

# اعمال پوشش NiAl اصلاح شده با کروم بر فولاد زنگ‌نزن ۳۱۰ با استفاده از روش روکش کاری جوشی و ارزیابی رفتار سایشی آن

سعیده پورمحمدی، مسعود عطاپور\* و فخرالدین اشرفی زاده

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۰۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۲/۲۰)

DOI: 10.18869/acadpub.jame.35.4.39

**چکیده** - در این پژوهش، پوششی از NiAl اصلاح شده با کروم به روش روکش کاری جوشی و با استفاده از فرایند جوش کاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) بر سطح فولاد ۳۱۰ اعمال شد. ترکیب شیمیایی و دانه‌بندی پوشش به دست آمده به کمک آزمون پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپی نوری و میکروسکوپی الکترونی روبشی مجهز به آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS) بررسی شد. سپس رفتار سایشی پوشش به دست آمده با استفاده از آزمون پین روی دیسک در دماهای محیط و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، اعمال پوشش NiAl اصلاح شده با کروم باعث افزایش شدید سختی می‌شود. نتایج آزمون‌های سایش نشان داد که پوشش NiAl اصلاح شده با کروم قادر به بهبود قابل ملاحظه مقاومت سایشی فولاد ۳۱۰ در دماهای محیط و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است. این نتایج بر اساس مکانیزم سایشی به دست آمده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مورد بحث قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: روکش کاری جوشی، NiAl، سایش

## Cladding of Cr- Modified NiAl Coating on 310 Stainless Steel Weld Cladding and Evaluation of its Wear Behavior.

S. Pourmohamadi, M. Atapour\* and F. Ashrafizadeh

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

**Abstract:** In this study, a Cr-modified NiAl coating was fabricated by weld cladding technique using Gas- Tungsten Arc Welding (GTAW) process on 310 steel. Chemical composition and microstructure of the coating was studied by X-Ray Diffraction (XRD), optical microscopy and scanning electron microscopy equipped with an Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). The wear behavior of the coated steel was examined through pin-on-disc tests at ambient temperature and 400 °C. The results showed that the hardness of coated steel increased remarkably due to the formation of Cr-modified NiAl on the surface. Furthermore, the wear experiments showed that the presence of Cr-modified NiAl coating caused significant improvement in wear resistance of cladding 310 steel at both ambient temperature and 400 °C. These results were discussed based on the wear mechanism obtained from examination of the worn surfaces using SEM.

**Keywords:** Weld cladding, NiAl, Wear

\* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: m.atapour@cc.iut.ac.ir

دو عنصر نیکل و آلومینیوم با هم می‌توانند به صورت‌های مختلفی، ترکیبات بین‌فلزی با ساختار بلوری بسیار منظم تشکیل دهند که باعث استحکام و سختی آن‌ها می‌شود. این ترکیبات، سبک‌تر از فولاد زنگ‌نزن و حدود پنج برابر مستحکم‌تر از آن هستند که فقط در دماهای خیلی بالا ذوب می‌شوند و هم‌چنین مزایای بیش‌تری نسبت به سوپرآلیاژهای کنونی برای کاربرد در دمای بالا دارند. این مزایا شامل نقطه ذوب بالاتر از سوپرآلیاژهای پایه نیکل، چگالی کم‌تر، هدایت گرمایی بالا و مقاومت عالی به اکسیداسیون است [۱، ۲].

ترکیبات بین‌فلزی تعادلی در نمودار فازی Ni و Al عبارتند از: NiAl، Ni<sub>3</sub>Al، Ni<sub>5</sub>Al<sub>3</sub>، Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>، NiAl<sub>3</sub>. در میان این ترکیبات، دو ترکیب NiAl و Ni<sub>3</sub>Al به دلیل کاربرد در مواد مهندسی دما بالا و پوشش‌ها، بیش از سایر ترکیبات مورد توجه‌اند. این دو ترکیب دارای دمای ذوب بالا و چگالی پایینی هستند و در دماهای بالا استحکام و مقاومت به اکسیداسیون خوبی از خود نشان می‌دهند [۳]. جذابیت‌های NiAl مربوط به خواص خوب این ماده از جمله نقطه ذوب بالا (۱۹۱۱ کلوین در ترکیب استوکیومتری)، چگالی کم (۵/۸۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، مقاومت به خوردگی خوب در مقابل عوامل محیطی، هدایت گرمایی بالا، مدول الاستیسیته بالا (۱۹۳ گیگاپاسکال)، خواص فلزی در بالای نقطه تبدیل چقرمه به ترد و قیمت کم مواد اولیه استاست [۴، ۵]. محدودیت این ترکیب، شکل‌پذیری کم آن در دمای محیط و مقاومت خزشی کم در دماهای بالاست [۶]. برای برطرف کردن این مشکل روش‌های زیادی استفاده شده است که یکی از آن‌ها، استفاده از عنصر سوم است. یکی از عناصر بررسی شده، کروم است که باعث بهبود شکل‌پذیری می‌شود [۷].

امروزه از روش‌های متفاوتی برای پوشش دادن این ترکیب بر زیرلایه‌های مختلف استفاده شده است. از جمله تسار و همکارانش [۸] به منظور بهبود مقاومت اکسیداسیون فولاد ۳۱۰، از روش سماتاسیون پودری<sup>۱</sup> برای ایجاد پوشش

NiAl بر سطح استفاده کردند و عنایتی و همکاران [۹] میکروساختار و رفتار سایشی پوشش NiAl به وجود آمده از طریق فرایند پاشش حرارتی با سرعت بالا<sup>۲</sup> را در دمای محیط مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین به منظور بهبود خوردگی و اکسیداسیون این ترکیب در دماهای بالا، اثر افزودن عناصر زیادی روی آن بررسی شده است که در این میان کروم بیشترین اثر را در بهبود کارایی آن داشته است [۱۰-۱۳]. با وجود این، تاکنون کارهای اندکی روی روکش‌کاری جوشی درجای پودرهای نیکل و آلومینیوم به همراه کروم، برای تولید NiAl انجام گرفته است. در این روش اصلاح سطح، مخلوط‌های پودری با نسبت معین، به همراه لایه نازکی از زیرلایه هم‌زمان ذوب و خیلی سریع منجمد می‌شوند. امتزاج زیرلایه و ماده پوشش باعث ایجاد یک پوشش مطلوب از منظر پیوند پوشش و زیرلایه می‌شود. تشکیل پیوند متالورژیکی قوی بین پوشش و زیرلایه مهمترین مزیت این روش است. فرایند جوش‌کاری قوس تنگستن-گاز<sup>۳</sup>، روشی ارزان و قابل قبول برای این کار است که امکان ایجاد پوششی متراکم در حد چند میلی‌متر را فراهم سازد [۱۴]. از طرف دیگر، در رابطه با تاثیر تشکیل ترکیب NiAl بر رفتار سایشی فولاد ۳۱۰ در دماهای بالا گزارشی ارائه نشده است. با توجه به دمای ذوب بالای ترکیب NiAl، توسعه این پوشش برای سطح فولاد ۳۱۰ که یکی از مهم‌ترین آلیاژهای مورد استفاده در دماهای بالاست می‌تواند بسیار مهم باشد. بر این اساس، در پژوهش حاضر، هدف بررسی امکان‌پذیری ایجاد ترکیب NiAl با استفاده از روکش‌کاری جوشی پودرهای Ni و Al و هم‌چنین ارزیابی تاثیر Cr بر رفتار سایشی سطح فولاد ۳۱۰ است. هم‌چنین با توجه به کاربردهای فولاد ۳۱۰ و اهمیت مقاومت به سایش این فولاد، به منظور بررسی اثر پوشش‌دهی بر رفتار سایشی این فولاد، تست‌های سایش بین روی دیسک در دو دماهای محیط و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، بر روی پوشش‌ها انجام می‌گیرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

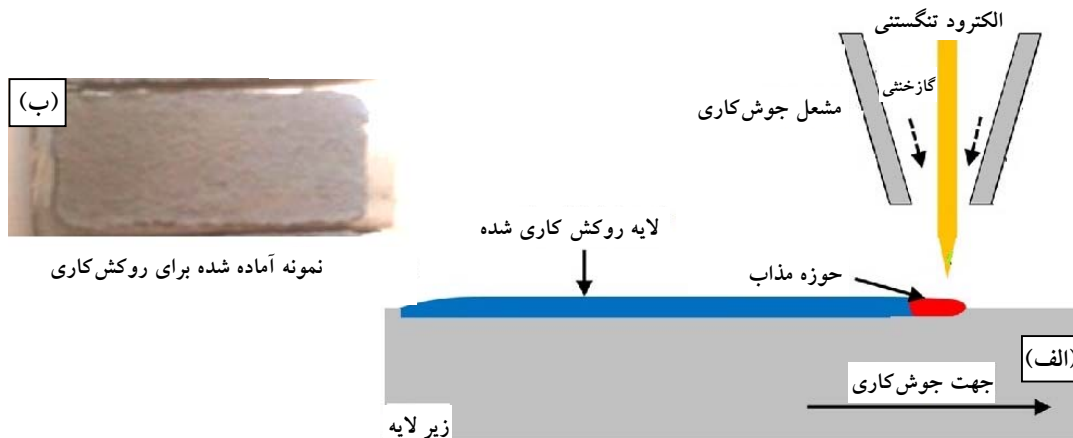
مواد مورد استفاده شامل پودر آلومینیوم (خلوص بالای ۹۹٪ و با اندازه دانه متوسط ۴۰۰ میکرومتر)، پودر نیکل (خلوص بالای ۹۹٪ و اندازه دانه زیر ۶۰ میکرومتر) و پودر کروم (خلوص بالای ۹۹/۵٪ و اندازه دانه زیر ۱۰ میکرومتر) بود. هم‌چنین از ورق‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۰ با ابعاد ۵×۳۰×۶۰ میلی‌متر مربع به عنوان زیرلایه استفاده شد. زیرلایه قبل از پوشش‌دهی ماشین‌کاری و توسط استون چربی‌زدایی شد. مخلوط پودری مورد نظر، مخلوط یکنواختی از پودرهای نیکل و آلومینیوم با نسبت اتمی برابر به همراه ۲۰ درصد اتمی کروم بود که برای آماده‌سازی آن از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای استفاده شد. سپس پودر مورد نظر با استفاده از یک چسب آلی و مقداری آب مقطر به صورت ملات درآمد و با ضخامت دو میلی‌متر روی زیرلایه نشانده شد. پس از آن برای تبخیر چسب و آب بکار رفته، نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. شکل ۱ نمونه‌های آماده شده برای جوش کاری و طرحواره‌ای از عملیات انجام شده بر روی آن‌ها را نشان می‌دهد.

روکش کاری جوشی نمونه‌ها با استفاده از فرایند GTAW و با دستگاه جوش نوع Fronus و مدل Magic Wave 2600 انجام شد. متغیرهای فرایند جوش کاری در جدول ۱ آمده است. به منظور شناسایی فازهای پوشش ایجاد شده از آزمون پراش پرتو ایکس<sup>۴</sup> استفاده شد. آزمایش‌های پراش پرتو ایکس با استفاده از یک دستگاه پراش پرتو ایکس Philips مدل MPD - X'PERT تحت ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر انجام شد. زمان روبش یک ثانیه و اندازه گام روبش ۰/۰۴ درجه انتخاب شد. در تمامی آزمایش‌ها از پرتو ایکس Cu Ka با طول موج ۱/۵۴۲ آنگستروم استفاده شد. برای بررسی ساختار و ترکیب نمونه‌های پوشش داده شده از میکروسکوپ نوری Olympus مدل PGM3 و دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی از نوع TESCAN مدل VEGA SERIES مجهز به ابزار آزمون EDS استفاده شد.

نهایتاً آزمون سایش در دو دمای محیط و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به روش پین بر روی دیسک (طبق استاندارد [۱۵] ASTM G99) انجام شد. برای این کار از نمونه‌های روکش کاری شده قطعاتی به شکل پین با شعاع عرقچین ۵ میلی‌متر برش داده شد. دیسک مورد استفاده نیز از جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ با سختی حدود ۸۵۰ ویکرز بود. این آزمون با نیروی ۳۵ نیوتون و با سرعت خطی ۰/۰۹ متر بر ثانیه و در مسافت ۱۰۰۰ متر انجام شد. تغییرات وزن نمونه‌ها در دمای محیط هر ۱۰۰ متر و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد هر ۵۰۰ متر یک بار با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه گیری شد. درصد رطوبت هوا در حین آزمون‌ها ۳۵ درصد بود.

## ۳- نتایج و بحث

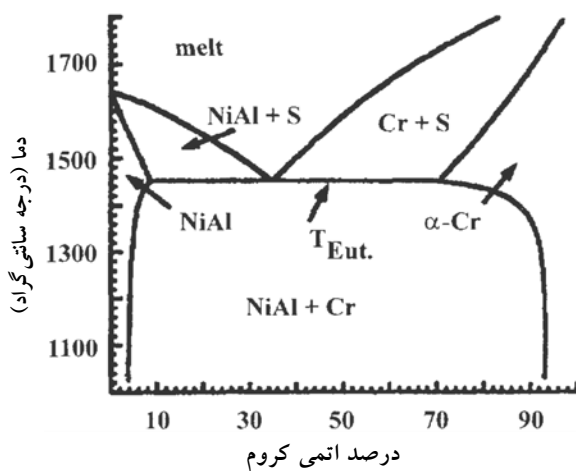
شکل ۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر آماده شده برای روکش کاری جوشی را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود دانه‌بندی تقریباً یکنواخت و فشرده‌ای از پودرها به دست آمده است. پودر آماده شده به شکل لایه‌ای با ضخامت ۲ میلی‌متر روی زیرلایه نشانده شد و عمل جوش کاری برای ایجاد روکش انجام شد. شکل ۳ دیاگرام فازی ترکیب NiAl و Cr را نشان می‌دهد، همانطور که دیده می‌شود انحلال کروم در NiAl بسیار کم و همان‌طور که کتون و همکارانش [۱۶] گزارش کرده اند در دمای محیط، حدود ۱ درصد اتمی است. برای شناسایی فازهای ایجاد شده در پوشش اعمالی از سطح نمونه آزمون پراش پرتو ایکس گرفته شد. شکل ۴ الگوهای پراش مربوط به مخلوط پودری اولیه و سطح نمونه روکش کاری شده را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، پس از جوش کاری، ترکیب NiAl در سطح ایجاد می‌شود. هم‌چنین به دلیل ذوب قسمتی از زیرلایه در اثر فرایند جوش کاری و امتزاج آن با پوشش، مقداری از عناصر موجود در زیرلایه وارد پوشش می‌شوند [۱۷]. شکل ۵-الف تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری، از مقطع عرضی نمونه را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود پیوند متالورژیکی خیلی خوبی بین زیرلایه و پوشش



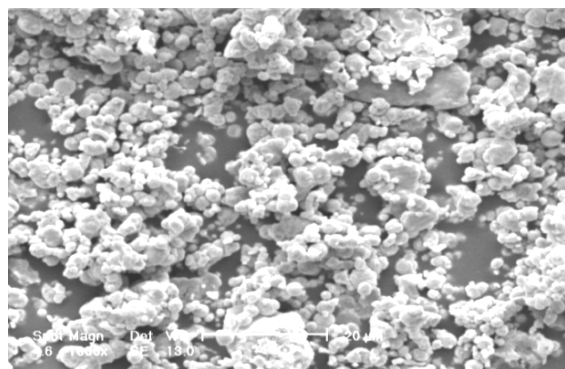
شکل ۱- الف) طرحواره فرایند روکش کاری جوشی و ب) یک تصویر از نمونه آماده شده جهت اعمال روکش کاری

جدول ۱- متغیرهای فرایند جوش کاری

متغیر	نوع یا مقدار
قطبیت	DCEN
جریان (آمپر)	۱۲۰
ولتاژ (ولت)	۱۲/۵
سرعت جوش کاری (cm/s)	۰/۲۴
نرخ دمش گاز (lit/min)	۹



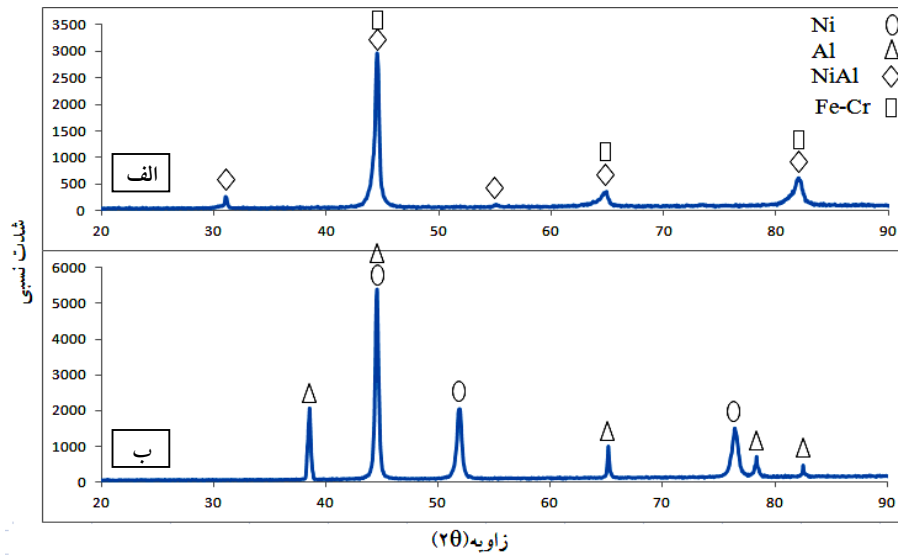
شکل ۳- نمودار فازی NiAl و Cr [۱۶]



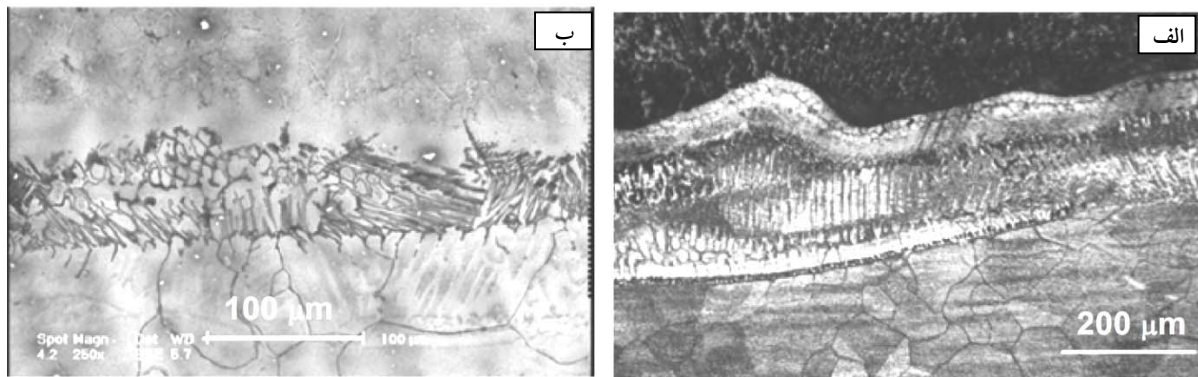
شکل ۲- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مخلوط پودری تهیه شده شامل ۴۰ درصد اتمی نیکل، ۴۰ درصد اتمی آلومینیوم و ۲۰ درصد اتمی کروم

گفت این لایه در اثر بالا رفتن دمای زیرلایه در زیر حوضچه جوش و سریع سرد شدن آن است که در نتیجه باعث ایجاد ساختار شبه مارتنزیتی در زیر پوشش شده است. برای مشاهده

ایجاد شده است. تصویر مقطع عرضی شامل سه لایه پوشش، زیرلایه و یک لایه میانی دیگر است. بررسی های EDS نشان داد که ترکیب لایه میانی با زیرلایه تفاوت چندانی ندارد و می توان



شکل ۴- نتایج آزمون پراش پرتوی ایکس از الف) سطح نمونه روکش کاری شده و ب) پودرهای اولیه



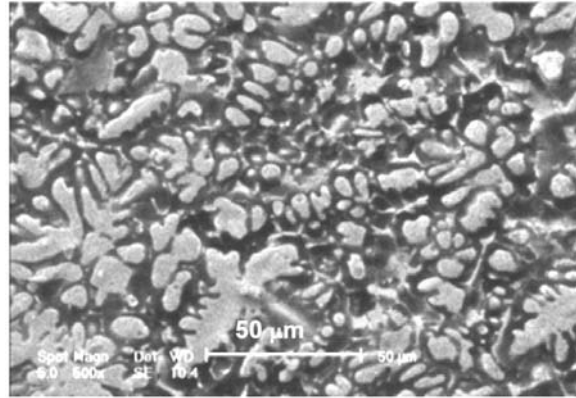
شکل ۵- تصاویر مقطع عرضی پوشش ایجاد شده گرفته شده توسط الف) میکروسکوپ نوری و ب) میکروسکوپ الکترونی روبشی

و نیکل بیش تر است و در نواحی بین دندریتی میزان عناصر آهن و کروم بیش تر است. پس می توان گفت نواحی دندریتی بیش تر شامل فاز NiAl و نواحی بین دندریتی شامل آلیاژ آهن، کروم و نیکل هستند.

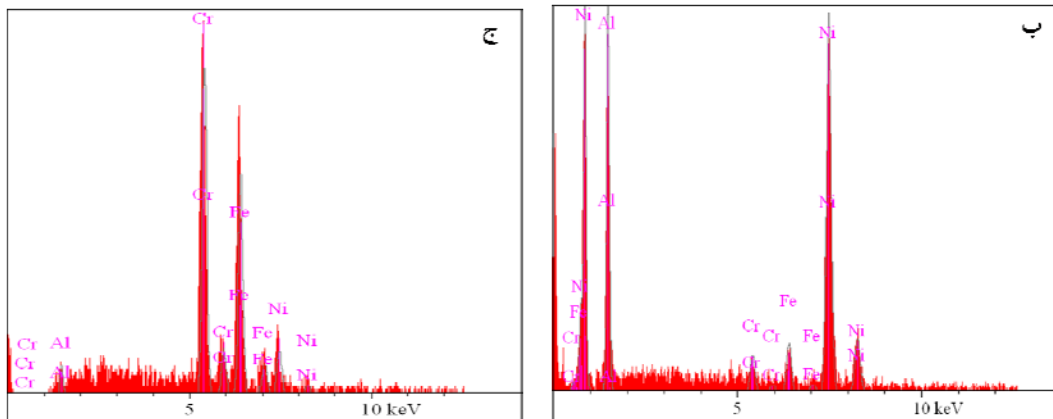
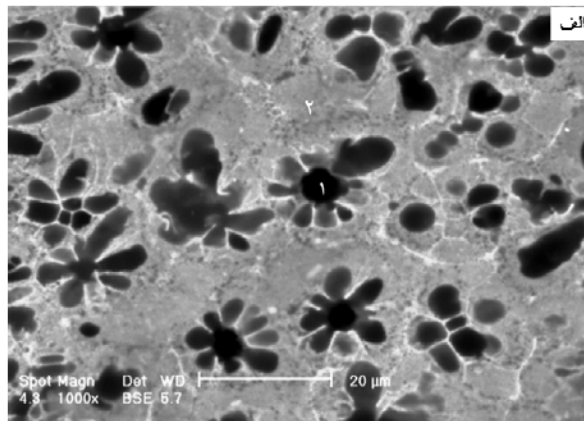
پروفیل سختی از سطح پوشش تا نزدیک فصل مشترک در شکل ۸ آورده شده است. همانطور که دیده می شود به علت حضور فاز NiAl در سطح، پوشش از سختی بالایی برخوردار است و در نزدیکی فصل مشترک به علت رقت بالا، میزان سختی افت پیدا می کند. رقت یک عامل مهم در تعیین مشخصات پوشش به شمار می رود. با ذوب شدن فلز پایه

بهرتر این اتفاق، از نمونه تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شد که در شکل ۵- ب آورده شده است. در این شکل به خوبی دیده می شود که تیغه های مارتنزیت درون دانه های آستنیت در حال شکل گیری بودند.

شکل ۶ تصویر گرفته شده از سطح روکش ایجاد شده را نشان می دهد. در این تصویر، ساختار دندریتی، ناشی از انجماد سریع ناحیه ذوب شده بعد از جوش کاری است. برای بررسی توزیع عناصر در پوشش از آزمون EDS استفاده شد. نتایج آزمون خطی از سطح پوشش در شکل ۷ آورده شده است. این نتایج نشان می دهد که در نواحی دندریتی میزان عناصر آلومینیوم



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح نمونه روکش کاری شده با ساختار دندریتی

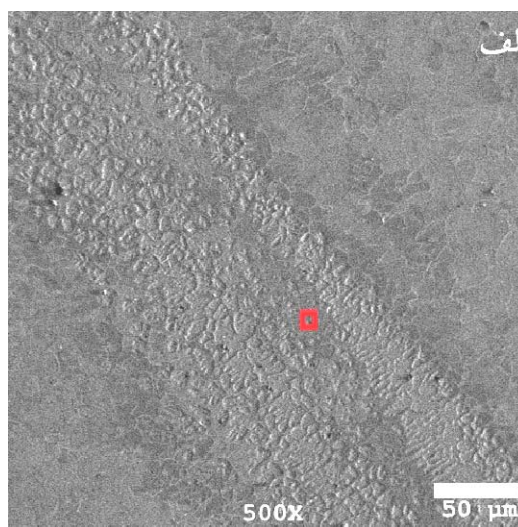
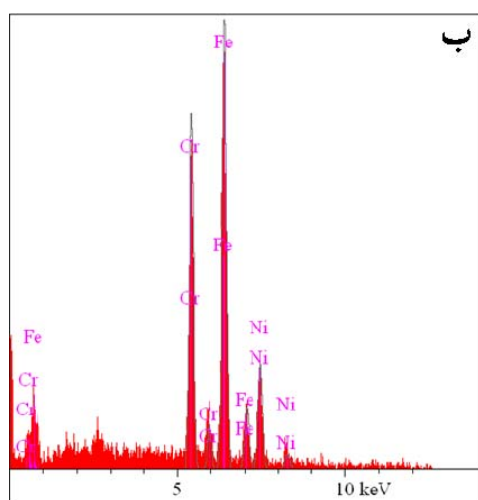


شکل ۷- الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی از سطح ناحیه روکش کاری شده، ب) نتیجه ارزیابی ترکیب شیمیایی از نقطه ۱

و ج) نتیجه ارزیابی ترکیب شیمیایی به دست آمده از نقطه ۲

بستگی دارد. در این پژوهش میزان رقت با استفاده از نرم افزار تصویری UTHSCSA، حدود ۳۰ درصد تخمین زده شد. این موضوع با استفاده از آزمون نقطه‌ای از فصل مشترک پوشش با

مقداری از آن وارد ماده پوشش می‌شود و با تغییر ترکیب شیمیایی پوشش در ناحیه فصل مشترک خواص مختلف را تحت تاثیر قرار می‌دهد. میزان رقت به شدت به جریان اعمالی



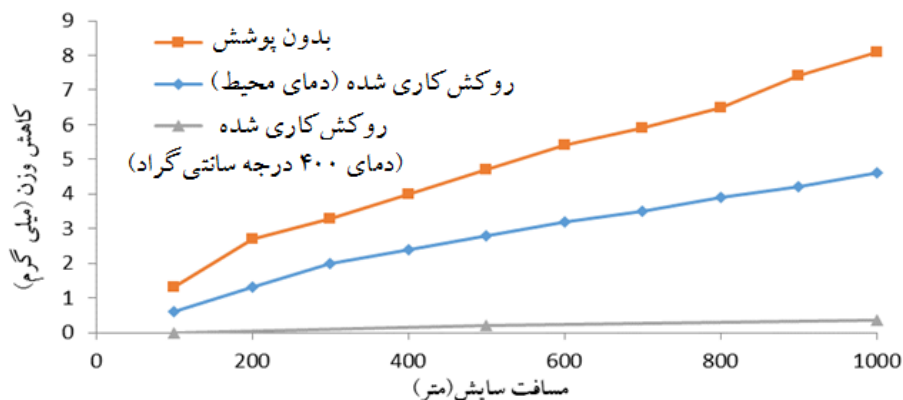
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	
O	Ka	52.17	2.92	0.88	wt. %	
Al	Ka	159.63	4.11	2.08	wt. %	
Cr	Ka	1,360.66	24.50	23.92	wt. %	
Fe	Ka	1,651.72	44.40	46.57	wt. %	
Ni	Ka	578.03	24.08	26.55	wt. %	
			100.00	100.00	wt. %	Total

شکل ۹- نتیجه طیف‌سنجی پراکندگی انرژی از فصل مشترک بین پوشش و زیرلایه:

الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی فصل مشترک، ب) نتیجه ارزیابی ترکیب شیمیایی از یک نقطه از سطح

محیط و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه بدون پوشش و نمونه پوشش‌دار در شکل ۱۰ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که اعمال پوشش باعث بهبود قابل ملاحظه مقاومت به سایش فولاد ۳۱۰ شده است. یکی از دلایل مهم بروز چنین رفتاری

زیرلایه به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۹). همان‌طور که مشاهده می‌شود این ناحیه غنی از آهن است که از زیرلایه تامین شده است. نمودارهای کاهش وزن حین آزمون سایش در دماهای



شکل ۱۰- تغییرات وزن نمونه بدون پوشش و پوشش داده شده در دماهای محیط و ۴۰۰ درجه سانتی گراد

برای بررسی این پدیده، از سطح ساییش نمونه موجود در دمای بالا در دو بزرگ‌نمایی ۱۵۰ و ۱۰۰۰ تصویر SEM گرفته شد (شکل ۱۳). در این تصاویر وجود لایه یکنواخت و فشرده‌ای بر روی سطح دیده می‌شود. نتیجه آزمون EDS از سطح این نمونه در شکل ۱۴ آورده شده است. این آزمون وجود مقدار زیادی اکسیژن، آهن و کروم را در سطح نشان می‌دهد که نشان از تشکیل اکسیدهای آهن و کروم روی سطح است. به نظر می‌رسد بعد از ایجاد ذرات ساییش، برخی از آن‌ها از بین سطوح خارج می‌شوند اما بیش‌تر آن‌ها بین سطوح باقی می‌مانند، در دمای بالاتر این ذرات دچار اکسیداسیون می‌شوند. ذرات اکسیدی ایجاد شده متحمل اتفاقاتی نظیر تغییر فرم، شکست به ذرات ریزتر و پودر شدن می‌شوند. بعضی از این ذرات ایجاد شده از بین سطوح ساییش خارج می‌شود و بقیه روی سطح به خصوص در حفره‌های ایجاد شده در مرحله اول ساییش باقی می‌مانند. در این زمان ذرات اکسیدی ریز ایجاد شده به هم سینتر می‌شوند و باعث ایجاد لایه‌ای به اسم گلیر<sup>۵</sup> [۱۸] می‌شوند. این لایه‌ها می‌توانند برای مدتی طولانی از سطح محافظت کند و در نتیجه باعث مقاومت ماده در برابر ساییش شود.

نکته دیگری که باید توجه شود، ورود آهن از زیرلایه فولادهای به پوشش است. مطالعات صورت گرفته در زمینه تاثیر آهن بر مشخصات مکانیکی پوشش NiAl نشان داده است که حضور آهن باعث افزایش اکسیداسیون در این پوشش می‌شود [۱۹، ۲۰]. این

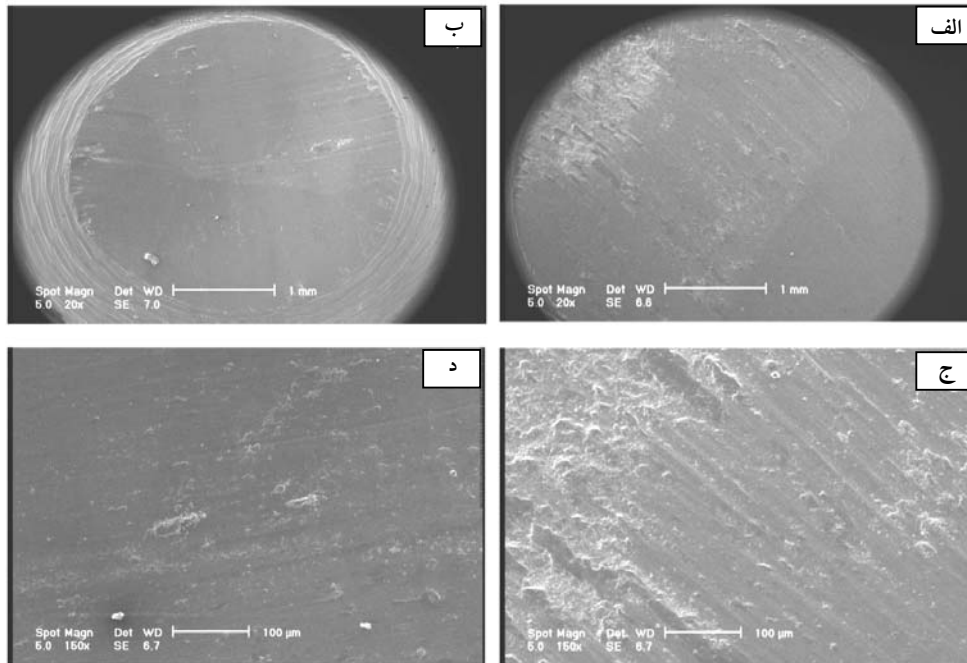
می‌تواند سختی بالای پوشش به دست آمده باشد. علاوه بر این، گزارش شده است که اضافه کردن کروم می‌تواند با کاهش انرژی نقص در چیده شدن در شبکه NiAl، به بهبود شکل‌پذیری آن کمک کند [۶] که این مورد هم می‌تواند باعث بهبود رفتار ساییشی شود.

شکل ۱۱ تصاویر SEM از سطوح ساییش یافته نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌دار را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که در نمونه بدون پوشش، مکانیزم اصلی ساییش چسبان شدید است. هم‌چنین اثرات ساییش خراشان و تغییر شکل پلاستیک شدید نیز در این نمونه دیده می‌شود. در نمونه پوشش داده شده، سطح ساییش یکنواخت‌تر است و فقط آثار کمی از ساییش خراشان به چشم می‌خورد.

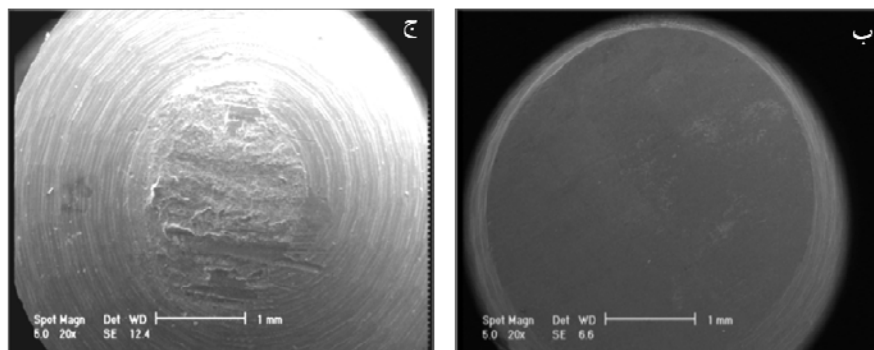
در شکل ۱۲، تصاویر مربوط به پین اولیه و سطح ساییده شده پین ساخته شده از نمونه پوشش در دمای محیط و دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در دمای بالا نمونه پوشش‌دار مقاومت بسیار بهتری نسبت به دمای محیط ارائه کرده است. این تصاویر در توافق خوبی با نتایج کاهش وزن (شکل ۱۰) است که نشان می‌دهد نمونه‌ی تحت ساییش در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد دچار تغییر وزن قابل ملاحظه‌ای نشد.

سطح پین در دمای پایین دچار ساییدگی و کاملاً صاف شد، اما در دمای بالا منطقه متأثر از ساییش خیلی کوچک بود.

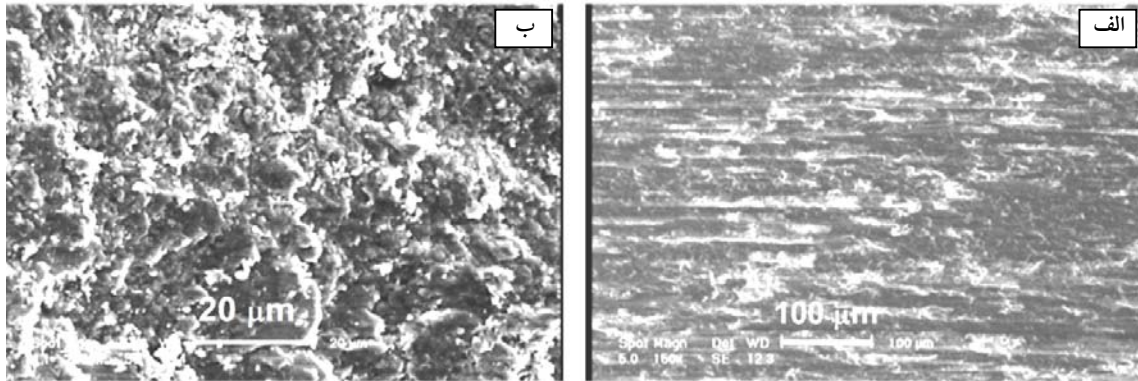




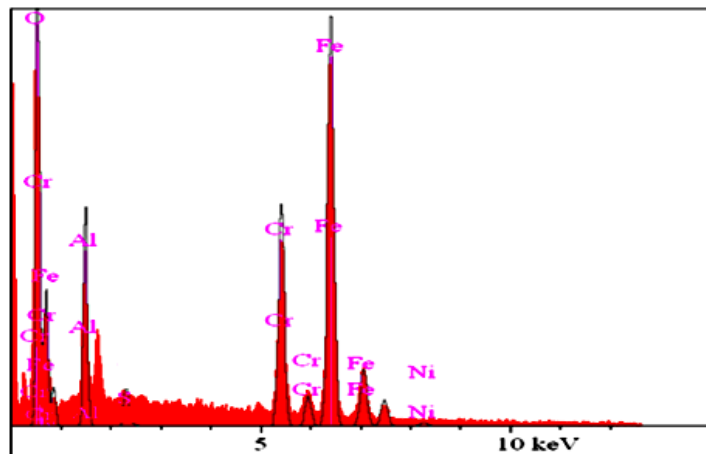
شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی از سطوح سایش یافته در دمای محیط: الف و ج) نمونه بدون پوشش که نشان‌دهنده سایش شدید سطح همراه با کندگی‌های عمیق است، ب و د) نمونه پوشش‌دهی شده که نشان‌دهنده سایش کم است، در دو بزرگ‌نمایی



شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپی الکترونی از پین اولیه و ساییده شده: الف) پین سالم قبل از آزمون سایش، ب) تصویر سطح پین پس از آزمون سایش در دمای محیط و ج) تصویر سطح پین پس از آزمون سایش در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۳- سطح تحت سایش نمونه در دماهای ۴۰۰ درجه سانتی گراد در دو بزرگ‌نمایی، (الف) ۱۵۰ و (ب) ۱۰۰۰ برابر، این تصاویر نشان‌دهنده وجود یک سطح یکنواخت پس از آزمون سایش است.



شکل ۱۴- نتایج آزمون EDS از سطح نمونه سایش یافته در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- ترکیب بین فلزی NiAl حاوی ۲۰ درصد کروم روی سطح فولاد ۳۱۰ با استفاده از روش روکش‌کاری جوشی قوسی با موفقیت ایجاد شد. تصاویر میکروسکوپی نشان‌دهنده ایجاد یک پوشش بدون عیب بر سطح فولاد ۳۱۰ است. هم‌چنین، مقداری از آهن زیرلایه وارد پوشش شده که این با نتایج آزمون EDS تایید شد.

۲- با اعمال پوشش NiAl حاوی ۲۰ درصد کروم میزان سختی فلز پایه حدود سه برابر افزایش یافت.

۳- آزمون‌های سایش پین روی دیسک نشان داد که اعمال

موضوع با نتایج آزمون EDS به‌دست آمده از نمونه‌های ساییده شده در توافق است. لازم به ذکر است که عناصر مختلف تمایل به اکسیداسیون متفاوتی هم دارند و این موضوع تعیین‌کننده اکسید غالب در سطح است. اگر چه از دیدگاه ترمودینامیکی اکسید آلومینیوم پایدارتر از بقیه اکسیدها است اما سینتیک رشد سریع اکسید آهن باعث ایجاد اکسیدهای آهن در سطح می‌شود [۱۹]. دریافت جزئیات بیش‌تری از این مشخصات سطحی نیازمند تحقیقات گسترده‌تری است.

۴- اعمال پوشش NiAl حاوی ۲۰ درصد کروم باعث بهبود مقاومت به سایش در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد شده است. بر اساس نتایج آزمون EDX مقاومت به سایش پوشش ایجاد شده، در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، مدیون تشکیل لایه اکسیدی کروم و آهن روی سطح در دمای بالا است.

پوشش NiAl حاوی ۲۰ درصد کروم بر زیرلایه ۳۱۰ باعث بهبود قابل ملاحظه مقاومت سایشی می‌شود. تصاویر به دست آمده از مطالعه سطح نمونه‌های ساییده شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که مکانیزم اصلی سایشی فلز پایه سایش چسبان شدید همراه با سایش خراشان ضعیفی بود. در مقابل نمونه پوشش‌دار تحت مکانیزم سایش خراشان خفیفی قرار داشت.

## واژه‌نامه

- |                              |                              |          |
|------------------------------|------------------------------|----------|
| 1. powder cementation        | 3. gas- tungsten arc welding | 5. glaze |
| 2. high velocity oxygen fuel | 4. x- ray diffraction        |          |

## مراجع

- Westbrook, J.H., and Fleischer, R.L., "Intermetallic Compounds: Structural Applications", John Wiley. New York, Vol. 2, Chap. 3, 2000
- Czeppe, T., and Wierzbinski, S., "Structure and Mechanical Properties of NiAl and Ni<sub>3</sub>Al-Based Alloys", *International Mechanical Sciences*, Vol. 42, pp. 1499-1518, 2000.
- Chrifi-Alaoui, F.Z., Nassik, M., Mahdouk, K., and Gachon, J.C., "Enthalpies of Formation of the Al-Ni Intermetallic Compounds", *Alloys and Compounds*, Vol. 364, pp. 121-126, 2004.
- Mohammadnezhad, M., Shamanian, M., and Enayati, M.H., "Formation of Nanostructured NiAl Coating on Carbon Steel by Using Mechanical Alloying" *Applied Surface Science*, Vol. 263, pp. 730-736, 2011.
- Liu, E., Jia, G., Bai, Y., Wang, W., and Gao, Y., "Study on Preparation and Mechanical Property of Nanocrystalline NiAl Intermetallic", *Materials and Design*. Vol. 53, pp. 596-603, 2014.
- Guo, J., Wang, Z., Sheng, L., Zhou, L., Yuan, C., Chen, Z., and Song, L., "Wear Properties of NiAl Based Materials", *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 22(5), pp. 414-425, 2012.
- Tian, W.H., Hu, S.L., and Nemoto, M., "Effect of Cr addition on Microstructures and Mechanical Properties of  $\beta$ -NiAl Alloys" *Acta Metallurgical Sinica*, Vol. 12, No. 2, pp. 173- 180, 1999.
- Tsaur, C.C., Rock, J.C., and Chang, Y., "The Effect of NaCl Deposit and Thermal Cycle on an Aluminide Layer Coated on 310 Stainless Steel" *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 91, pp. 330-337, 2005.
- Enayati, M. H., Karimzadeh, F., Jafari, M., Markazi, A., and Tahvilian, A., "Microstructural and Wear Characteristics of HVOF-Sprayed Nanocrystalline NiAl Coating", *Wear*, Vol. 309, pp. 192-199, 2014.
- Zhou, C., and Min, Q., "Hot Corrosion Behavior of Co Modified NiAl Coating on Nickel Base Superalloys", *Corrosion Science*, Vol. 63, pp. 239-245, 2012.
- Leyens, C., Pint, B.A., and Wright, I.J., "Effect of Composition on the Oxidation and Hot Corrosion resistance of NiAl Doped with Precious Metals", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 133-134, pp. 15-22, 2000.
- Task, M., Gleeson, B., and Pettit, F., "Compositional Effects on the Type I Hot Corrosion of  $\beta$ -NiAl Alloys", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 206, pp. 1552-1557, 2011.
- Rastegari, S., Arabi, H., Aboutalebi, M. R., and Eslamia, A., "Study on the Microstructural Changes of Cr-Modified Aluminide Coatings on a Nickel-Based Superalloy during Hot Corrosion", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 47, No. 2, pp. 223-232, 2008.
- Chen, J. H., Chen, P.N., Lin, C.M., Chang, C.M., Chang, Y.Y., and Wu, W., "Microstructure and Wear Properties of Multicomponent Alloy Cladding Formed by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)", *Surface And Coatings Technology*, Vol. 203, pp. 3231-3234, 2009.
- ASTM E975-00, "Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with near Random Crystallographic Orientation", ASTM Book of Standards; Vol. 03.01, West Conshohocken, Pa, United States, pp. 1-6. In. (accessed), 2004.
- Cotton, J.D., Noebe, R.D., and Kaufman, M.J., "The

- Effects of Cr on  $\beta$ -NiAl Intermetallic Alloys. Part I. Microstructures and Mechanical Properties”, *Intermetallics*, Vol. 1, pp. 3-20, 1993.
17. Brunetti, C., D'Oliveira, A., Pintaude, G., and Yano, D., “Modification of NiAl Intermetallic Coatings Processed by PTA with Chromium Carbides”, *Journal of ASTM International*, Vol. 8, pp. 150-161, 2011.
  18. Pauschitz, A., Roy, M., and Franek, F., “Mechanisms of Sliding Wear of Metals and Alloys at Elevated Temperatures”, *Tribology International*, Vol. 41, pp. 584–602, 2008.
  19. Brunetti, C., Belotti, L.P., Miyoshi, M.H., Pintaude, G., and D'Oliveira, A.S.C.M., “Influence of Fe on the Room and High-Temperature Sliding Wear of NiAl Coatings”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 258, pp. 160–167, 2014.
  20. Munroe, P.R., George, M., Baker, I., and Kennedy, F.E., “Microstructure, Mechanical Properties and Wear of Ni–Al–Fe Alloys”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 325, pp.1–8, 2002.