

بررسی ریزساختار و مقاومت به اکسایش پوشش نفوذی ایجاد شده بر روی ترکیب بین فلزی Ti₃Al به روش غوطه وری در مذاب Al-7wt%Si*

رسول آذری خسروشاهی^(۱) نقی پروینی احمدی^(۲) افشین بابانژاد^(۳)

چکیده آلیاژهای بر پایه Ti₃Al به خاطر نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خزشی مناسب در دماهای بالا، در صنایع هوا - فضا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، ولی مقاومت به اکسایش ضعیف آنها کاربردشان را در دماهای بالا محدود کرده است. آلیاژ (at.%) Nb-۱۱-۰.۹Si-۲۳Al-۲۳ از مهمترین آلیاژهای این گروه می‌باشد. در تحقیق حاضر به منظور افزایش مقاومت به اکسیداسیون آلیاژ یاد شده، عملیات پوشش‌دهی نفوذی از طریق غوطه‌وری در مذاب Al-۷wt%Si همراه با عملیات آنیل نفوذی در ۸۵۰ °C به مدت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ ساعت بر روی آن انجام شد. سپس رفتار اکسایشی آلیاژ پایه و نمونه پوشش داده شده مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی ساختمان بلوری و مورفولوژی پوشش و لایه اکسید تشکیل شده بر روی آن به ترتیب از دستگاه پراش‌سنجی پرتو X (XRD) و میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیزگر EDX استفاده شد. پوشش نفوذی ایجاد شده در اثر عملیات آنیل نفوذی شامل یک لایه خارجی بر پایه TiAl₃ و یک لایه داخلی بر پایه TiAl بود. نتایج اکسایش تک‌دما نشان دهنده تشکیل لایه محافظ α-Al₂O₃ در سطح نمونه‌های پوشش داده شده بود. همچنین نتایج آزمایش‌های اکسایش سیکلی نشان‌داد که نمونه‌های پوشش داده شده از مقاومت به اکسایش بیشتری نسبت به آلیاژ پایه برخوردار بودند.

واژه‌های کلیدی ترکیب بین فلزی Ti₃Al، پوشش نفوذی، اکسایش، غوطه‌وری، آنیل نفوذی.

Study on Microstructure and Oxidation Resistance of a Diffusion Coated Alloy on Ti₃Al Intermetallic Compound Via immersion in Al-7wt%Si liquid.

R. A. Khosroshahi N. Parvini Ahmadi A. Babanejad

Abstract Alloys based on Ti₃Al intermetallic compounds have assumed considerable importance in aerospace and automotive industries, because of their high strength to weight ratio and excellent creep resistance up to 800 °C. One such alloy is Ti-23Al-11Nb-0.9Si(at.%) which shows attractive creep properties. Nevertheless, the alloy suffers from relatively poor resistance to oxidation at high temperatures. To improve this, the alloy was coated by immersing in Al-7wt%Si liquid followed by diffusional annealing at 850 °C for 5, 10 and 15 hours. Microstructure studies revealed that coatings were consisted of exterior TiAl₃ and interior TiAl layers. To study the effect of coating on oxidation behavior of the alloy, isothermal and cyclic oxidation tests were carried out before and after coating. The results showed that the oxidation resistance of the coated samples were much better than those of uncoated ones. This was due to the formation of a thin α-Al₂O₃ layer on the coating surfaces.

Key Words Ti₃Al intermetallic Compound, Diffusional Coating, Oxidation, Immersion, Diffusional Annealing.

* نسخه‌اولیه مقاله در تاریخ ۸۴/۱/۲۷ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۵/۹/۱۸ به دفتر نشریه رسیده‌است.

(۱) استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی سهند

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی سهند

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی سهند

مقدمه

آلیاژهای بر پایه ترکیب بین فلزی Ti_2Al به خاطر نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خزشی مناسب در دماهای بالا در صنایع هوایی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. وجود چنین خواصی باعث شده است تا این آلیاژها به عنوان جایگزینی مناسب برای سوپر آلیاژها مطرح شوند [1]. ضعف اصلی این آلیاژها انعطاف پذیری کم در دمای محیط و مقاومت به اکسایش ضعیف در دماهای بالا است [2].

به منظور بهبود انعطاف‌پذیری و مقاومت به اکسایش این آلیاژها تحقیقات وسیعی از طریق تغییر ترکیب شیمیایی و کنترل ساختاری آنها صورت گرفته است [2,3,4]. افزودن Nb به میزان ۱۱ درصد اتمی باعث بهبود انعطاف‌پذیری و افزایش مقاومت به اکسایش می‌شود [4].

افزودن همزمان Nb و Si اگر چه باعث افزایش بیشتر مقاومت به اکسایش این آلیاژها می‌شود، ولی منجر به تشکیل لایه اکسیدی محافظ Al_2O_3 بر روی سطح آلیاژ نشده و بنابراین بکارگیری یک فرایند پوشش دهی مفید و مؤثر قبل از کاربردهای عملی این آلیاژها ضروری به نظر می‌رسد [4,5]. پوشش‌های نفوذی بر مبنای ترکیبات بین فلزی یک روش مؤثر در بهبود خصوصیات سطحی این آلیاژها می‌باشد [2]. مطالعات اخیر در زمینه آلومینایزینگ آلیاژهای بر پایه Ti_2Al-Nb حاکی از تشکیل پوشش نفوذی بر مبنای $TiAl_3$ است که به خاطر میزان آلومینیم بالای آن و تشکیل لایه پیوسته $\alpha-Al_2O_3$ بر روی سطح پوشش، مقاومت به اکسایش آن را افزایش می‌دهد [2,6,7]. هدف از تحقیق حاضر ایجاد پوشش نفوذی آلومینیدی در آلیاژ $0/4Si$ - $Ti_2Al-11Nb$ به روش غوطه‌وری در مذاب $Al-7wt\%/Si$ همراه با بررسی اثر انجام عملیات آنیل نفوذی بعدی بر روی پوشش و مقایسه مقاومت به اکسایش آلیاژ پایه بدون پوشش با آلیاژ پوشش داده شده قبل و بعد از عملیات آنیل نفوذی است.

روش تحقیق

ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده $0/4Si$ - $Ti_2Al-11Nb$ است که در شرکت Imperial Metal Industries Limited (IMI) بیرمینگهام انگلستان در محیط گاز آرگون ریخته‌گری شده، سپس مورد عملیات آهنگری و عملیات آبدی بعدی از منطقه تکفازی β با ساختار مکعبی مرکزدار قرار گرفته و متعاقباً در دمای $800^\circ C$ در منطقه دو فازی $\alpha + \beta$ به مدت یک ساعت بازگشت داده شده است. به منظور انجام آزمایش‌های غوطه‌وری در مذاب، نمونه‌های مکعب مستطیل با ابعاد $4 \times 5 \times 15$ mm با استفاده از دستگاه برش سیمی از آلیاژ مینا تهیه شدند. کلیه سطوح نمونه‌ها با کاغذهای سنباده تا شماره ۱۰۰۰ مسطح شده و سپس در داخل الکل و با استفاده از دستگاه آلتراسونیک تمیز و با دمش هوا خشک شدند.

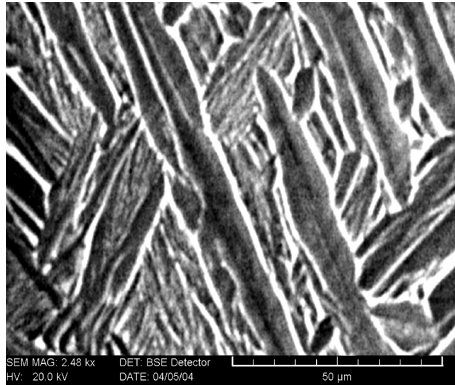
نمونه‌های آماده‌شده در مذاب $Al-7wt\%/Si$ در دمای $680^\circ C$ به مدت ۵ ثانیه فرو برده شده و با سرعت یکسانی بیرون آورده شدند. نمونه‌های پوشش داده شده به روش غوطه‌وری تحت عملیات آنیل نفوذی بعدی در دمای $850^\circ C$ به مدت زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ ساعت در محیط گاز آرگون $99/999$ درصد قرار گرفتند. به منظور بررسی مقاومت به اکسایش، نمونه‌های پوشش داده شده و آنیل شده در $850^\circ C$ به مدت ۱۵ ساعت همراه با آلیاژ پایه تحت آزمایش اکسایش تک‌دما و سیکلی قرار گرفتند. اکسایش تک‌دما در $900^\circ C$ به مدت ۱۲۰ ساعت و اکسایش سیکلی در $1000^\circ C$ به تعداد ۶۰ سیکل انجام شد. هر سیکل حرارتی شامل نگهداری نمونه به مدت یک ساعت در دمای $1000^\circ C$ و نیم ساعت در دمای محیط بود. وزن نمونه‌ها بعد از هر سیکل حرارتی توسط ترازویی با دقت $0/0001$ گرم تعیین شد و افزایش وزن آنها نسبت به نمونه اولیه محاسبه گردید.

برای شناسایی ساختمان‌های بلوری تشکیل شده در نمونه‌های پوشش داده شده و همچنین پوسته‌های

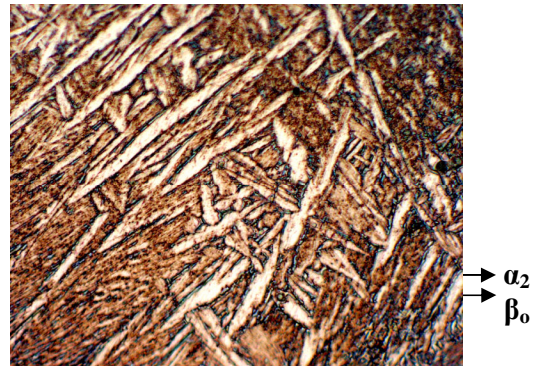
نتایج آزمایشات و بحث

الف- مشخصات آلیاژ پایه و پوشش نفوذی ایجاد شده بر روی آن. تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی از ریزساختار آلیاژ پایه قبل از عملیات پوشش دهی و نیز الگوی پراش پرتو x آن در شکل (۱) نشان داده شده است.

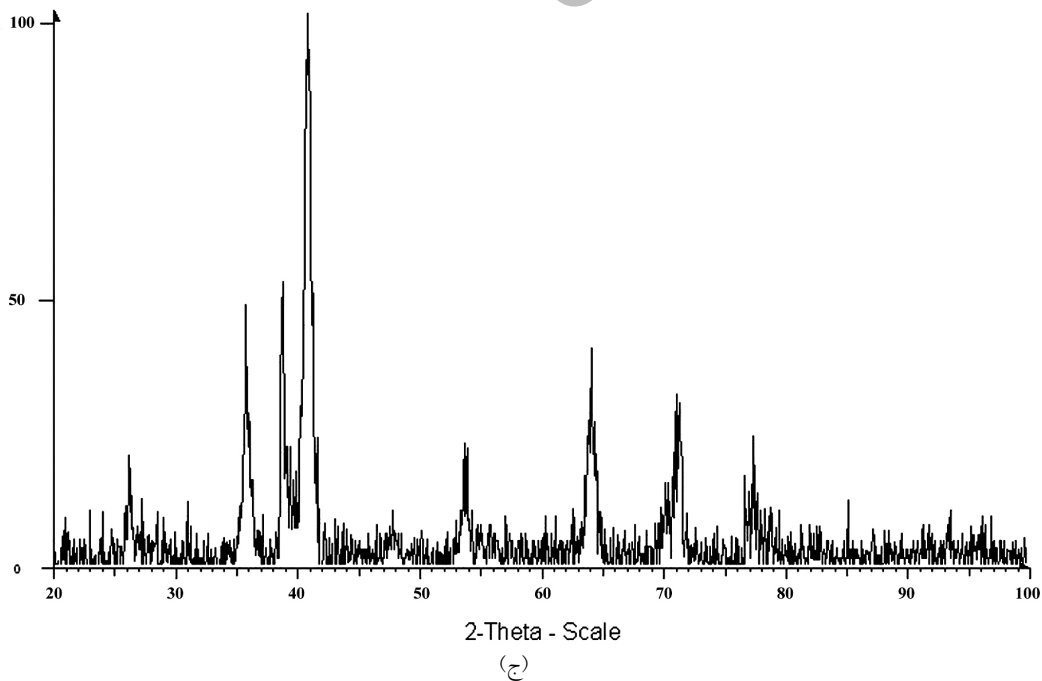
اکسیدی از دستگاه پراش سنجی پرتو X (XRD) مدل D-8 Bruker با استفاده از λ_{Cu} و جهت بررسی سطوح و مقاطع لایه‌های نفوذی و پوسته‌های اکسیدی از دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Camscan MV-2300 مجهزه آنالیزگر EDX، استفاده شد.



(ب)



(الف)



شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ (الف) نوری، (ب) الکترونی روبشی از ریزساختار آلیاژ Ti-23Al-11Nb-0.9Si و (ج) الگوی پراش سنجی پرتو X از آلیاژ مزبور

ارایه شده است.

جدول ۱ نتایج آنالیز شیمیایی از آلیاژ پایه

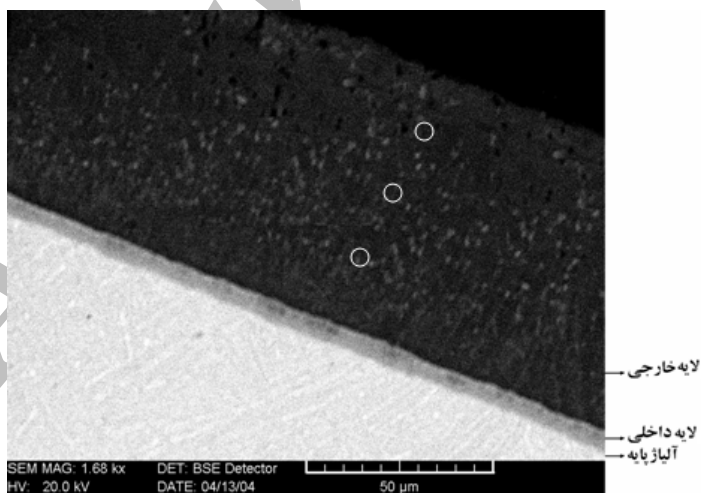
عنصر	Ti	Al	Nb	Si
درصد اتمی	۶۴/۳۰	۲۳/۴۱	۱۱/۳۳	۰/۹۶

جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی از سه منطقه بالایی، میانی و پایینی لایه خارجی نمونه‌های پوشش داده شده در مذاب Al-۷wt% Si

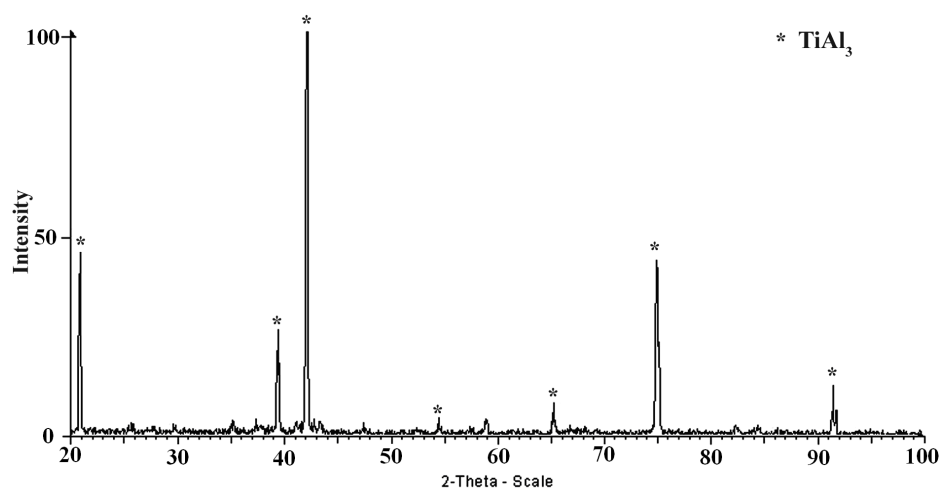
عنصر	درصد اتمی		
	ناحیه بالایی	ناحیه میانی	ناحیه پایینی
Ti	۲۳/۸۲	۲۳/۹۱	۲۴/۰۱
Al	۶۶/۰۷	۶۶/۰۴	۶۵/۸۸
Nb	۳/۹۳	۳/۹۴	۴/۰۱
Si	۶/۱۸	۶/۱۱	۶/۱۰

ریزساختار آلیاژ یاد شده به شکل ویدمن اشتاتن بوده و شامل لایه های β_0 (فاز مکعبی مرکزدار منظم) و α_2 (فاز هگزاگونال منظم) می‌باشد. بررسی مقاطع عرضی نمونه‌های پوشش داده شده بعد از عملیات آنیل نفوذی حاکی از تشکیل لایه‌های نفوذی یکنواخت در سطح نمونه‌ها است. برای مثال شکل (۲) مقطع عرضی نمونه پوشش داده شده در مذاب Al-۷wt% Si را بعد از عملیات آنیل نفوذی در 850°C به مدت زمان ۱۵ ساعت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است پوشش نفوذی ایجاد شده شامل یک لایه خارجی و یک لایه داخلی بوده که توسط یک فصل مشترک صاف و یکنواخت از یکدیگر متمایز شده‌اند. ضخامت لایه خارجی در حدود $70\ \mu\text{m}$ بوده که به مراتب بیشتر از ضخامت لایه داخلی ($6\ \mu\text{m}$) است.

ب- مشخصات لایه خارجی. نتایج آنالیز شیمیایی از آلیاژ پایه و سه منطقه بالایی، میانی و پایینی لایه خارجی نمونه پوشش داده شده در مذاب Al-۷wt% Si و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت به ترتیب در جداول (۱ و ۲)



شکل ۲ تصویر SEM از مقطع عرضی نمونه پوشش داده شده در مذاب Al-۷ wt% Si و آنیل شده در 850°C به مدت ۱۵ ساعت، دایره‌های توخالی نشان دهنده موقعیت مناطق آنالیز شده بالایی، میانی و پایینی لایه خارجی می‌باشند.



شکل ۳ الگوی پراش حاصله از نمونه پوشش داده شده در مذاب Al-7wt%Si و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت.

جدول ۳ نتایج آنالیز شیمیایی از لایه داخلی تشکیل شده در نمونه پوشش داده شده در مذاب Al-vwt% Si.

عنصر	درصد اتمی
Ti	۴۷/۶۵
Al	۴۲/۷۹
Nb	۷/۲۵
Si	۲/۳۱

همان طور که مشخص است میزان آلومینیم در لایه داخلی کمتر از لایه خارجی و میزان تیتانیم آن بیشتر می باشد. همان طور که انتظار می رفت، ترکیب شیمیایی لایه داخلی منطبق با ترکیب بین فلزی TiAl بوده. خاطر نشان می سازد ترکیب بین فلزی TiAl_۳ نیز در محدوده ترکیبی لایه داخلی در نمودار تعادلی Ti-Al گزارش شده است [8] که در تحقیق حاضر مشاهده نشد. در تحقیقات مشابهی که در این زمینه انجام شده از تشکیل لایه داخلی بر مبنای TiAl گزارش داده اند [3,7]. Rieck و Vanloo در تحقیقی که در خصوص جفت نفوذی TiAl_۳ - Ti_۲Al در محدوده دمایی ۸۰۰ الی ۹۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۴۹ ساعت انجام

موقعیت سه منطقه آنالیز شده مزبور در شکل (۲) نشان داده شده است. همان طور که از جدول (۲) ملاحظه می شود در نمونه پوشش داده شده، آلومینیم و سیلیسیم به داخل آلیاژ مینا نفوذ کرده به طوری که لایه خارجی به ترتیب غنی از آلومینیم، تیتانیم، سیلیسیم و نایوبیم شده است. لایه خارجی تشکیل شده دارای ترکیب شیمیایی یکنواختی در طول پوشش بوده که نشان دهنده نفوذپذیری بالای آن است. به منظور مطالعه ساختارهای بلوری تشکیل یافته در لایه خارجی نمونه های پوشش داده شده، آزمایش پرتو سنجی با اشعه X از سطح آنها انجام شد. نتایج پراش پرتو X در نمونه های پوشش داده شده منطبق با ساختمان بلوری TiAl_۳ بود. شکل (۳) الگوی پراش حاصله از نمونه پوشش داده شده و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت را نشان می دهد.

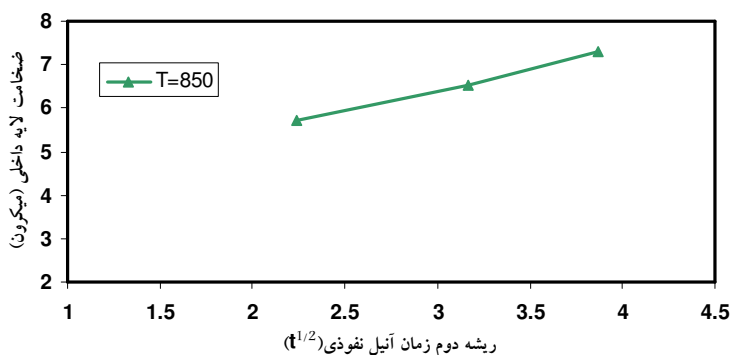
ج - مشخصات لایه داخلی. نتایج آنالیز شیمیایی از لایه داخلی تشکیل شده در نمونه پوشش داده شده در مذاب Al-vwt%Si و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت در جدول (۳) نشان داده شده است.

اکسیدی تشکیل یافته در نمونه پوشش داده شده در مذاب $\text{Al}-7\text{ wt\%Si}$ و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت و آلیاژ پایه را نشان می‌دهد. لایه اکسیدی در نمونه پوشش داده شده نازک، پیوسته و چسبنده بوده، در حالی که لایه اکسیدی تشکیل شده بر روی آلیاژ پایه چسبندگی کافی نداشته و در بیشتر مواضع از سطح کنده شده است. الگوی پراش سنجی پرتو X نمونه پوشش داده شده در مذاب $\text{Al}-7\text{ wt\%Si}$ و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت و آلیاژ پایه پس از اکسایش تکدما در 900°C به مدت ۱۵ ساعت به ترتیب در شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) نشان داده شده است.

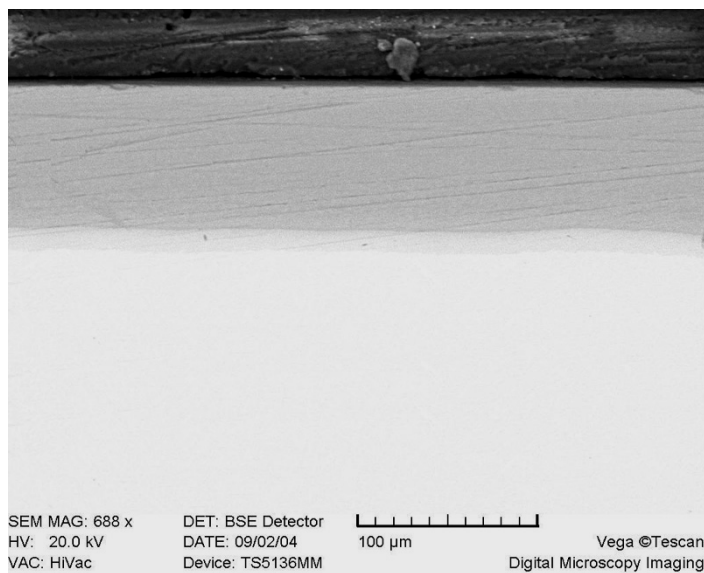
این نتایج نشان‌دهنده تشکیل $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ به عنوان فاز غالب اکسیدی و TiO_2 (روتیل) به عنوان فاز فرعی در لایه اکسیدی نمونه پوشش داده شده و تشکیل TiO_2 به عنوان فاز غالب در لایه اکسیدی آلیاژ پایه می‌باشد. هیچ اثری از ساختار بلوری مربوط به فاز SiO_2 در الگوی پراش مشاهده نشد. احتمالاً حضور SiO_2 به صورت آمورف [10] دلیل عدم وجود آن در الگوی پراش است.

دادند، تشکیل یافتن دو لایه داخلی ضخیم با ترکیب TiAl_2 و نازک با ترکیب TiAl را با مجموع ضخامت ۸۱ میکرون گزارش کردند [9]. با در نظر گرفتن مطالب فوق و همچنین با توجه به اینکه نفوذ در حالت چند فازی یک مکانیزم مهم در بررسی نمودارهای فازی است، چنین به نظر می‌رسد که محدودیت‌های سینتیکی برای برقراری تعادل ترمودینامیکی باعث می‌شود که فازهای تعادلی حین یک فرایند نفوذی ایجاد نگردند. بنابراین احتمال می‌رود که عدم تشکیل لایه مستقل بر پایه TiAl_2 در تحقیق حاضر به دلایل سینتیکی باشد. شکل (۴) تغییرات ضخامت لایه داخلی را بر حسب ریشه دوم زمان عملیات آنیل نفوذی ($t^{1/2}$) نشان می‌دهد. این تغییرات سرعت رشدی مطابق با قانون سهمی نشان می‌دهد که حاکی از یک فرایند کنترل شونده توسط نفوذ می‌باشد.

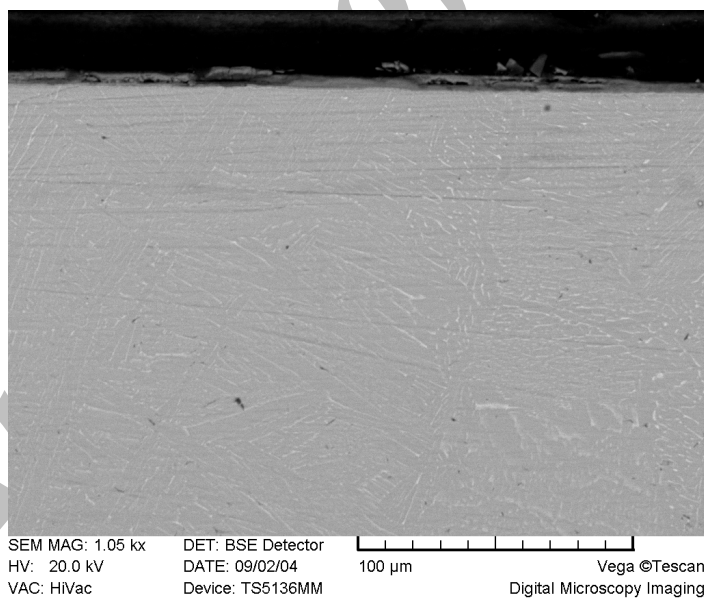
د- بررسی مقاومت به اکسایش نمونه‌های پوشش داده شده و آلیاژ پایه. نتایج حاصل از آزمایش اکسایش تکدما حاکی از تشکیل لایه محافظ و پیوسته Al_2O_3 در نمونه پوشش داده شده بود. شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) به ترتیب مقاطع عرضی لایه



شکل ۴ نمایش تغییرات ضخامت لایه داخلی بر حسب ریشه دوم زمان عملیات آنیل نفوذی ($t^{1/2}$).

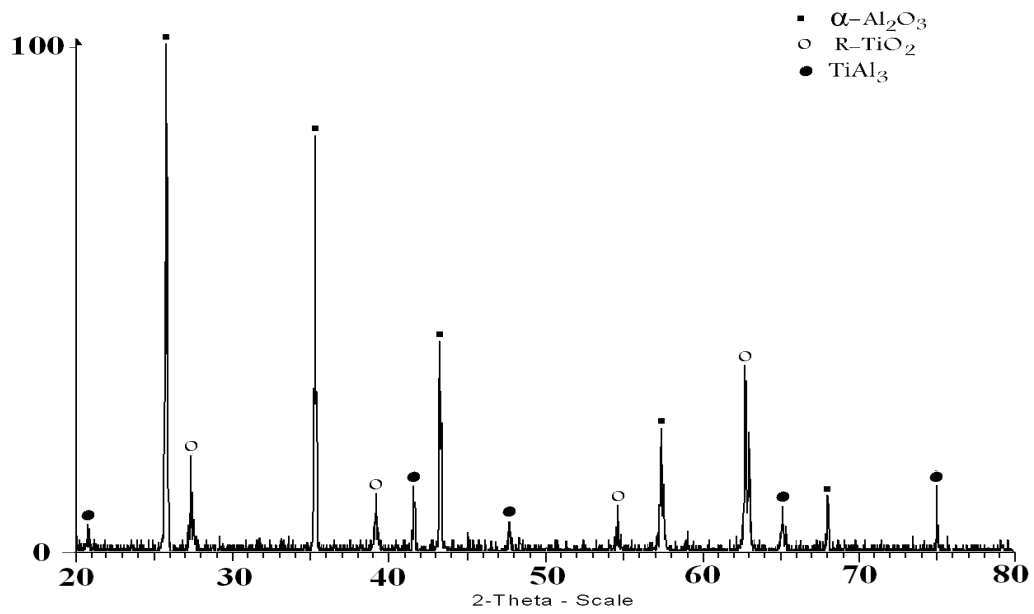


(الف)

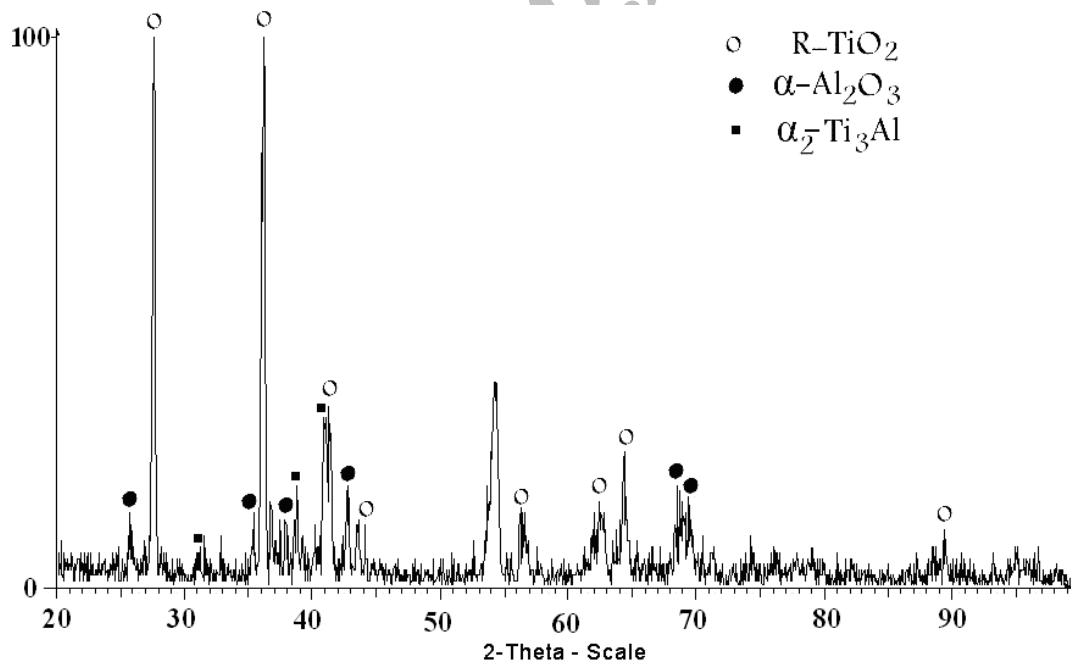


(ب)

شکل ۵ لایه اکسیدی تشکیل یافته در (الف) نمونه پوشش داده شده و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت و (ب) آلیاژ پایه

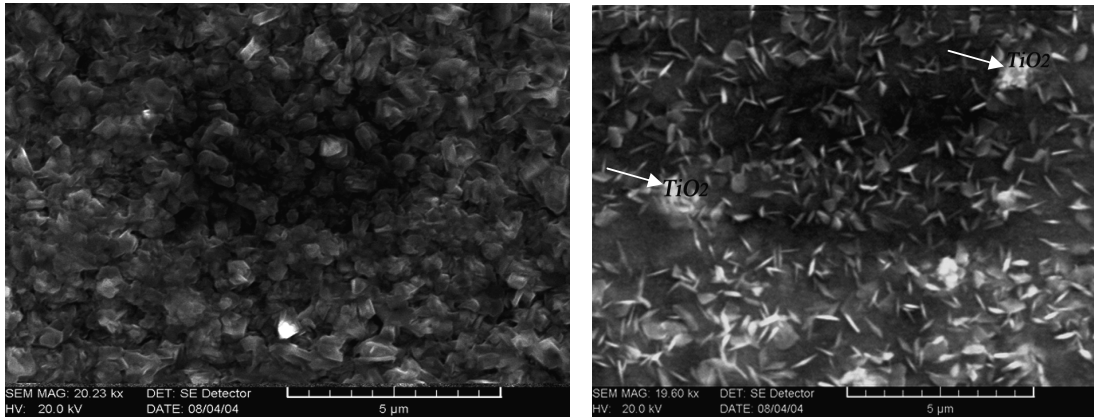


(الف)



(ب)

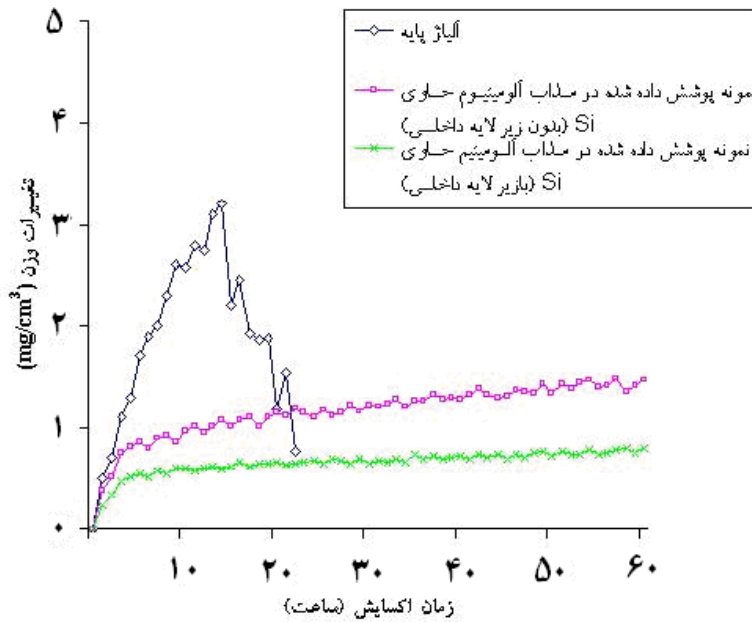
شکل ۶ الگوی پراش سنجی پرتو X الف) نمونه پوشش داده شده و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت
ب) آلیاژ پایه، پس از اکسیداسیون تک‌مرحله‌ای در 900°C



(ب)

(الف)

شکل ۷ تصویر سطح پوسته اکسیدی (الف) نمونه پوشش داده شده و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت و (ب) آلیاژ پایه



شکل ۸ سینتیک اکسایش آلیاژ پایه و نمونه پوشش داده شده و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت در دمای 1000°C

اکسیدی در نمونه پوشش داده شده شامل زمینه $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ همراه با دانه های کوچک TiO_2 بوده که از نواحی زیرین لایه اکسیدی رشد کرده و خود را به سطح رسانده اند. همان طور که مشاهده می شود پوسته

شکل های (الف-۷) و (ب-۷) به ترتیب تصاویر سطح پوسته اکسیدی نمونه پوشش داده شده در مذاب $\text{Al}-7\text{wt}\%\text{Si}$ و آنیل شده به مدت ۱۵ ساعت و آلیاژ پایه را بعد از عملیات آنیل نفوذی نشان می دهد. پوسته

پوشش و مقاومت بیشتر لایه اکسیدی به تنش‌های حرارتی و تحمل سیکل‌های حرارتی بیشتر بدون تخریب و کنده شدن آن از سطح پوشش می‌شود.

نتیجه‌گیری

۱- پوشش‌دهی از طریق غوطه‌وری در مذاب $\text{Al}-7\text{wt}\%\text{Si}$ همراه با آنیل نفوذی بعدی باعث ایجاد پوشش نفوذی شامل یک لایه خارجی بر مبنای TiAl_3 و یک لایه داخلی بر مبنای TiAl در آلیاژ $\text{Ti}-23\text{Al}-11\text{Nb}-0.4\text{Si}(\text{at}\%)$ می‌شود.

۲- از آنجا که ضخامت لایه داخلی با افزایش زمان عملیات آنیل نفوذی مطابق قانون سهمی افزایش می‌یابد از این رو، یک فرآیند نفوذی در حین پوشش دادن اتفاق افتاده است.

۳- انجام عملیات پوشش دهی باعث افزایش مقاومت به اکسایش آلیاژ گشته و عملیات آنیل بعدی سبب افزایش بیشتر مقاومت به اکسایش آلیاژ می‌شود.

اکسیدی در آلیاژ پایه شامل دانه‌های درشت و متخلخل TiO_2 بوده که وجود فضاها بین دانه‌ای باعث نفوذ بیشتر اکسیژن و افزایش سرعت اکسیداسیون می‌شود.

شکل (۸) تغییرات وزن آلیاژ پایه، نمونه پوشش داده شده در مذاب $\text{Al}-7\text{wt}\%\text{Si}$ قبل و پس از عملیات آنیل نفوذی در 850°C به مدت ۱۵ ساعت را در دمای 1000°C در طی ۶۰ سیکل حرارتی نشان می‌دهد. نتایج آزمایش نشان دهنده مقاومت به اکسایش بیشتر نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به آلیاژ پایه می‌باشد. آلیاژ پایه در مراحل اولیه آزمایش، بعث تشکیل پوسته اکسیدی افزایش وزن یافته، اما در مراحل بعدی پس از طی حدود ۱۴ سیکل حرارتی، پوسته اکسیدی تخریب شده و وزن نمونه شدیداً کاهش می‌یابد. تشکیل لایه پیوسته و محافظ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ در نمونه‌های پوشش داده شده، باعث مقاومت بیشتر آنها به تنش‌های حرارتی القاء شده در طول سیکل‌های حرارتی می‌شود. همچنین حضور لایه داخلی بر مبنای TiAl که انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به لایه خارجی داشته، باعث کاهش شیب حرارتی نمونه در طول

مراجع

1. Mitao, S., and Minakawa, K., "Alloy modification of γ -base titanium aluminide for improved oxidation resistance, creep strength and fracture toughness", *Mat. Sci, Eng, A153*, pp. 451-456, (1992).
2. Koo, C. H., and Yu, T. H., "Pack cementation coating on $\text{Ti}_3\text{Al-Nb}$ alloys to modify the high temperature oxidation properties", *Surf. Coat. Tech.*, 126. pp. 171-180, (2000).
3. Li, Z., Gao, W., yoshihara, M., and He, Y., "Improving oxidation resistance of Ti_3Al and TiAl intermetallic compounds with electro-spark deposit coatings", *Mat. Sci. Eng, A347*. pp. 243-252, (2003).
4. Wu, J. S., Zhang, L. T., Wang, F., jiang, K., and Qiu, G H., "The individual effects of niobium and silicon on the oxidation behaviour of Ti_3Al based alloys", *Intermetallics*, 8, pp. 19-28, (2000).
5. Qiu, G., Wu, J., Zhang, L., and Lin, D., "Oxidation behaviour of Ti_3Al alloyed with niobium and silicon", *Scripta Met.*, 33 (2), pp. 213-217., (1995).

6. Li, Z., Gao, W., and He, Y., "Protection of Ti₃Al-Nb alloy by electro-spark deposition coating", Scripta Met., 45, pp. 1099-1105, (2001).
7. Sialek, J. L., Gedwill, M. A., and Brindley, P. k., "Cyclic oxidation of aluminide coatings on Ti₃Al + Nb", Scripta Met., 24, pp. 1291-1296, (1990).
8. Ye, H. Q., "Recent developments in Ti₃Al and TiAl intermetallics research in China", Mat. Sci. and Eng. 269, pp. 289-295, (1999).
9. Van Loo, F. J. J and Riek, G. D., "Diffusion in the titanium-aluminum system. II. Interdiffusion in the composition range between 25-100 at% Ti", Acta Met. , 21(1), pp. 73-84, (1973).
10. Li, X. Y., Taniguchi, S., Matsunaga, Y., Nakagawa, K., and Fujita, K., "Influence of siliconizing on the oxidation behavior of a γ -TiAl based alloy", Intermetallics, 11, pp. 143-150, (2003).

Archive of SID