

تأثیر پارامترهای آسیاکاری مکانیکی بر تشکیل پوشش Ni-Al روی سطح سوپرآلیاژ پایه نیکل (Inconel 617)

راضیه اکبرنژاد، علیرضا مشرقی، مهدی کلانتر، مسعود مصلائی پور

دانشگاه مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت مقاله ۹۴/۱۱/۱۵ - پذیرش مقاله : ۹۶/۰۲/۰۹)

چکیده

در این تحقیق از روش آسیاکاری مکانیکی برای ایجاد پوشش Ni-Al بر سطح سوپرآلیاژ پایه نیکل (Inconel 617) استفاده شده است. در این روش بمنظور تشکیل پوشش، پودر Al و زیرلیه (Inconel 617) همراه با گلوله‌های با قطرهای متفاوت و نسبت وزنی گلوله به پودر متفاوت درون محفظه دستگاه آسیای سیاره‌ای قرار گرفتند و عملیات آسیاکاری در زمان‌های ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ ساعت انجام شد. در حین انجام فرآیند آسیاکاری در اثر برخورد متوالی گلوله‌ها با ذرات پودر و سطح زیرلیه، پودر روی سطح زیرلیه جوش سرد خورده و پوشش تشکیل می‌شود. در مرحله بعد عملیات حرارتی در دمای ۵۵۰ °C بر روی نمونه‌ها انجام شد تا شرایط برای نفوذ و تشکیل ترکیبات بین فلزی مهیا شود. بمنظور به دست آوردن شرایط بهینه ضخامت و سختی پوشش از پارامترهای اندازه گلوله‌ها، نسبت وزنی گلوله به پودر و زمان آسیاکاری استفاده شد. بررسی مورفولوژی و ترکیب پوشش‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز طیف‌نگاری تفرق انرژی (EDS) انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد، پوشش با ترکیب بین فلزی Ni-Al بر سطح زیرلیه (Inconel 617) تشکیل شده است. بهترین شرایط پوشش در زمان آسیاکاری ۱۵ ساعت و نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ و با مخلوط گلوله‌های به قطر (۸ و ۱۲ و ۱۶) میلی‌متر ایجاد شد. ماکسیمم سختی پوشش ۱۲۷۰ ویکرز در زمان ۱۵ ساعت آسیاکاری به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آسیاکاری مکانیکی، سوپرآلیاژ (Inconel 617)، پوشش دهی، ترکیبات بین فلزی Ni-Al

Effect of Parameters of Mechanical Milling on the Formation of NiAl Coatings on the Nickel-Based Superalloy (Inconel 617)

Raziyeh Akbarnezhad, Alireza Mashreghi, Mehdi Kalantar, Masoud Mosallae Pour

Department Mining & Metallurgical Engineering, Yazd University

(Received 4 February 2016, accepted 29 April 2017)

Abstract

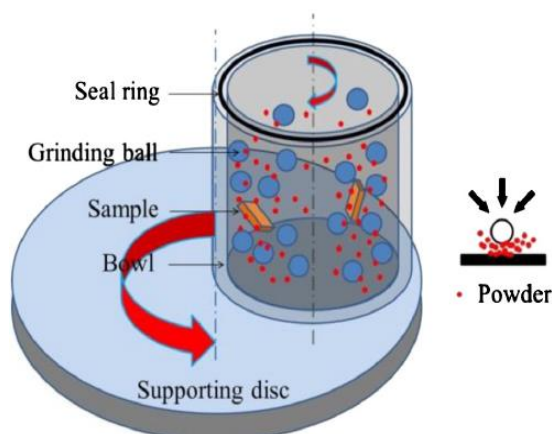
In this study, mechanical milling has been applied to fabricate Ni-Al coating on the surface of a nickel-based superalloy (Inconel 617). In order to form the coating layer, Al powders accompanying the substrate (Inconel 617) and balls with different ball size and ball-to-powder weight ratio were placed and then ball milling was done for 5, 10, 15, and 20 h. During the mechanical milling process, due to the cold welding between powder particles and surface of substrate, coating layer was formed. To form the intermetallic compositions, all samples were annealed at 550 °C for 120 min. In additions, to optimize of thickness and coating hardness the ball-to-powder weight ratio, milling duration, and ball size as effective parameters were investigated. The microstructure studies of samples was investigated by using of scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the formation of Ni-Al intermetallic coatings on nickel-based superalloy (Inconel 617) have been formed. Also, the best coating was formed in milling duration of 15 h and ball to powder weight ratio of 10:1 and mixing ball 8, 12, and 16 mm diameter. Also, the maximum hardness of the formed coatings reached 1270 HV for sample ball milled for 15 hr.

Keywords: Mechanical Milling, superalloy (Inconel 617), Coating, Ni-Al intermetallics.

E-mail of corresponding author: razie.akbarnejad@yahoo.com.

مقدمه

در این روش نمونه‌ها به دو صورت ثابت و متحرک به همراه پودر و تعداد زیادی گلوله درون محفظه دستگاه آسیاکاری قرار می‌گیرند. در اثر آسیاکاری سطح نمونه‌ها با تعداد زیادی گلوله و پودر برخورد می‌کند و در اثر برخورد بین گلوله - پودر - نمونه، پودر بر روی سطح نمونه‌ها جوش سرد خورده و پوشش روی سطح نمونه‌ها تشکیل می‌شود. این فرآیند شامل جوش سرد، شکست و جوش مجدد ذرات و نفوذ در فواصل کم به صورت متوالی است [۱۱-۱۰].



شکل ۱. شماتیک روش پوشش‌دهی به روش آلیاژسازی مکانیکی [۱۲].

شکل (۱) به صورت شماتیک قرار گرفتن ذرات پودر را در بین گلوله‌ها در حال برخورد و مراحل آلیاژسازی مکانیکی را نشان می‌دهد. زمانی که گلوله‌های فولادی با یکدیگر و با نمونه برخورد می‌کنند، مقادیری از پودر موجود در محفظه آسیاکاری بین آن‌ها قرار می‌گیرد. پودر در اثر ضربات گلوله‌ها در نقاطی به سطح زیرلایه می‌چسبد و لایه‌ای بر روی سطح زیرلایه ایجاد می‌شود و در اثر ضربات بعدی به داخل سطوح زیرلایه فشرده می‌شوند. برخورد گلوله‌های آسیا سطح زیرلایه را ریزدانه، سخت و فعال می‌کند. با ریز شدن سطح زیرلایه و تبدیل ذرات

سوپرآلیاژها مواد مهندسی هستند که به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فرد مانند استحکام، مقاومت به خزش و خوردگی داغ، به طور گسترده در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با توجه به استفاده سوپرآلیاژها در دماهای بالا و به مدت طولانی، کاربرد این سوپرآلیاژها بدون پوشش مقرون به صرفه نیست. برای این منظور، سوپرآلیاژها پوشش داده شده و سپس بکار می‌روند. عمومی‌ترین نوع پوشش‌های محافظ سوپرآلیاژها پوشش نفوذی آلومینایدی است که در آن یک لایه آلومینایدی NiAl با مقاومت اکسیداسیون بالا روی سطح آلیاژ ایجاد می‌شود [۳-۱].

ترکیبات بین فلزی Ni-Al دارای خواص مهندسی منحصر به فرد نظیر وزن مخصوص پایین، مقاومت سایشی بالا، استحکام ویژه بالا، ضریب اصطکاک کم و مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون در دمای بالا است. این ترکیبات اغلب نقطه ذوب بالاتری نسبت به سوپرآلیاژها دارند و همچنین به دلیل داشتن پیوندهای فلزی چقرمگی بیشتری نسبت به سرامیک‌ها دارند. از این رو در سال‌های اخیر بر روی روش‌های تولید، خواص و کاربردهای این گونه ترکیبات تحقیقات وسیعی انجام شده است [۵-۴].

آلیاژسازی مکانیکی^۱ یکی از روش‌های فرآوری پودری است که امکان تولید مواد همگن از مخلوط پودری اولیه را فراهم می‌کند. آلیاژسازی مکانیکی یک روش تولید مواد در حالت جامد است که شامل جوش سرد و شکست متوالی ذرات پودر مواد اولیه در یک آسیای پرانرژی است [۶].

زمانی که مخلوطی از پودرها آسیاکاری مکانیکی می‌شوند بخشی از پودر آسیا شده تشکیل لایه پوششی روی گلوله‌های آسیا و محفظه درونی دیواره ظرف را می‌دهد. بتازگی معلوم شده است که این روش می‌تواند بعنوان روشی انعطاف‌پذیر جهت پوشش‌دهی روی سطوح قطعات انجام شود [۹-۷].

¹ Mechanical alloying Process (MA)

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از پودر Al با اندازه ذرات متوسط ۲۰ میکرون و با خلوص ۹۹/۹٪ که از شرکت پرتاوس مشهد تهیه شده بود بعنوان ماده اولیه برای ایجاد پوشش مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از سوپراآلیاژ پایه نیکل (Inconel 617) تجاری بعنوان نمونه (زیرلایه) استفاده شده است. سوپراآلیاژ پایه نیکل (Inconel 617) به روش کوانتومتری آنالیز شیمیایی شد و نتایج آن در جدول ۱ ذکر شده است. سختی زیرلایه قبل از پوشش دهی ۶۰۰ ویکرز بود. قطعات سوپر آلیاژ به ابعاد ۱۰×۱۰×۴ میلی متر به کمک وایرکات برش زده شدند.

نمونه‌ها قبل از پوشش دهی جهت حذف چربی و آلودگی‌های سطحی تحت فرآیند آماده سازی سطح (سنباده زنی و شستشو با الکل و استون) قرار گرفتند و سپس با هوای گرم خشک شدند.

نمونه‌های آماده شده به همراه پودر Al و گلوله‌های فولادی درون محفظه دستگاه آسیا سیاره‌ای مدل (PBM210) با حجم 400 cm^3 قرار داده شدند. اتمسفر داخلی محفظه آسیا با گازدهی آرگون از طریق دو شیر ورودی و خروجی تعبیه شده بر روی در محفظه، جهت جلوگیری از اکسیداسیون ناخواسته کنترل شد. از گلوله‌های با قطر (۸ و ۱۲ و ۱۶) میلی متر و نسبت وزنی گلوله به پودر (۱:۱۰) و (۱:۲۰) استفاده شد. سرعت دستگاه برای انجام فرآیند آسیاکاری ۳۰۰ rpm انتخاب شد. آسیاکاری مکانیکی در مدت زمان‌های ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ ساعت انجام شد. شماتیک روش پوشش دهی انجام شده در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. نمونه‌های پوشش داده شده در کوره تحت اتمسفر گاز آرگون در دمای 550°C به مدت ۱۲۰ دقیقه حرارت داده شد و در کوره سرد گردید.

پودری به ابعاد بسیار ریز و افزایش عیوب شبکه، واکنش‌های شیمیایی بین مواد پودری و سطح زیرلایه و نفوذ سطحی افزایش می‌یابد. در این روش فعال سازی سطوح و رسوب پودر به ترتیب انجام می‌شود. فعال سازی سطوح باعث انجام واکنش‌های شیمیایی و اتصال بین سطح هدف و پوشش می‌شود [۱۱].

یونگان لی^۱ و همکارانش از این روش برای پوشش دادن Cr بر روی سطح Cu استفاده کردند. در این تحقیق پوشش Cr بر روی سطح زیرلایه به وجود آمد و با جوش سرد به زیرلایه متصل شده است. پوشش با سختی حداکثر ۶۲۵ ویکرز که در حدود شش برابر بیشتر از زیرلایه تشکیل شده و باعث بهبود خواص مکانیکی زیرلایه Cu شده است [۱۲].

بولی^۲ و همکارانش نیز پوشش بین فلزی Ti-Cu و Ti-Cr را بر روی آلیاژ Ti ایجاد کردند. در این تحقیق ضخامت پوشش Ti-Cu بیشتر از Ti-Cr به دست آمد. مکانیسم اصلی تشکیل پوشش نفوذ بود که در روند افزایش ضخامت پوشش بسیار مؤثر بود. پوشش Ti-Cu مقاومت به خراش بیشتری نسبت به پوشش Ti-Cr داشت [۱۳].

رومانکو^۳ و همکارانش از این روش برای پوشش دادن Ti-Al روی سطح Ti و Al استفاده کردند. پوشش Ti-Al دارای مقاومت به اکسیداسیون و خواص مکانیکی مطلوب در دماهای بالا نسبت به آلیاژهای تیتانیوم است. در این تحقیق پوشش Ti-Al با ضخامت $200\ \mu\text{m}$ بر روی سطح Ti به وجود آمد [۱۴].

با توجه به این که تحقیقی در زمینه پوشش دهی به روش آسیاکاری مکانیکی بر روی سطح سوپراآلیاژ تاکنون گزارش نشده است، لذا پوشش بر پایه ترکیبات بین فلزی Ni-Al بر روی سطح سوپراآلیاژ پایه نیکل (Inconel 617) ایجاد و پارامترهای پوشش دهی مورد بررسی قرار گرفت.

¹.Yongcan Li

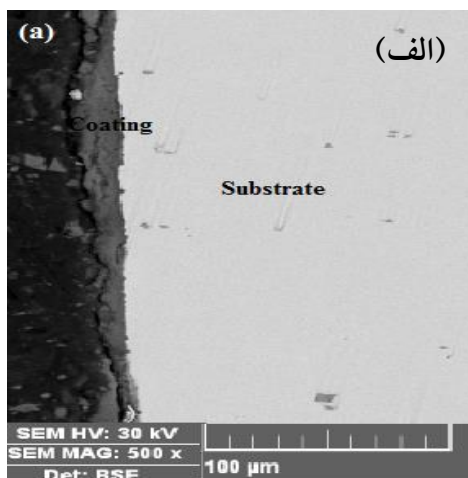
².Bo Li

³.Romankov

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سوپر آلیاژ مورد استفاده (Inconel 617).

عنصر شیمیایی	C	Ti	Fe	Al	Mo	Co	Cr	Ni
درصد وزنی	۰/۱	۰/۴	۱/۰	۱/۲	۹/۳	۱۲	۲۲	۵۴

شکل (۲-ب) پوشش تشکیل شده با گلوله‌های قطر ۱۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. در این حالت به دلیل نیروی کمتری که از گلوله‌ها به پوشش وارد شده پوشش به‌طور کامل و پیوسته بر روی سطح زیرلایه تشکیل شده است و پوشش و زیرلایه از طریق جوش سرد به یکدیگر اتصال دارند. در این حالت انرژی جنبشی گلوله‌ها از حالت قبل کمتر بوده است به همین دلیل پوشش دچار کندگی نشده است ولی با توجه به اندازه نسبتاً بزرگ گلوله، نیروی وزن آن‌ها هنوز بالاست، لذا باعث آسیب به پوشش و ایجاد تخلخل زیاد در پوشش شده است. در شکل (۲-ج) از گلوله‌های به قطر ۸ میلی‌متر استفاده شده است. در این حالت نیروی گلوله‌ها نسبت به گلوله‌های با قطر ۱۲ و ۱۶ کمتر شده است و ضخامت پوشش کاهش یافته و پوشش به‌طور کامل و غیر یکنواخت بر روی زیر لایه تشکیل شده است. در جهت رفع عیب‌های ایجاد شده از مخلوط گلوله‌های ۸ و ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر در شکل (۲-د) استفاده شده است. در شکل (۲-د) انرژی جنبشی که از گلوله‌ها بر سطح وارد شده باعث شده پوشش ایجاد شده بر سطح زیرلایه از فشردگی مناسبی برخوردار باشد و انرژی لازم جهت ایجاد جوش سرد بین پودر و نمونه وجود داشته باشد [۱۷].



ساختار میکروسکوپی پوشش‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل VEGA3 TESCAN مجهز به دستگاه آنالیز عنصری (EDS) بررسی شد. همچنین از نرم افزار آنالیز تصویر Clemex برای محاسبه درصد سطحی حفره‌ها استفاده شد. جهت اندازه‌گیری سختی پوشش از دستگاه میکروهاردنس کوپا با بار اعمالی ۵۰۰ گرم و مدت‌زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه استفاده شد.

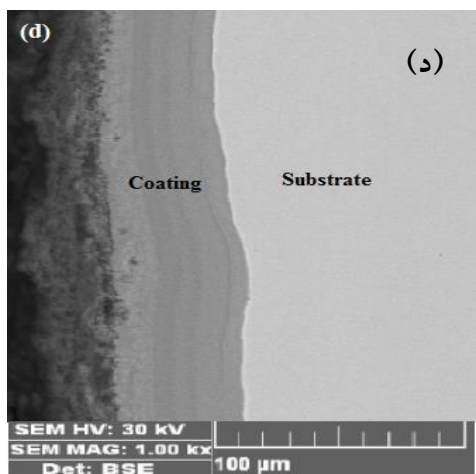
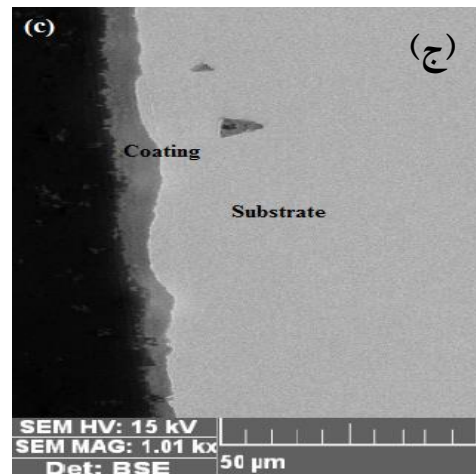
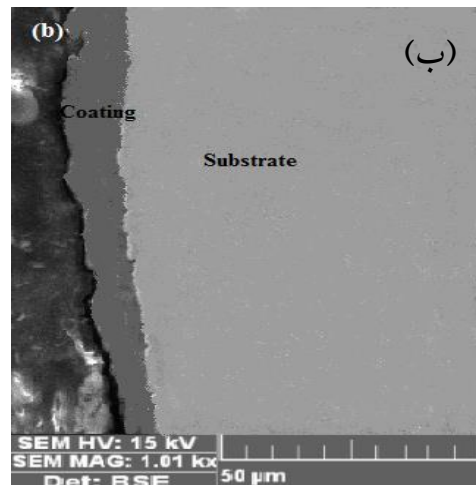
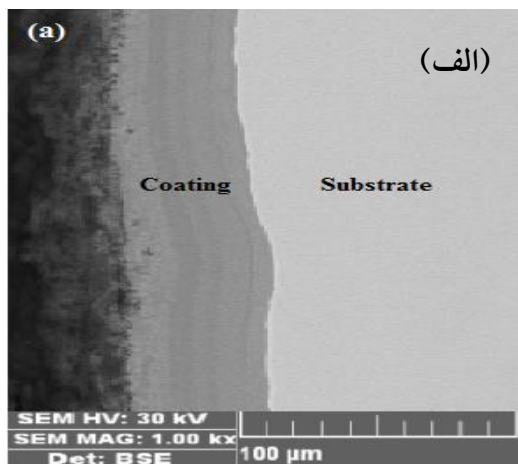
نتایج و بحث

پارامترهای فرآیند آسیاکاری از قبیل اندازه گلوله، نسبت وزنی گلوله به پودر و زمان آسیاکاری تأثیر زیادی بر خواص پوشش ایجاد شده دارد؛ بنابراین شرایطی که در آن، حداکثر ضخامت و سختی پوشش به دست آید بسیار حایز اهمیت است.

بررسی پارامترهای فرآیند

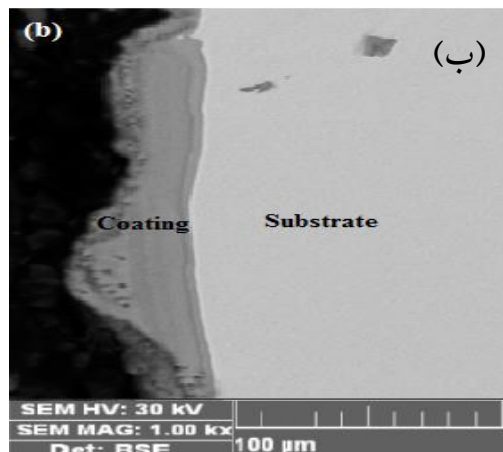
در آسیاکاری مکانیکی نیروی وارده حین فرآیند ارتباط مستقیمی با اندازه گلوله‌های مورداستفاده دارد. جوش سرد و شکسته شدن لایه پوشش، دو عامل اصلی تشکیل پوشش در فرآیند آسیاکاری مکانیکی هستند [۱۵ و ۱۶]. شکل (۲) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پوشش ایجاد شده با زمان آسیاکاری ۵ ساعت با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ و با گلوله‌های متفاوت را نشان می‌دهد. در شکل (۲-ب) از گلوله با قطر ۱۶ میلی‌متر استفاده شده است. پوشش پیوستگی مناسبی بر روی سطح ندارد و آسیب زیادی بر پوشش وارد شده است که دلیل آن نیروی زیادی است که از گلوله‌ها بر پوشش وارد می‌شود.

شکل (۳) تصاویر میکروسکوپی پوشش ایجاد شده با گلوله‌های به قطر ۸ و ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر با مدت زمان آسیاکاری ۵ ساعت و نسبت وزنی گلوله به پودر متفاوت ۱۰:۱ و ۲۰:۱ را نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود در هر دو نمونه پوشش بر سطح زیرلایه تشکیل شده است ولی از نظر ضخامت و مورفولوژی سطحی، پوشش‌های ایجاد شده متفاوت هستند. همان‌طور که در تصاویر ملاحظه می‌شود. در نمونه (۳-الف) با نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰:۱ پوشش بر روی سطح زیرلایه تشکیل شده است و با توجه به تعداد زیاد گلوله‌ها نیروی زیادی بر واحد سطح اعمال شده که باعث کنده شدن پوشش و آسیب به پوشش شده و پوشش به‌طور کامل بر سطح زیرلایه تشکیل نشده است و امکان اتصال و جوش سرد بین ذرات پودر و زیرلایه کمتر شده است. ضخامت پوشش در بیشتر مناطق متفاوت و سطح پوشش غیریکنواخت و ناصاف است. در نمونه (۳-ب) با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ یک پوشش متراکم بر سطح فلز پایه تشکیل شده است. پوشش نسبت به حالت قبل صاف‌تر و یکنواخت‌تر است. با توجه به تعداد و وزن کمتر گلوله‌ها نسبت به حالت قبل نیروی کمتری بر واحد سطح وارد شده است که امکان اتصال و جوش سرد بیشتر فراهم شده است. ضخامت پوشش در اکثر مناطق بیشتر شده است [۱۵].

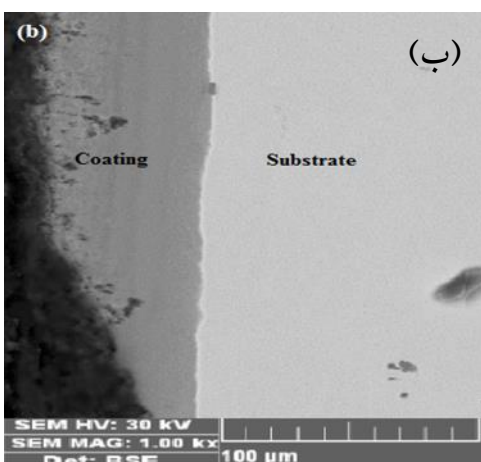
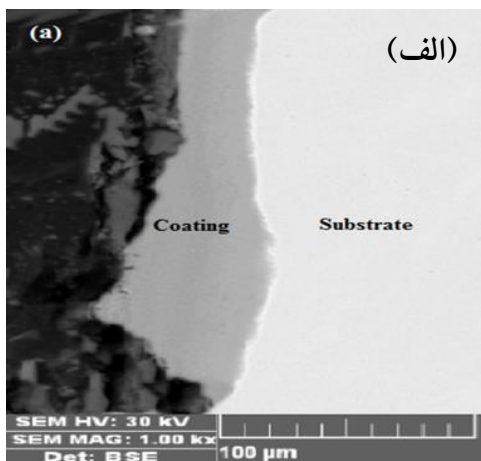


شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع زیرلایه پوشش داده شده با گلوله‌های به قطر الف) ۸ میلی‌متر، ب) ۱۲ میلی‌متر، ج) ۱۶ میلی‌متر، د) مخلوطی از گلوله‌های به قطر ۸ و ۱۲ میلی‌متر.

شکل (۵) تأثیر زمان آسیاکاری را بر ضخامت پوشش نشان می‌دهد، همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش زمان آسیاکاری ضخامت پوشش افزایش پیدا کرده و پوشش با نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰:۱ تا ضخامت $60/49 \mu\text{m}$ و با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ تا ضخامت $73/11 \mu\text{m}$ تشکیل شده است. با افزایش زمان بیش از ۱۵ ساعت ضخامت کاهش یافته و افزایش زمان سبب ایجاد ترک، ورقه‌ای شدن و ایجاد تخلخل در لایه‌های پوشش شده است [۱۴].



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، نشان‌دهنده تأثیر نسبت وزنی گلوله به پودر روی تشکیل پوشش (الف) ۱۰:۱، (ب) ۲۰:۱.

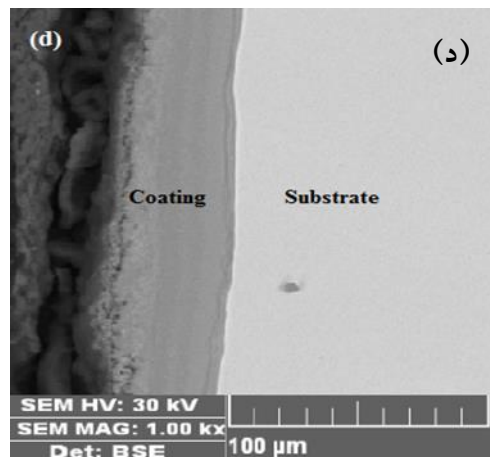
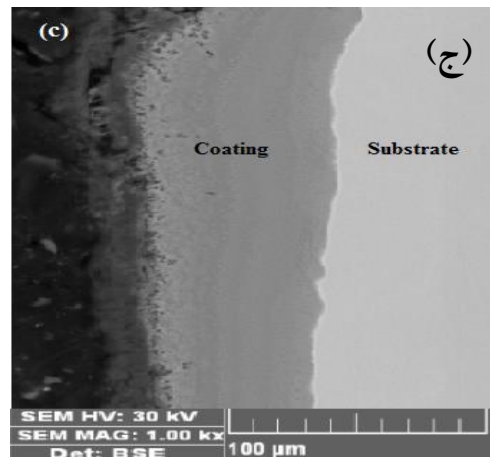


شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش‌های تشکیل شده با مخلوط گلوله‌های با قطر ۸ و ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر و نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰:۱ پس از زمان‌های مختلف آسیاکاری را نشان می‌دهد. شکل (۴-الف) تصویر میکروسکوپی نمونه پوشش داده‌شده پس از ۵ ساعت آسیاکاری را نشان می‌دهد. ضخامت پوشش در مناطق مختلف متفاوت است و پوشش از پیوستگی مناسبی بر روی سطح برخوردار نیست. در شکل (۴-ب) تصویر میکروسکوپی از سطح مقطع نمونه بعد از ۱۰ ساعت آسیاکاری را نشان می‌دهد که میانگین ضخامت پوشش نسبت به ۵ ساعت آسیاکاری افزایش یافته است و پوشش به صورت نسبتاً یکنواخت بر روی سطح زیرلایه تشکیل شده است. در شکل (۴-ج) تصویر میکروسکوپی از سطح مقطع نمونه بعد از ۱۵ ساعت آسیاکاری را نشان می‌دهد. میانگین ضخامت پوشش نسبت به دو حالت قبل افزایش یافته است. پوشش به صورت کاملاً یکنواخت بر روی سطح تشکیل شده است. در شکل (۴-د) آسیاکاری به مدت ۲۰ ساعت انجام شده است به دلیل زمان زیاد آسیاکاری پوشش دچار آسیب شده و ضخامت پوشش کاهش می‌یابد [۱۴ و ۶].

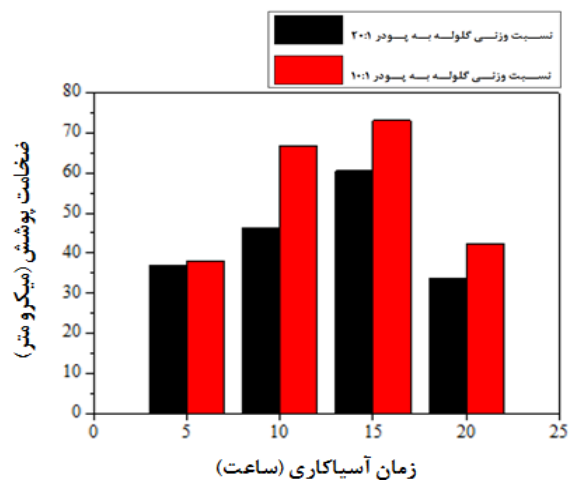
بررسی مورفولوژی پوشش

شکل (۶) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی پوشش تشکیل شده با گلوله‌های به قطر ۸ و ۱۲ (۱۶ و ۱۲) میلی‌متر و نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۰ در زمان‌های ۵ و ۱۵ ساعت آسیاکاری را نشان می‌دهد. شکل (۶-الف) میزان تخلخل‌ها و ناپیوستگی‌ها ۲۵/۸ درصد و در شکل (۶-ب) با افزایش زمان آسیاکاری تا ۱۵ ساعت میزان تخلخل و ناپیوستگی‌های موجود در پوشش کاهش یافته و به ۱۲/۵ درصد رسیده است. افزایش زمان آسیاکاری موجب افزایش تعداد ضربات گلوله‌ها بر سطح پوشش می‌شود که این افزایش باعث فشردگی بیشتر لایه‌های پوشش بر روی هم و کاهش تخلخل شده است [۱۲].

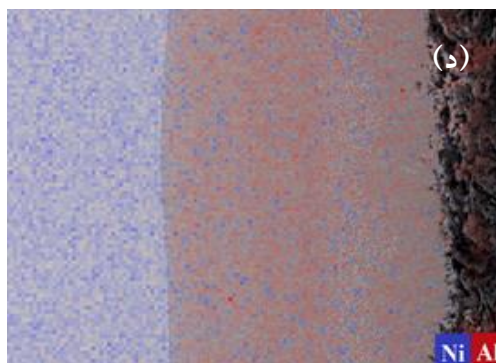
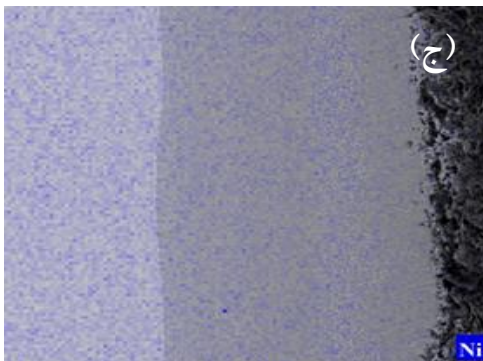
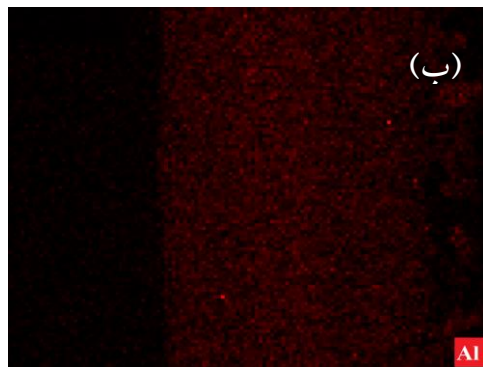
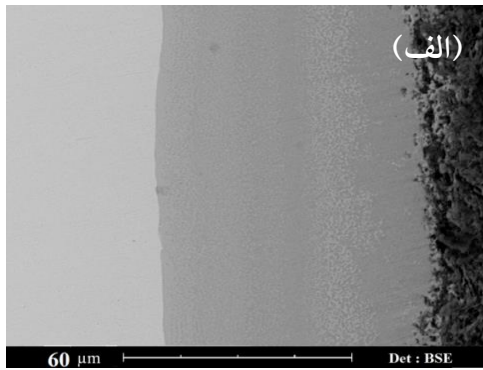
جهت بررسی چگونگی توزیع عناصر حین فرآیند آسیاکاری از آنالیز نقشه اشعه ایکس استفاده شد. شکل (۷-الف) تصاویر گرفته شده از نمونه پوشش داده شده با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۰ و با گلوله‌های به قطر ۸ و ۱۲ میلی‌متر در زمان ۱۰ ساعت آسیاکاری را نشان می‌دهد. شکل (۷-ب) توزیع عنصر آلومینیوم با رنگ قرمز مشخص است و نشان دهنده حضور عنصر آلومینیوم در سرتاسر پوشش می‌باشد و آلومینیوم توانسته به زیرلایه سوپرآلیاژ پایه نیکلی (Inconel 617) نفوذ کند و با نیکل موجود در زیرلایه پیوند ایجاد کند و تشکیل ترکیبات بین فلزی Ni-Al دهد. در شکل (۷-ج) توزیع عنصر نیکل با رنگ آبی مشخص شده است. همانطور که در شکل (۷-د) مشاهده می‌شود عناصر Ni و Al در کل نواحی پوشش وجود دارند و به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند [۱۵ و ۱۶].



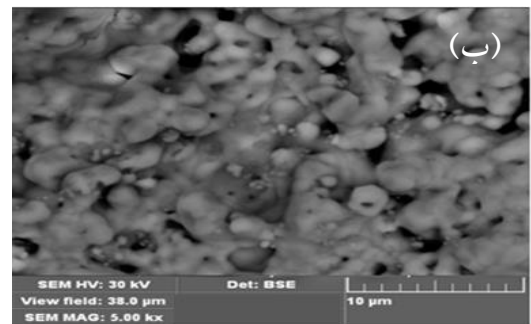
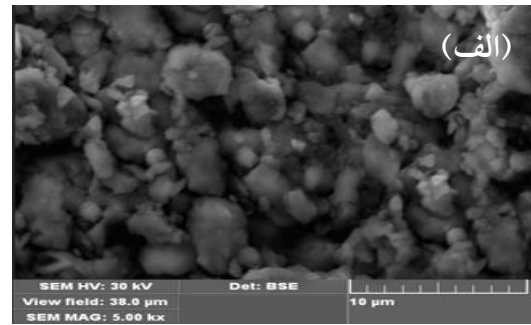
شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع پوشش آسیاکاری با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۰ و مخلوطی از گلوله‌های به قطر ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر بعد از زمان‌های مختلف آسیاکاری (الف) ۵ (ب) ۱۰ (ج) ۱۵ (د) ۲۰ ساعت.



شکل ۵. نمودار تغییرات ضخامت پوشش نسبت به زمان آسیاکاری.



شکل ۷. تصاویر آنالیز نقشه اشعه ایکس پوشش ایجادشده با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ و گلوله‌های به قطر ۸ و ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر و زمان آسیاکاری ۱۰ ساعت (الف) تصویر محل بررسی (ب) توزیع عنصر آلومینیوم (ج) توزیع عنصر نیکل (د) توزیع عناصر آلومینیوم و نیکل.



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی پوشش تشکیل شده با گلوله‌های به قطر ۸ و ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر و نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ در زمان‌های آسیاکاری (الف) ۵ و (ب) ۱۵ ساعت.

آنالیز سختی

به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها از آزمایش سختی به شکل پروفیل در امتداد نمونه از پوشش بیرونی به سمت داخل زیرلایه استفاده شده است. شکل (۸) توزیع میکرو سختی از مقطع نمونه‌ها را در زمان‌های مختلف آسیاکاری نشان می‌دهد. در همه نمونه‌ها سختی پوشش به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از سختی زیر لایه است و بافاصله گرفتن از سطح نمونه سختی کاهش می‌یابد. ماکسیمم سختی پوشش در زمان آسیاکاری ۱۵ ساعت است. با افزایش زمان آسیاکاری مقدار انرژی بیشتری در اثر ضربات متوالی گلوله‌ها به پوشش و سطح نمونه وارد می‌شود که باعث افزایش کرنش ذخیره شده در پوشش می‌شود و کارسختی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که میزان سختی بالای پوشش بستگی به تشکیل ترکیبات بین فلزی و کارسختی ناشی از ضربات متوالی گلوله‌ها است [۱۸].

performance of nickel aluminide coating prepared by pack cementation, Corros. Sci. 110 (2016)284–295.

3. F.H. Latief, E.M. Sherif, K. Kakehi, Role of aluminide coating on oxidation resistance of Ni-based single crystal superalloy at 900 °C, Int. J. Electrochem. Sci. 10(2015)1873–1882.

۴. گرهارد ساوتف، "ترکیبات بین فلزی"، مترجم: علی حائریان و محمد حسین همتی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۲).

5. S.Z. Anvari, F. Karimzadeh, M.H. Enayati, J. Alloy Compd. 447(2009)178–181.

6. C. Suryanarayana, Mechanical alloying and milling, Progress in Materials Science, 46(2001)1-184.

7. L. Takacs, Self-sustaining reactions induced by ball milling, Progress in Materials Science, 47(2002)355–414.

8. A. Revesz 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.

9. S. Romankov, W. Sha, S.D. Kaloshkin and K. Kaevitser, Fabrication of Ti Coatings by Mechanical Alloying Method, Surface & Coatings Technology, 201(2006)4255-4261.

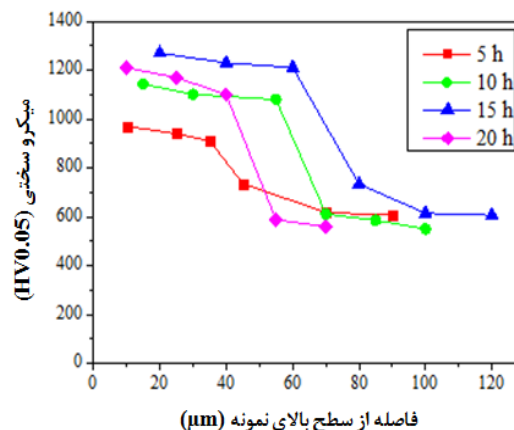
10. S. Romankov, Y. Hayasaka, E. Kasai and J. M. Yoon, Fabrication of nanostructured Mo coatings on Al and Ti substrates by ball impact cladding, Surface & Coatings Technology, 205 (2010)2313-2321.

11. R. Pouriamanasha, J. Vahdati-Khaki, Q. Mohammadi, Coating of Al substrate by metallic Ni through mechanical alloying, Journal of Alloys and Compounds. 488(2009)430–436.

12. L. Yongcan, C. Cheng, D. Ruixiang, F. Xiaomei, S. Yifu, Microstructure evolution of Cr coatings on Cu substrates prepared by mechanical alloying method, Powder Technology 268(2014)165–172.

13. L. Bo, D. Rundong, S. Yifu, H. Yongzhi, G. Yan, Preparation of Ti-Cr and Ti-Cu flame-retardant coatings on Ti-6Al-4V using a high-energy mechanical alloying method, Materials and Design 35(2012)25–36.

14. 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.



شکل ۸. نمودار تغییرات سختی برحسب زمان آسیاکاری.

نتیجه‌گیری

با استفاده از روش آسیاکاری مکانیکی پوششی بر پایه ترکیبات بین فلزی Ni(Al) بر سطح سوپراآلیاژ پایه نیکل تشکیل شد. بهترین پوشش ایجاد شده با گلوله‌های به قطر ۸ و ۱۲ و ۱۶ و با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۰ و در زمان آسیاکاری ۱۵ ساعت ایجاد شده است. افزایش زمان آسیاکاری موجب افزایش ضخامت پوشش شده و بیشترین ضخامت پوشش پس از ۱۵ ساعت آسیاکاری (۷۳/۱۱ μm) تشکیل شده است. با افزایش زمان آسیاکاری سختی پوشش افزایش یافته است و این افزایش تا زمان ۱۵ ساعت روند صعودی داشته است. کاهش میزان سختی در زمان ۲۰ ساعت ناشی از ایجاد تخلخل و ترک در ساختار پوشش است. در نتیجه، افزایش زمان آسیاکاری از ۱۵ به ۲۰ ساعت باعث کاهش کیفیت پوشش شده است. آنالیز الگوی EDX نشان می‌دهد که عناصر Al و Ni در کل نواحی پوشش وجود دارند و به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند.

مراجع

1. M.J. Donachie, S.J. Donachie, *Superalloys A Technical Guide*, ASM International, (2002).
2. Y.H. Zhou, L. Wang, G. Wang, D.L. Jin, W. Hao, X.F. Zhao, J. Zhang, P. Xiao, *Influence of substrate composition on the oxidation*

15. S. Romankov, S.D. Kaloshkin, Y. Hayasaka, N. Hayashi, E. Kasai, S.V. Komarov, J. Alloy Compd. 484(2009)665–673.
16. M. Mohammadnezhad, M. Shamanian, M.H. Enayati, Appl. Surf. Sci. 263(2013)730–736.
17. S. Romankov, S.V. Komarov, E. Vdovichenko, Y. Hayasaka, N. Hayashi, E. Kasai, Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 27 (2009)492-497.
18. C. Cheng, D. Cuiyuan, L. Yongcan, F. Xiaomei, S. Yifu, *Effects of Cu content on the microstructures and properties of Cr-Cu composite coatings fabricated via mechanical alloying method*, Powder Technology (2015).