

تأثیر جنس و فاصله زیرلایه روی ویژگی‌های لایه نشانی نانو پودر آلومینا به روش پاشش پلاسمایی

محمد کوهی، علیرضا ستوده خیابان و صمد سبحانیان

گروه فیزیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

پست الکترونیکی: kouhi@iaut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۱۰/۱۷)

چکیده

در این مقاله تأثیر جنس و فاصله زیرلایه روی ویژگی‌های لایه نشانی نانو پودر آلومینای گاما به روش پاشش پلاسمایی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با استفاده از مشعل پلاسمایی لایه نشانی نانو پودر آلومینا بر روی دو نوع زیر لایه از جنس فولاد زنگ نزن و شیشه پیرکس انجام گرفت. مشخصات مورفولوژیکی نانو لایه تهیه شده از طریق بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شد. همچنین، ساختار و تغییرات فازی نانو پودر آلومینا با استفاده از طیف‌های پراش پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند میزان نشست ذرات روی زیر لایه فولاد بیشتر از مورد شیشه می‌باشد. همچنین، با افزایش فاصله زیرلایه میزان نشست ذرات در هردو زیرلایه کاهش می‌یابد. یک موقعیت بهینه‌ای برای زیرلایه نسبت به نازل مشعل برای ایجاد و کنترل مناسب لایه نشانی وجود دارد. یک نتیجه مهم در این کار تجربی تغییر فاز آلومینای گاما به نوع آلفا در اثر حرارت بالای مشعل پلاسمایی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پاشش پلاسمایی، آلومینا، لایه نشانی، تغییر فاز، پراش پرتو ایکس

۱. مقدمه

روش پاشش پلاسمایی، عدم گرم شدن قطعه و در نتیجه عدم بروز تنش‌های حرارتی، یک مزیت اصلی در استفاده از این فناوری می‌باشد [۱]. با توجه به این ویژگی اخیر بدون اینکه حرارت ورودی باعث تغییر در خصوصیات ساختاری قطعه یا پیچ خوردن و تاب برداشتن آن شود امکان ایجاد پوشش‌هایی با نقطه ذوب بالا بر روی قطعه به روش پاشش پلاسمایی وجود دارد. همچنین، امکان بازسازی پوشش‌های آسیب دیده بدون تغییر در ساختار میکروسکوپی و یا در ابعاد قطعه از مزایای

پاشش پلاسمایی در هوا یکی از روش‌های مشهور برای لایه نشانی نانو پودر اکسیدهای سرامیکی است. یکی از مزایای اصلی فرایند پاشش پلاسمایی، در مقایسه با روش‌های دیگر لایه نشانی، امکان ایجاد طیف گسترده‌ای از پوشش‌های مواد مختلف روی بستر قطعه مورد نظر می‌باشد. در حقیقت، تمام موادی را که بدون تجزیه شدن قابل ذوب باشند، می‌توان برای ایجاد پوشش با این روش مورد استفاده قرار داد. در استفاده از

یک فاصله محدود و کوتاه ممکن است فرصت کافی برای ذوب شدن ذرات را ندهد [۱۶]. بنابراین، فاصله زیرلایه بهینه‌ای در لایه نشانی به روش پاشش پلاسمایی وجود دارد. این فاصله بستگی به توان مشعل پلاسمایی و نوع زیرلایه دارد.

۲. مواد و روش تحقیق

۲.۱. آماده سازی زیر لایه‌ها و پودر آلومینا

در این تحقیق از فولاد زنگ نزن آستنیتی شماره ۳۰۴ به عنوان یکی از جنس‌های زیر لایه استفاده شده است. به دلیل ویژگی‌های مقاومت خوردگی بالا، ماشینکاری خوب و قیمت پایین این نوع فولاد بیشترین مورد استفاده را در بین انواع دیگر فولادها دارد [۱۷]. زیرلایه دیگر مورد استفاده در این کار تجربی شیشه پیرکس است. با توجه به اینکه درجه حرارت مشعل پلاسمای منجر به ترک برداشتن و در نهایت شکسته شدن شیشه معمولی می‌شد از جنس پیرکس برای زیر لایه جهت لایه نشانی نانو پودر آلومینا استفاده شد.

ورقه‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن و شیشه پیرکس در ابعادی حدود ۱۵×۱۵ میلی‌متر با ضخامت‌های ۲ میلی‌متر برای فولاد و ۱٫۵ میلی‌متر برای شیشه پیرکس از هر کدام سه نمونه به عنوان زیرلایه در نظر گرفته شدند. جهت لایه نشانی بهینه، سطح فولاد زنگ نزن با استفاده از سمپاده نمره ۵۰۰ صیقل داده شد و سپس سطوح فولاد زنگ نزن و شیشه با استفاده از مواد شوینده و الکل اتانول چربی زدایی و تمیزکاری شدند تا در نهایت پس از خشک شدن، آماده لایه نشانی شوند.

نانو پودر آلومینای مورد استفاده از نوع گاما با درجه خلوص بیش از ۹۹ درصد و میانگین اندازه کریستالی ۲۰ نانومتر تولیدی شرکت US Research Nanomaterials, Inc.USA است. مشخصات کامل نانو پودر مورد استفاده در جدول ۱ داده شده است [۱۸].

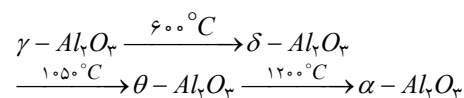
سیستم ارتعاشگر جهت ایجاد لرزش برای انتقال پودر قرار داده شده در محفظه و انتقال آن از طریق ریل ماریچ به صورت

دیگر روش پاشش پلاسمایی می‌باشد [۱، ۲].

لایه تهیه شده با روش پاشش پلاسمایی با استفاده از نانو پودر دارای سختی بالا، مقاومت سایشی زیاد و مقدار تخلخل پایین تر در مقایسه با پودرهای معمولی است. بنابراین، استفاده از نانو پودرهای اکسید سرامیکی مانند ZrO_2 و Al_2O_3, TiO_2 در لایه نشانی به روش پاشش پلاسمایی مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است [۳-۸].

در فرایند تهیه لایه سرامیکی از نانو پودرها مسائل جدیدی به وجود می‌آیند. مهم‌ترین مسئله تزریق نانو پودر به داخل پلاسمای است. ذرات نانو پودر به دیواره سیستم تغذیه ذرات چسبیده و به دلیل سطح ویژه بالا و جرم کم به سختی به مشعل پلاسمایی می‌رسند. برای حل این مشکل با ترکیب نانو ذرات، دانه‌هایی در ابعاد میکرومتر تهیه می‌شود [۹-۱۱]. نویسندگان دیگری نیز استفاده از یک مایع به عنوان حامل نانو ذرات را پیشنهاد داده‌اند. نانو پودر داخل مایع حل شده و به صورت تعلیق مستقیماً به مشعل پلاسمای تزریق می‌شود [۱۲، ۱۳].

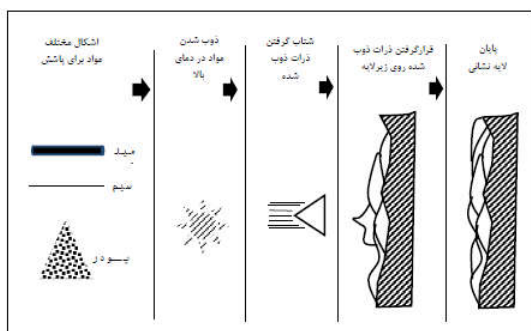
نوع یا ساختار آلومینا و محدوده دمایی وجود آن توسط ساختار هیدروکسید شروع کننده تعیین می‌شود و برای هیدروکسیدهای مختلف، متفاوت است. این ساختارهای کریستالی را فازهای آلومینا می‌نامند و بر اساس حروف یونانی نام گذاری می‌شوند [۱۴]. فاز نهایی گذارهای گرمایی آلومینای گاما به صورت زیر، آلومینای نوع آلفا است [۱۵].



در این مقاله با تغییر دادن فاصله زیرلایه از نازل مشعل پلاسمایی، مشخصات ظاهری و همچنین تغییرات فازی آلومینا بر روی دو جنس متفاوت از زیر لایه یعنی فولاد زنگ نزن و شیشه از طریق بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف پراش پرتو ایکس مورد مطالعه قرار گرفته است. با افزایش فاصله زیرلایه میزان نشست ذرات کاهش می‌یابد. وجود فاصله طولانی ممکن است باعث انجماد ذرات ذوب شده، قبل از رسیدن به زیرلایه شود. همچنین،

جدول ۱. مشخصات نانو پودر مورد استفاده در این تحقیق [۱۸].

مشخصات	مقدار و واحد
خلوص	بیشتر از ۹۹ درصد
مساحت سطح ویژه	بیشتر از $138 \text{ m}^2/\text{gr}$
رنگ	سفید
ظرفیت گرمایی ویژه	880 J/kgK
چگالی	3890 kg/m^3



شکل ۲. مراحل انجام پاشش پلاسمایی.



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) ارتعاشگر انتقال پودر به همراه واریاک.

مستقیم ترکیب مجدد یون‌ها و الکترون‌های پلازما در اطراف سطح ذره می‌باشد. دمای نهایی که ذرات پودر از جریان پلاسمای مشعل کسب می‌کنند بستگی به دمای پلازما، مدت زمان حضور ذرات در جریان پلازما، ظرفیت گرمایی، هدایت حرارتی و شکل ذرات دارد [۲]. بعد از اینکه ذرات پودر ذوب و شتاب گرفتند با سرعت زیاد به سطح زیر لایه برخورد کرده و ضمن سرد شدن به آن می‌چسبند. ادامه این روند باعث انباشت ذرات روی زیرلایه شده و عملیات لایه نشانی کامل می‌شود.

۲.۳. مشعل پلاسمایی

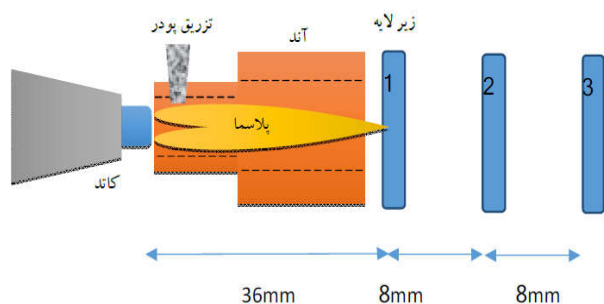
در این تحقیق جهت پاشش پودر آلومینا از یک سیستم پاشش پلازما در هوا مدل CT 416 از نوع غیرمنتقل^۱ متعلق به آزمایشگاه تحقیقاتی پلاسمای دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز استفاده شده است. در شکل ۳ عکسی از دستگاه مشعل پلاسمایی نشان داده شده است. مشعل پلاسمایی شامل دو الکترود آند و کاتد جهت تولید پلازما مورد استفاده قرار

یکنواخت به داخل مشعل پلاسمایی در شکل ۱ نشان داده شده است. ثابت بودن سرعت ریزش پودر در لایه نشانی با پاشش پلاسمایی اهمیت زیادی دارد. برای این منظور از یک واریاک برای تنظیم ولتاژ تغذیه دستگاه ارتعاشگر استفاده شد. با ثابت نگه داشتن ولتاژ کار واریاک سیستم ارتعاشگر روی ۲۴ ولت و اندازه‌گیری وزن پودر ریخته شده در مدت یک دقیقه و تعداد چهار بار تکرار این روند سرعت ثابت تزریق پودر به طور میانگین 3 gr/min به دست آمد.

۲.۲. مراحل لایه نشانی به روش پاشش پلاسمایی

شکل ۲ مراحل لایه نشانی یک سیستم پاشش پلاسمایی در هوا را نشان می‌دهد. ماده مورد پاشش که می‌تواند به شکل پودر، میله و یا سیم باشد [۱۹] بعد از ذوب شدن توسط مشعل به سطح زیر لایه پاشیده می‌شود. اندرکنش پلازما و ذرات پودر به صورت فرایندهای فیزیکی گرمایش و شتابدهی ذرات اتفاق می‌افتد. گرمایش ذرات پودر در جریان پلاسمای مشعل نتیجه

۱. Non- Transferred



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نحوه قرار گیری زیر لایه مقابل مشعل پلاسمایی.

این تحقیق از گاز اکسیژن استفاده شده است، شعله پلازما از داخل نازل آند به بیرون هدایت می شود. با توجه به دمای بالای پلاسمای ایجاد شده، جهت جلوگیری از فرسایش جداره محفظه نازل آند با آب خنک می شود. در مسیر خروجی پلازما دقیقاً بالای ابتدای نازل آند و دهانه خروجی کاتد پودر آلومینا وارد پلازما می شود. این پودر در داخل پلازما به دمای بالا رسیده و پس از ذوب شدن بر روی زیر لایه مستقر در جلوی نازل، انتقال داده می شود. شمایی از مشعل پلاسمایی و چگونگی قرارگیری زیر لایه ها در شکل ۴ نشان داده شده است. در مشعل پلازما قوسی مابین کاتد تنگستن با نوک مخروطی شکل و یک نازل مسی به عنوان آند ایجاد می شود. پلازما در نوک کاتد ایجاد شده و بخشی از گاز پلازما که در امتداد کاتد تزریق شده، در ستون پلازما پمپ می شود. این ستون در اثر سرد شدن کناره ها تثبیت خواهد شد.

سرد شدن توسط بخش سرد گاز پلازما و دیواره های آند مسی که با آب خنک می شود، انجام می گیرد. زمانی که لایه مرزی سرد که در نزدیکی دیواره است به قدر کافی به وسیله لایه مرزی داغ ستون پلازما گرم شد، این ستون آشفته خواهد شد و در دیواره آند قوس زده می شود.

قوس ایجاد شده به صورت یک یا چند ستون پلاسمای کوچک منقبض می شود و این ستون ها در اثر نیروی الکترومغناطیس افت و خیز می کنند. پس از تشکیل قوس، پلازما در داخل و نیز خارج نازل به دلیل گرمای آزاد شده



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) عکس مشعل پلاسمایی و الکتروودهای آند و کاتد.

می گیرد. مواد به کار رفته در الکتروودها ممکن است مصرفی (از جنس گرافیت) و یا غیر مصرفی (از جنس مس، تنگستن یا مولیبدن) باشند. یک انتخاب مناسب برای آند فلز مس می باشد؛ اگرچه مولیبدن یا گرافیت نیز مورد استفاده قرار می گیرد.

کاتد می تواند از نوع گرمایونی مانند تنگستن، کربن یا مولیبدنوم انتخاب شود که باید در محیط غیراکسید کننده مورد استفاده قرار گیرد. کاتدها اغلب از تنگستن غنی شده با ۲٪ توریم (ThO_2) ساخته می شوند. توریم در تنگستن عمدتاً برای کاهش پتانسیل انتشار الکترون و جلوگیری از سایش کاتد به علت ناخالصی های موجود در گاز پلازما به کار می رود [۱۵]. الکتروودهای آند و کاتد مشعل پلاسمایی مورد استفاده نیز در شکل ۳ نشان داده شده اند. الکتروود آند اغلب می تواند به شکل لوله، قرص و یا حلقه باشد. در این کار تجربی آند به شکل لوله است. کاتدها نیز متشکل از یک میله به همراه یک نوک مخروطی شکل می باشند.

به منظور محافظت از الکتروودها پوشش الکتروودها به وسیله سیستم خنک کننده آب سرد خنک می شود و فرسایش الکتروودها با استفاده از جریان گاز یا میدان مغناطیسی به وسیله حرکت سریع قوس، کاهش می یابد. اگر گازهای واکنشی در قوس استفاده شوند، فرسایش کاتد می تواند یک مشکل اساسی باشد.

در این دستگاه پلازما در داخل مشعل (بین دو الکتروود آند و کاتد) تولید می شود و از طریق جریان سریع گاز کاری که در

دستگاه XRD مدل D8 ADVANCE ساخت شرکت آلمانی Bruker واقع در دانشگاه صنعتی سهند تبریز انجام گرفت. نتایج حاصل پس از تجزیه و تحلیل با استفاده از نرم‌افزار XPert High Score برای زیرلایه‌های فولاد زنگ نزن و شیشه پیرکس به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها موقع لایه نشانی فاصله زیرلایه از انتهای کاتد برای طیف‌های پراش پرتو ایکس الف، ب و ج به ترتیب ۳۶، ۴۴ و ۵۲ میلی‌متر بوده است.

در هر دو نوع زیرلایه تغییر فاز آلومینای نوع گاما به نوع آلفا مشاهده شده است. تغییر فاز آلومینا نشان دهنده دمای بیشتر از ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مشعل پلاسمایی است. برای تخمین

دمای متوسط مشعل از رابطه نیمه تجربی
$$T = ۱,۶۲ \left(\frac{I^2}{Gd} \right)^{۰,۳۶}$$
 مرجع [۲۰] استفاده شد. که در آن I جریان بر حسب آمپر، G میزان شارش گاز بر حسب kg/s ، d قطر آند بر حسب متر و T دمای پلاسمای خروجی از آند بر حسب کلوین است. با به کار بردن مقادیر $I = ۶۰ A$ ، $G = ۰,۰۰۴۸ kg/s$ و $d = ۱۰^{-۳} m$ دمای پلاسمای حدود $T = ۲۵۴۰ K$ برآورد شد. دمای به دست آمده برای مشعل پلاسمایی از دمای ذوب آلومینا ($۲۰۷۲^\circ C$) بالاتر است.

از مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ معلوم می‌شود، شدت قله‌ها در زیر لایه فولاد زنگ نزن تقریباً دو برابر مورد زیر لایه شیشه پیرکس است. در نتیجه میزان نشست ذرات در زیرلایه فولاد بیشتر از مورد شیشه می‌باشد. همچنین، برعکس زیرلایه فولاد زنگ نزن، ترکیبات فلزی قابل ترکیب شیمیایی با ساختار اکسید آلومینیوم در شیشه بیشتر است.

با افزایش فاصله زیرلایه، مقدار نشست ذرات روی هر دو زیرلایه کاهش پیدا می‌کند. اما در مورد زیرلایه شیشه کاهش نشست ذرات با افزایش فاصله محسوس‌تر است، به طوری که کمترین مقدار نشست ذرات روی زیرلایه شیشه برای فاصله ۵۲ میلی‌متری به دست آمد.

برای محاسبه اندازه متوسط بلورک‌های روی زیرلایه از فرمول مشهور دبای-شرر $D = \frac{۰,۹۴\lambda}{\beta \cos \theta}$ [۲۱، ۲۲] استفاده شد،

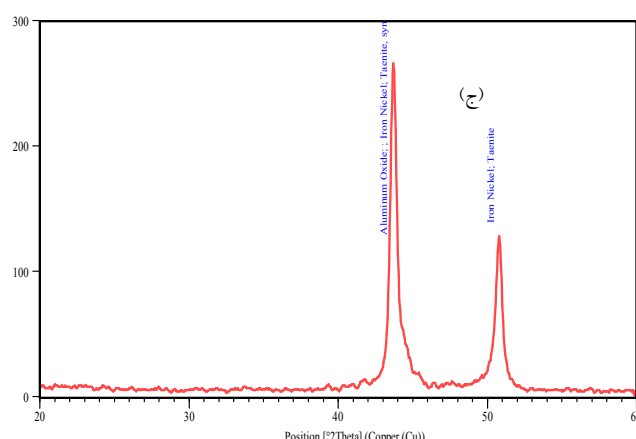
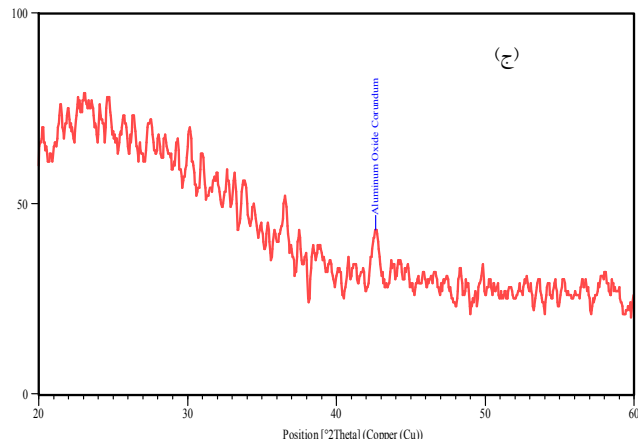
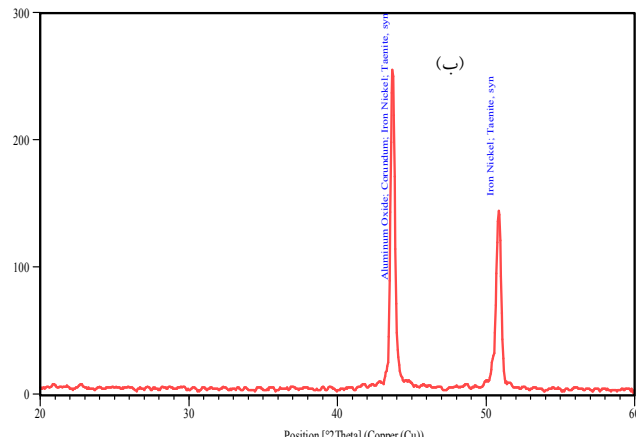
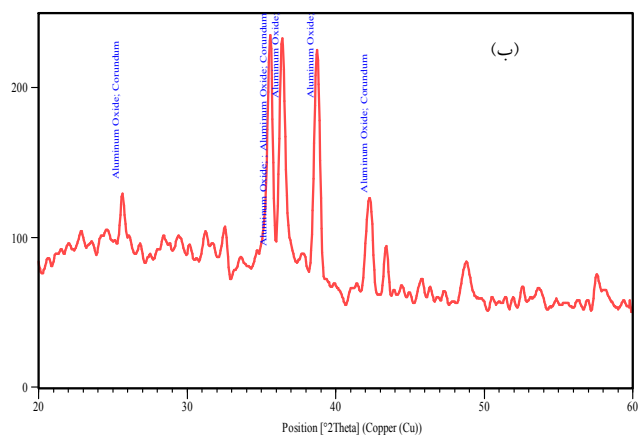
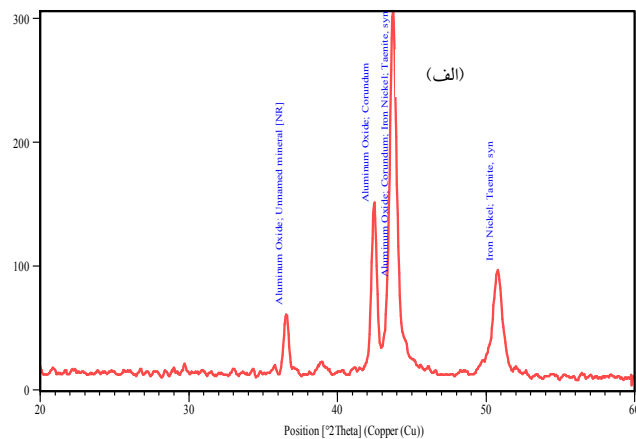
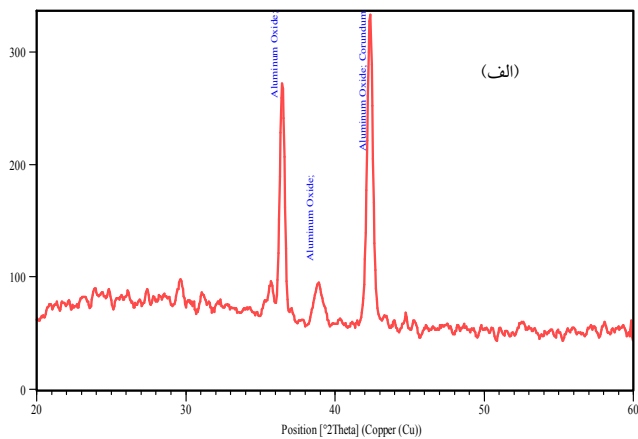
توسط ترکیب مجدد یون‌ها و الکترون‌ها و اتم‌ها برقرار می‌شود. زمانی که فواره پلاسمای نازل خارج می‌شود تا جریان اطراف خروجی نازل به صورت جریان گردابی در آید و به سمت جریان برگردد، حلقه‌های گردابی مجاور تمایل به یکی شدن داشته و گرداب‌های بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند که سبب کشیده شدن هوای خارجی می‌شود. پدیده فوق به سرعت جریان، و شکسانی گاز، جریان قوس و شکل نازل بستگی دارد. برای روشن کردن مشعل پلاسمایی و لایه نشانی به روش پاشش پلاسمایی مراحل زیر انجام گرفت. ابتدا شیر کپسول گاز اکسیژن باز و فشار گاز ورودی به مشعل از طریق گیج مربوطه به ۴ bar تنظیم شد. کلید مشعل پلاسمایی استارت زده شد و به طور همزمان دستگاه ارتعاشگر محتوی پودر آلومینا نیز روشن شد تا عمل تزریق پودر به داخل شعله پلاسمای انجام شود تا پودر پس از ذوب به روی سطح زیر لایه (فولاد زنگ نزن و شیشه پیرکس) انتقال داده شود. در پایان ۳۰ ثانیه عملیات متوقف و مراحل برای نمونه‌های بعدی برای دو فاصله دیگر از مقابل نازل پلاسمای تکرار شد. در ضمن محدود شدن زمان لایه نشانی به ۳۰ ثانیه، از یک طرف باعث کاهش احتمال شکستن شیشه پیرکس می‌شود و از طرف دیگر قبل از آگلومره شدن نانو پودرهای آلومینا عمل لایه نشانی انجام می‌گیرد.

۳. نتایج و بحث

قطعات لایه نشانی شده پس از اتمام کار جهت پرتونگاری XRD و بعد از برش زیر لایه‌ها به ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر جهت قرارگیری در دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM به منظور بررسی موفولوژی ساختار به دست آمده، به آزمایشگاه‌های مربوطه فرستاده شدند. نتایج به دست آمده از XRD با استفاده از نرم‌افزار XPert High Score مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، در ادامه نتایج حاصل ارائه و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۳.۱. نتایج پراش پرتو ایکس

طیف نگاری پراش پرتو ایکس نمونه‌های لایه نشانی شده با



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف XRD برای نمونه با زیر لایه شیشه پیرکس در فاصله (الف) ۳۶ mm، (ب) ۴۴ mm و (ج) ۵۲ mm.

شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف XRD برای نمونه با زیر لایه فولاد زنگ نزن در فاصله (الف) ۳۶ mm، (ب) ۴۴ mm و (ج) ۵۲ mm.

وجود ندارد.

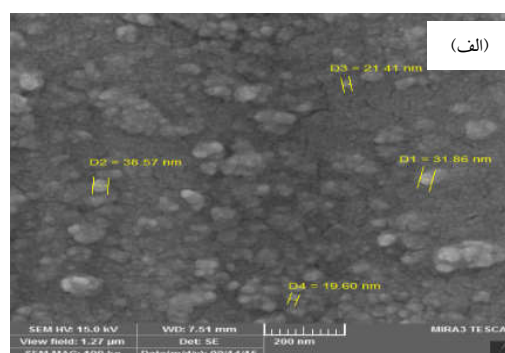
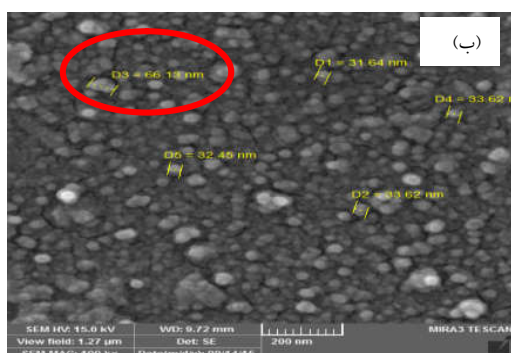
که در آن D اندازه متوسط ذره، θ زاویه پراش براگ، λ طول موج پرتو ایکس و β نیم پهنای بیشینه شدت می باشد. نتیجه محاسبات اندازه بلورکها در جدول ۲ نشان داده شده است. ملاحظه می شود نظم خاصی در مورد اندازه متوسط بلورکها

۲.۳. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی

نمونه ها به منظور بررسی مشخصات مورفولوژیکی نانو لایه های

جدول ۲. نتایج محاسبه اندازه متوسط بلورک‌ها.

جنس زیر لایه	فاصله (mm)	زاویه قله (2θ)	نیم پهنا β	اندازه متوسط بلورک‌ها (nm)
فولاد	۳۶	۴۳٫۶۹۱۹	۰٫۳۹۳۶	۲۲٫۷۶۸
	۴۴	۴۳٫۶۹۶۷	۰٫۱۹۶۸	۴۳٫۵۲۲
	۵۲	۴۳٫۶۵۲۵	۰٫۴۹۲۰	۱۸٫۳۰۹
	۳۶	۴۲٫۳۹۰۵	۰٫۴۲۰۰	۲۱٫۲۴۲
شیشه	۴۴	۴۲٫۳۵۲۷	۰٫۴۹۲۰	۱۹٫۲۸۷
	۵۲	۴۲٫۶۲۸۲	۰٫۷۲۰۰	۱۲٫۴۰۱



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصویر مورفولوژی از سطح نمونه‌های با زیر لایه (الف) فولاد زنگ نزن و (ب) شیشه پیرکس از طریق (SEM) برای فاصله ۴۴ میلی‌متری زیر لایه.

[۱-۸]. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهند با کم کردن زمان پاشش دهی امکان لایه نشانی روی زیر لایه شیشه نیز وجود دارد. نویسندگان مرجع [۷] به منظور تولید پلازما از گاز نیتروژن و برای حمل پودرها از گاز آرگون استفاده کرده‌اند، در حالی که در مقاله حاضر فقط از گاز اکسیژن برای هر دو منظور استفاده شد و نتایج به دست آمده از نقطه نظر تغییر فاز دادن آلومینای گاما به نوع آلفا مطابقت خوبی با نتایج آنها دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر جنس و فاصله زیر لایه روی ویژگی‌های لایه نشانی نانو پودر آلومینای گاما به روش پاشش پلاسمایی در هوا مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از مشعل پلاسمایی نانو پودر آلومینا بر روی دو نوع زیر لایه از جنس فولاد زنگ نزن و شیشه پیرکس با فاصله‌های متفاوت از مشعل لایه نشانی شد. مشخصات مورفولوژیکی نانو لایه‌ها از طریق تصاویر

تهیه شده، به ابعاد 10×10 میلی‌متر برش و با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل MIRA3 TESCAN دانشگاه تبریز تصویر برداری شد. در شکل ۷ تصاویر مورفولوژی لایه آلومینای تشکیل شده روی زیر لایه‌های فولاد زنگ نزن (الف) و شیشه پیرکس (ب) برای فاصله زیر لایه ۴۴ میلی‌متر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، ابعاد ذرات لایه نشانی شده بر روی هر دو زیر لایه در محدوده نانومتر است. به دلیل بیشتر بودن خاصیت آگلومره شدن در زیر لایه شیشه نسبت به زیر لایه فولاد، ابعاد ذرات در زیر لایه شیشه بزرگ‌تر از زیر لایه فولاد می‌باشد. همان طوری که از شکل ۷. ب ملاحظه می‌شود قطر ذره مشخص شده تقریباً دو برابر قطر ذرات دیگر است. این وضعیت می‌تواند نشان دهنده خاصیت آگلومره شدن در زیر لایه شیشه باشد.

معمولاً در لایه نشانی‌های پودر به روش پاشش پلاسمایی فولاد زنگ نزن یا سایر فلزات به عنوان زیر لایه انتخاب می‌شود

بیشتر از مورد شیشه می‌باشد. به دلیل دمای بالای مشعل پلاسمایی، آلومینای گاما به نوع آلفا تغییر فاز می‌دهد. نتایج این تحقیق می‌توانند در تهیه نانو لایه‌های دیرگداز مفید باشند.

میکروسکوپ الکترونی روبشی و تغییرات فازی نانوپودر آلومینا با استفاده از طیف‌های پراش پرتو ایکس مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان دادند، میزان نشست ذرات در زیر لایه فولاد

مراجع

1. P Fauchais, *J. Phys. D Appl. Phys.* **37** 9 (2004) R86.
2. B Gill and R Tucker, *Mater. Sci. Technol.* **2** 3 (1986) 207.
3. M Benea and L Benea, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **106** (2016) 012024.
4. A Anderson, *Int. J. Ambient Energy* **38** 1 (2017) 108.
5. Y An, *et al.*, *Ceram. Int.* **43** 6 (2017) 5319.
6. B Dhakar, S Chatterjee and K Sabiruddin, *Mater. Sci. Technol.* **33** 3 (2017) 285.
7. L Marcinauskas, *J. Mater. Sci.* **16** (2010) 47.
8. Y Zeng, S Lee and C Ding, *Mater. Lett.* **57** 2 (2002) 495.
9. RS Lima and BR Marple, *Surf. Coat. Technol.* **200** 11 (2006) 3428.
10. H Chen, Y Zeng and C Ding, *J. Eur. Ceram. Soc.* **23** 3 (2003) 491.
11. L L Shaw, *et al.*, *Surf. Coat. Technol.* **130** 1(2000) 1.
12. F L Toma, *et al.*, *Surf. Coat. Technol.* **202** 18 (2008) 4343.
13. D Li, *et al.*, *Ceram. Int.* **43** 10 (2017) 7488.
14. PS Santos, HS Santos and S Toledo, *Mat. Res.* **3** 4 (2000) 104.
15. B Kasprzyk-Hordern, *Adv. Colloid Interface Sci.* **110** 1 (2004) 19.
16. D Matejka and B Benko, "Plasma spraying of metallic and ceramic materials", John Wiley and Sons (1989).
17. X Xu, *et al.*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **90** (2017) 979.
18. <http://www.us-nano.com/inc/sdetail/209>.
19. R B Heimann, "Plasma- Spray Coating", VCH Verlagsgesellschaft mbH. (1996).
20. E Akdogan, *et al.*, *Surf. Coat. Technol.* **201** (2006) 2540.
21. R Shabannia, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **27** (2016) 6413.
22. B Sahin, F Bayansal, M Yüksel and H A Çetinkara, *Mater. Sci. Semicon. Process* **18** (2014) 135.