

بررسی پوشش دهی مکانیکی سطح توسط مخلوط نیکل، مس و نانو ذرات سیلیس بر روی جداره داخلی لوله های با قطر کم

رضا شجاعی اوغاز^۱؛ ایمان فرح بخش^{۲*}

۱ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، شاهرود، ایران

۲ گروه مهندسی مکانیک، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران



تاریخ دریافت:

۹۴/۹/۲

تاریخ پذیرش:

۹۵/۴/۵

چکیده

یکی از چالش‌های بزرگ در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی، ساییدگی تجهیزات و جداره داخلی لوله‌های با قطر کم می‌باشد. در این تحقیق به منظور بررسی بهبود خواص مکانیکی از فرایند پوشش دهی مکانیکی سطح (۳۰٪) با استفاده از فرآیند آسیاکاری مکانیکی استفاده گردید. جهت ساخت پوشش از پودرهای مس، نیکل و نانو ذرات سیلیس، بر روی بستر فولادی، در دمای اتاق و تحت اتمسفر محیط، در زمان‌های مختلف آسیا استفاده گردید. ترکیب شیمیایی مخلوط پودر مصرفی در غالب نمونه‌های سری ۱ (۳۰٪ مس) و نمونه‌های سری ۲ (۳۰٪ نیکل) در نظر گرفته شد. نفوذ دو جانبه‌ی عناصر نیکل و مس در طول آسیاکاری منجر به ایجاد پوشش لایه‌ای و تشکیل محلول جامد Ni-Cu بر سطح نمونه‌ها می‌شود. بررسی مشخصات میکرو ساختاری سطح پوشش با استفاده از آنالیزهای متعدد از جمله: میکروسکوپ الکترونی روبشی FE-SEM، طیف سنجی اشعه ایکس با انرژی پراکنده EDS و آنالیز زبری سطح و سایش نشان داد که با استفاده از روش و شرایط عملیاتی مناسب، ضخامت لایه پوشش تشکیل شده در سری ۱ (۳۰٪ مس) بیشتر از سری ۲ (۳۰٪ نیکل) می‌باشد. نتایج پراش اشعه‌ی X (XRD) تشکیل نانو کریستال‌های محلول‌های جامد را اثبات نمود. تاثیر افزودن نانوذرات SiO₂ به مخلوط پودر باعث بهبود خواص مکانیکی گردید. نتایج تست سایش حاکاکی از بهبود مقاومت به سایش در اثر تشکیل این پوشش می‌باشد.

پوشش دهی مکانیکی سطح (SMC)، نانو ذرات سیلیس،
محلول جامد نانو ساختار Ni-Cu، زمان آسیاکاری

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

از آنجایی استفاده از لوله های با قطر کم در صنایع مختلف نفت، گاز و پتروشیمی از گستردگی بالایی برخوردار است، از طرفی پوشش دهی این لوله ها همواره یکی از مسائل صنعت محسوب می شود، در این تحقیق، استفاده از روشی بر پایه آلیاژ سازی مکانیکی به منظور تولید پوشش پیشنهاد می گردد. آلیاژ سازی مکانیکی روشی بسیار کارا جهت تولید نانو ساختارها، پایدار کردن فازهای شبه پایدار و محلولهای جامد فوق اشباع [۱]، و نیز تولید آلیاژهای آمورف در انواع سیستم های آلیاژی می باشد. در فرایند آلیاژ سازی مکانیکی از برخورد گلوله ها به ذرات پودر در یک آسیا گلوله ای پر انرژی استفاده می شود [۲]. آنچه در آلیاژ سازی مکانیکی اتفاق می افتد در واقع فرایندی پیچیده ای است متشکل از شکست، تغییر شکل، جوش سرد و نفوذ در فواصل کم [۳]، در حالی که حداکثر دمای ماکروسکوپی جین فرآیند به ۵۰ درجه سانتیگراد نمی رسد [۴]. در این فرآیند، ترکیبات اولیه توسط برخورد های پر انرژی بین گلوله ها آسیا می شوند که انواع مختلف واکنش ها توسط نفوذ در اتم ها و سطوح نانو کریستالی به وقوع می پیوندد [۵، ۶]. در آلیاژ سازی مکانیکی سیستم های شکل پذیر، فشار برخورد گلوله ها باعث می شود پودرهای فلزی مسطح و سخت کاری شوند. در حین آسیاکاری سطح گلوله ها و دیواره های داخلی محفظه پیوسته تحت برخورد گلوله ها قرار دارند که منجر به پوشیده شدن آنها توسط پودر می گردد [۷، ۸]. آلیاژ های Ni-Cu دارای کاربردهای زیادی در صنایع مختلف از جمله؛ پوششهای مغناطیسی و کاربردهای با مقاومت بالا در برابر خوردگی هستند [۹، ۱۰]. بت و همکاران [۱۱] نشان داد که آلیاژ سازی مکانیکی بر روی سیستم Ni-Cu منجر به تغییرات اندازه ذرات و در نتیجه تغییر در دمای کوری این ترکیب می گردد. دوریوالت و همکاران [۱۲] دریافتند که خواص نانو ساختارها با عیوب موجود در آنها بسیار به هم مرتبط می باشد، همچنین آنها توانستند با استفاده از روش آلیاژ سازی مکانیکی در سیستم Ni-Cu به اندازه کریستالیت در حدود کمتر از ۵۰ نانومتر دست یابند. گروپاز و همکاران [۱۳، ۱۴] یافتند که ۷۰٪ کریستالیت های سیستم Cu-20%Ni پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۲۴۰ ساعت آسیاکاری به ترتیب دارای اندازه کمتر از ۳۵، ۲۲ و ۱۶ نانومتر خواهند داشت. آنها مکانیزم غالب تغییر شکل ذرات را در این سیستم دوتایی، لغزش عنوان کردند، در حالی قبلا هلسترن [۱۵] این مکانیزم را ناشی از فرآیندهای برشی اعلام کرده بود. کریمیگی و همکاران [۱۶] نشان دادند که حین فرایند آلیاژ-

سازی مکانیکی در سیستم Cu-Ni، تغییرات ساختاری و تغییرات پارامتر شبکه برای فازهای غنی از نیکل به مراتب شدیدتر از فازهای غنی از مس می باشد. از آنجایی که مطالعات اندکی جهت ساخت پوشش با استفاده از روش پوشش دهی مکانیکی سطح (SMC) صورت گرفته است، در تحقیق حاضر، با استفاده از این روش در حضور ورق فولاد ضد زنگ و مخلوط پودرهای مس، نیکل و نانو ذرات سیلیس، پوشش دهی جداره داخلی لوله ها مورد بررسی قرار گرفت.

۲- بخش تجربی

۲-۱- آماده سازی نمونه

گلوله های فولادی در دو اندازه ۵ و ۹ میلیمتری به ترتیب تعداد ۷ و ۳۰ عدد، با وزن کل گلوله ها معادل ۱۴۴/۲ گرم و پودر نیکل (با خلوص بیش از ۹۹٫۹۹٪، ۴۵ μm) و پودر مسی (با خلوص بیش از ۹۹٫۹۹٪، ۴۵ μm) و نانو ذرات سیلیس (با خلوص بیش از ۹۹٫۹۹٪، ۷۰ nm) به داخل محفظه آسیا ریخته شد و محفظه در داخل glove box تحت اتمسفر آرگون قرار گرفت [۱۷]. فرآیند آسیاکاری در آسیا Fritsch Pulverisette-6 انجام شد. حین عملیات آسیاکاری ذرات پودر در اثر فشار و ضربه گلوله به سطح نمونه چسبیده و بر روی آن مجتمع می گردند و در اثر تکرار این ضربات علاوه بر افزایش ضخامت پوشش، نفوذ مکانیکی اتمها در ساختار کریستالی یکدیگر نیز اتفاق می افتد. به منظور جلوگیری از بالا رفتن بیش از حد دمای محفظه، پس از ۲۰ دقیقه چرخش محفظه، ۴ دقیقه استراحت در نظر گرفته شد. همچنین جهت جلوگیری از اکسیداسیون پودرهای سنتز شده پس از اتمام عملیات آسیاکاری و سرد شدن محفظه آسیا، درب محفظه باز شده، پودر و گلوله های جهت انجام آنالیزهای بعدی از داخل محفظه خارج گردیدند. در گروه ۱ نسبت وزنی مخلوط Ni-30%Cu و در گروه ۲ نسبت وزنی مخلوط Ni-70%Cu استفاده گردید. در هر دو گروه معادل ۱٪ وزنی پودر سیلیس (SiO_۲) به مخلوط پودرها اضافه گردید.

به منظور آماده سازی نمونه ها جهت انجام آنالیز، ورق های فولادی پوشش دهی شده تولیدی برای هر نمونه پس از انجام مانع سرد، برش عرضی و پولیش سطح مقطع عرضی ورق فولادی جهت انجام آنالیزهای مختلف و بررسی پوشش آماده شد. سپس ورق های فولادی تولیدی، به همراه مقداری از پودر

در طول آسیاکاری، ذرات مس، نیکل و نانو ذرات سیلیس در بین گلوله ها به دام افتاده و بر روی سطح ورق فشرده می شوند. در زمان آسیاکاری ۱۰ ساعت، ذرات مسطح شده به صورت ناپیوسته و غیریکنواخت شکل گرفته و توسط جوش سرد به صورت لایه لایه سطح نمونه را می پوشانند. همانطور که در قسمت الف ملاحظه می گردد، در عمق ۶ میکرومتری از سطح پوشش، نیکل و مس کمتر در هم حل شده اند و اختلاط کمتری رخ داده است، چون پیک های مربوط به مس و نیکل از هم فاصله زیادی دارند. در قسمت ب که مربوط به زمان آسیاکاری ۲۰ ساعت می باشد، مشاهده می گردد که در این نمونه نیز ساختار لایه لایه می باشد، ولی نسبت به نمونه ی ۱۰ ساعت، اختلاط بیشتری رخ داده است و ضخامت لایه ها کمتر شده است و با افزایش زمان آسیاکاری غلظت نیکل و مس به هم نزدیک شده اند. در قسمت ج که مربوط به نمونه ی ۳۰ ساعت می باشد، مشاهده می گردد که ساختار لایه لایه حذف شده است و پوشش ایجاد شده، یکنواخت، همگن و غنی از مس می باشد. با توجه به شکل ۲ (الف)، که زمان آسیاکاری ۵ ساعت را نشان می دهد، پوشش تشکیل شده دارای ضخامت بسیار کم در حدود ۳ میکرومتر می باشد که دارای درصد بالایی از پودر مس می باشد. در قسمت (ب) در زمان آسیاکاری ۱۰ ساعت، دارای پوششی با ضخامت

باقیمانده، جهت بررسی سطح خارجی آن توسط الکترونی روبشی FESEM مورد استفاده قرار گرفت و مقداری از پودر باقیمانده، جهت بررسی طیف سنجی پراش اشعه ایکس XRD مورد استفاده قرار گرفت، سپس از ورقه های فولادی باقیمانده تست سایش و تست زبری گرفته شد. جهت تهیه برش عرضی از سطح مقطع نمونه ها، از دستگاه برش نیمه اتوماتیک struers (Laboforce-3, Labopol-1) استفاده گردید. ضخامت پوشش تشکیل شده سطح نمونه ها، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی FESEM اندازه گیری شد. برای تعیین ترکیب فازها در پوشش، از آنالیز پراش اشعه ایکس XRD با تشعشع $Cu K\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) در ۳۵ kv و ۱۵ استفاده گردید.

۲-۲- مشخصات میکرو ساختاری:

روش ویلیامسون هال:

اندازه ی دانه در پودرهای باقی مانده (D) با استفاده از رابطه ویلیامسون-هال اندازه گیری شد [۱۸، ۱۹].

$$\beta \cos \theta = \frac{k \cdot \lambda}{D} + \epsilon \sin \theta$$

که θ زاویه ی پراش براگ، D اندازه ی کریستال، ϵ کرنش داخلی میانگین، β پهنا ی قله ی پراش در نصف ماکسیمم شدت (در رادیان) و K ثابت شرر (۰/۹۱) می باشد.

روش کوهن:

برای محاسبه ی پارامتر شبکه با کمترین خطا از روش کوهن که حاصل حل دو معادله ی زیر است، استفاده گردید.

$$\sum a \sin^2 \theta = A \sum \alpha^2 + C \sum \alpha \delta$$

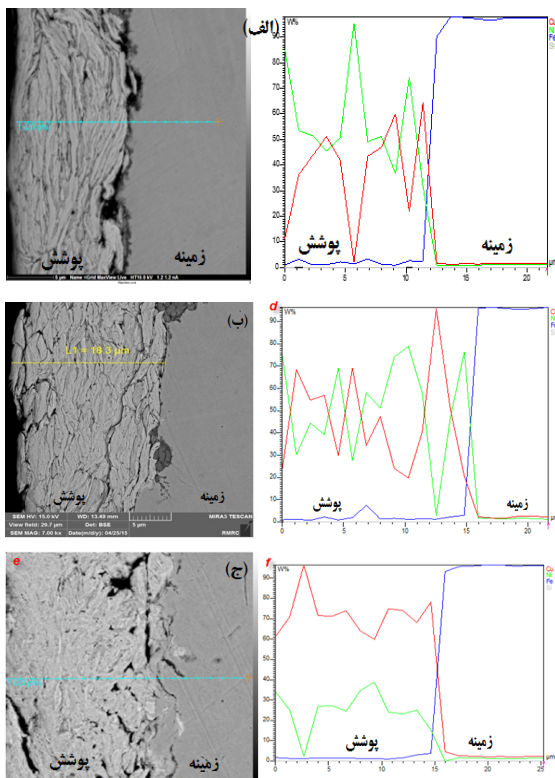
$$\sum \delta \sin^2 \theta = A \sum \alpha \delta + C \sum \delta^2$$

که در آن $\alpha = (l^2 + k^2 + h^2)$ و $A = \lambda^2 / 4a_0^2$ و C عددی ثابت و $\delta = 10 \sin^2 (2\theta)$ می باشد.

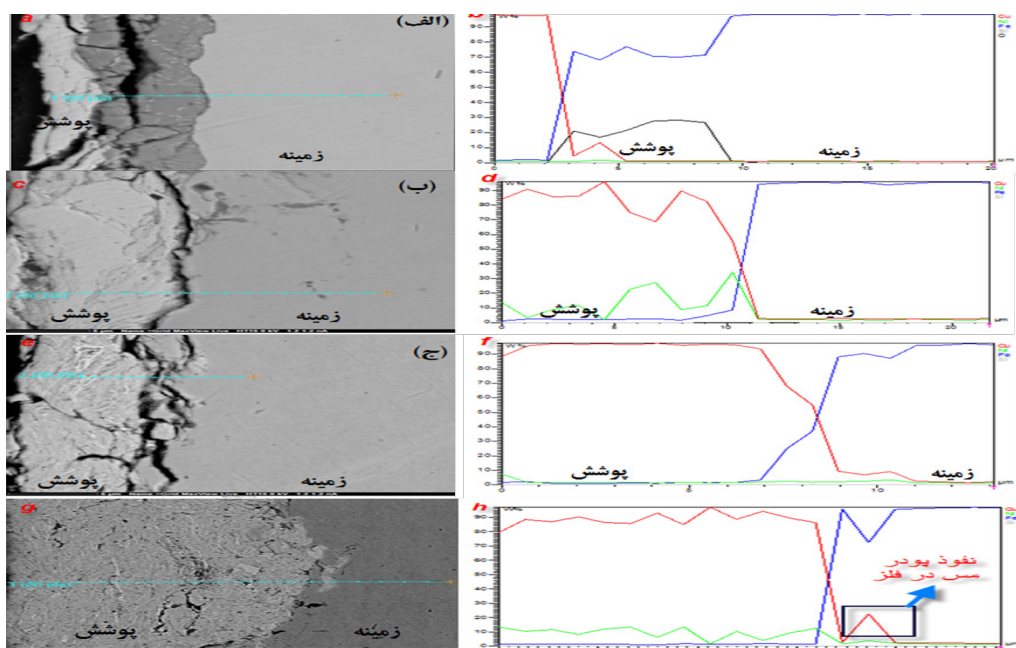
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آنالیز SEM-EDS

به منظور تعیین ترکیب شیمیایی لایه پوشش و همچنین میزان اختلاط نیکل و مس در یکدیگر، از آنالیز خطی، توسط آنالیز EDS استفاده گردید، که تصاویر نتایج آنالیز خطی مربوط به نمونه های سری ۱ در شکل ۱ ارائه گردیده است.



شکل ۱) تصاویر برش عرضی و نتایج EDS برای نمونه های سری ۱ (۳۰٪ مس) در بزرگنمایی ۷۰۰۰ پس از: الف) ۱۰ ساعت، ب) ۲۰ ساعت، ج) ۳۰ ساعت

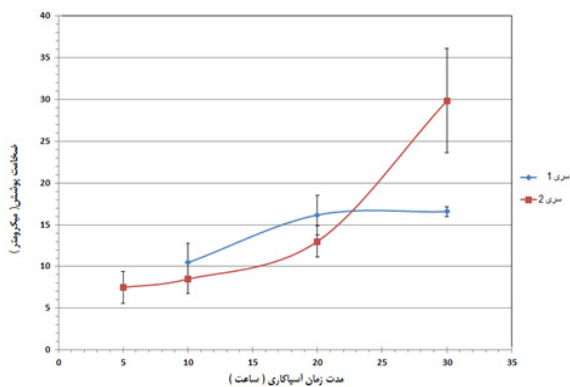


شکل ۲) تصاویر برش عرضی ونتایج EDS برای نمونه های سری ۲ (۳۰٪ نیکل) در بزرگنمای ۷۰۰۰ پس از: الف) ۵ ساعت، ب) ۱۰ ساعت، ج) ۲۰ ساعت، د) ۳۰ ساعت

عدم افزایش ضخامت پوشش در نمونه های سری ۱، در زمان های ۲۰-۳۰ ساعت مشاهده می گردد.

۳-۳- نتایج بررسی میانگین درصد عناصر

شکل ۴، مربوط به تغییرات نتایج میانگین درصد عناصر در کل نقاط اسکن شده بر حسب مدت زمان آسیاکاری برای نمونه های سری ۱ و ۲ می باشد. به طور کلی با افزایش زمان آسیاکاری کار سختی زیاد و پوشش ترد می شود، با توجه به اینکه سختی نیکل در مقایسه با مس بیشتر است، احتمال تاثیر کارسختی و در نتیجه شکستن و جدایش پوشش از نمونه افزایش می یابد، در نتیجه غلظت نیکل، روند نزولی به خود خواهد گرفت. این درحالی است که، به علت نرم تر بودن مس در مقایسه با نیکل، ضخامت پوشش و غلظت مس در نمونه های سری ۲ (۳۰٪ نیکل) روند افزایشی داشته است.

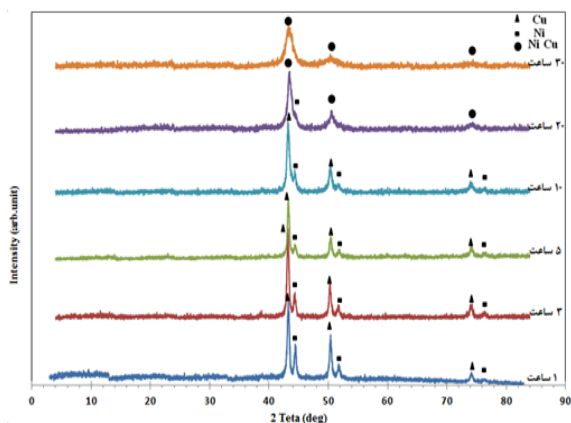


شکل ۳) نمودار ضخامت پوشش بر حسب زمان آسیاکاری (ساعت، ج) ۲۰ ساعت، د) ۳۰ ساعت

۱۱ میکرومتر می باشد و درصد بالایی از پوشش از پودر نیکل تشکیل شده است. در قسمت (ب) در زمان آسیاکاری ۲۰ ساعت، پوششی تقریباً یکنواخت در حدود ۸ میکرومتر تشکیل شده است و در قسمت (ج) در زمان آسیاکاری ۳۰ ساعت، پوشش دارای بیشترین ضخامت در بین بقیه نمونه هاست، که پوششی در حدود ۳۲ میکرومتر ایجاد شده است و در حدود عمق ۳۵-۴۰ میکرومتر مقداری از پودر مس در فلز حل شده است، که در شکل ۲ نشان داده شده است. در این پوشش، عناصر در لایه های بیرونی در هم حل شده اند اما هر چه به سمت داخل می رویم، پوشش لایه لایه می شود، چون لایه های بیرونی دیرتر روی فلز قرار گرفتن و بیشتر توسط گلوله ها ضربه خوردن، بنابراین در هم حل شده اند.

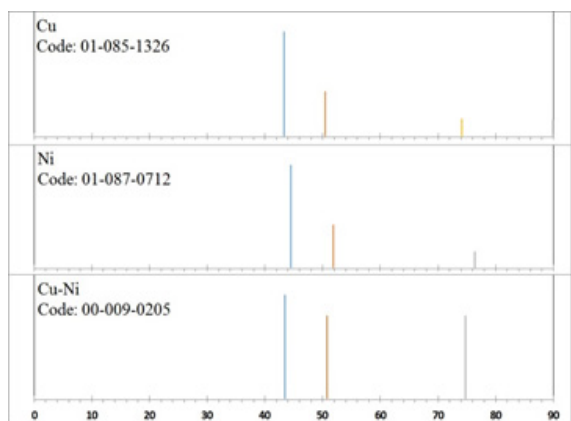
۳-۲- نتایج بررسی ضخامت پوشش

با توجه به نمودار شکل ۳، ضخامت پوشش در سری ۱ بیشتر از سری ۲ است و در نمونه سری ۱ در زمان های ۲۰ و ۳۰ ساعت به ضخامت پوشش تقریباً یکسانی رسیده است ولی در نمونه ی سری ۲، در زمان آسیاکاری ۳۰ ساعت ضخامت پوشش تا حدود ۳۰ میکرومتر افزایش می یابد. ضخامت پوشش در زمان های کمتر برای نمونه های سری ۱ بیشتر از نمونه های سری ۲ است، چرا که سختی نیکل و زمینه (فولاد) به هم نزدیک است، اما با افزایش زمان آسیاکاری، به علت ضربات متوالی، سختی پوشش (خصوصاً نیکل) افزایش یافته و خاصیت تردی به خود می گیرد در نتیجه احتمال شکست پوشش افزایش می یابد، لذا

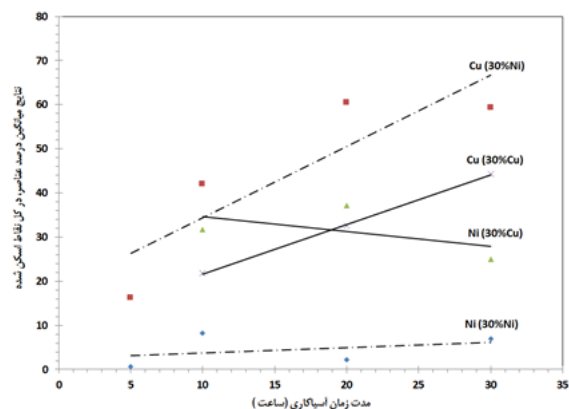


شکل ۶) الگوهای پراش XRD پودرهای باقیمانده برحسب زمان آسیاکاری برای نمونه سری ۲ (۳۰٪ نیکل)

نیکل و مس از بین رفته و به جای آنها، پیک محلول جامد نیکل - مس ایجاد گردیده است، به طور کلی با افزایش زمان آسیاکاری، شرایط برای نفوذ تدریجی عناصر نیکل و مس در شبکه کریستالی یکدیگر فراهم گردیده و در نهایت منجر به تشکیل محلول جامد نیکل-مس می‌گردد که در نمونه ۳۰ ساعته، پیک مربوطه پهن تر شده است. این مطلب تایید کننده تشکیل محلول جامد Cu-Ni بعد از حدود ۱۰ ساعت آسیاکاری می باشد. که علت آنرا می توان به انحلال جزئی عنصر نیکل و مس در داخل نمونه و در نتیجه تشکیل محلول جامد مس و نیکل مرتبط دانست [۱۳]. الگوی پراش اشعه ایکس، برای نمونه سری ۲ (۳۰٪ نیکل) در شکل ۶ ارائه گردیده است. چون درصد عنصر مس در این سری از نمونه بیشتر است، شانس قرار گرفتن پودر مس بین گلوله ها بیشتر می شود و تشکیل لایه مس بر روی سطح نمونه سریع تر اتفاق خواهد افتاد، بنابراین دارای پیک بلندتری است، که در نمونه های سری اول



شکل ۷) الگوی استاندارد پراش XRD برای مس و نیکل خالص و محلول جامد Cu-Ni

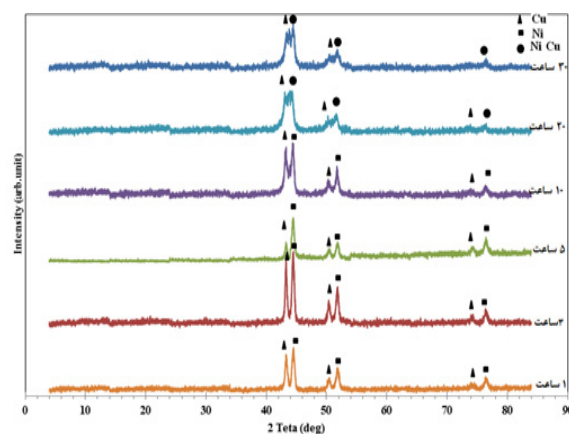


شکل ۸) نتایج میانگین درصد عناصر در کل نقاط اسکن شده بر حسب مدت زمان آسیاکاری، برای نمونه های سری ۱ و ۲

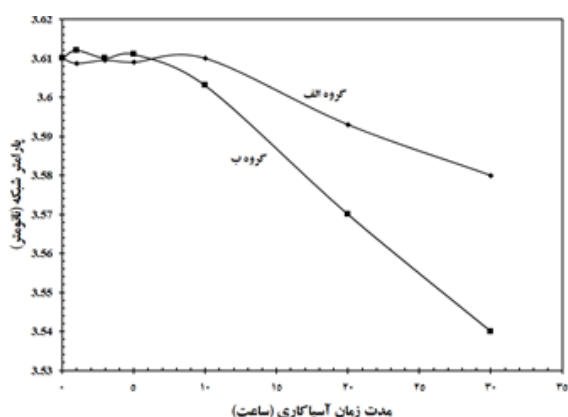
۳-۴- نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس

الگوی پراش اشعه ایکس XRD، برای نمونه های سری ۱ (۳۰٪ مس) در شکل ۵ ارائه گردیده است. به طور کلی با افزایش زمان آسیاکاری، شرایط برای نفوذ تدریجی عناصر نیکل و مس در شبکه کریستالی یکدیگر فراهم گردیده و در نهایت منجر به تشکیل محلول جامد نیکل-مس می‌گردد [۱۸].

هر عنصر دارای یک پیک می باشد، و چون درصد عنصر نیکل در این سری از نمونه بیشتر است، شانس قرار گرفتن نیکل بین گلوله ها بیشتر می شود و تشکیل لایه نیکل بر روی سطح نمونه سریع تر اتفاق خواهد افتاد، بنابراین دارای پیک بلندتری است، و برای نمونه های با زمان آسیاکاری ۱ تا ۱۰ ساعت، پیک های نیکل و مس به طور مجزا قابل مشاهده می باشد، که بیانگر وجود هر دو عنصر نیکل و مس بطور جدا گانه می باشد. با افزایش زمان آسیاکاری، پیک های مجزای



شکل ۵) الگوهای پراش XRD پودرهای باقیمانده برحسب زمان آسیاکاری برای نمونه سری ۱ (۳۰٪ مس).



شکل ۹) منحنی تغییرات (الف) پارامتر شبکه و (ب) غلظت اکسیژن بر حسب سرعت آسیاکاری برای نمونه های گروه ۱ و ۲

آسیاکاری موجب ورود ذرات نیکل به ساختار شبکه‌ی مس شده و به واسطه‌ی شعاع اتمی کوچک‌تر نیکل نسبت به مس، پارامتر شبکه کاهش یافته است. دوماً، افزایش دما و گذر زمان حین عملیات آسیاکاری عاملی برای جذب بیش تر اکسیژن محسوب می‌شود و پارامتر شبکه به واسطه‌ی ورود مقدار بیشتر اکسیژن که به صورت بین نشین در ساختار کریستالی مس قرار گرفته‌اند، افزایش یافته است [۴۳]. در مجموع، برآیند این دو عامل سبب ثابت باقی ماندن پارامتر شبکه شده است (شکل ۹)؛ اما ملاحظه می‌گردد که در مدت زمان ۲۰ و ۳۰ ساعت به خاطر ورود مقدار زیاد نیکل در شبکه‌ی اتمی مس، پارامتر شبکه به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در گروه ۱ روند کاهش پارامتر شبکه آهسته تر می‌باشد.

۳-۷- نتایج آنالیز سایش سطح

شکل ۱۰ نشان دهنده تغییرات وزن نمونه بر حسب مدت زمان تست سایش رسم شده است. بر طبق نمودار، نمونه سری ۱ با زمان آسیاکاری ۳ ساعت دارای پوشش و استحکام بهتر و محکمتری نسبت به سایر نمونه هاست، و همچنین با مقایسه منحنی‌ها، مشخص می‌شود که نمونه‌های سری ۱ (۳۰٪ مس)، از نمونه سری ۲ (۳۰٪ نیکل)، دارای پوشش مستحکمتری است. دلیل نتایج تست سایش را می‌توان چنین توضیح داد که، با توجه به این که سختی نیکل، بیشتر از مس می‌باشد، و در نمونه سری ۱ درصد بیشتری از نیکل در پوشش وجود دارد، در نتیجه نمونه سری ۱ دارای پوشش مستحکمتری نسبت به نمونه سری ۲ می‌باشد. ضمناً، همانطور که در شکل ملاحظه می‌گردد، مقاومت به سایش در نمونه بدون ذرات سیلیس، به مراتب کمتر از نمونه‌های حاوی نانوذرات سیلیس می‌باشد.

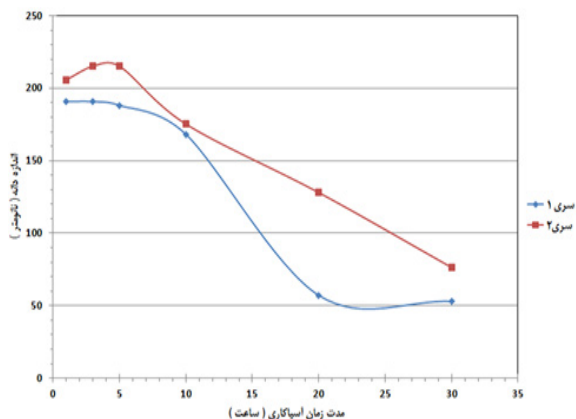
به وضوح مشخص می‌باشد، و با افزایش زمان آسیاکاری، شدت پیک اصلی عنصر مس و نیکل رو به کاهش و پهن شدن می‌باشد، و در زمان‌های آسیاکاری ۲۰ و ۳۰ ساعت، تشکیل محلول مس و نیکل را مشاهده می‌کنیم. از مقایسه این دو شکل و همچنین توضیحاتی که در بخش بررسی پارامتر شبکه ارائه شده است، می‌توان نتیجه گرفت که نیکل بیشتر در مس حل می‌شود تا مس در نیکل. ضمناً، در شکل ۷ الگوی استاندارد پراش XRD برای مس و نیکل خالص و محلول جامد Cu-Ni نشان داده شده است.

۳-۵- بررسی تغییرات اندازه دانه

با توجه به نمودار تغییرات اندازه دانه بر حسب مدت زمان آسیاکاری شکل ۸، مشاهده می‌شود که با افزایش زمان آسیاکاری، شیب نمودار در حال کم شدن است، که نشان دهنده‌ی کاهش اندازه دانه‌ها می‌باشد. به طوری که کاهش اندازه دانه باعث نفوذ راحت تر و یکنواخت اتم‌ها به داخل ساختار شبکه عنصر مقابل خواهد شد و نهایتاً همگنی پوشش افزایش می‌یابد.

۳-۶- بررسی تغییرات پارامتر شبکه

نحوه‌ی تغییرات پارامتر شبکه‌ی کریستالی در سیستم مورد بررسی بر حسب مدت زمان آسیاکاری در شکل ۹ آورده شده است. بر اساس این نمودار، در زمانهای کمتر از ۲۰ ساعت تغییرات چندانی در پارامتر شبکه ملاحظه نمی‌گردد. در واقع با افزایش مدت زمان آسیاکاری تا قبل از ۲۰ ساعت روند تقریباً ثابتی برای پارامتر شبکه مشاهده می‌گردد؛ که عوامل احتمالی زیر می‌توانند بر این فرآیند حاکم باشند: اولاً، افزایش تعداد ضربات و در نتیجه افزایش انرژی ذخیره شده در پودر ناشی از بالا رفتن مدت زمان



شکل ۸) نمودار تغییرات اندازه دانه بر حسب مدت زمان آسیاکاری

۴- نتیجه گیری

۱- تصاویر مربوط به برش عرضی از سطح مقطع نمونه ها و تست سایش برای سری ۱ (۳۰٪ مس) و سری ۲ (۳۰٪ نیکل)، در شرایط کاملا یکسان نشان می دهد که پوشش تشکیل شده برای نمونه سری ۱ (۳۰٪ مس) از لحاظ یکنواختی و ترکیب شیمیایی از شرایط بهتری برخوردار است.

۲- با افزایش زمان آسیاکاری، ساختار لایه لایه ی پوشش رفته رفته به ساختار یکنواخت و همگن تبدیل می شود.

۳- از مقایسه دو شکل نمودار پراش اشعه ایکس XRD، برای سری ۱ (۳۰٪ مس) و سری ۲ (۳۰٪ نیکل) می توان نتیجه گرفت که نیکل بهتر در مس حل می شود تا مس در نیکل، و همچنین با افزایش زمان آسیاکاری، کاهش اندازه دانه ها می یابد. اندازه دانه در لایه سطحی با ابعاد نانومتری برای نمونه های هر دو سری کاهش یافته و شرایط برای نفوذ مکانیکی و شکل گیری لایه محلول جامد نیکل - مس بر روی سطح نمونه ها فراهم می گردد.

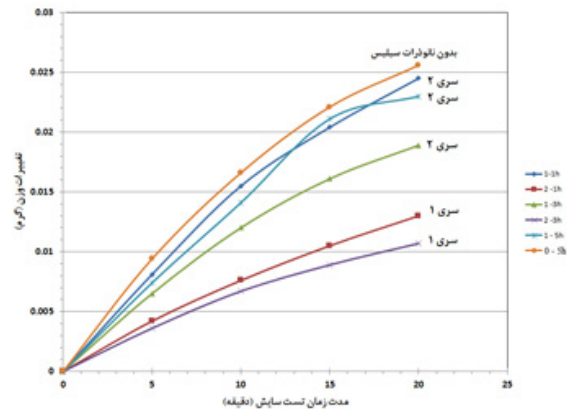
۴- با توجه به نتایج بررسی مقاومت به سایش مشخص گردید که، نمونه های سری ۱ (۳۰٪ مس)، از نمونه سری ۲ (۳۰٪ نیکل)، دارای پوشش مقاوم تری هستند.

۵- مقاومت به سایش در نمونه بدون ذرات سیلیس، به مراتب کمتر از نمونه های حاوی نانوذرات سیلیس می باشد.

۶- نمونه های سری ۱ (۳۰٪ مس)، از نمونه سری ۲ (۳۰٪ نیکل)، دارای زبری بیشتری هستند.

مراجع

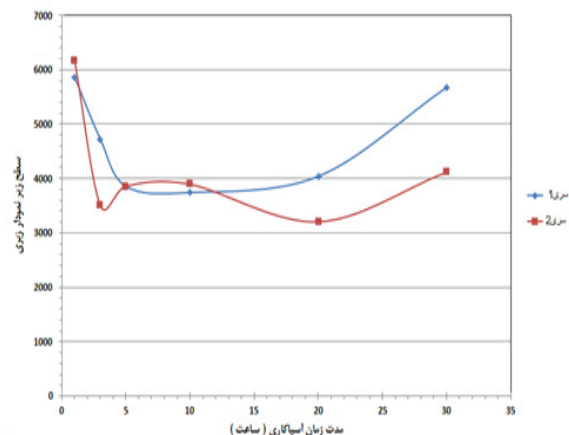
- [1] Koch, C.C., Intermetallic matrix composites prepared by mechanical alloying—a review. *Materials Science and Engineering: A*, 1998. 244(1): p. 39-48.
- [2] Suryanarayana, C., Mechanical alloying and milling. *Progress in materials science*, 2001. 46(1): p. 1-184.
- [3] El-Eskandarany, M.S., Mechanical alloying: For fabrication of advanced engineering materials. 2001: William Andrew.
- [4] Tong, W., et al., Nitriding iron at lower temperatures. *Science*, 2003. 299(5607): p. 686-688.
- [4] Ba (Zr 0.6 Ti 0.4) O 3 solid solutions. *Materials Chemistry and Physics*, 2007. 105(2): p. 286-292.



شکل ۱۰) نمودار تغییرات وزن بر حسب مدت زمان سایش

۳-۸- نتایج آنالیز زبری سطح

با توجه به شکل ۱۱، نمونه ها با زمان آسیاکاری ۱ و ۳ ساعت، به علت درشتی ذرات پودر زبری سطح بیشتر است. در نمونه ی با زمان آسیاکاری ۵ ساعت، با مقایسه با نمودار سایش، به این نتیجه می رسیدیم که مقاومت به سایش نمونه ۵ ساعت کمتر است، بنابراین چون مقاومت به سایش آن کمتر است، بنابراین زبری آن هم کمتر است، چون با زدن ضربات گلوله به این نمونه، پودر در نمونه نفوذ کرده و زبری آن کمتر است. در نمونه آسیاکاری ۱۰ ساعت هم همین قضیه می باشد، پدیده جوش سرد که ناشی از نرمی ذرات می باشد پدیده غالب بوده و بصورت پوشش لایه لایه در تصاویر FESEM قابل مشاهده می باشد، همچنین با افزایش مدت زمان آسیاکاری در زمان های آسیاکاری ۲۰ و ۳۰ ساعت، در اثر کار سختی پدیده شکست (سخت شدن ذرات ناشی از برخورد مکرر گلوله ها) غالب می گردد، و در نتیجه ی آن ذرات درشت که ناشی از شکسته شدن لایه ها می باشند ایجاد گردیده است و باعث افزایش زبری سطح می گردد.



شکل ۱۱) نمودار زبری بر حسب مدت زمان آسیاکاری

- low-energy ball milling. *Nanostructured materials*, 1999. 11(8): p. 1123-1132.
- [15] Hellstern, E., et al. Multicomponent ultrafine microstructures. in *Proc. Mater. Res. Soc.* 1989.
- [16] Karimbeigi, A., A. Zakeri, and A. Sadighzadeh, EFFECT OF COMPOSITION AND MILLING TIME ON THE SYNTHESIS OF NANOSTRUCTURED Ni-Cu ALLOYS BY MECHANICAL ALLOYING METHOD. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 2013. 10(3).
- [17] Varalakshmi, S., M. Kamaraj, and B. Murty, Processing and properties of nanocrystalline CuNiCoZn-AlTi high entropy alloys by mechanical alloying. *Materials Science and Engineering: A*, 2010. 527(4): p. 1027-1030.
- [18] Waje, S.B., et al., X-ray diffraction studies on crystallite size evolution of CoFe₂O₄ nanoparticles prepared using mechanical alloying and sintering. *Applied Surface Science*, 2010. 256(10): p. 3122-3127.
- [19] Suryanarayana, C. and M.G. Norton, X-ray diffraction: a practical approach. *Microscopy and Microanalysis*, 1998. 4: p. 513-515.
- [6] Fuentes, J., J. Rodriguez, and E. Herrera, Processing of mechanically alloyed aluminum powder: a metallographic study. *Materials Characterization*, 2010. 61(4): p. 386-395.
- [7] Torosyan, A. and L. Takacs, Mechanochemical reaction at the interface between a metal plate and oxide powders. *Journal of materials science*, 2004. 39(16-17): p. 5491-5496.
- [8] Takacs, L. and Á. Révész, Preparation of Coatings by Mechanical Alloying. *Chemistry of sustainable Development*, 2007. 15: p. 231-235.
- [9] Tharamani, C. and S. Mayanna, Low-cost black Cu-Ni alloy coatings for solar selective applications. *Solar energy materials and solar cells*, 2007. 91(8): p. 664-669.
- [10] Baskaran, I., T.S. Narayanan, and A. Stephen, Pulsed electrodeposition of nanocrystalline Cu-Ni alloy films and evaluation of their characteristic properties. *Materials Letters*, 2006. 60(16): p. 1990-1995.
- [11] Bettge, M., J. Chatterjee, and Y. Haik, Physically synthesized Ni-Cu nanoparticles for magnetic hyperthermia. *Biomagnetic research and technology*, 2004. 2(1): p. 4.
- [12] Durivault, L., et al., Cu-Ni materials prepared by mechanical milling: their properties and electrocatalytic activity towards nitrate reduction in alkaline medium. *Journal of alloys and compounds*, 2007. 432(1): p. 323-332.
- [13] Guerrero-Paz, J. and D. Jaramillo-Vigueras, Comparison of grain size distributions obtained by XRD and TEM in milled FCC powders. *Nanostructured materials*, 1999. 11(8): p. 1195-1204.
- [14] Guerrero-Paz, J. and D. Jaramillo-Vigueras, Nanometric grain formation in ductile powders by