

تأثیر پارامترهای فرآیند بر تشکیل پوشش نانو ساختار NiAl بر سطح فولاد ساده کربنی به روش آسیابکاری

مهیار محمدنژاد، مرتضی شمعیان، محمدحسین عنایتی و مهدی صالحی

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد

(دریافت مقاله : ۹۰/۱۱/۱۵ - پذیرش مقاله : ۹۰/۱۲/۱۰)

چکیده

در این تحقیق از روش آسیابکاری مکانیکی جهت ایجاد پوشش ترکیبات بین فلزی NiAl بر سطح فولاد ساده کربنی استفاده شده است. بدین منظور از ترکیب پودر Ni-Al با نسبت اتمی ۱:۱ همراه با گلوله های با قطر و نسبت گلوله به پودر متفاوت در محفظه آسیاب پر انرژی اسپکس در زمان های متفاوت استفاده شد و نمونه زیر لایه فولادی در انتهای محفظه ثابت شد. حین فرآیند آسیابکاری سطح فلز زیر لایه تحت ضربات متوالی گلوله قرار می گیرد. در اثر ضربات متوالی گلوله، ذرات پودر بین گلوله و زیر لایه قرار گرفته و پودر بر سطح زیر لایه جوش سرد خورده و پوشش ایجاد می شود. در ادامه عملیات حرارتی بر نمونه های بدست آمده از شرایط مختلف آسیابکاری انجام شد. ضخامت و سختی پوشش با فاکتور های قطر گلوله، نسبت وزنی گلوله به پودر و زمان آسیابکاری بهینه شده است. به منظور مشخصه یابی و بررسی مورفولوژی پوشش، نمونه ها تحت آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و عبوری (TEM) قرار گرفته شد. یافته های پژوهشی نشان داد، پوشش با ترکیب بین فلزی NiAl بر سطح فلز پایه تشکیل شده است. با افزایش زمان آسیابکاری ضخامت پوشش افزایش می یابد و ساختار پوشش از حالت لایه ای به محلول جامد تبدیل شده است. بهترین شرایط با گلوله به قطر ۴mm و نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ ایجاد شد. افزایش زمان آسیابکاری تا ۴۸۰ دقیقه باعث کاهش اندازه ذرات تا ۲۸nm شده است.

واژه های کلیدی: آلیاژسازی مکانیکی، پوشش دهی، ترکیبات بین فلزی، نانو ساختار، Ni-Al.

Effect of process parameters on the formation of nanostructured Ni-Al coating on carbon steel by using mechanical alloying

M. Mohammadnejhad, M. Shamanian, M. H. Enayati and M. Salehi

Department of materials Engineering, Isfahan University of technology

(Received 3 February 2012, accepted 28 February 2012)

Abstract

In the present study, formation of the nanostructured NiAl intermetallic coatings on carbon steel by MA method was studied. The composition of Ni-Al powder with an atomic ratio of 1:1 with different ball size, ball-to-powder weight ratio and milling duration were used. The substrate, fixed at the top of a vibration chamber. During mechanical alloying process, the substrate surface was subjected to high-energy ball impacts. Powder particles trapped between the ball and cold welding occurred at surface. After that, synthesized samples were annealed. Thickness and hardness of coating optimized with factors ball size, ball-to-powder weight ratio and milling duration. The cross-section of the coated substrate was investigated using X-ray diffraction and scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The results showed that the formation of Ni-Al intermetallic coatings were achievable. By increasing milling duration the thickness of the Ni-Al coatings significantly increased and the layered or pancake-type structure of the coating consolidate into a bulk material. Best coating was formed with ball 4mm diameter and ball to powder weight ratio of 10:1. The milling duration increases to 480 minutes and particle size reduced to 28nm.

Keywords: Coating, Mechanical Alloying, Intermetallics, Nanostructured Materials.

E-mail of corresponding author: mahyar.mohammadnejad@yahoo.com.

مقدمه

همچنین در حالتی که در شکل (ب-۱) نشان داده شده است می توان یک فویل نازک را روی زیرلایه و در یک طرف محفظه قرار داد و با تعداد زیادی گلوله در دستگاه آسیابکاری پر انرژی آسیابکاری نمود. در اثر ضربات متوالی گلوله ها فویل روی سطح زیرلایه فرو می رود و یک پیوند مکانیکی برقرار شده و یک پوشش با خواص مکانیکی بالا روی سطح ایجاد می شود.

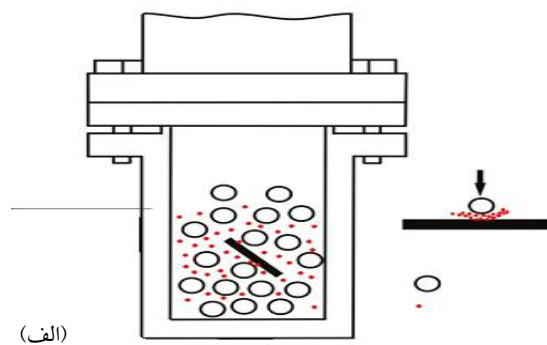
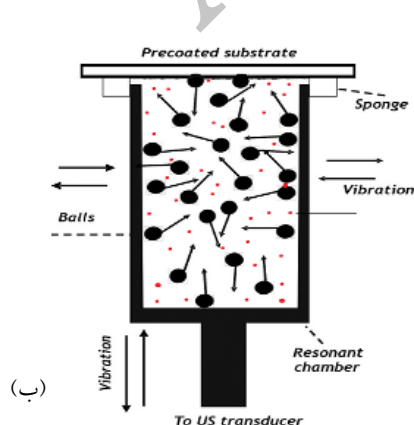
در حین آسیابکاری با انرژی بالا ذرات پودر در اثر ضربه گلوله ها به طور مکرر تحت می شوند و به همدیگر جوش می خورند و سپس شکسته می شوند و دوباره به هم جوش می خورند. هرگاه دو گلوله فولادی و یا گلوله و زیر لایه با یکدیگر برخورد کنند مقادیری از پودر موجود در محفظه آسیابکاری بین آنها به دام می افتند [۳]. شکل (۲) به صورت شماتیک قرار گرفتن ذرات پودر را در بین گلوله ها در حال برخورد و مراحل آلیاژسازی مکانیکی را نشان می دهد. نیروی ضربه ای اعمالی به ذرات پودر باعث تغییر شکل پلاستیک آنها می شود و کارسختی^۲ را در آنها افزایش می دهد و سپس ذرات کارسخت شده در اثر اعمال ضربه می شکنند. سطوح جدید ایجاد شده در اثر شکست ذرات پودر قادر به جوش خوردن به یکدیگر می باشند و این امر باعث افزایش اندازه ذرات پودر و تشکیل پوشش بر سطح زیر لایه می شود. در سالهای اخیر ترکیبات بین فلزی به عنوان دسته ای از مواد پیشرفته، به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی برجسته ای که

اگر یک ماده از جنس زیرلایه یا از جنس دیگر به سطحی اضافه یا بر روی آن نشانداده شود، ماده جدید را "پوشش" نامند. پوشش ها معمولا به یکی از دلایل زیر استفاده می شوند: الف: برای محافظت سطح از تماس با محیط یا سطوح دیگر برای جلوگیری از خوردگی یا سایش.

ب: برای بهبود ظاهر سطح (پوشش های زینتی).

ج: برای بازسازی سطوح از بین رفته.

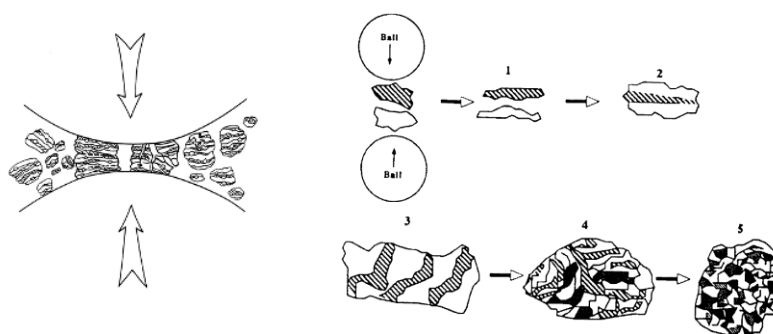
پوشش دهی به روش آسیابکاری مکانیکی^۱ روش جدیدی است که انجام فرآیند در شرایط محیط و همراه با بهبود خواص مکانیکی سطحی (مانند کارسختی)، فعالسازی مکانیکی و ایجاد یک پوشش با ابعاد نانو همراه است. اساس این روش قرار دادن زیرلایه و پودر در یک محفظه لرزان و آسیابکاری آن همراه با تعداد زیادی گلوله متحرک در دستگاه آسیابکاری اسپکس است. در حین آسیابکاری سطح زیرلایه با تعداد زیادی گلوله متحرک و پودر به صورت متوالی برخورد می کند. در اثر برخورد متوالی گلوله-پودر-زیرلایه، پودر روی سطح زیرلایه جوش سرد می خورد [۱ و ۲]. شکل (الف-۱) شماتیکی از این روش را نشان می دهد. علاوه بر روش ذکر شده که در آن زیر لایه داخل محفظه قرار می گیرد، می توان پوشش را با قرار دادن زیرلایه در یک یا دو طرف محفظه آسیابکاری، همراه با گلوله و پودر بدست آورد [۱ و ۲]. شماتیک این روش در شکل (ب-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. الف) شماتیک روش پوشش دهی به روش آلیاژسازی مکانیکی، ب) شماتیک روش روکش دهی مکانیکی [۱ و ۲].

². Work hardening

¹. Mechanical alloying process (MA)



شکل ۲. برخورد گلوله‌ها و مراحل آلیاژ شدن ذرات پودر [۳].

ضخامت پوشش افزایش یافته است و توانستند پوشش با ضخامت $60\ \mu\text{m}$ را ایجاد کنند [۶]. هایان دو^۳ و همکارانش، Ni-Fe را روی Fe ایجاد نمودند [۷]. رومانکو و همکارانش، فویل Mo را روی سطح Ti و Al با روش روکش کاری تحت ضربه گلوله پوشش دادند. آنها زیرلایه و فویل را در بالای محفظه لرزان قرار دادند و در اثر ضربات متوالی گلوله‌ها، فویل به زیرلایه جوش سرد خورد و پوشش بدست آمد در این پژوهش محققین توانستند فویل با ضخامت $0.5\ \text{mm}$ را بر سطوح فلز پایه پوشش دهند [۸]. مرور مقالات منتشر شده نشان می‌دهد که تا کنون تحقیقی با هدف تشکیل پوشش Ni-Al به روش آسیابکاری بر سطح فولاد ساده کربنی انجام نشده است، لذا این پژوهش با هدف ایجاد پوشش Ni-Al انجام شد.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق فولادی با قطر $50\ \text{mm}$ و ضخامت $5\ \text{mm}$ با آنالیز شیمیایی نشان داده شده در جدول (۱) به عنوان زیر لایه استفاده شده است. به منظور چربی زدایی سطح ورق فولاد پس از پولیش به منظور چربی زدایی با استون و الکل شستشو داده شد. از پودر نیکل با خلوص 99.9% و اندازه دانه کوچکتر از $10\ \mu\text{m}$ و پودر آلومینیوم با خلوص 99.9% و اندازه دانه کوچکتر از $12\ \mu\text{m}$ به عنوان مواد اولیه استفاده شد. با $50\% \text{Ni atm}$ به وزن $5\ \text{g}$ استفاده شد. از گلوله های با

در اکثر آنها وجود دارد، مورد توجه محققین و مهندسين قرار گرفته‌اند. ویژگی‌هایی همچون چگالی معمولاً کم، نقطه ذوب بالا، استحکام ویژه بالا در دمای اتاق، حفظ استحکام تا دماهای بالا، مقاومت خمشی، خستگی، خزشی و سایشی خوب، مقاومت اکسیداسیون، خوردگی و سولفیداسیون عالی، از جمله خصوصیت‌هایی هستند که معمولاً در ترکیبات بین فلزی وجود دارند [۳ و ۴]. تحقیقات نشان داده است که با کاهش اندازه ریزساختار مواد تا ابعاد نانومتر اکثر خواص مکانیکی و فیزیکی نظیر سختی، استحکام و نیز مقاومت به سایش بهبود می‌یابد. از جمله روش‌هایی که بطور گسترده به منظور ایجاد نانو مواد استفاده می‌شود، روش آسیابکاری مکانیکی می‌باشد [۳].

رومانکو^۱ و همکارانش از این روش برای پوشش دادن Ti-Al روی سطح Ti و Al استفاده کردند. در این تحقیق پوشش لایه‌ای روی سطح به وجود آمده به گونه‌ای که ذرات تیتانیوم در بین ذرات آلومینیم قرار گرفته است و پوشش با اندازه ذرات $200\ \text{nm}$ تشکیل شده است [۴]. همچنین آنها پوشش سخت TiN را روی سطح Ti، Al و SUS304 را به این روش ایجاد کردند. در این تحقیق لایه نازک TiN در دمای محیط، در اثر برخورد گلوله و پودر با زیر لایه روی سطح زیرلایه جوش سرد خورده و پوشش تشکیل شده است. اندازه ذرات کریستالی در این پژوهش تا $120\ \text{nm}$ کاهش یافت [۵]. روز و همکارانش نیز پوشش Zr-Ti را روی Cu ایجاد کردند. محققین در این پژوهش دریافته‌اند که با افزایش زمان آسیابکاری

¹. Romankov

². Revesz

³. Huayan Du

شکل ۲. آنالیز شیمیایی فولاد (%Wt).

C	Mn	S	P	Fe
1.7	1.1	0.03	0.031	Bal

نتایج و بحث

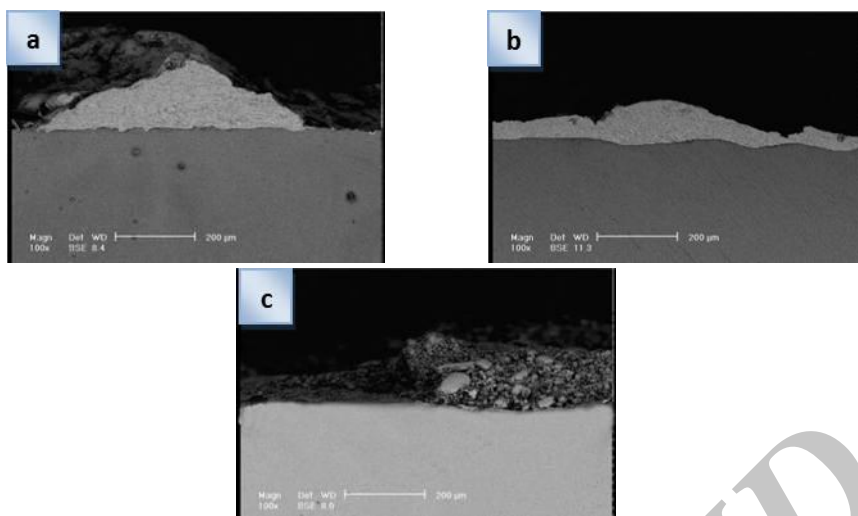
پوشش دهی به روش آسیابکاری یکی از روش های نوین است، از خصوصیات ویژه این روش پوشش دهی در شرایط و دمای محیط است. استفاده از این روش از ایجاد عیوب احتمالی ناشی از دمای بالای فرآیند جلوگیری می کند. شکل (۳) تصویری از نمونه های پوشش داده شده را نشان می دهد. مورفولوژی و ضخامت پوشش به وسیله تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع نمونه ها بررسی شد. شکل (۴) تصاویر میکروسکوپی نمونه پوشش داده شده را پس از ۱۲۰ دقیقه آسیابکاری با گلوله های به قطر ۴mm با نسبت های وزنی متفاوت گلوله به پودر نشان می دهد. همانطور که در تصاویر ملاحظه می شود در نمونه (۴-a) پوشش تشکیل شده با نسبت وزنی ۱:۲۰ به صورت جزیره ای تشکیل شده است و سطح زیر لایه به طور کامل پوشیده نشده است. در این مورد می توان به این نتیجه رسید که با توجه به تعداد و وزن بالای گلوله ها و ضربات متوالی زیادی که بر سطح زیر لایه وارد شده، گلوله ها نیروی زیادی بر پوشش ایجاد شده وارد کرده اند که باعث کندگی پوشش و تشکیل جزیره ای آن شده است در حقیقت با تکرار فرآیند آسیابکاری مرتباً پوشش تشکیل شده و بر اثر ضربات گلوله با انرژی بالا

توجه به نمودار تعادلی ترکیب استوکیومتری Al-Ni-Al- توجه به نمودار تعادلی ترکیب استوکیومتری Al-Ni-Al- قطر (۷ و ۱۰) میلی متری نسبت وزنی گلوله به پودر (۱:۵) و (۱:۱۰) و (۱:۲۰) استفاده گردید. عملیات آسیابکاری در محفظه دستگاه آسیاب اسپکس 8000 و با حجم 35 cm^3 انجام گرفت. شماتیک روش پوشش دهی انجام شده در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. کلیه مراحل پوشش دهی در شرایط دما و اتمسفر محیط انجام گرفت. نمونه های پوشش داده شده در کوره تحت اتمسفر گاز آرگون در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۲۰ دقیقه حرارت داده شد و در کوره سرد گردید. جهت بررسی مورفولوژی پوشش از آنالیز پراش پرتو ایکس توسط دستگاه XRD فیلیپس مدل X'PERTMPD و میکروسکوپ الکترونی روبشی فیلیپس مدل XL30 و میکروسکوپ الکترونی عبوری فیلیپس مدل 912AB جهت اندازه گیری سختی پوشش از دستگاه میکرو هاردنس کوپا بار اعمالی ۴۰۰ گرم و مدت زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه استفاده شد. جهت اندازه گیری اندازه ذرات پوشش از رابطه ویلیامسون- هال^۱ استفاده شده است.



شکل ۲. تصویر نمونه پوشش داده شده.

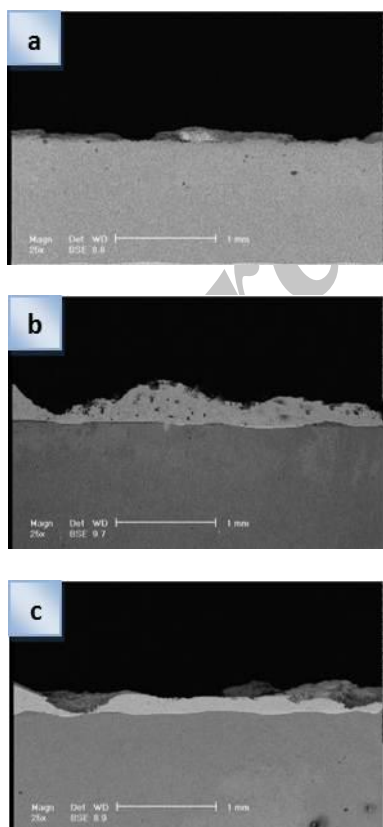
¹. Hall -Williamson



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی با نسبت های وزنی گلوله به پودر آسیابکاری $\{(20:1)(a)\}$ ، $\{(10:1)(b)\}$ ، $\{(5:1)(c)\}$.

نمونه پوشش داده شده با گلوله قطر ۷mm را نشان می دهد. در این شکل پوشش به طور کامل سطح زیر لایه را پوشانده است در حالیکه میزان تخلخل و سطح پوسته ای پوشش زیاد است. در این حالت انرژی پرتابی گلوله ها از حالت قبل

دوباره از سطح زیر لایه کنده شده است. در نمونه (b-۴) با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ پوشش به صورت کامل بر سطح فلز پایه تشکیل شده است ولی سطح پوشش غیر یکنواخت و ناصاف است که دلیل این پدیده می تواند زمان کوتاه آسیابکاری باشد. در این نمونه با توجه به کاهش نیروی اعمال شده از طرف گلوله ها به پوشش از آسیب و کندگی پوشش جلوگیری شده است. در نمونه (c-۴) با توجه به نسبت گلوله به پودر پایین، نیروی اعمال شده از طرف گلوله ها به پودر کاهش یافته است و در نتیجه امکان تشکیل ترکیب بین ذرات پودر وجود نداشته و از طرفی نیروی اعمالی تاحدی کاهش یافته است که امکان تشکیل پوشش وجود نداشته است. در حقیقت کاهش نیروی گلوله ها تاحدی بین فلزی وجود نداشته است.



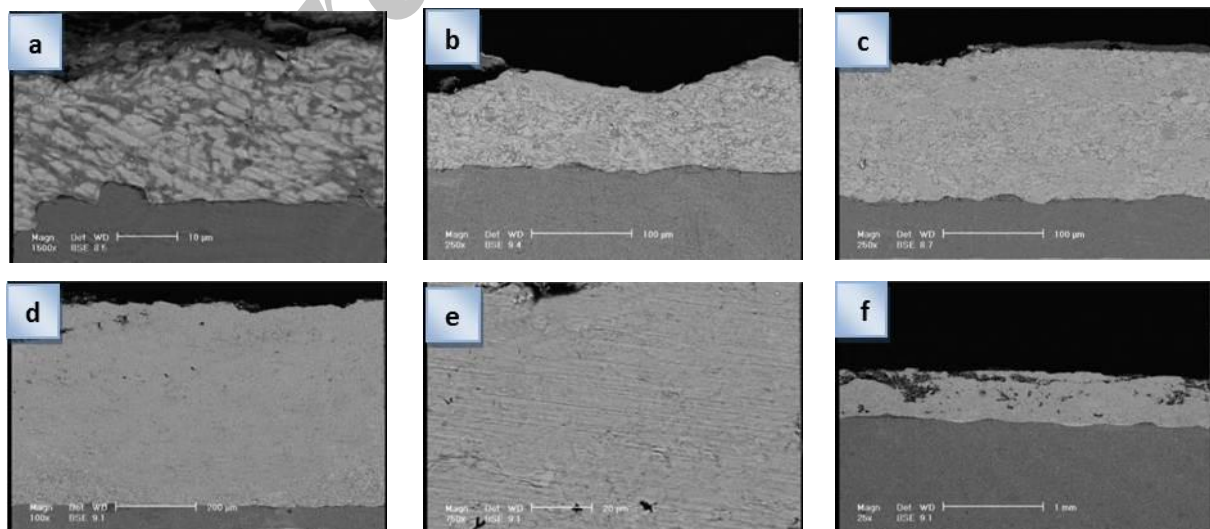
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی با گلوله های با قطر (a) ۱۰ میلی متر، (b) ۷ میلی متر، (c) ۴ میلی متر.

شکل (۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پوشش ایجاد شده با زمان آسیابکاری ۱۲۰ دقیقه با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ و با گلوله های متفاوت را نشان می دهد. همانطور که در شکل (a-۵) ملاحظه می شود زمانی که از گلوله با قطر ۱۰mm استفاده شده است به دلیل نیروی بالای اعمال شده از طرف گلوله به پوشش، آسیب شدیدی بر پوشش وارد شده است. استفاده از گلوله با قطر زیاد باعث کنده شده پوشش و تشکیل غیر یکنواخت آن شده است. شکل (b-۵) تصویر

کمتر بوده است به همین دلیل پوشش دچار حالت کندگی نشده ولی با توجه به اندازه نسبتاً بزرگ گلوله و نیروی وزن آن باعث آسیب پوشش شده و بر اثر ضربات متوالی گلوله ها تغییر فرم شدید ذرات مقاومت ضربه پوشش کاهش یافته و باعث ایجاد تخلخل شدید در پوشش شده است. در حالتی که از گلوله های با قطر ۴mm استفاده شده به دلیل نیروی وزن کمتر گلوله ها نسبت به گلوله های با قطر ۷mm ضخامت پوشش کاهش یافته است. در این حالت پوشش به طور کامل سطح نمونه را پوشانده و با توجه به نیروی وارد شده کمتر از طرف گلوله هابر سطح، پوشش دچار آسیب نشده است. ولی در این حالت سطح پوشش یکنواخت و صاف نبوده است که در جهت رفع این عیب در ادامه از زمان های بالاتر آسیابکاری استفاده شده است.

شکل (۶) تصاویر میکروسکوپی پوشش ایجاد شده با گلوله های با قطر ۴mm و با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۰ را در زمان های مختلف نشان می دهد. در زمان های کوتاه آسیابکاری پوشش با سطح ناصاف دیده می شود در صورتی که در زمان های طولانی ساختار یکسان و سطح صاف بوجود می آید [۶]. مشاهده می شود که با افزایش زمان ضخامت پوشش افزایش می یابد و اندازه ذرات موجود در پوشش به

مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. همانطور که در شکل (b-۶) ملاحظه می شود با افزایش زمان آسیابکاری تا ۲۴۰ دقیقه در نزدیکی سطح، پوشش به صورت توده ای تشکیل شده است. شکل (c-۶) تصویر میکروسکوپ نمونه پوشش داده شده را پس از ۳۶۰ دقیقه آسیابکاری نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود با افزایش زمان آسیابکاری سطح پوشش یکنواخت و تخت می گردد. در این نمونه پوشش به صورت کاملاً یکنواخت بر سطح فلز پایه در محل فصل مشترک فلز پایه و پوشش تشکیل شده است. شکل (d,e-۶) تصاویر میکروسکوپی نمونه پس از ۴۸۰ دقیقه آسیابکاری را نشان می دهد. اندازه ذرات پوشش در زمان ۴۸۰ دقیقه تا ۲۸ نانومتر کاهش یافته است. شکل (۷) تصویر میکروسکوپ عبوری نمونه ۴۸۰ دقیقه آسیابکاری است که تشکیل ساختار با ذرات نانو را را نشان می دهد. بر اثر ضربات متوالی گلوله بر پودر و ایجاد جوش سرد بین نیکل و آلومینیوم ساختارهای کامپوزیتی تشکیل شده است. در زمانهای اولیه پوشش دهی، پوشش به صورت لایه ای تشکیل می شود با افزایش زمان آسیابکاری پوشش به شکل توده ای تبدیل می شود [۷]. با مقایسه دو شکل (a-۶) و شکل (e-۶) این نتیجه به دست آمد که در زمان های اولیه ترکیبات پوشش به صورت

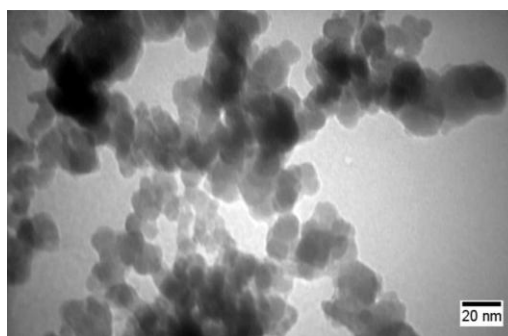


شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در زمانهای آسیابکاری (a) ۱۲۰ دقیقه، (b) ۲۴۰ دقیقه، (c) ۳۶۰ دقیقه، (d)، (e) ۴۸۰ دقیقه، (f) ۶۰۰ دقیقه.

می دهد، همانطور که ملاحظه می شود با افزایش زمان آسیابکاری ضخامت پوشش افزایش پیدا کرده و پوشش تا ضخامت $450 \mu\text{m}$ تشکیل شده است اما با افزایش زمان بیش از 480 دقیقه ضخامت پوشش تغییری نداشته و افزایش زمان سبب آسیب پوشش شده است.

شکل (۹) تاثیر زمان آسیابکاری را بر سختی پوشش حاصل نشان می دهد. پس از بررسی های انجام گرفته این نتیجه بدست آمد که میزان سختی بالای پوشش علاوه بر خواص ویژه ترکیبات بین فلزی به دلیل کارسختی شدید پوشش در اثر ضربات متوالی گلوله ها است. ملاحظه می شود که با افزایش زمان آسیاب کاری سختی پوشش افزایش یافته است و این افزایش تا زمان 480 دقیقه روند صعودی داشته است. کاهش میزان سختی در زمان 600 دقیقه به دلیل ایجاد تخلخل در ساختار پوشش است. در ادامه تغییرات ساختاری ترکیبات پوشش در زمان های مختلف با روش پراش اشعه ایکس مطالعه گردید.

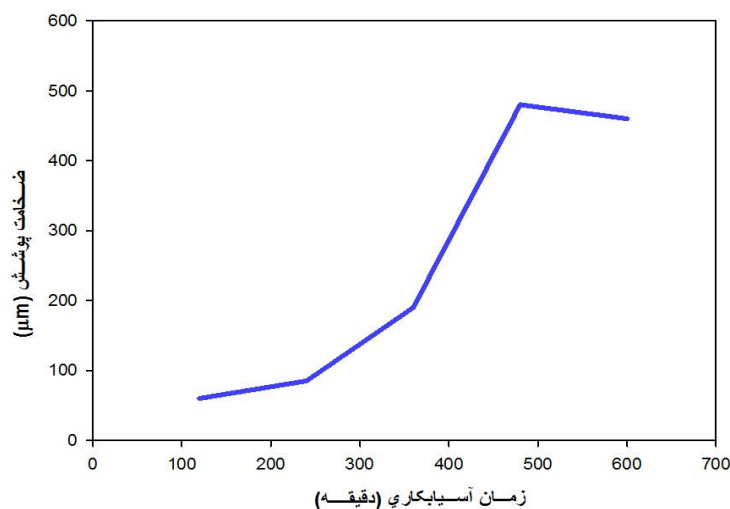
شکل (۱۰) الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه را در زمان های مختلف نشان می دهد. بررسی های الگوهای پراش نشان می دهد که پوشش با ترکیب NiAl تشکیل شده است. همانطور که ملاحظه می شود، با گذشت زمان آسیابکاری پهنای پیک های پراش افزایش می یابد و شدت پیک ها کاهش می یابد. این تغییرات ناشی از انجام کار سرد بر روی



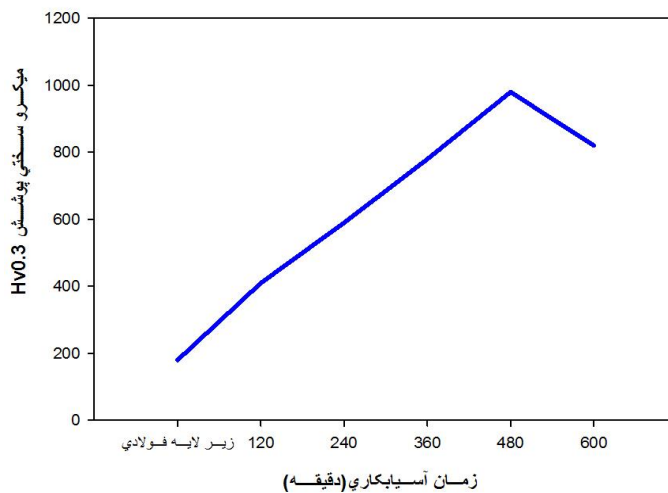
شکل ۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش در زمان آسیابکاری 480 دقیقه.

لایه ای است در صورتی که با ادامه فرآیند در زمان های نهایی همانطور که ملاحظه می شود، پوشش از حالت لایه ای خارج شده و محلول جامد Ni(Al) تشکیل شده است. همانطور که در شکل (f-۶) ملاحظه می شود افزایش زمان تا 600 دقیقه باعث آسیب پوشش ایجاد شده می شود و بر اثر ضربات متوالی گلوله ها و تغییر فرم شدید ذرات مقاومت ضربه پوشش کاهش یافته و باعث ایجاد تخلخل شدید در پوشش شده است.

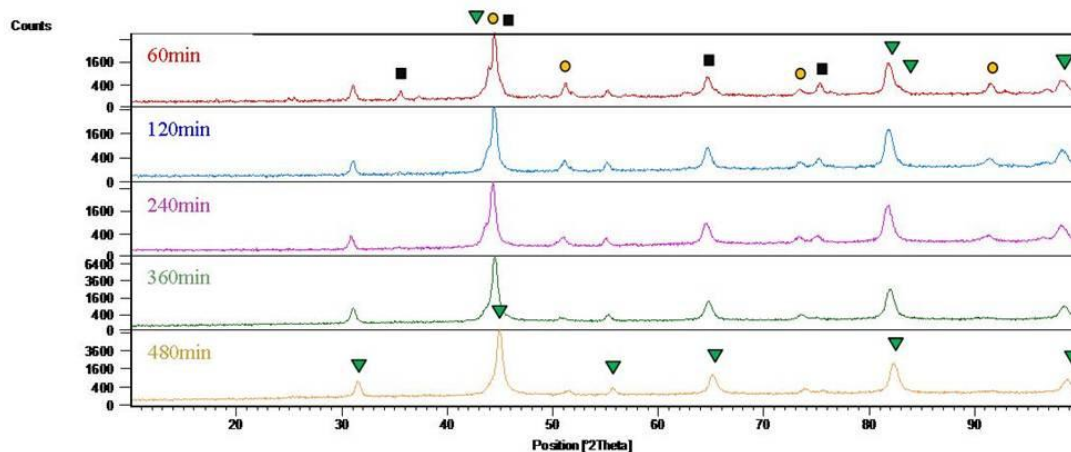
با افزایش زمان آسیابکاری ضخامت پوشش افزایش می یابد. در تحقیقات انجام شده قبلی محققان توانستند پوشش تا ضخامت $120 \mu\text{m}$ را بر سطوح فلز پایه ایجاد کنند [۶-۷]. شکل (۸) تاثیر زمان آسیابکاری با گلوله های به قطر 4 mm و با نسبت وزنی گلوله به پودر $10:1$ را بر ضخامت پوشش نشان



شکل ۸. نمودار تغییرات ضخامت پوشش نسبت به زمان آسیابکاری.



شکل ۹. نمودار تغییرات سختی پوشش نسبت به زمان آسیابکاری.



شکل ۱۰. الگوهای پراش اشعه ایکس در زمانهای مختلف آسیابکاری.

Ni	○
Al	■
NiAl	▽

دارای چگالی بالایی از ناپجایی ها است. در واقع با افزایش فصل مشترک فازی شرایط سینتیکی لازم برای تشکیل محلول جامد در سیستم حاضر در حین آلیاژسازی و پوشش دهی فراهم شده است. همانطور که از تصاویر الگوی پراش مشاهده می شود با بالا رفتن زمان آسیابکاری به تدریج از شدت پیک های آلومینیوم و نیکل کاسته شده است و پیک های پهن NiAl تشکیل می شود. در الگوهای پراش با زمان بالا تشکیل پیک های جدید مربوط به NiAl دیده می شود که مشخصه تشکیل ترکیب بین فلزی با ساختار نانو است.

ذرات پودر و همچنین کاهش اندازه دانه در حین آلیاژسازی مکانیکی است. با افزایش زمان آسیابکاری ساختار ذرات به تدریج تغییر کرده تا جایی که ساختار تکمیل شده و پیک پهن ظاهر شده، نشان دهنده تشکیل محلول جامد است. در طی فرآیند آلیاژسازی مکانیکی پودر های اولیه به طور مکرر بین گلوله ها و یا گلوله ها و محفظه آسیاب به دام افتاده و در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی هم پهن می شوند. افزایش سطح ذرات در اثر پهن شدن و تماس سطح آزاد فلزی باعث ایجاد جوش سرد بین ذرات پودر و باعث ایجاد پوشش با ساختار لایه ای بر سطح فلز پایه شده است. با ادامه عملیات آلیاژ سازی مکانیکی، شکست ها و جوش خوردگی های متوالی ذرات پودر منجر به ایجاد باندهای برشی می شود که

نتیجه گیری

یافته های این پژوهش نشان می دهد:

- ۱- بهترین پوشش ایجاد شده با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۰ ایجاد شده است.
- ۲- بهترین پوشش ایجاد شده با گلوله های به قطر ۴mm ایجاد شده است.
- ۳- الگوهای پراش اشعه ایکس نشان می دهد که در زمانهای زیاد پوشش با ترکیب NiAl به صورت محلول جامد تشکیل شده است و در نمونه ۴۸۰ دقیقه پس از عملیات حرارتی ترکیب کامل NiAl تشکیل شده است.
- ۴- آسیابکاری در زمان ۴۸۰ دقیقه موجب تشکیل پوشش با بهترین خواص از نظر ضخامت و سختی شده است. افزایش زمان آسیابکاری باعث کاهش اندازه ساختار تا ۲۸nm شده است.

منابع

1. Z. Zhan, Y. He, D. Wang and W. Gao, *Low-temperature processing of Fe-Al intermetallic coatings assisted by ball milling*, *Intermetallics*, 14(2006)75-81.
2. S. Romankov, Y. Hayasaka, E. Kasai and J.-M. Yoon, *Fabrication of nanostructured Mo coatings on Al and Ti substrates by ball impact cladding*, *Surface*, 205 (2010)2313-2321.
۳. شیروانی، م، تشکیل ترکیبات بین فلزی Fe₃Al به روش آلیاژسازی مکانیکی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۳
4. S. Romankov, W. Sha, S. D. Kalshkin and K. Kaevitser, *Fabrication of Ti-Al coatings by mechanical alloying method*, *Surface & Coating Technology* 201(2006)3235-3245.
5. S. Romankov, S. V. Komarov, E. Vdovichenko, Y. Hayasaka, N. Hayashi, S.D. Kaloshkin and E. Kasai, *Fabrication of TiN coatings using mechanical milling techniques*, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27(2009)492-497.
6. Á. Révész and L. Takacs, *Coating a Cu plate with a Zr-Ti powder mixture using surface mechanical attrition treatment*, *Surface & Coatings Technology*, 203(2009)3026-3031.
7. H. Du, Y. Wei, W. Lin, L. Hou, Z. Liu, Y. An and W. Yang, *One way of surface alloying treatment on iron surface based on surface mechanical attrition treatment and heat treatment*, *Applied Surface Science*, 255(2009)8660-8666.
8. S. Romankov, Y. Hayasaka, E. Kasai and J. M. Yoon, *Fabrication of nanostructured Mo coatings on Al and Ti substrates by ball impact cladding*, *Surface and Coatings Technology*, 205(2010)2313-2321.