

توسعه پوشش‌های نانوکریستال با تبلور فاز آمورف توسط فرآیندهای پاشش حرارتی

بهرروز موحدی

گروه مهندسی نانوفناوری، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان

مهدی صالحی و محمد حسین عنایتی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت : ۸۹/۱۲/۲۰ - پذیرش : ۹۰/۲/۳۱)

چکیده

در این مقاله پوشش‌های پاشش حرارتی نانوکریستال با تبلور کنترل شده فاز آمورف بر پایه آهن توسعه یافته‌اند. بر این اساس ابتدا پودر آلیاژی آهن با ساختار آمورف و با ترکیب Fe-Cr-Mo-B-P-C-Si در حالت جامد توسط فرآیند آلیاژسازی مکانیکی ساخته شد. پس از بهینه سازی پودر ساخته شده از لحاظ مورفولوژی و توزیع اندازه ذرات، با کمک فرآیند پاشش شعله‌ای با سرعت بالا (HVOF) بر زیرلایه‌های فولاد ساده کربنی، پوشش‌هایی اعمال گردید. تغییر و تحولات ساختاری پوشش‌ها در اثر تبلور و مشخصه‌های فاز آمورف و نانوکریستال، توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و آنالیز فازی XRD مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با کنترل دقیق پارامترهای فرآیند HVOF و نحوه سرد شدن پوشش، می‌توان فاز آمورف را به صورت کنترل شده متبلور نمود و ساختارهای متنوعی شامل آمورف کامل تا نانوکریستال کامل با اندازه دانه حدود ۱۰-۲۰ نانومتر بدست آورد که به تبع آن خواص مکانیکی و سایشی بهبود یافته‌ای خواهند داشت.

واژه های کلیدی: نانوکریستال، آمورف، تبلور، پاشش حرارتی HVOF

Development of thermal spray nanocrystalline coatings by devitrification of amorphous phase

B. Movahedi

Department of Nanotechnology Engineering, Faculty of Advanced Sciences and Technologies,
University of Isfahan

M. Salehi and M. H. Enayati

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology
(Received 10 March 2011, accepted 21 May 2011)

Abstract

In this paper thermal spray nanocrystalline coatings were developed by devitrification of Fe-based amorphous phase. In this approach a new composition of Fe-Cr-Mo-P-B-C-Si amorphous powder was produced in solid state by mechanical alloying of elemental powder mixture. After optimizing the powder morphologies as well as the size distributions, some coatings were produced by high velocity oxy fuel (HVOF) on carbon steel substrates. The phase transformations of coatings during devitrification were investigated by x-ray diffractometry (XRD), and transmission electron microscopy (TEM). It was found that by carefully controlling the HVOF parameters and the rate of cooling, the amorphous phase could be crystallized in the controlled manner and the microstructures with fully amorphous and nanocrystalline phases in the range of 10-20 nm were obtained. Therefore, these coatings will have the modified mechanical and tribological properties.

Keywords: Nanocrystalline, Amorphous, Devitrification, HVOF.

E-mail of corresponding author: b.movahedi@ast.ui.ac.ir

مقدمه

یکی از کاربردی ترین روش های تولید آلیاژهای نانو ساختار، تبلور آلیاژهای آمورف است. آلیاژهای آمورف از نظر ترمودینامیکی شبه پایدار هستند؛ از این رو در صورت افزایش دما ساختار آمورف به حالت کریستالی تبدیل می شود تا انرژی آزاد آن کاهش یابد. با کنترل مرحله تبلور به نحوی که حداکثر نرخ جوانه زنی و حداقل نرخ رشد بدست آید، می توان به ساختارهای نانومتری دست یافت. همچنین با کنترل مرحله تبلور می توان آلیاژ آمورف را بطور جزئی کریستاله کرد و ساختار کامپوزیتی متشکل از فازهای نانو کریستال در زمینه آمورف، بوجود آورد [۱۱].

در این مقاله با استفاده از پودر آمورف ساخته شده توسط فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، پوشش هایی بر زیرلایه های فولاد ساده کربنی توسط فرآیند نوین پاشش حرارتی HVOF تحت شرایط مختلف اعمال شد تا ساختاری متشکل از درصدهای مختلف فازهای آمورف و نانو کریستال حاصل گردد. سپس ساختار و خواص پوشش ها با آزمون های آنالیز فازی و بررسی های میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مطالعه شدند.

مواد و روش تحقیق

پودر آمورف بر پایه آهن با ترکیب Fe-18Cr-5Mo-5P-1.5C-1.5Si-3B (درصد وزنی) توسط فرآیند آلیاژسازی مکانیکی مطابق فرآیندی که جزییات آن در مقاله های قبلی [۱۲ و ۱۳] ارایه شده است، ساخته شد. سپس این پودر توسط فرآیند غربال کردن با الک هایی با مش های ۴۰۰-۲۳۰ دانه بندی شد به طوری که جهت استفاده در فرآیندهای پاشش حرارتی مناسب گردید. اندازه و توزیع ذرات پودر توسط دستگاه تفرق لیزر^۱ مدل FRITSCH بدست آمد. فرآیند پوشش دهی باتفنگ HVOF (Metallisation Met JET II) با پارامترهایی که در جدول ۱ آورده شده است، انجام شد. از فولاد ساده کربنی (CK45) با ابعاد ۴×۵×۵ میلی متری به عنوان زیرلایه استفاده شد. قبل از عملیات پوشش دهی به منظور زدودن

یکی از روش های بهبود کیفیت سطوح استفاده از پوشش هایی با خواص مطلوب است که در این راستا کاربرد پوشش هایی با ساختار آمورف، نانو کریستال و پوشش هایی با ساختار دوگانه آمورف/نانو کریستال در چند سال اخیر مورد توجه واقع شده است. این پوشش ها با جمع خواص منحصر بفردی نظیر استحکام تسلیم بالا، سختی بالا، مقاومت سایشی عالی و تافنس مطلوب، شرایط مناسبی را در راستای بهبود کیفیت سطوح فراهم می کنند. یک ماده جامد که ساختمان اتمی آن مشابه مذاب (غیر کریستالی) باشد را آمورف می گویند. بر خلاف کریستال ها در مواد آمورف نظم اتمی محدود به فواصل کوتاه است و به همین دلیل خواص مواد آمورف از خواص مواد کریستالی متمایز می شود. نکته قابل توجه در مورد مواد آمورف این است که به دلیل عدم وجود سیستم های لغزشی در این مواد، رفتار پلاستیکی آنها کاملاً با مواد کریستالی، متفاوت است که این تفاوت بر خواص تریبولوژیکی آنها تاثیر بسزایی دارد [۱-۵].

یکی از دغدغه هایی که امروزه مهندسیین سطح در زمینه پوشش های پاشش حرارتی با آن درگیر هستند، چگونگی کنترل ریز ساختار این پوشش ها به منظور دستیابی به پوشش هایی با خواص شیمیایی (مقاومت به خوردگی در محیط های خورنده)، خواص فیزیکی (پایداری حرارتی) و خواص مکانیکی مطلوب نظیر سختی، استحکام چسبندگی، تافنس و مهم تر از همه مقاومت سایشی است. از آنجایی که این نوع پوشش ها از طریق ذوب ماده پوششی در شعله و پاشش آن بر سطح قطعه با سرعت بالایی شکل می گیرند، لذا ریز ساختار بهم ریخته ای تشکیل می شود که کنترل آن در دستیابی به خواص مورد نظر کار دشواری است. در بین روش های نوین پوشش دهی سطح، روش های پاشش حرارتی نظیر پاشش پلاسمایی و HVOF به دلیل ایجاد پوشش هایی با کیفیت برتر و نیز امکان کنترل دقیق پارامترهای پوشش دهی، بیشتر برای ساخت پوشش های آمورف/نانو ساختار مورد توجه قرار گرفته اند [۱ و ۶-۱۰].

^۱.Laser Scattering

جدول ۱. پارامترهای پاشش حرارتی HVOF بر حسب نوع ریزساختار.

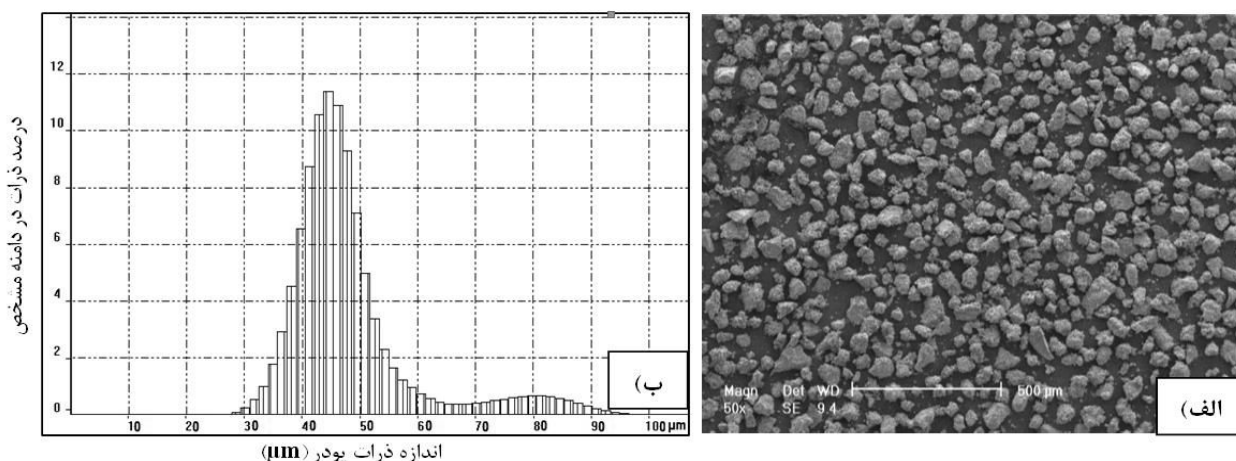
پارامترهای پوشش دهی	نمونه بر حسب ریز ساختار		
	پوشش آمورف (H ₁)	پوشش آمورف-نانو کریستال (H ₂)	پوشش نانو کریستال (H ₃)
Oxygen gas flow rate (SLPM)	۸۳۳	۶۸۲	۵۶۰
Fuel (Kerosene) flow rate (SLPM)	۰/۳۷	۰/۲۱	۰/۱۴
Fuel/Oxygen (Vol%)	۰/۰۴۴	۰/۰۳۱	۰/۰۲۵
Powder feed rate (g min ⁻¹)	۳۵	۳۵	۳۵
Spray distance (mm)	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
Scanning velocity (mm s ⁻¹)	۵۰	۵۰	۵۰
Deposit thickness (μm)	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
Nozzle length (mm)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
Compress Ar cooling	yes	yes	yes

نتایج و بحث

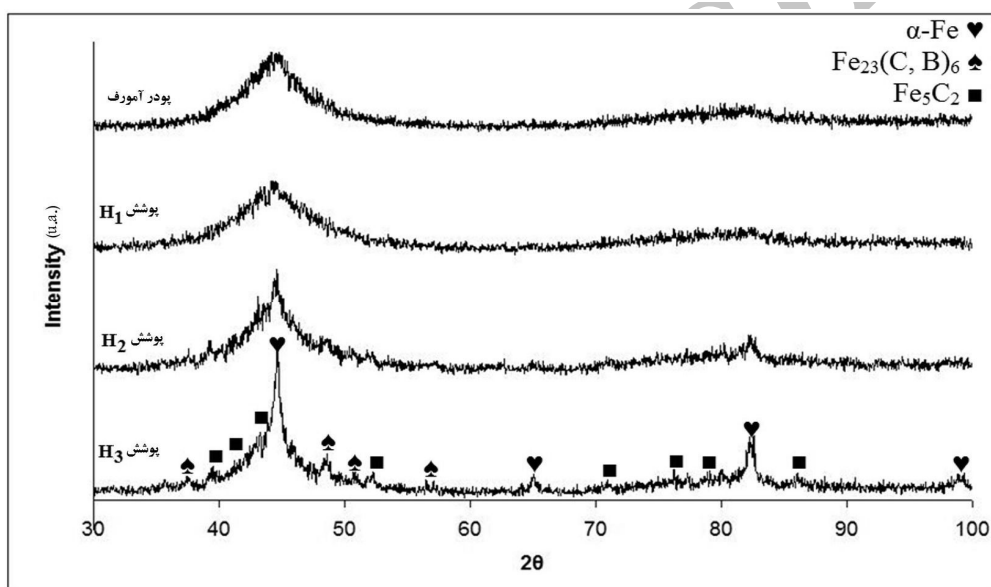
شکل ۱-الف) تصویر SEM از مورفولوژی پودر آمورف و شکل ۱-ب) نمودار توزیع اندازه ذرات آن را بعد از دانه بندی نشان می دهند. همان طور که مشاهده می شود عمده توزیع اندازه ذرات پودر در محدوده ۵۰-۴۰ μm است که مقدار ۶۰ درصد را به خود اختصاص داده است. نکته قابل توجه باریک بودن دامنه توزیع اندازه ذرات است که منجر به یکنواختی بالای آن شده است؛ به طوری که چنین پودری در حین پاشش حرارتی بالاترین میزان سیلان را داشته و پوششی با کیفیت بالا ایجاد می کند.

شکل ۲ نمودارهای پراش پرتو ایکس پودر پاششی و نمونه های پوششی تحت سه شرایط متفاوت نسبت سوخت به اکسیژن (جدول ۱) را نشان می دهند. همان طور که مشاهده می شود الگوی پراش برای پودر آمورف تنها از یک پیک کاملاً پهن که مشخصه ساختارهایی با نظم کم دامنه می باشند، تشکیل شده است. الگوی پراش پرتو ایکس پوشش H1 نیز مشابه پودر پاششی است که نشان دهنده این است که این پوشش شاید ساختار کاملاً آمورفی داشته باشد. در پوشش H2 میزان پهن شدگی پیک آمورف کمتر شده است و در راس آن یک پیک شارپ مشاهده می شود که گویای تبلور جزئی فاز آمورف و تشکیل محلول جامد α-Fe است.

اکسیدها و چربی های موجود بر سطح زیرلایه ها، تمامی نمونه ها با ماسه آلومینایی با ابعاد ۵۴۰ μm ماسه پاشی شد. سپس سطح ماسه پاشی شده توسط فرآیند آلتراسونیک کاملاً تمیز گردید. نمونه ها در نگه دارنده هایی که برای این کار طراحی شده بود، نصب و پس از آن جهت پوشش دهی در مقابل تفنگ HVOF قرار گرفت. از گاز آرگون با فشار بالا به منظور خنک کردن نمونه ها در حین پوشش دهی استفاده شد. از پراش پرتو ایکس (XRD) مدل X-Pert-MPD تحت ولتاژ ۴۰ kV و جریان ۳۰ mA به منظور شناسایی تغییرات فازی و میکروسکوپ الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا (HRTEM) مدل Jeol-JEM-2010 و با ولتاژ ۲۰۰ kV جهت آنالیز ساختاری پوشش ها استفاده گردید. به منظور اندازه گیری مقدار ریز سختی و نحوه تغییرات آن در پوشش ها از دستگاه ریز سختی سنج مدل Matsuzawa MXT70 با دقت ±۵ Hv و تحت بار ۲۵ gf استفاده گردید. اندازه گیری ضریب اصطکاک پوشش ها توسط آزمون سایش پین روی دیسک و بر اساس استاندارد ASTM G99-95a انجام گرفت. در این آزمون از دستگاه تریبومتر CSEM با گلوله آلومینایی با زبری ۰/۰۲ و به قطر ۶ mm تحت بار عمودی ۱۵ N استفاده شد. سرعت لغزش ۱۰ cm/s و مسافت ۱۰۰۰ m برای کلیه نمونه ها در نظر گرفته شد. این آزمون برای کلیه نمونه ها در دمای ۲۵ °C و رطوبت ۳۰٪ انجام گرفت.



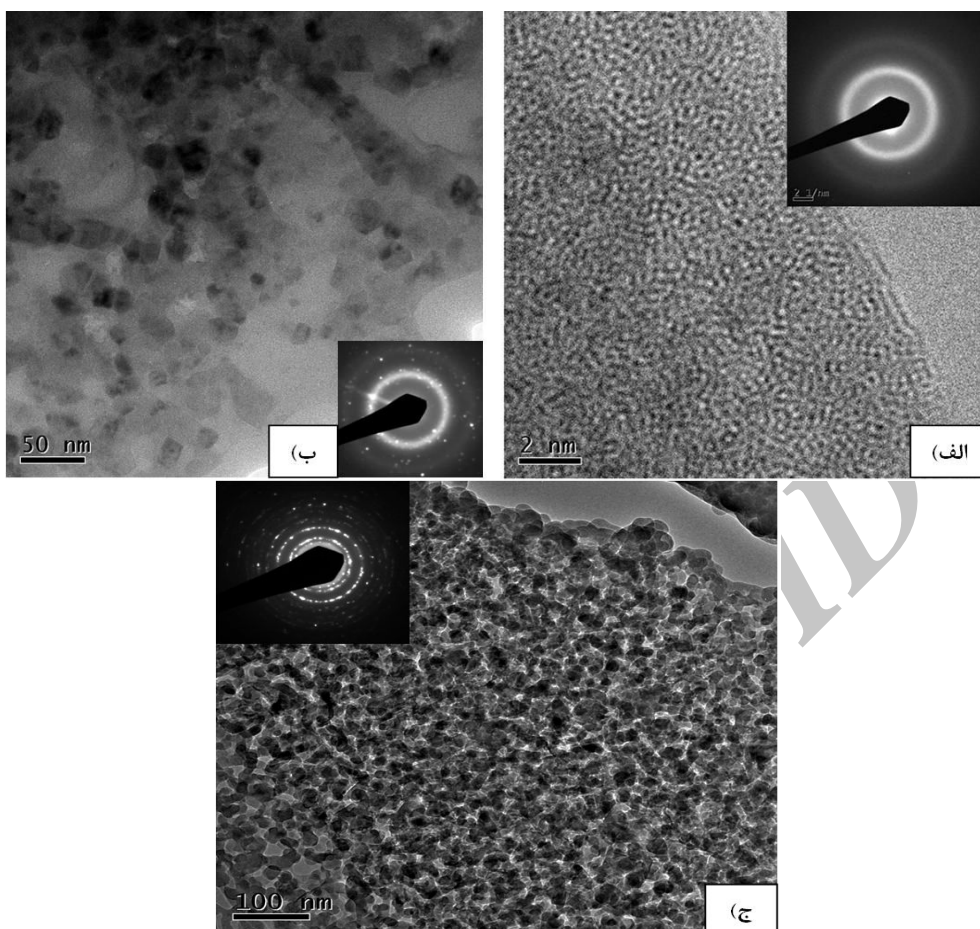
شکل ۱. الف) تصویر SEM از مورفولوژی ذرات پودر آمورف بر پایه آهن ب) نمودار درصد ذرات پودر آمورف در دامنه مشخص بعد از مراحل بهینه‌سازی.



شکل ۲. نمودارهای پراش پرتو ایکس پودر آمورف بر پایه آهن و پوشش های HVOF.

شده است. شکل ۳-الف) تصویر TEM با قدرت تفکیک بالا از پوشش H1 را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود این تصویر گویای ساختار کاملاً آمورف است و نظم کوتاه دامنه در آن به وضوح دیده می‌شود. الگوی پراش الکترونی از ناحیه انتخابی (SADP) در ضمیمه این تصویر، تنها یک حلقه پهن را نشان می‌دهد که نماینده ساختار آمورف است. شکل ۳-ب) مربوط به تصویر TEM از پوشش H2 است. در این تصویر دانه‌های نانومتری با ابعاد حدود ۲۰ نانومتر در زمینه فاز آمورف مشاهده می‌شوند. این ساختار نماینده ساختار دوگانه آمورف-نانوکریستال است که در اثر تبلور

این روند در الگوی پراش پرتو ایکس پوشش H3 بیشتر نمود پیدا می‌کند بطوری که درصد فازهای کریستالی به شدت افزایش یافته و پهن شدگی پیک آمورف اولیه نیز به کمترین میزان خود رسیده است. در این حالت مشاهده می‌شود که فازهای کریستالی کاربیدی نظیر $Fe_{23}(C, B)_6$ و Fe_5C_2 در اثر تبلور کامل فاز آمورف در حین فرآیند پاشش HVOF بوجود آمده است. مطالعات دقیق‌تر از تغییر و تحولات فازی در حین تبلور فاز آمورف در فرآیند پاشش حرارتی HVOF، توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری مطابق تصاویر شکل ۳ انجام



شکل ۳. تصاویر TEM و SADP از (الف) پوشش H₁ (ب) پوشش H₂ (ج) پوشش H₃.

علت تفاوت درصد فاز آمورف و نانوکریستال در این سه نمونه پوششی را می توان بر اساس تغییر نسبت سوخت به اکسیژن و به تبع آن دمای ذرات پودر تفسیر نمود. رفتار ذرات پودر در حین عبور از شعله HVOF و برخورد آن با سطح زیر لایه به سه صورت اتفاق می افتد: (الف) ذراتی که کاملاً ذوب می شوند (ب) ذراتی که به صورت نیمه مذاب در می آیند (ج) ذراتی که به صورت جامد باقی می مانند. با افزایش نسبت سوخت به اکسیژن دمای ذرات پودر و همچنین میزان ذوب شدگی آنها افزایش می یابد در نتیجه سرعت سرد شدن ذرات پودر در حین برخورد به سطح زیر لایه نیز بیشتر می شود. با توجه به اینکه پودر حاصل با ترکیب Fe-Cr-Mo-B-P-C-Si قابلیت آمورف شدن بالایی دارد [۱۲ و ۱۳] در اثر سریع سرد شدن از حالت مذاب دوباره به فاز آمورف تبدیل می گردد. این شرایط در پوشش H₁ که بالاترین میزان نسبت سوخت به

جزیی فاز آمورف در حین پوشش دهی بوجود آمده است. الگوی SADP از این پوشش، در کنار حلقه پهن که معرف ساختار آمورف زمینه است، نقاط زیاد و پراکنده ای را نشان می دهد که به وجود فاز نانوکریستالی در میان فاز آمورف اشاره دارد. (شکل ۳-ج) تصویر TEM از پوشش H₃ را نشان می دهد. همان طور که دیده می شود در این تصویر دانه های هم محوری در ابعاد حدود ۲۰-۱۰ نانومتر، به طور یکنواخت سرتاسر نمونه را در بر گرفته اند. در این تصویر فاز آمورف قابل توجهی مشاهده نمی شود و ساختار نانوکریستالی حاصل از تبلور کامل فاز آمورف بوجود آمده است. الگوی SADP در ضمیمه تصویر نیز حلقه های نازک پیوسته ای را نشان می دهد که نماینده ساختار نانوکریستال است. تصاویر TEM فوق تایید کننده نتایج حاصل از نمودارهای XRD در شکل ۲ می باشند.

سختی می تواند به علت تشکیل فازهای کاربید آهن در ابعاد نانومتری و محلول جامد آهن با دانه های حدود ۱۰ نانومتر، در حین تبلور کامل فاز آمورف در پوشش H3 باشد. این روند تغییرات سختی در حین تبلور فاز آمورف توسط سایر محققین نیز ارایه شده است [۷ و ۱۶] هر چند بعضی از آنها سختی ساختارهای دوگانه آمورف-نانوکریستال را بیشتر از سختی پوشش هایی با ساختار آمورف و نانوکریستال کامل گزارش کرده اند [۱۷]. البته همان طور که اشاره شد این اختلاف می تواند ناشی از نحوه تجزیه فاز آمورف در اثر تبلور و نوع فازهای کریستالی بوجود آمده باشد اما با این حال همه آنها به افزایش سختی در اثر تبلور کنترل شده فاز آمورف اذعان دارند.

شکل ۴ نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای پوشش های H1، H2 و H3 را نشان می دهد. همان طور که انتظار می رود پوشش H1 با ساختار آمورف کامل کمترین میزان ضریب اصطکاک یعنی حدود ۰/۲ را دارد. به طوری که این مقدار با تبلور فاز آمورف و افزایش درصد فاز کریستالی بیشتر می شود. همان طور که اشاره شد، در ساختارهای آمورف به علت عدم وجود سیستم های لغزشی و طبیعت کارسختی، ضریب اصطکاک نسبت به ساختارهای کریستالی مقدار پایین تری را به خود اختصاص می دهد، در نتیجه انتظار می رود خواص سایشی بهبود یافته ای داشته باشد [۵].

نتیجه گیری

(۱) با کنترل نسبت سوخت به اکسیژن در فرآیند پاشش حرارتی HVOF می توان پودر پاششی با ساختار آمورف را به صورت های جزیی و یا کامل متبلور کرد و در نتیجه دامنه ای از ساختارهای آمورف تا نانوکریستال کامل ایجاد نمود.

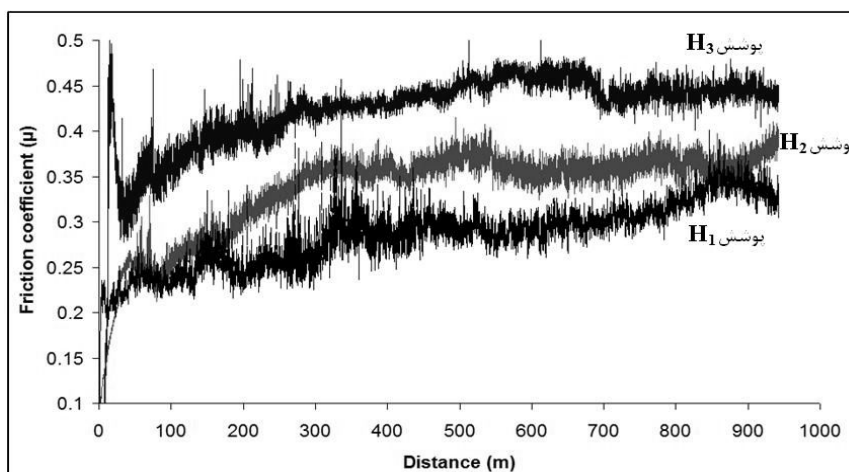
(۲) با تبلور فاز آمورف میزان ریزسختی پوشش افزایش می یابد بطوری که در پوشش با ساختار نانوکریستال کامل به بیشترین مقدار خود می رسد.

اکسیژن در آن مهیا می باشد، با ذوب شدن کامل ذرات و سپس سریع سرد شدن آنها، ساختار آمورف کاملی را ایجاد کرده است. در نسبت سوخت به اکسیژن پایین تر ذرات به طور کامل ذوب نمی شوند از این رو نواحی ذوب نشده متبلور می شوند و با توجه به بالا بودن سرعت سرد شدن ذرات در حین برخورد به سطح زیرلایه، فرصت کافی برای رشد دانه ها نیر فراهم نمی شود؛ از این رو به دو صورت آمورف-نانوکریستال (پوشش H2) و یا نانوکریستال کامل (پوشش H3) تبدیل می شوند. نتایج ریزسختی پوشش های H1 با ساختار کاملاً آمورف، پوشش H2 با ساختار دوگانه آمورف-نانوکریستال و پوشش H3 با ساختار نانوکریستال کامل در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲. مقادیر ریزسختی پوشش های HVOF بر حسب نوع

ریزسختی (HV ₂₅)		نمونه بر حسب ریز ساختار
انحراف معیار	مقدار میانگین	
۳۶/۴	۸۳۰	پوشش آمورف (H ₁)
۸۵/۳	۹۵۰	پوشش آمورف-نانوکریستال (H ₂)
۴۶/۲	۱۲۳۰	پوشش نانوکریستال (H ₃)

همان طور که مشاهده می شود تمامی پوشش ها سختی بالایی در محدوده ۸۰۰-۱۲۵۰ ویکرز دارند. این مقادیر مشابه سختی گزارش شده توسط سایر محققین برای آلیاژهای آمورف پایه آهن است [۱۴] اما از پوشش های کروم سخت و پوشش های آمورف پایه نیکل بیشتر می باشد [۱۵]. اختلاف بین مقادیرهای ریزسختی این سه نمونه پوشش وابسته به میزان فازهای آمورف و نانوکریستال است. پوشش H1 با ساختار آمورف کامل کمترین میزان سختی یعنی حدود ۸۳۰ ویکرز را در مقایسه با پوشش H2 با ساختار دوگانه آمورف-نانوکریستال (۹۵۰ ویکرز) دارد. از طرف دیگر پوشش با ساختار نانوکریستال کامل بیشترین میزان ریزسختی یعنی حدود ۱۲۳۰ ویکرز را به خود اختصاص داده است. این میزان افزایش



شکل ۴. نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای پوشش های HVOF.

منابع

1. Y. Wu, P. Lin, G. Xie, J. Hu and M. Cao, *Formation of amorphous and nanocrystalline phases in high velocity oxy-fuel thermally sprayed Fe-Cr-Si-B-Mn alloy*, Materials Science and Engineering A, 430 (2006) 34-39.
2. M. Cherigui, Z. Salhi, N. E. Fenineche, P. Gougeon and C. Coddet, *FeSi HVOF thermal spray coatings: Diagnostic, microstructure, and magnetic properties*, Materials Letters, 59 (2005) 463-467.
3. A. Leyland and A. Matthews, *Design criteria for wear-resistant nanostructured and glassy-metal coatings*, Surface and Coatings Technology, 177-178 (2004) 317-324.
4. J. Jayaraj, D. J. Sordelet, D. H. Kim, Y. C. Kim and E. Fleury, *Corrosion behaviour of Ni-Zr-Ti-Si-Sn amorphous plasma spray coating*, Corrosion Science, 48 (2006) 950-964.
5. A. L. Greer, K. L. Rutherford and I. M. Hutchings, *Wear resistance of amorphous alloys and related materials*, International Materials Review, 47 (2002) 87-112.
6. C. Suryanarayana, *Mechanical alloying and milling*, Progress in Materials Science, 46 (2001) 1-184.
7. K. Kishitake, H. Era and F. Otsubo, *Characterization of plasma sprayed Fe-Cr-Mo-(C, B) amorphous coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 5 (1996) 145-153.
8. M. S. El-Eskandarany, W. Zhang and A. Inoue, *Mechanically induced crystalline-glassy phase transformations of mechanically alloyed TaZrAlNiCu multicomponent alloy powders*, Journal of Alloys and Compounds, 350 (2003) 222-231.
9. X. Wu and Y. Hong, *Fe-based thick amorphous alloy coating by laser cladding*, Surface and Coating Technology, 141 (2001) 141-144.
10. S. J. Pang, T. Zhang, K. Asami and A. Inoue, *Synthesis of Fe-Cr-Mo-C-B-P bulk metallic glasses with high corrosion resistance*, Acta Materialia, 50 (2002) 489-497.
11. A. V. Sergueeva, N. A. Mara, D. J. Branagan and A. K. Mukherjee, *Phase morphology effect on elevated temperature mechanical behavior of nanostructures*, Materials Letters, 61 (2007) 1465-1468.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت پودر افشان واقع در اصفهان، به سبب فراهم کردن تجهیزات پیشرفته پاشش حرارتی HVOF کمال تشکر و قدردانی را می نمایند.

12. B. Movahedi, M. H. Enayati and C. C. Wong, Study on nanocrystallization and amorphization in Fe–Cr–Mo–B–P–Si–C system during mechanical alloying, *Materials Science and Engineering B*, 172 (2010) 50-54.
13. B. Movahedi, M. H. Enayati and C. C. Wong, On the crystallization behavior of amorphous Fe–Cr–Mo–B–P–Si–C powder prepared by mechanical alloying, *Materials Letters*, 64 (2010) 1055–1058.
14. A. Kobayashi, S. Yano, H. Kimura and A. Inoue, Fe-based metallic glass coatings produced by smart plasma spraying process, *Materials Science and Engineering B*, 148 (2008) 110–113.
15. H. S. Ni, X. H. Liu, X. C. Chang, W. L. Hou, W. Liu and J. Q. Wang, High performance amorphous steel coating prepared by HVOF thermal spraying, *Journal of Alloys and Compounds*, 467 (2009) 163–167.
16. D. J. Branagan, M. Breitsameter, B. E. Meacham and V. Belashchenko, High-performance nanoscale composite coatings for boiler applications, *Journal of Thermal Spray Technology*, 14(2) (2005) 196-204.
17. K. Kishitake, H. Era and F. Otsubo, Characterization of plasma sprayed Fe-17Cr-38Mo-4C amorphous coatings crystallizing at extremely high temperature, *Journal of Thermal Spray Technology*, 5(3) (1996) 283-288.

Archive of SID