



کاربردهای فناوری نانو در بهبود خواص سایشی پوشش‌های نانوکامپوزیتی به روش PEO



شناسنامه

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهریژن	سال انتشار:	۱۴۰۱
نظارت:	داود قرابلو	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
پست الکترونیک:	IND@nano.ir	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
سندوق پستی:	۱۴۵۶۵-۳۴۴	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir www.INDnano.ir
تهیه کننده:	شرکت نوآوران صنعت و نانوفناوری معین	اینستاگرام نانو و صنعت:	@INDnano.ir

فهرست مطالب

۳	خوردگی
۳	پوشش های تبدیلی
۳	پوشش های تبدیلی الکتروشیمیایی
۴	آندیزاسیون
۵	اکسیداسیون الکترولیتی پلاسما
۵	مکانیسم پوشش PEO
۷	شرایط پردازش مؤثر در فرآیند PEO
۸	کاربرد فناوری نانو در پوشش های PEO
۹	تأثیر نانوذرات مختلف بر رفتار خوردگی آلومینیوم و آلیاژهای آن
۱۰	ارائه دهندگان پوشش نانوکامپوزیت PEO در داخل کشور
۱۱	ارائه دهندگان پوشش نانوکامپوزیت PEO در خارج کشور
۱۱	پی نوشت ها
۱۲	مراجع

خوردگی

پوشش از نقطه نظر مهندسی سطح، لایه‌ای از مواد است که بر روی یک بستر قرار می‌گیرد تا خواص سطح برای محافظت در برابر خوردگی و سایش را افزایش دهد. عوامل مؤثر بر انتخاب یک پوشش شامل محیط، طول عمر، سازگاری مواد بستر، شکل و اندازه اجزا و هزینه است. [۱]

پوشش دهی به دلیل فراهم و ممکن بودن به‌کارگیری مواد و فرایندهای متنوع پوششی پرکاربردترین روش برای جلوگیری، به حداقل رساندن و کنترل خوردگی است. پوشش، می‌تواند در سطوح داخلی یا خارجی و در محدوده‌های دمایی مختلف اعمال شود. پوشش‌ها حتی سبب بهبود خواص سطحی از قبیل صافی و بهبود جریان‌های سطح می‌شوند. استفاده از یک پوشش ممکن است هزینه بالایی داشته باشد، اما در درازمدت و در مقیاس بزرگ امکان‌پذیرترین روش است.

به‌طور کلی پوشش‌ها با ارائه حفاظت غیرفعال یا فعال خوردگی را کاهش می‌دهند. حفاظت غیرفعال زمانی حاصل می‌شود که پوشش یک مانع فیزیکی از اکسیدها بین بستر و محیط اطراف ایجاد کند. حفاظت فعال زمانی حاصل می‌شود که مواد شیمیایی (بازدارنده) به محیط‌های ته‌اجمی برای جلوگیری یا به حداقل رساندن خوردگی اضافه شوند. بازدارنده‌ها با جذب شیمیایی بر روی سطح و با ایجاد یک لایه محافظ نازک بر روی آن یا از طریق واکنش شیمیایی با عوامل خورنده در محیط‌های آبی سرعت خوردگی را به حداقل می‌رسانند. [۲]

پوشش‌های تبدیلی

یکی از روش‌های رایج پوشش دهی پوشش‌های تبدیلی^۱ هستند. پوشش‌های تبدیلی بیش از یک قرن است که بر روی سطح فلزات و آلیاژها استفاده می‌شود. به‌طور کلی پوشش‌های تبدیلی به پوشش‌هایی گفته می‌شود که در اثر عملیات شیمیایی یا الکتروشیمیایی بر روی سطح فلز تولید می‌شوند. این پوشش می‌تواند به‌عنوان یک پوشش مستقل از خوردگی و یا به‌عنوان یک لایه تقویت‌کننده چسبندگی برای پوشش بعدی عمل کند. در حال حاضر روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی پوشش‌های تبدیلی وجود دارد. با این حال، یکی از مفیدترین طبقه‌بندی‌ها، تقسیم آن‌ها به پوشش‌های تبدیل شیمیایی و پوشش‌های تبدیلی الکتروشیمیایی است [۳].

پوشش‌های تبدیل شیمیایی به دلیل وجود پیوندهای شیمیایی بسیار چسبنده هستند و به‌عنوان یک لایه میانی بین پوشش و فلز زیرین آن عمل می‌کنند. مدت زمان پردازش کوتاه، عملیات آسان و مقرون به‌صرفه بودن مواد شیمیایی خام مورد استفاده برای محلول‌ها سبب محبوبیت این نوع پوشش‌ها در صنایع تولیدی شده است.

پوشش‌های تبدیلی الکتروشیمیایی

پوشش‌های تبدیلی الکتروشیمیایی از طریق آندیزاسیون^۲ سطحی که خواهان ایجاد پوشش بر روی آن هستیم به وجود می‌آیند. آندیزاسیون یک روش الکترولیتی مؤثر برای تولید یک پوشش سطحی چسبنده، مقاوم در برابر سایش و پایدار با ضخامت ۵ تا ۱۰۰ میکرومتر است. آندیزاسیون یک روش اکسیداسیون الکترولیتی است که با ایجاد یک لایه فیلم اکسید بر روی زیرلایه مدنظر سبب بهبود خواص سطحی و دکرانتیو می‌شود. در این فرآیند زیرلایه مدنظر به‌عنوان آند در مدار قرار می‌گیرد و فرآیند اکسیداسیون در محلول الکترولیت طی مراحل طی که در ادامه شرح داده می‌شود، صورت می‌پذیرد.

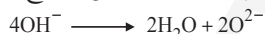
در سطح آند:



در سطح کاتد:



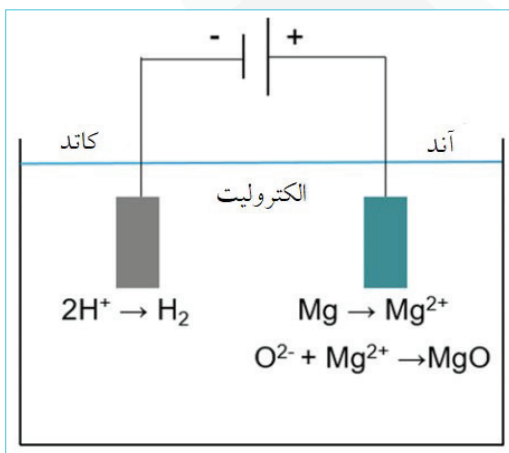
سپس گروه هیدروکسیل به سطح آند مهاجرت می‌کند و در آنجا با آزاد کردن پروتون یون O^{2-} تولید می‌کند:



و در نهایت یون O^{2-} با یون فلزی واکنش داده و اکسید فلزی را به وجود می‌آورد:



فرآیند فوق به صورت شماتیک برای منیزیم در شکل ۱ آورده شده است [۳].



شکل ۱- آندیزاسیون الکتروشیمیایی منیزیم

آندیزاسیون

آندیزاسیون^۳ با اکسیداسیون آندی یک روش کلاسیک عمل‌آوری سطح^۴ است که برای فلزات سبک (آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم) و آلیاژهای آن‌ها برای تشکیل یک لایه اکسید محافظ به‌کار می‌رود [۱۳]. در این فرآیند، یک ولتاژ یا جریان یکنواخت بین دو الکترود در یک محلول الکترولیتی برای تولید یک لایه اکسید ضخیم بر روی بستر آند فلزی استفاده می‌شود. آندیزاسیون در ابتدا در مقیاس صنعتی در سال ۱۹۲۳ برای محافظت از هواپیماهای دریایی ساخته شده با آلومینیوم در برابر خوردگی استفاده شد. فرآیند آندیزه کردن اسید اگزالیک در سال ۱۹۲۳ در ژاپن ثبت اختراع شد و عمدتاً برای کاربردهای معماری مورد استفاده قرار گرفت. فرآیند آندیزاسیون به‌طور کلی در دمای عملیاتی پایین و چگالی جریان بالا انجام می‌شود. در این روش ساختار سطح و ترکیب شیمیایی لایه اکسید سطحی را می‌توان با تنظیم پارامترهایی مانند غلظت و ترکیب الکترولیت، پارامترهای الکتریکی و ترکیب بستر اصلاح کرد.

اکسیداسیون الکترولیتی پلاسما

اکسیداسیون الکترولیتی پلاسما (PEO⁵) یک نوع فرآیند پوشش تبدیلی الکتروشیمیایی است که به طور منحصربه فردی عملکرد آلیاژهای سبک را بهبود می بخشد. اکسیداسیون الکترولیتی پلاسما یک فرآیند عملیات سطحی^۶ جدید برای تولید پوشش های اکسید فلزی ضخیم و متراکم به ویژه بر روی فلزات سبک (آلومینوم، تیتانیوم، منیزیم و...)، برای بهبود مقاومت در برابر سایش و خوردگی است. پوشش تولید شده از فرآیند PEO نسبتاً بهتر از اکسیداسیون آندی معمولی است. این نوع پوشش ها به طور گسترده ای در زمینه های مکانیکی، پتروشیمی و صنایع بیوپزشکی به کار گرفته می شود [۴].

فرآیند PEO یک نسخه پیشرفته از تکنیک آندیزاسیون است که از پتانسیل بالاتری برای پیش برد واکنش شیمیایی، حرارتی و پلاسما بر روی بستر به منظور تشکیل یک پوشش اکسید سرامیکی ضخیم و متراکم استفاده می کند. فرآیند PEO همچنین امکان تشکیل سطوح جدید با رنگ ها و بافت های مختلف را فراهم می کند که در نهایت مقاومت در برابر سایش و خوردگی، پایداری حرارتی، خاصیت دی الکتریک، زیست فعالی^۷ بهتر و زیست سازگاری را ارائه می دهد. این فرآیند همچنین اغلب اکسیداسیون میکرو قوس (MAO⁸)، اکسیداسیون شیمیایی پلاسما (PCO⁹)، یا اکسیداسیون آندی توسط تخلیه جرقه^{۱۰} نیز نامیده می شود. PEO از الکترولیت های قلیایی و اسیدی ضعیف و دوست دار محیط زیست استفاده می کند که در آن پوشش های اکسیدی تحت اعمال ولتاژهای الکتریکی بالاتر تشکیل می شوند [۵، ۶]. در طی این فرآیند، ضخامت پوشش های اکسیدی در محدوده ده ها تا صدها میکرون روی بستر رشد می کند که می تواند به طور قابل توجهی مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر سایش و ویژگی های عایق حرارتی را بهبود بخشد [۴].

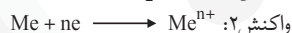
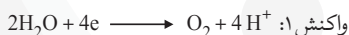
تشکیل پوشش PEO یک فرآیند پیچیده است زیرا شامل سه عملیات هم زمان است: واکنش های الکتروشیمیایی، واکنش های شیمیایی پلاسما و واکنش های انتشار اکسیژن حرارتی^{۱۱}. پوشش های به دست آمده از این واکنش ها معمولاً شامل ساختارهای سه لایه با یک لایه بیرونی متخلخل، یک لایه میانی متراکم و یک لایه متراکم داخلی نازک است [۴]. در ادامه به بررسی مکانیسم پوشش PEO خواهیم پرداخت.

مکانیسم پوشش PEO

در فرآیند PEO، تغییر حالت جریان بین جریان متناوب (AC^{۱۲})، جریان مستقیم (DC^{۱۳})، جریان تک قطبی^{۱۴} و دوقطبی^{۱۵} ممکن است منجر به تغییرات سطحی قابل توجهی شود. پارامترهای اولیه مانند چگالی جریان الکتریکی، شدت ولتاژ الکتریکی، نوسان پالس و چرخه وظیفه مثبت/منفی^{۱۶} بر فرآیند PEO و ویژگی های پوشش به دست آمده تأثیر می گذارند [۷]. علاوه بر این موارد، مواردی چون شکست ولتاژ توسعه یافته^{۱۷}، ذوب موضعی^{۱۸}، اکسیداسیون بستر، فرآیندهای فروشانی^{۱۹} و تبلور مجدد^{۲۰} نیز به طور قابل توجهی بر ریزساختار و خواص پوشش تأثیر می گذارند. در فرآیند PEO، طیف وسیعی از ولتاژها (۹۵ تا ۷۵۰ ولت) همراه با منبع الکتریکی AC یا DC بین کاتد و آند استفاده می شود. در تکمیل مدار الکتریکی، کاتد و آند از قوانین فارادی و اهم پیروی می کنند. در این جا، بستر فلزی به عنوان یک الکترود کار^{۲۱} (آند) همراه با یک الکترود مقابل^{۲۲} (کاتد)، به طور کلی از فولاد ضد زنگ یا گرافیت تشکیل شده است) عمل می کند. هر دو الکترود در یک الکترولیت قلیایی ضعیف غوطه ور هستند. سپس الکترودها به منبع الکتریکی خارجی متصل می شوند تا فرآیند پوشش آغاز شود. تکامل الکتروشیمیایی اکسیژن^{۲۳} و واکنش های اکسیداسیون فلز در آند در طول فرآیند PEO رخ می دهد (واکنش های ۱ و ۲). در این

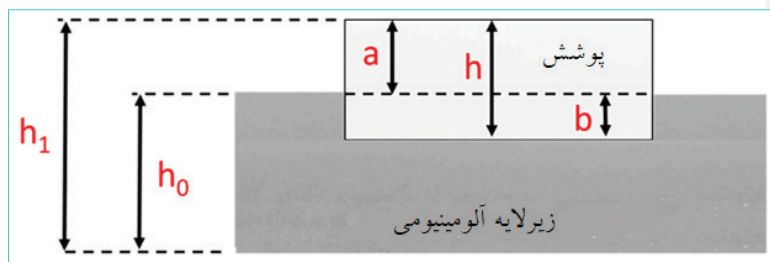
فرآیند، تولید آندی اکسیژن به دلیل میدان الکتریکی بالاتر اتفاق می افتد و آنیون های اکسیژن (O^{2-}) به سمت آند مهاجرت می کنند به طوری که یک اکسید فلزی را با بستر تشکیل می دهند. بسته به زیرلایه، ترکیب الکترولیت و فعالیت شیمیایی، این فرآیند می تواند منجر به انحلال سطح یا تشکیل یک فیلم اکسید آندی شود (واکنش ۳). در همان زمان، تکامل شدید گاز هیدروژن^{۲۲} (واکنش ۴) و کاهش کاتیون در سطح کاتد رخ می دهد (واکنش ۵). به دلیل آزادسازی گاز و واکنش تخلیه، پوشش به دست آمده می تواند در مقایسه با فیلم اکسیدی ناشی از فرآیند آندیزاسیون متخلخل تر باشد.

واکنش های کلی درگیر در فرآیند PEO عبارت اند از:



(M: فلزی که فرآیند PEO بر روی آن انجام می شود. n: تعداد الکترون های انتقال یافته. e: الکترون. Cat: کاتیون)

مکانیسم های کلی که در طول فرآیند PEO اتفاق می افتد عبارت اند از: (الف) تشکیل یک لایه اکسید روی مرز بین فلز و الکترولیت، (ب) افزایش اختلاف پتانسیل در دو طرف لایه اکسید دی الکتریک و (ج) شکستن لایه اکسید دی الکتریک. در ابتدای فرآیند اکسیداسیون، یک ضخیم شدن اولیه لایه اکسید به سمت بیرون و به دنبال آن ضخیم شدن لایه اکسید به سمت داخل رخ می دهد. این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- یک نمودار شماتیک که تشکیل پوشش PEO را بر روی یک بستر آلومینیوم ۱۰۶۰ توضیح می دهد

h_0 : ضخامت نمونه قبل از PEO

h_1 : ضخامت نمونه بعد از PEO

h : ضخامت پوشش PEO

a : ضخامت رشد بیرونی

b : بخشی که به سمت بستر رشد می کند.

لایه اکسید به دست آمده اغلب منجر به ساختاری سفت و کریستالی می شود، زیرا تخلیه های الکتریکی مقدار

قابل توجهی گرماساطع می کنند و در نتیجه تبلور در اطراف لایه اکسید افزایش می یابد. پوشش هایی که در معرض PEO قرار می گیرند دارای سطح تخلخل بالایی هستند اما نسبت به پوشش های حاصل از آندیزاسیون در برابر سایش نسبتاً مقاوم تر هستند. تجزیه دی الکتریک بین لایه نازک اکسیدی در بستر منافذ عمیق پوشش رخ می دهد. در فرآیند PEO، ولتاژ و AC بالاتر منجر به جرقه های شدید ناشی از تخلیه های ریزقوس می شود که منجر به تشکیل لایه های اکسیدی می شود.

فرآیند PEO تحت تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ماهیت مواد بستر، اجزای الکترولیت، جگالی جریان، نوع جریان، ولتاژ، فرکانس، چرخه کار، مواد افزودنی، ذرات افزوده شده، زمان پوشش و دمای عملیاتی قرار می گیرد. اگرچه این فرآیند به طور گسترده برای موادی مانند آلومینیوم و منیزیم و آلیاژهای آن ها استفاده شده است، اما تمرکز تحقیقات جدیدتر روی پوشش های PEO به سمت فلزات دیگر مانند تیتانیوم، تانتالیوم، زیرکونیوم و نیوبیم و انواع مختلف آلیاژهای آن ها معطوف شده است. علاوه بر این، کار قابل توجهی نیز در مورد اصلاح فلز روی توسط فرآیند PEO گزارش شده است. جدای از مواد ذکر شده در بالا، مطالعات کمی بر روی سایر فلزات کمتر رایج مانند هافنیم، بریلیوم و برنج نیز انجام شده است [۴].

شرایط پردازش مؤثر در فرآیند PEO

در طول فرآیند پوشش، پارامترهای مختلفی مانند ترکیب الکترولیت، مواد بستر، زمان فرآیند، ولتاژ و نوع جریان، یعنی AC یا DC بر کیفیت پوشش تأثیر می گذارند. علاوه بر پارامترهای ذکر شده، عوامل دیگری نیز وجود دارند که بر پوشش تأثیر می گذارند، مانند حباب های گاز تشکیل شده، تخلیه نرم پلاسمایی^{۲۵} در مراحل بعدی فرآیند، تابش الکترومغناطیسی ساطع شده که به عنوان پدیده گالونولومینسانس^{۲۶} نیز شناخته می شود، دمای پلاσμα، حرکت سریع ذرات پراکنده در الکترولیت هنگام اعمال میدان الکتریکی که به عنوان الکتروفورز^{۲۷} نیز شناخته می شود و انرژی مصرف شده در طول فرآیند [۶]. در نهایت مورفولوژی، ریزساختار و اجزای فاز پوشش PEO عملکرد پوشش را تعیین می کند. در بخش بعدی، مروری مختصر بر تأثیر پارامترهای اثرگذار بر پوشش های PEO ارائه خواهیم کرد [۴].

■ تأثیر جریان الکتریکی

نوع توان به کار رفته در فرآیند PEO بر مورفولوژی پوشش توسعه یافته، ساختار پوشش، سرعت رشد ضخامت پوشش، سختی پوشش و مقدار تخلخل تأثیر می گذارد. حالت های مختلف جریان الکتریکی که می توان در طی فرآیند PEO استفاده کرد، همان طور که قبلاً ذکر شد، DC و AC هستند با جریان تک قطبی و دو قطبی برای کاربردهای خاص. اگرچه DC را می توان برای اهداف پوششی توسط فرآیند PEO استفاده کرد، این فرآیند زمانی مؤثرتر می شود که از AC استفاده شود. DC در کاربردهایی که نیاز به پوشش های متخلخل و نازک دارند کاربرد بیشتری دارد. علاوه بر این، حالت DC از تولید پوشش هایی پشتیبانی می کند که در آن سرعت تشکیل لایه اکسید نسبتاً پایین تر است که منجر به ساختارهایی با تخلخل بالاتر می شود. این حالت جریان، کنترل کمتر و ویژگی های تخلیه قابل تنظیم کمتری را ارائه می کند، اما اگر از حالت DC پالسی استفاده شود، کنترل بهتر مدت زمان تخلیه و احتمالاً مصرف انرژی کمتری را ممکن می سازد. البته کاربرد DC نسبتاً آزان تر و راحت تر از AC است. از سوی دیگر، مزیت استفاده از حالت AC این است که قطبش الکترو^{۲۸} را متوقف می کند و به کنترل فرآیند با قطع قوس کمک

می‌کند. مشاهده شده است که حالت های جریان پالس دوقطبی، پوشش های بهتر و ضخیم تری با مقاومت در برابر خوردگی بالاتر ایجاد می‌کنند، زیرا اثر تخلیه های پلاسما با شدت بالا و همچنین لبه های دمای بالا^{۲۹} را هنگام استفاده در فرآیند PEO کاهش می‌دهد[۴].

■ تأثیر الکترولیت ها

ترکیب، ماهیت (قوی یا ضعیف) و غلظت الکترولیت ها نقش حیاتی در تعیین پوشش تشکیل شده توسط فرآیند PEO دارد. به طور کلی، الکترولیت های مورد استفاده در فرآیند PEO قلیایی و ضعیف هستند. الکترولیت ها بارهای الکتریکی را قادر به حرکت می‌سازند که یک مدار را تشکیل می‌دهند و می‌توانند رسانایی الکتریکی را مناسب تنظیم کنند. طول عمر^{۳۰} الکترولیت ها یک عامل اساسی در فرآیند پوشش PEO است. علاوه بر این، مقادیر pH الکترولیت ها نقش مهمی در فرآیند PEO دارند که می‌تواند بر ریزساختار و خواص پوشش به دست آمده تأثیر بگذارد.[۴]

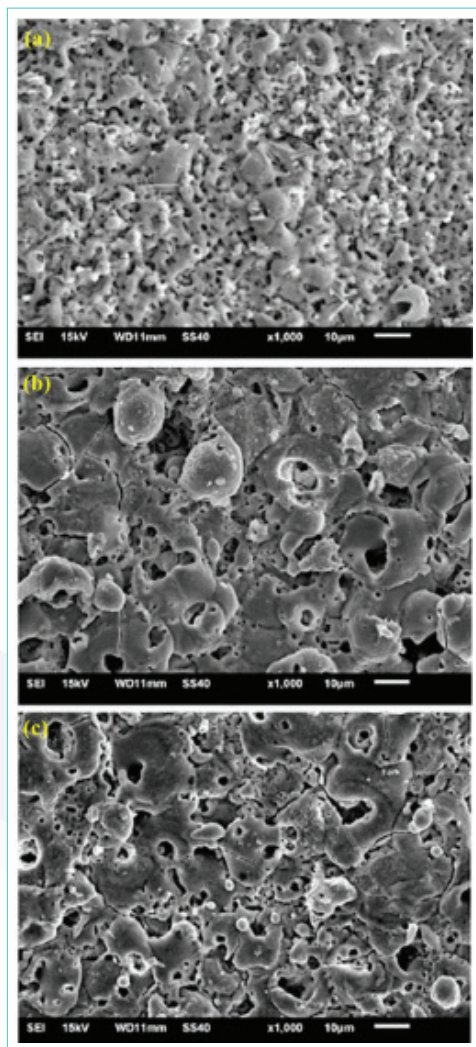
■ تأثیر افزودنی ها

افزودنی ها نقش حیاتی در بهبود ویژگی های پوشش PEO ایفا می‌کنند. ثابت شده که افزودنی ها به شکل اکسیدها، نانولوله های کربنی یا گرافیت سبب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پوشش های PEO می‌شوند. هنگامی که مواد افزودنی با بستر ترکیب می‌شوند پوشش به دست آمده حاوی نقص و ترک خوردگی های کمتری خواهد بود که در نتیجه سبب افزایش مقاومت پوشش در برابر خوردگی می‌شود[۴].

کاربرد فناوری نانو در پوشش های PEO

اخیراً فرآیند PEO برای تولید پوشش های نانوکامپوزیت با ترکیب نانوذرات در الکترولیت مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب نانوذرات یک تکنیک کارآمد برای بهبود کیفیت پوشش های PEO است. این نانوذرات تعبیه شده در ساختار، به فرآیند PEO اجازه می‌دهد تا پوشش های کامپوزیتی تولید کند. اگرچه تعداد قابل توجهی از نانوذرات ممکن است وارد اجزای داخلی پوشش شوند (به نظر می‌رسد که نانوذرات به حفره های ایجاد شده توسط فوران اکسیدهای مذاب جایی که تجزیه دی الکتریک اتفاق می‌افتد جذب می‌شوند)، اما بیشتر آن ها به صورت پراکنده در نزدیکی لایه بیرونی پوشش باقی می‌مانند؛ بنابراین ساختار پوشش اصلاح می‌شود. نانوذرات تعبیه شده در ساختار پوشش نه تنها ویژگی های خوردگی و تریبولوژیکی آن را بهبود می‌دهند، بلکه چسبندگی و سختی آن را به زیرلایه نیز بهبود می‌بخشد. این پوشش های نانوکامپوزیت در صنایع خودروسازی، پتروشیمی، زیست پزشکی، دریایی و الکترونیک به کار می‌روند[۴].

به عنوان یک ویژگی اجتناب ناپذیر، سطح پوشش های PEO دارای مورفولوژی متخلخل دارای منافذ با اشکال و اندازه های متفاوت است که به دلیل اکسید مذاب و خروج گاز از کانال های تخلیه پلاسما به طور تصادفی بر روی سطح پخش می‌شوند. در برخی شرایط، برخی ترک ها از طریق آزاد کردن تنش حرارتی، علاوه بر منافذ، در کانال های تخلیه پلاسما و خنک شدن سریع اکسید مذاب از طریق محلول همسایه در رشد فرآیند پوشش بر روی سطح ظاهر می‌شود. تولید پوشش های کامپوزیت پس از افزودن نانوذرات به محلول های پایه منجر به تخلخل سطح و همچنین تعداد و اندازه منافذ کمتر در مقایسه با پوشش های ساده می‌شود که به دلیل جذب و به دام افتادن ذرات درون منافذ و سپس بسته شدن منافذ است (شکل ۳). این ذرات از طریق فرآیند انتشار و الکتروفورز در داخل ریزمنافذ^{۳۱} پوشش گنجانده شدند[۸].



شکل ۳- تصاویر SEM از پوشش‌های با غلظت گرافیت مختلف (a) ۰، (b) ۱۵ و (c) ۲۵ گرم در لیتر

تأثیر نانوذرات مختلف بر رفتار خوردگی آلومینیوم و آلیاژهای آن

برای بهبود عملکرد خوردگی Al و آلیاژهای آن، نانوذرات مختلفی به پوشش‌های PEO اضافه شده‌اند [۹-۱۱]. نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs^{32}) توسط لی و همکاران^{۳۳} به پوشش‌های PEO روی آلیاژ ۷۰۷۵

Al اضافه شدند [۹]. چگالی جریان خوردگی لایه از $(4.6 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2)$ به $(8.3 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2)$ در حضور ذرات در محلول NaCl ۳٫۵٪ کاهش یافت. بهرامیان و همکاران^{۳۴} [۱۷] اثر ذرات TiO_2 را بر رفتار خوردگی آلیاژ Al 7075 پوشش داده شده با PEO در محلول H_2SO_4 یک مولار مطالعه کردند. اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی نشان داد که چگالی جریان خوردگی پوشش‌های PEO از $(40 \pm 7 \mu\text{A/cm}^2)$ به $(15 \pm 1 \mu\text{A/cm}^2)$ کاهش یافت. [۵] نانوذرات مختلفی به منظور ساخت پوشش‌های نانوکامپوزیتی بر روی زیرلایه‌های مختلف به روش PEO به کار گرفته شده‌اند که هر کدام ویژگی‌های ساختاری و مکانیکی متفاوتی را در پوشش ایجاد می‌کنند [۱۲].

ارائه‌دهندگان پوشش نانوکامپوزیت PEO در داخل کشور

در ایران شرکت‌هایی اقدام به ارائه خدمات پوشش‌دهی نانوکامپوزیتی بر اساس روش PEO کرده‌اند که در ادامه به بررسی آن‌ها خواهیم پرداخت.

■ شرکت پلاسما اکسید پارس

شرکت پلاسما اکسید پارس از جمله مجموعه‌های کارآمد جهت ارائه خدمات مهندسی سطح، مشاوره فنی در زمینه مهندسی سطح، خوردگی و سایش و راه‌اندازی خطوط پوشش‌دهی (در مقیاس خرد و کلان) به صنایع مختلف از جمله پزشکی، هوافضا، نساجی، خودرو، ماشین‌آلات، صنایع دریایی، الکترونیک و صنایع لوازم خانگی محسوب می‌شود. این شرکت در محوری‌ترین زمینه فعالیت خود، اقدام به خدمات پوشش‌دهی با روش اکسیداسیون الکتrolیتی پلاسمایی به صنعتگران کرده است. (www.plasmaoxide.com)

از ویژگی‌های پوشش‌های PEO این شرکت می‌توان موارد زیر را نام برد:

- عدم تخریب خواص مکانیکی زیرلایه به دلیل حرارت ورودی ناچیز؛
- عدم نیاز به آماده‌سازی اولیه زیرلایه؛
- عدم وابستگی فرایند به شکل و اندازه قطعه؛
- سادگی عملکرد تجهیزات و عدم نیاز به خلأ و تجهیزات گازه‌ای حفاظتی؛
- فرایندی بی‌خطر و دوست‌دار محیط‌زیست (عدم استفاده از محیط‌های اسیدی و عناصر سنگین)؛
- گستره وسیعی از خواص سطحی چون مقاومت بالا به خوردگی و سایش، خواص کاربردی نظیر دما-نوری، عایق دی الکتریک، سد حرارتی و...؛
- ایجاد پوشش با ضخامت یکنواخت در سرتاسر قطعه؛
- امکان ایجاد پوشش در محدوده ضخامت‌های ۱ تا ۲۰۰ میکرون با کنترل شرایط فرایند؛
- امکان استفاده به عنوان یک میان‌لایه برای سایر فرایندهای پوشش‌دهی؛
- تطبیق‌پذیری پوشش با نوع کاربرد از طریق کنترل پارامترهای فرایند؛
- سختی بالا (بیش از ۲۰۰۰ ویکرز)؛
- مقاومت به خوردگی عالی (بیش از ۲۰۰۰ ساعت مقاومت در آزمون سالت اسپری^{۳۵})؛
- افزایش مقاومت به حرارت (بیش از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد)؛
- افزایش طول عمر (گستره استفاده از قطعات فلزی تا ۳ الی ۵ سال نسبت به قطعه بدون پوشش)؛
- قابلیت تحمل فشار (مدول الاستیک حدود ۳۰ گیگا پاسکال).

■ شرکت تارا پوشش

تارا پوشش تولیدکننده انواع پوشش های کاربردی با استفاده از به روزترین فرایندهای ساخت است. شرکت تارا پوشش با توجه به سابقه بالا در زمینه انواع روش های پوشش دهی، به ویژه پوشش دهی PEO، با بهینه نمودن پارامترها و محلول های الکترولیت، به پوشش دهی قطعات به روش PEO با انواع کاربردها دست یافته است که آمادگی همکاری با صنایع گوناگون را دارد. سازگاری با محیط زیست، امکان پوشش دهی قطعات پیچیده، مقاومت در برابر خوردگی عالی و موارد دیگر از ویژگی های پوشش PEO این شرکت است.

ارائه دهندگان پوشش نانوکامپوزیت PEO در خارج از کشور

در خارج از کشور نیز شرکت هایی اقدام به ارائه خدمات پوشش دهی نانوکامپوزیتی بر اساس روش PEO کرده اند که در ادامه به بررسی آن ها خواهیم پرداخت.

■ IBC Materials & Technologies LLC

IBC Materials & Technologies LLC در سال ۲۰۰۲ در لبنان، ایندیانا تأسیس شد و عضو گروه شرکت های IBC است. IBC در تحقیق و توسعه راه حل های مهندسی سطح برای بهبود عملکرد و عمر قطعات و سیستم ها تخصص دارد. تمرکز اصلی این شرکت فناوری های الکترولیتی پلاسما و پوشش های PVD^{36} و CVD^{37} تریبولوژیکی مهندسی شده و اجرای آن ها در کاربردهای صنعتی، پزشکی، نیمه هادی، هوافضا و دفاعی است. (www.ibcmaterials.com)

■ Keronite

Keronite در سال ۲۰۰۲ تأسیس شده و هم اکنون در حال توسعه، طراحی و به کارگیری پیشرفته ترین تکنیک های سطحی از جمله PEO در جهان برای آلیاژهای سبک وزن است.

پی نوشت ها

- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1- Conversion coatings | 20- Recrystallization |
| 2- Anodization | 21- Working electrode |
| 3- Anodization | 22- Counter electrode |
| 4- Surface treatment | 23- Electrochemical oxygen evolution |
| 5- Plasma electrolytic oxidation | 24- Hydrogen evolution |
| 6- Surface treatment | 25- Soft plasma discharge |
| 7- Bioactivity | 26- Galvonoluminescence |
| 8- Micro-arc oxidation | 27- Electrophoresis |
| 9- Plasma chemical oxidation | 28- Electrode polarization |
| 10- Anodic oxidation by spark discharge | 29- High-temperature spikes |
| 11- Thermal oxygen diffusion reactions | 30- Aging |
| 12- Alternative current | 31- Micro porous |
| 13- Direct current | 32- Multi-wall carbon nanotubes |
| 14- Polar | 33- Lee et al |
| 15- Bipolar | 34- Bahramian et al |
| 16- Positive/negative cycle duty | 35- Salt spray |
| 17- Developed voltage breakdown | 36- Physical vapor deposition |
| 18- Local melting | 37- Chemical vapor deposition |
| 19- Quenching process | |

مراجع

- ۱ britanica. surface coating. 2016; Available from: <https://www.britannica.com/technology/surface-coating>.
- ۲ Abdeen, D.H., et al., A review on the corrosion behaviour of nanocoatings on metallic substrates. Materials, 2019. 12(2): p. 210
- ۳ Saji, V.S., T.S.N.S. Narayanan, and X. Chen, Conversion Coatings for Magnesium and Its Alloys. 2022: Springer International Publishing.
- ۴ Sikdar, S., et al., Plasma electrolytic oxidation (PEO) process—processing, properties, and applications. Nanomaterials, 2021. 11(6): p. 1375.
- ۵ Lu, X., et al., Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions—A review. Surface and Coatings Technology, 2016. 307: p. 1165-1182.
- ۶ Kaseem, M., et al., Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance. Progress in Materials Science, 2021. 117: p. 100735.
- ۷ Martin, J., et al., Effects of electrical parameters on plasma electrolytic oxidation of aluminium. Surface and coatings technology, 2013. 221: p. 70-76.
- ۸ Molaei, M., K. Babaei, and A. Fattah-alhosseini, Improving the wear resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Mg and its alloys under the addition of nano- and micro-sized additives into the electrolytes: a review. Journal of Magnesium and Alloys, 2021. 9(4): p. 1164-1186.
- ۹ Lee, K.M., Y.G. Ko, and D.H. Shin, Incorporation of multi-walled carbon nanotubes into the oxide layer on a 7075 Al alloy coated by plasma electrolytic oxidation: Coating structure and corrosion properties. Current Applied Physics, 2011. 11(4): p. 555-559.
- ۱۰ Kim, D., et al., Composite plasma electrolytic oxidation to improve the thermal radiation performance and corrosion resistance on an Al substrate. Applied Surface Science, 2015. 357: p. 1396-1402.
- ۱۱ Bahramian, A., K. Raeissi, and A. Hakimizad, An investigation of the characteristics of Al₂O₃/TiO₂ PEO nanocomposite coating. Applied Surface Science, 2015. 351: p. 13-26.
- ۱۲ Mahmood Aliofkhaezrai, A.S.R., Fabrication of Nanostructures by Plasma Electrolysis, in Fabrication of Nanostructures by Plasma Electrolysis. 2010, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. p. 211-242.