌دهد و آن را غیرمحافظ می‌کند [۱۵]. نسبت سیلیسیم به بور پودر غنی از سیلیسیم استفاده شده در این تحقیق (MoSiB_2)، برابر با ۵/۷ و بیشتر از ۱ است، بنابراین انتظار حضور ترکیب B_2O_3 در لایه‌ی اکسیدی چندان معقول به نظر نمی‌رسد و همان‌طور که تحلیل XRD شکل ۷ نشان می‌دهد، دریافت فاز SiO_2 دور از انتظار نیست.

در شکل (۷)، نمودارهای XRD سطح پوشش، قبل و بعد فرایند اکسایش در حالت‌های مختلف ترکیب پوشش مقایسه شده است؛ با توجه به این شکل، می‌توان دریافت که پوشش‌کاری از ترکیبات بین‌فلزی، پس از اکسایش در زمان‌های طولانی، هیچگونه مقاومتی از خود نشان نداده و پس از اضمحلال تدریجی پوشش غنی از مولیبدن، لایه‌هایی از اکسید آهن تشکیل شده است، درحالی‌که نمودارهای XRD پوشش حاوی ترکیبات بین‌فلزی در بعد از اکسایش، نشان می‌دهد که علاوه بر

دمای بالا برخورددار باشد و دوم این‌که غلظت سیلیسیم به اندازه کافی بالا باشد تا بتواند یک لایه اکسیدی پیوسته‌ی خارجی ایجاد کند. گاهی اوقات ممکن است پوسته SiO_2 تشکیل شود ولی حفاظت‌کنندگی مطلوبی از خود نشان ندهد؛ این پدیده، موقعی به‌وجود می‌آید که رشد رقابتی چندین اکسید وجود داشته باشد و یا آنکه پدیده پوسته‌پوسته شدن^۷، غالب باشد. نکته‌ی قابل توجه دیگر، این‌که نسبت اتمی سیلیسیم به بور، نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار اکسایشی آلیاژهای Mo-Si-B دارد. در این راستا در دمای 800°C ، نسبت‌های سیلیسیم به بور ۰/۵، ۰/۷۱ و ۱، مقاومت به اکسایش بهتری در مقایسه با آلیاژهای حاوی نسبت ۰/۵ و آلیاژهایی که از کسر حجمی بالای فاز Mo_5SiB_2 برخوردارند، حاصل می‌شود [۱۵].

همان‌طور که واکنش (۱) نشان می‌دهد، پوسته‌ی ایجاد شده بر روی Mo_5SiB_2 شامل B_2O_3 و SiO_2 غنی از بور می‌باشد، درحالی‌که پوسته‌ی تشکیل شده بر روی سیلیساید‌های دوتایی، SiO_2 است [۱۶ و ۱۷]:



در آلیاژهای Mo-Si-B و در دماهای پائین (کمتر از 800°C)،

ندارد و پس از مدت زمان طولانی، کاملاً از بین می‌روند.

۲- با اعمال پوششهای Mo-Si-B حاوی ترکیبات بین فلزی روی فولاد ساده کربنی، نرخ اکسایش زیرلایه کاهش قابل توجه یافته و شیب نمودار نیز سیر نزولی پیدا می‌کند. این درحالی است که ترکیب اصلی پوشش پس از اکسایش، تغییر چندانی از خود نشان نمی‌دهد و لایه‌ای محافظ از SiO₂ نیز بر روی سطح حاصل می‌شود.

حفظ این ترکیبات، لایه‌ای از پوشش مفید و مقاوم به اکسایش SiO₂ نیز بر روی سطح تشکیل می‌شود. ایجاد این پوشش، دلیل اصلی مقاومت ویژه آلیاژهای Mo-Si-B به محیط اکسیدان است [۶و۴].

۴- نتیجه‌گیری

۱- وجود پوششهای Mo-Si-B عاری از ترکیبات بین فلزی روی فولاد ساده کربنی، تأثیر قابل توجهی بر نرخ اکسایش زیرلایه

واژه نامه

1. blades
2. attritor mill
3. air plasma spraying (APS)
4. scanning electron microscopy (SEM)
5. X-ray diffraction (XRD)
6. energy dispersive X-ray analysis (EDX)
7. spallation

مراجع

1. Jéhanno, P., Heilmaier, M., Saage, H., Heyse, H., Böning, M., Kestler, H., and Schneibel, J. H., "Superplasticity of a Multiphase Refractory Mo-Si-B alloy," *Scripta Materialia*, Vol. 55, pp. 525-528, 2006.
2. Jéhanno, P., Heilmaier, M., and Kestler, H., "Characterization of an Industrially Processed Mo-Based Silicide Alloy," *Intermetallics*, Vol. 12, pp. 1005-1009, 2004.
3. Mitra, R., Srivastava, A. K., Prasad, N. E., and Kumari, S., "Microstructure and Mechanical Behaviour of Reaction Hot Pressed Multiphase Mo-Si-B and Mo-Si-B-Al Intermetallic Alloys," *Intermetallics*, Vol. 14, pp. 1461-1471, 2006.
4. Meyer, M. K., Thom, A. J., and Akinc, M., "Oxide Scale Formation and Isothermal Oxidation Behavior of Mo-Si-B Intermetallics at 600-1000 °C," *Intermetallics*, Vol. 7, pp. 153-162, 1999.
5. Hayashi, T., Ito, K., Ihara, K., Fujikura, M., and Yamaguchi, M., "Creep of Single Crystalline and Polycrystalline T₂ Phase in the Mo-Si-B System," *Intermetallics*, Vol. 12, pp. 699-704, 2004.
6. Paswan, S., Mitra, R., and Roy, S. K., "Isothermal Oxidation Behaviour of Mo-Si-B and Mo-Si-B-Al Alloys in the Temperature Range of 400-800°C," *Materials Science and Engineering*, A424, pp. 251-265, 2006.
7. Jain, P., Alur, A. P., and Kumar, K. S., "High Temperature Compressive Flow Behavior of a Mo-Si-B Solid Solution Alloy," *Scripta Materialia*, Vol. 54, pp. 13-17, 2006.
8. Kuznetsov, S. A., Rebrov, E. V., Mies, M. J. M., de Croon, M. H. J. M., and Schouten, J. C., "Synthesis of Protective Mo-Si-B Coatings in Molten Salts and Their Oxidation Behavior in an Air-Water Mixture," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 971-978, 2006.
9. Alur, A. P., and Kumar, K. S., "Monotonic and Cyclic Crack Growth Response of a Mo-Si-B Alloy," *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 385-400, 2006.
10. Bakhshi, S. R., Salehi, M., Edris, H., and Borhani, G. H., "Structural Evaluation of Mo-Si-B Multiphase Alloy During Mechanical Alloying and Heat Treatment," *Powder Metallurgy*, Vol. 51, No. 2, pp. 119-124, 2008.
۱۱. بخشی، س. ر.، صالحی، م.، ادریس، ح. و برهانی، غ. ح.، "تولید پودرهای ترکیبی Mo-Si-B برای استفاده در فرایند پاشش حرارتی به کمک آلیاژسازی مکانیکی،" دومین همایش ملی مهندسی مواد، متالورژی و ریخته‌گری ایران، دانشگاه آزاد واحد کرج، ص ۲۵۰، ۱۳۸۷.
12. Mandal, P., Thom, A. J., Kramer, M. J., Behrani, V., and Akinc, M., "Oxidation Behavior of Mo-Si-B Alloys in Wet Air," *Materials Science and Engineering*, A371, pp. 335-342, 2004.
13. Supatarawanich, V., Johnson, D. R., and Liu, C. T., "Oxidation Behavior of Multiphase Mo-Si-B Alloys," *Intermetallics*, Vol. 12, pp. 721-725, 2004.
14. Meier, G.H., Pettit, F.S., "The oxidation behavior of

intermetallic compounds,” *Materials Science and Engineering A*, 153, pp. 548-560, 1992.

15. Mitra, R., “Mechanical Behavior and Oxidation Resistance of Structural Silicides,” *International Materials Reviews*, Vol. 51, No. 1, pp. 13-64, 2006.
16. Yanagihara, K., Przybylski, K., Maruyama, T., “The Role of Microstructure on Pesting During Oxidation

of MoSi_2 and $\text{Mo}(\text{Si,Al})_2$ at 773 °K,” *Oxidation of Metals*, 47(3-4), pp. 277-293, 1997.

17. Meyer, M.K., Akinc, M., “Oxidation Behavior of Boron-Modified Mo_5Si_3 at 800-1300°C,” *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 79, No. 4, pp. 938-944, 1996.