فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۶، شماره‌ی ۲، تابستان ۱۳۹۶

بررسی رفتار مکانیکی پوشش کامپوزیتی نانوساختار زیرکونیا– آلومینا اعمال شده بر روی سطح آلومینیوم ۲۰۲۴ با روش سل– ژل

علی شانقی، علیرضا سوری*، مهدی رفیعی، علی بخشی

دانشگاه ملایر، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد

* arsouri@gmail.com

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲۲ خرداد ۱۳۹۶

پذیرش: ۵ دی ۱۳۹۶

کلید واژه:

پوشش نانوکامپوزیت زیرکونیا– آلومینا، آلومینیوم ۲۰۲۴، سل–ژل، رفتار مکانیکی

چکیده:

پوشش‌های نانوکامپوزیتی پایه سرامیکی به دلیل دارا بودن سختی و مقاومت به سایش بالا دارای کاربرد بسیار زیادی در بهبود رفتار سایشی آلومینیوم و آلیاژهای آن دارد. دراین تحقیق پوشش نانوکامپوزیتی زیرکونیا – آلومیناتوسط فرآیند سل- ژل و روش غوطه‌وری همراه با استفاده از پیش ماده‌های آلکوکسیدی زیرکونیوم پروپوکساید و آلومینیوم تری سک بوتیلات برروی سطح آلومینیوم ۲۰۲۴ اعمال گردیده است. سپس خواص فازی، ساختاری ومورفولوژی پوشش به ترتیب با استفاده از GIXRD، FTIR، FESEM، AFM مورد بررسی قرارگرفته است. همچنین خواص نانو مکانیکی پوشش بوسیله روش‌های نانودندانه‌گذاری و نانو خراش در بارهای ۵۰ و ۶۰ میلی نیوتن ارزیابی شده است. نتایج بیانگر تشکیل پوشش همگن، یکنواخت و کم ترک همراه با ضخامت تقریبا ۸۰۰ نانومتر است. حضور آلومینا با بهبود خواص مکانیکی همانند سختی و مدول الاستیک به مقدار ۱/۱۵ و ۱۵ گیگاپاسکال منجر به بهبود رفتار سایشی با ضریب اصطکاک ۰/۵۱ و حاکم شدن مکانیزم سایش خراشان همراه با مکانیزم برشی گردیده است.

۱- مقدمه

آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ بدلیل استحکام بالا، دانسیته کم و خواص مکانیکی مطلوب کاربرد وسیع و گسترده‌ای در صنایع دارد. اما دارای محدودیت‌هایی همانند، مقاومت سایشی کم و همچنین مقاومت به خوردگی پایین به دلیل حضور عنصر مس است [۱]. یکی از روش‌های متداول برای بهبود مقاومت به خوردگی و سایشی فلزات، اعمال پوشش‌های مقاوم همانند پوشش‌های سرامیکی پایه زیرکونیا، آلومینا و تیتانیا است. در این میان پوشش زیرکونیا به دلیل دارا بودن مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی بالا از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. اما متفاوت بودن ساختار کریستالی و همچنین خواص فیزیکی و شیمیایی زیرکونیا با زیر لایه آلومینیوم ۲۰۲۴ منجر به ایجاد ترک و تخلخل در پوشش زیرکوینا گردیده، که همین امر خود

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

منجر به کاهش خواص مکانیکی و خوردگی پوشش می‌گردد. اضافه کردن اکسیدهای تثبیت‌کننده مانند Y_2O_3، MgO و CaO به زیرکونیا، پایداری و ثبات فاز مکعبی و تتراگونال آن را از دمای اتاق تا نقطه ذوبش امکان‌پذیر می‌سازند، در نتیجه با این عمل از انبساط حجمی زیان‌آوری که در پی تغییر فاز تتراگونال به منو کلینیک صورت می‌گیرد، می‌توان اجتناب کرد. همچنین استفاده از پوشش‌های کامپوزیتی جهت رفع معایب پوشش زیرکونیا بسیار متداول است، به همین دلیل جهت بهبود عملکرد پوشش زیرکونیا از آلومینا بعنوان پایدار کننده و بهبود دهنده ساختار و افزایش متناسب بودن پوشش و زیرلایه آلومینیوم ۲۰۲۴ استفاده می‌گردد [۲-۳].

روش‌های متداولی برای اعمال پوشش‌های سرامیک وجود دارد، همانند روش‌های CVD [۴]، PVD [۵]، کند و پاش مغناطیسی [۶] و سل- ژل [۷-۸]. در این میان پوشش‌دهی به روش سل-ژل جهت اعمال پوشش سرامیکی دارای مزایایی مثل تهیه پوشش در دمای پایین و کنترل آسان پارامترهای پوشش‌دهی، تجهیزات نسبتا ساده، اعمال پوشش‌های کامپوزیتی با ترکیب و خواص یکنواخت تر و قابلیت پوشش دهی قطعات با اشکالی پیچیده می‌باشد [۹-۱۰]. اگرچه گاهی اوقات چسبندگی این پوشش‌ها برای کاربردهای تریبولوژیکی کافی نیست، ولی با کنترل پارامترهای تهیه محلول و فرایند پوشش‌دهی می‌توان خواص سایشی و خوردگی پوشش‌های سرامیکی را بهبود داد.

بطور کلی در میان تحقیقات انجام شده، رفتار مکانیکی پوشش نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا با استفاده از روش‌های نانو دندانه‌گذاری و نانو خراش بطور کامل و تحت اثر نیروهای مختلف مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این تحقیق پوشش نانوکامپوزیتی زیرکونیا - آلومینا توسط فرآیند سل- ژل و روش غوطه‌وری همراه با استفاده از پیش ماده‌های آلکوکسیدی زیرکونیوم پروپوکساید و آلومینیوم تری سک بوتیلات بر روی سطح آلومینیوم ۲۰۲۴ اعمال گردیده است. سپس خواص فازی، ساختاری و مورفولوژی به ترتیب با استفاده از GIXRD،FTIR، FESEM، AFM مورد بررسی قرار گرفته، همچنین خواص نانو مکانیکی پوشش به‌وسیله روش‌های نانودندانه‌گذاری و نانو خراش در بارهای مختلف همانند ۵۰ و ۶۰ میلی نیوتن ارزیابی شده است.

۲- فعالیت‌های تجربی

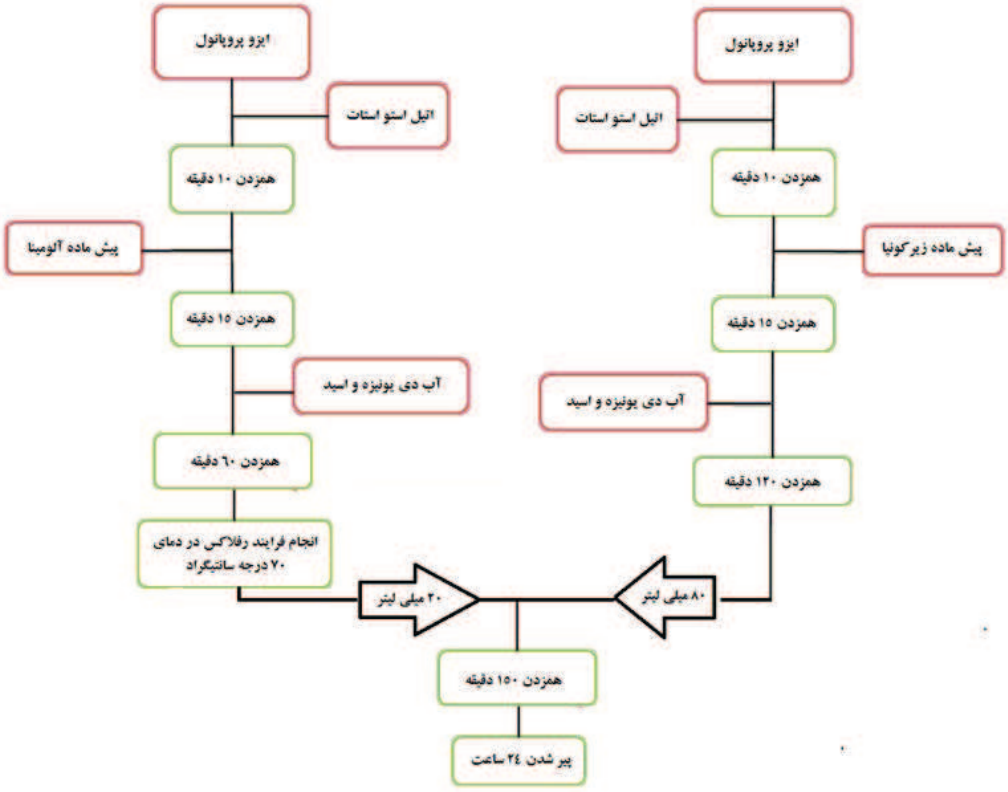
۲-۱- تهیه محلول پوشش‌دهی

در تهیه محلول‌ها، پروپوکساید زیرکونیا به‌عنوان پیش ماده زیرکونیا، آلومینیوم تری سک بوتیلات بعنوان پیش ماده آلومینا، ایزوپروپانول بعنوان حلال و اتیل استواستات بعنوان عامل پایدار کننده محلول مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جهت شروع فرایند هیدرولیز و کنترل واکنش‌های هیدرولیز و کندانسیون، آب دیونیزه به صورت قطره قطره به محلول اضافه گردید. طرحواره تهیه محلول پوشش دهی زیرکونیا و آلومینا در شکل ۱ نشان داده شده است. قابل ذکر است که تهیه محلول آلومینا مشابه محلول زیرکونیا است با این تفاوت که جهت ایجاد محلول همگن و پایدار، محلول آلومینا تحت رفلاکس به مدت ۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت و در نهایت محلول پوشش با ترکیب

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

نسبت حجمی زیرکونیا- آلومینا، ۸۰-۲۰ درصد، با هم ترکیب شده و به مدت ۱۵۰ دقیقه به شدت مخلوط شده و در نهایت محلول به مدت ۲۴ ساعت تحت عملیات پیرسازی قرار گرفته است.



شکل ۱- طرحواره تهیه محلول پوشش‌دهی زیرکونیا- آلومینا.

۲-۲- آماده سازی و اعمال پوشش زیرکونیا- آلومینا

در این تحقیق آلومینیوم ۲۰۲۴ به عنوان زیرلایه در نظر گرفته شده و تحت عملیات آماده سازی سطحی بوسیله فرایند سمباده زنی از شماره ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ مش، پولیش‌کاری بوسیله محلول دوغابی آلومینا با اندازه ذرات ۱ تا ۳ میکرون و در نهایت چربی گیری و شستشوی سطحی بوسیله استن، الکل و آب مقطر قرار گرفته است. در ادامه پوشش به وسیله فرایند سل- ژل و روش غوطه‌وری با سرعت ۲۵ میلی متر بر دقیقه و نگهداری به مدت ۱ دقیقه بر روی سطح آلومینیوم ۲۰۲۴ اعمال شده است. جهت ایجاد پوشش با ضخامت مشخص و یکنواخت فرایند پوشش‌دهی ۸ مرتبه تکرار شده است. پس از اعمال هر لایه توسط فرایند غوطه‌وری، برای ایجاد پوششی کاملا پایدار و بی‌نقص، نمونه‌ها ابتدا در محفظه حاوی ایزوپروپانول خشک شده و در نهایت تحت عملیات حرارتی پلکانی با سرعت ۱ درجه بر دقیقه در دماهای ۹۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۲ دقیقه، ۱۲۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۵ دقیقه و در نهایت ۱۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفته‌اند.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

۲-۳- روش‌های ارزیابی پوشش

رفتار فازی پوشش با استفاده از روش GIXRD (X'Pert Pro MPD) بوسیله اشعه ایکس Cu, kα (λ=۱/۵۴ Å) با زاویه ورودی ۵ درجه در محدوده زاویه پراش ۱۰ تا ۸۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت. ساختار شیمیایی و نوع پیوندهای شیمیایی پوشش بوسیله طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) (مدل v۱۱۳IFS ساخت شرکت Brucker آلمان با دقت با دقت $^{-1}$ ۰/۰۳cm)، همچنین ضخامت، مورفولوژی و ساختار سطحی لایه‌ها بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) (مدل TESCAN – Mira III ساخت کشور جمهوری چک) ارزیابی شد. توپوگرافی سطحی نمونه‌ها و خواص مکانیکی پوشش همانند نانوسختی، مدول یانگ و نانو پوشش به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) (Hysitron Inc. Triboscope، بامبدل دوبعدی به همراه نرم‌افزارهای NanoscopeIII و Triboscope®3.5PL) مجهز به فرورونده برکوویچ[1] (منشوری با زاویه رأس ۱۴۲/۳°) تحت بارهای مختلف اعمالی همانند ۵۰ و ۶۰ میلی نیوتن ارزیابی شده است.

۳- نتایج و بحث

در این مقاله دو نوع پوشش زیرکونیا و پوشش نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا بر روی سطح آلومینیوم ۲۰۲۴ با روش سل- ژل اعمال گردیده و سپس خواص فازی، ساختاری و خواص نانو مکانیکی همانند نانو سختی و نانو سایش آنها بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است.

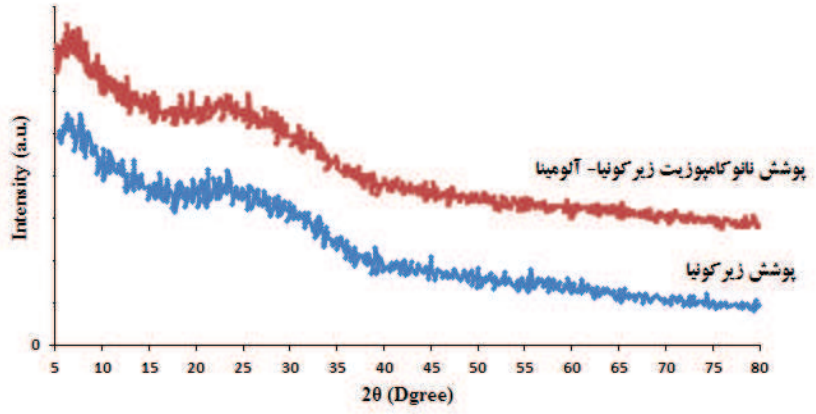
در شکل ۲ منحنی GIXRD پوشش‌های زیرکونیا و زیرکونیا- آلومینا نشان داده شده، که بیانگر آمورف بودن پوشش‌ها و عدم تشکیل ساختار کریستالی، بوسیله تشکیل یک قله پهن در منحنی می‌باشد [۱۱-۱۲]. البته قابل ذکر است که در پوشش‌های سل- ژل زیرکونیا در محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد کریستالیته نشده و پوشش‌ها آمورف می‌باشند و تشکیل ساختار مونوکلینیک تقریبا در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد صورت می‌پذیرد [۱۳]. انتخاب دمای پایین برای عملیات حرارتی جهت جلوگیری از تشکیل نواقص در سطح پوشش، بالاتر بودن مقاومت به خوردگی فاز آمورف نسبت به ساختار کریستالی و همچنین متناسب به دماهای عملیات حرارتی زیرلایه آلومینیوم ۲۰۲۴ جهت حفظ ساختار و خواص زیرلایه صورت پذیرفته است.

در شکل ۳ نمودارهای FTIR پوشش‌های زیرکونیا و زیرکونیا- آلومینا نشان داده شده، پیک‌های مشاهده شده در ۵۰۴ و $۷۸۵cm^{-1}$ مربوط به Al-O و $۶۴۲cm^{-1}$ مربوط به Zr-O بوده [۱۴-۱۶] و پیک‌های مشاهده شده در ۷۸۵، ۱۲۷۴، ۲۹۴۲ و $۲۹۷۹ cm^{-1}$ مربوط به پیوندهای C-H و O-C و پیک‌های مشاهده شده در محدوده ۱۴۰۰ تا $۱۷۰۰cm^{-1}$ مربوط به گروه‌های Zr-O-H و Al-O-H است [۱۷-۱۸]. همچنین پیک‌های در محدوده ۳۰۰۰ تا $۴۰۰۰cm^{-1}$ مربوط به گروه‌های O-H است. نکته قابل توجه شباهت بسیار بالای نمودارهای پوشش زیرکونیا و پوشش نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا است، که می‌تواند بیانگر تشکیل محلول جامد زیرکونیا- آلومینا باشد.

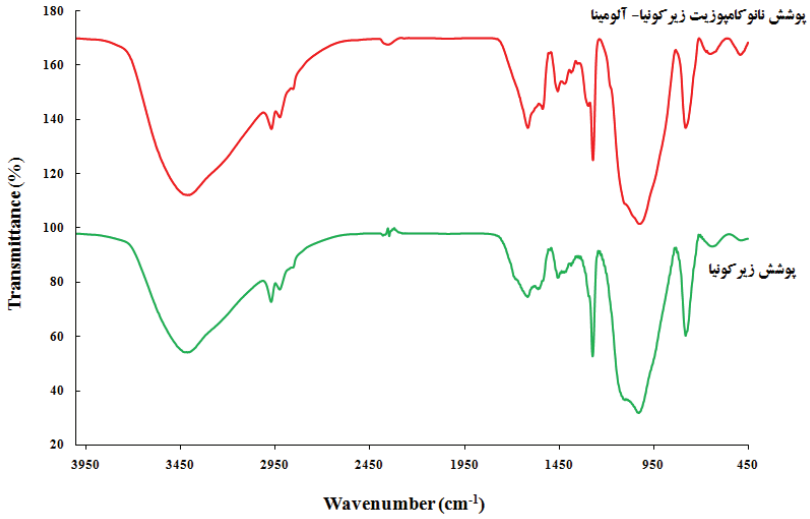
[1] Berkovich Indenter

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]



شکل ۲- الگوهای GIXRD پوشش‌های زیرکونیا و زیرکونیا- آلومینا عملیات حرارتی شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد.



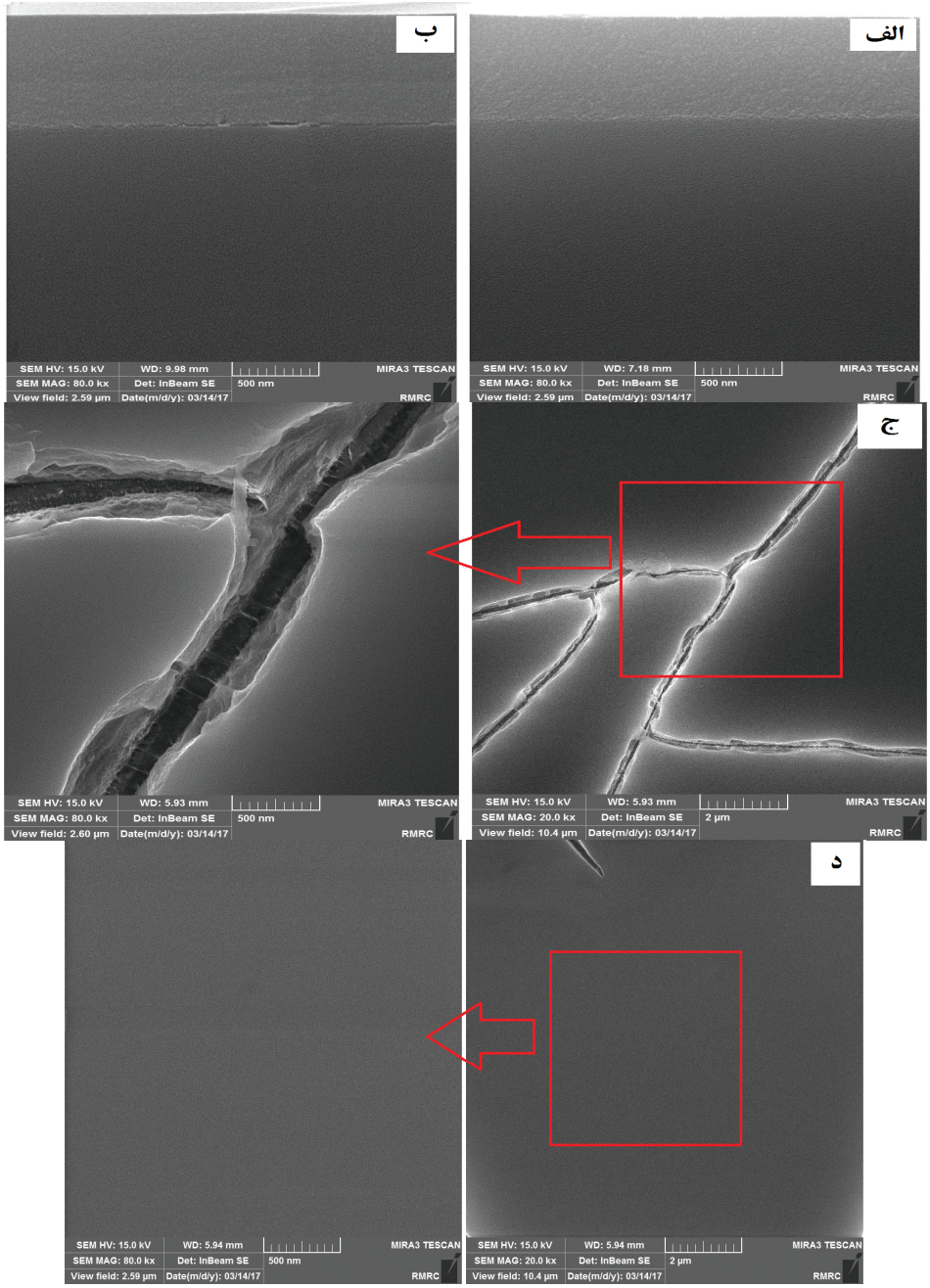
شکل ۳- نمودار FTIR پوشش زیرکونیا و پوشش نانو کامپوزیت زیرکونیا- آلومینا.

در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی FESEM ضخامت، ساختار، مورفولوژی پوشش‌های زیرکونیا و زیرکونیا- آلومینا در بزرگنمایی‌های ۲۰،۰۰۰ و ۸۰،۰۰۰ و همچنین نقشه توزیع عنصری پوشش‌ها نشان داده شده است. مطابق شکل ۴- الف و ۴- ب ضخامت هر دو پوشش زیرکونیا و زیرکونیا- آلومینا به ترتیب ۷۴۰ و ۸۱۰ نانومتر است، از آنجایی‌که سرعت ورود و خروج و نحوه اعمال هر دو پوشش یکسان است، لذا تغییر ضخامت می‌تواند ناشی از افزایش غلظت و ویسکوزیته محلول پوشش‌دهی زیرکونیا- آلومینا نسبت به محلول زیرکونیا باشد. تصویر ۴-ج به خوبی بیانگر ایجاد ترک در پوشش زیرکونیا به دلیل ضریب انبساط حرارتی بالای زیرکونیا، خروج ترکیبات آلی و مواد فرار از پوشش در دمای عملیات حرارتی کمتر از ۱۵۰ درجه سانتیگراد است، البته در این مقاله با خشک کردن نمونه‌ها در اتمسفر حاوی ایزوپروپانول و انجام عملیات حرارتی با حداقل سرعت ۱

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

درجه سانتیگراد بر دقیقه، خروج مواد آلی فرار از پوشش و ایجاد ترک به حداقل رسانده شده است [۱۷و۱۹]. حضور آلومینا به دلیل دارا بودن ضریب انبساط حرارتی کمتری نسبت به زیرکونیا و بعنوان عامل پایدار کننده از رشد ترک‌ها و ایجاد نواقص در حین عملیات حرارتی ممانعت نموده است [۲۰].

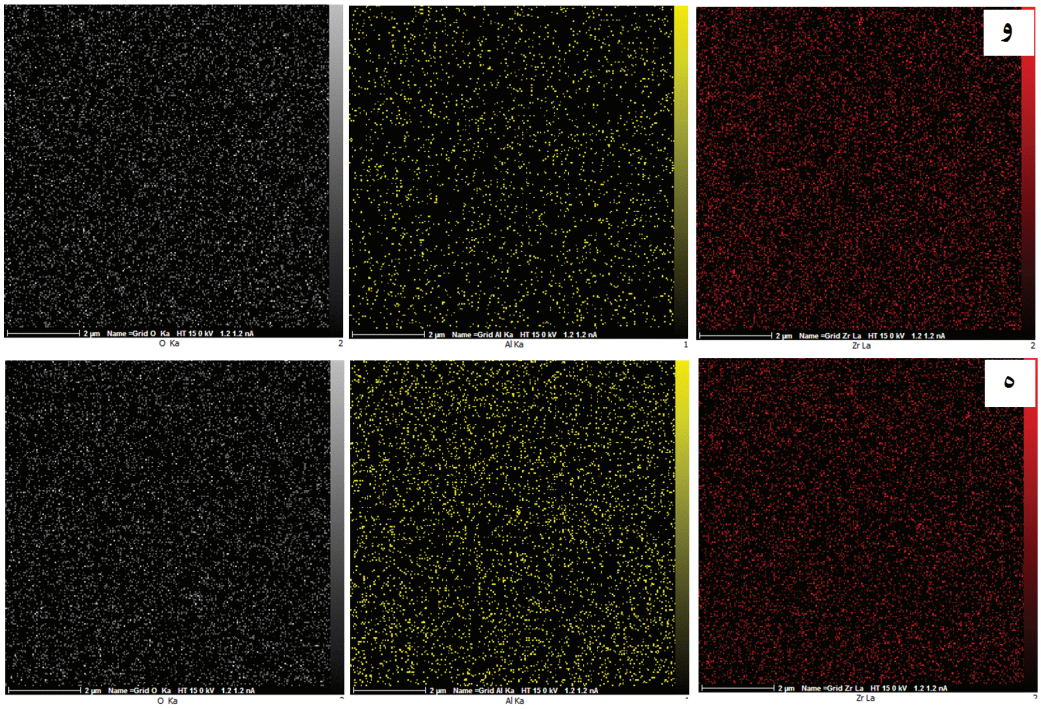


شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع پوشش، الف) زیرکونیا و ب) نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا، تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح پوشش، ج) زیرکونیا در بزرگنمایی‌های ۲۰ و ۸۰ هزار برابر، و د) نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا در بزرگنمایی‌های ۲۰ و ۸۰ هزار برابر.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

تصویر ۴-د نشان دهنده ایجاد پوششی همگن، نانوساختار و با درصد خیلی کمی ترک، ناشی از حضور آلومینا است. نکته قابل توجه همگنی و یکنواختی ترکیب شیمیایی هر دو پوشش زیرکونیا (ترک دار) و زیرکونیا- آلومینا (تقریبا عاری از ترک)، همانند حضور عناصر زیرکونیوم، آلومینیوم و اکسیژن، مشاهده شده در شکل‌های ۴-و و ۴-ه است، که به خوبی بیانگر مناسب بودن فرایند سل- ژل در ایجاد ترکیبات تک جزئی همانند پوشش زیرکونیا و هم ترکیبات دو جزئی همانند پوشش زیرکونیا- آلومینا دارد.



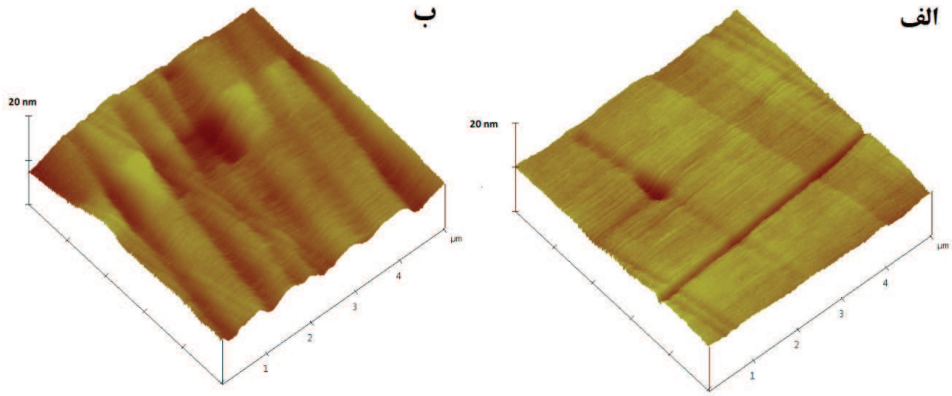
ادامه شکل ۴- نقشه توزیع عنصری زیرکونیم، آلومینیوم و اکسیژن در پوشش، و) زیرکونیا و ه) نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا.

در شکل ۵ تصاویر AFM پوشش های زیرکونیا و زیرکونیا- آلومینا جهت تایید نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی در مقیاس $5\times5\mu m^2$ نشان داده شده، که بخوبی بیانگر عاری از ترک بودن پوشش نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا نسبت به پوشش زیرکونیا است. اگرچه پوشش نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا یکپارچه تر از پوشش زیرکونیا است، اما دارای پستی و بلندی ها و همچنین ناهمگونی بیشتری نسبت به پوشش زیرکونیا است، که می‌تواند ناشی از تنش‌هایی باشد که در هنگام خروج مواد آلی و فرار از پوشش ایجاد شده باشند، که در پوشش زیرکونیا منجر به ایجاد ترک و حفره گردیده و در پوشش نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا، به دلیل حضور آلومینا منجر به ایجاد ناهمگونی گردیده است. این مواد فرار می‌توانند ناشی از ترکیبات آلی و حلقوی مواد اولیه مورد استفاده و همچنین محصول‌های واکنش‌های هیدرولیز و کندانسیون فرایند سل- ژل باشند[۲۱و ۲۲]. میانگین زبری سطح (Sa)

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

زیرلایه آلومینیوم ۲۰۲۴ بدون پوشش، پوشش زیرکونیا و پوشش نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا به ترتیب ۴۱/۹۲۵، ۰/۸۴۹ و ۰/۲۹۸ نانومتر است، که به خوبی بیانگر کاهش زبری سطح آلومینیوم ۲۰۲۴ با اعمال پوشش نانوساختار پایه زیرکونیایی است، همچنین با حضور جزء ثانویه آلومینا نیز زبری سطحی حدود ۶۵ درصد کاهش یافته است.



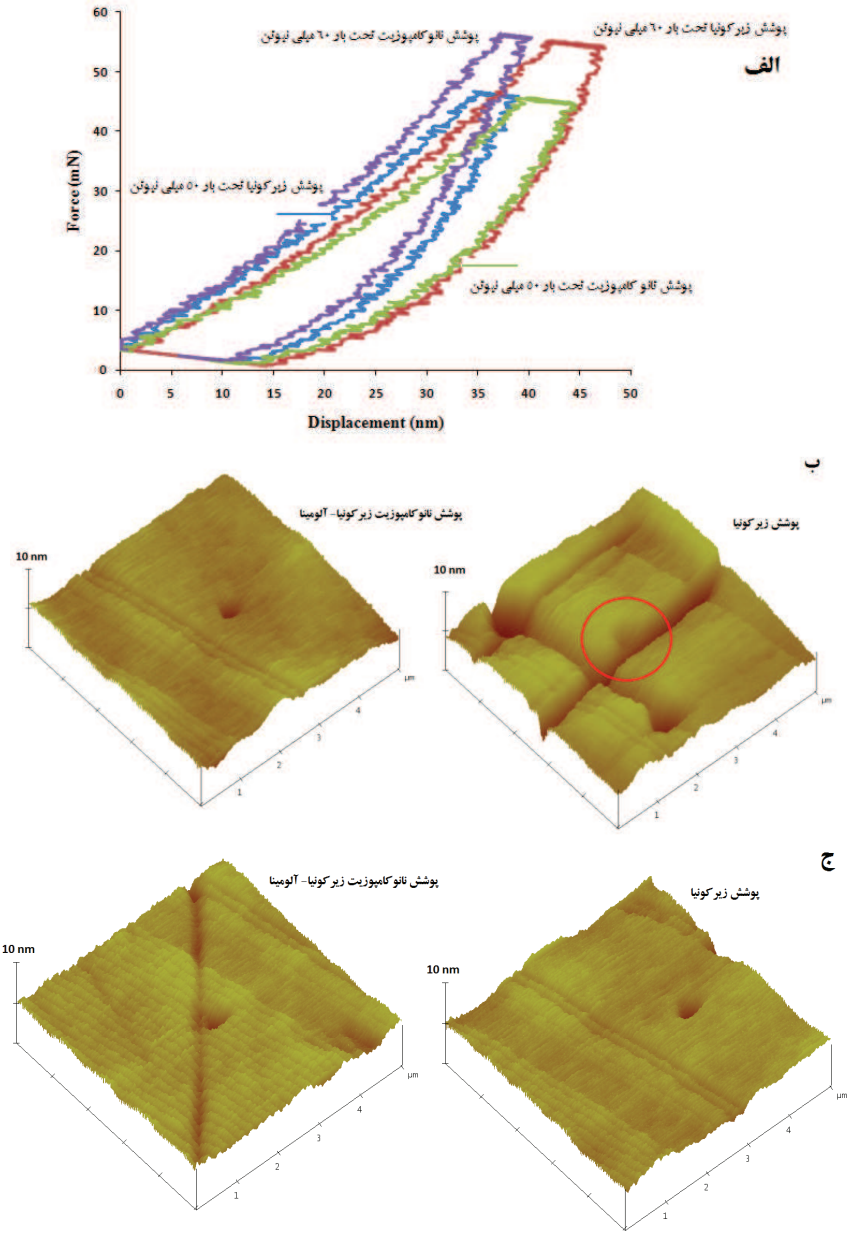
شکل ۵- تصویر AFM پوشش، الف) زیرکونیا و ب) نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا.

خواص نانو مکانیکی پوشش‌ها به ترتیب بوسیله دو روش نانو دندانه‌گذاری و نانو خراش جهت بررسی رفتار سختی و رفتار سایشی پوشش‌های زیرکونیا و زیرکونیا- آلومینا مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۶ منحنی و تصاویر نانو دندانه‌گذاری پوشش‌های زیرکونیا و زیرکونیا- آلومینا در دو بار مختلف اعمالی ۵۰ و ۶۰ میلی نیوتن نشان داده شده و نتایج آن بطور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین قابل ذکر است که نتایج حاصل از اعمال دو بار مختلف ۵۰ و ۶۰ میلی نیوتن با عمق نفوذ در محدوده ۴۰ تا ۶۰ نانومتر که حدود یک دهم ضخامت پوشش است، صرفا بیانگر خصوصیات و رفتار پوشش است [۲۳ و ۲۴]. مطابق منحنی نانو دندانه گذاری و تصاویر فرورونده در سطح در بار ۵۰ میلی نیوتن، پوشش زیرکونیا دارای سختی، مدول الاستیک و منطقه پلاستیک بیشتری در مقایسه با پوشش نانو کامپوزیت زیرکونیا- آلومینا است. البته احتمال دارد دلیل این امر ناشی از حضور نواقص و ترک‌های زیاد در پوشش زیرکونیا نسبت به دیگری باشد که می‌تواند به دلیل جذب انرژی توسط نواقص باشد. اما با افزایش بار اعمالی به ۶۰ میلی نیوتن، پوشش نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا دارای سختی، مدول الاستیک و منطقه پلاستیک بیشتری در مقایسه با زیرکونیا است. در واقع پوشش نانوکامپوزیت به دلیل عاری بودن از نواقص و ترک و همچنین یکپارچه و پیوسته بودن‌دارای مقاومت بیشتری نسبت به پوشش زیرکونیا در برابر نفوذ فرورنده در سطح بوده است. در مقایسه منحنی نانو دندانه گذاری پوشش زیرکونیا در دو بار مختلف ۵۰ و ۶۰ میلی نیوتن، پوشش با افزایش نیرو مقاومت کمتری از خود نشان داده و سختی و مدول الاستیک آن کاهش یافته است، در واقع با افزایش نیرو احتمالا حضور نواقص و اثرات ناشی از آنها بیشتر نمایان شده و جذب و آزاد شدن انرژی توسط آنها راحت‌تر و سریع‌تر اتفاق افتاده و افزایش قسمت افقی منحنی دندانه‌گذاری در هنگام تغییر بارگذاری و ماکزیمم عمق نفوذ

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

می‌تواند تایید کننده این امر و حرکت راحت‌تر نابجایی‌ها در پوشش زیرکونیا باشد. اما پوشش نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا رفتاری متفاوت نسبت به پوشش زیرکونیا دارد، و با افزایش نیروی اعمالی از ۵۰ به ۶۰ میلی نیوتن، سختی و مدول الاستیک افزایش یافته، شاید بتوان گفت پوشش کار سخت شده است و این امر به خوبی با کاهش در قسمت افقی منحنی دندانه‌گذاری در هنگام تغییر بارگذاری و ماکزیمم عمق نفوذ قابل مشاهده است [۲۳-۲۷].



شکل ۶- الف) منحنی نانو دنداگذاری پوشش‌های زیرکونیا و نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا، ب) تصویر فرورونده در پوشش‌های زیرکونیا و نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا تحت بار ۵۰ میلی نیوتن و ج) تصویر فرورونده در پوشش‌های زیرکونیا و نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا تحت بار ۶۰ میلی نیوتن.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

جدول ۱- نتایج خلاصه شده آزمایش دندانه‌گذاری پوشش های زیرکونیا و نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا تحت بارهای ۵۰ و ۶۰ میلی نیوتن

بار اعمالی (mN)	پوشش	مدول الاستیک (GPa)	سختی (GPa)	ماکزیمم عمق نفوذ (nm)
۵۰	زیرکونیا	۱۴/۰	۰/۹۳	۳۹
	زیرکونیا- آلومینا	۱۰/۲	۰/۷۵	۴۵
۶۰	زیرکونیا	۱۲/۱	۰/۷۹	۴۸
	زیرکونیا- آلومینا	۱۵/۱	۱/۱۵	۴۱

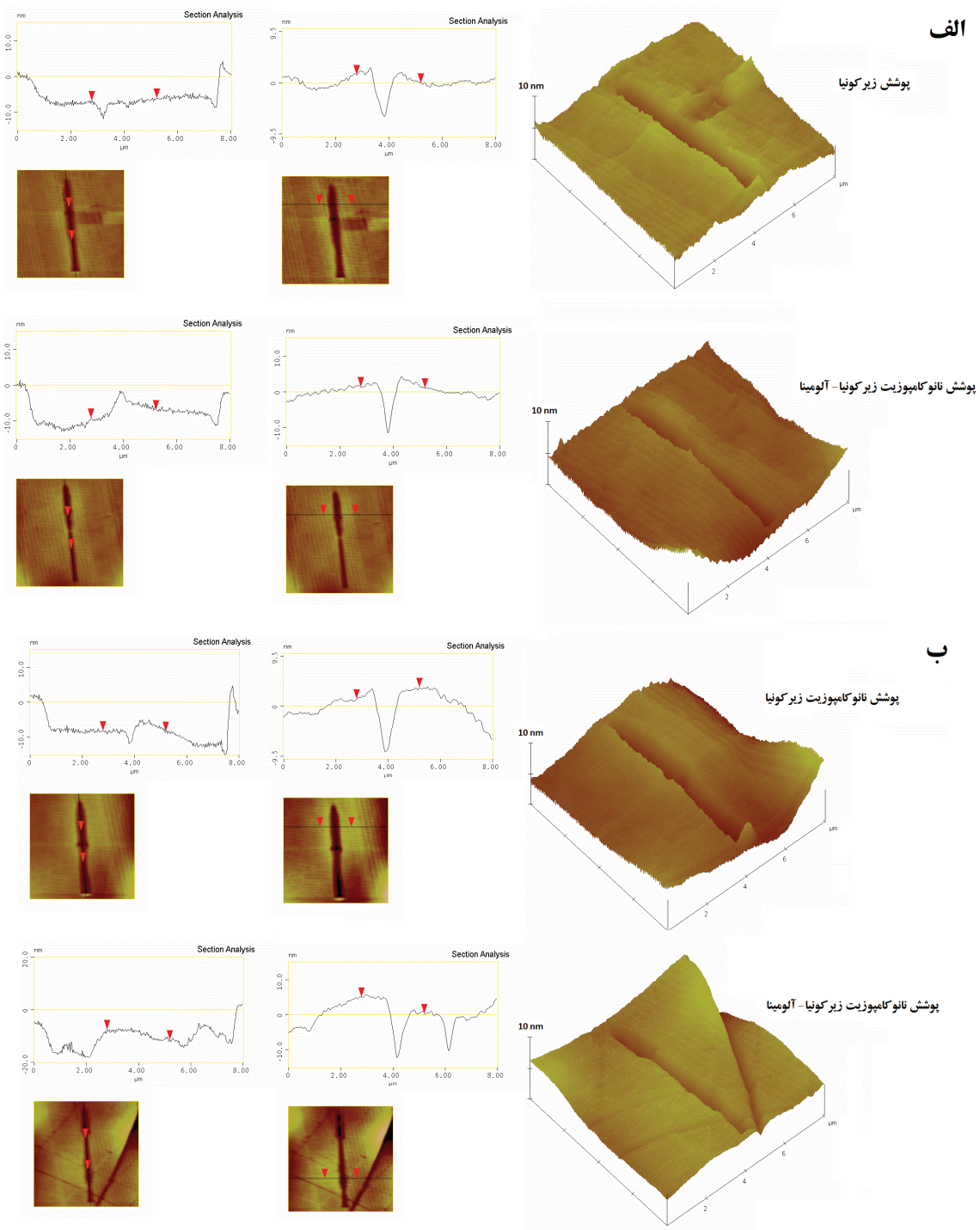
در واقع، حضور آلومینا در پوشش نانو کامپوزیت زیرکونیا- آلومینا اگر چه در بار ۵۰ میلی نیوتن دارای سختی و مدول الاستیک کمتری نسبت به پوشش زیرکوینا است، زیرا نابجایی‌های به راحتی می‌توانند حرکت کنند، اما با افزایش نیرو به ۶۰ میلی‌نیوتن و افزایش عمق نفوذ، مساحت بیشتری تحت تاثیر نیرو قرار گرفته و محلول زیرکونیا- آلومینا از حرکت نابجایی‌های ممانعت کرده است.

برای بررسی دقیق‌تر خواص نانو مکانیکی پوشش‌ها، روش نانو خراش مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۷ تصویر خراش و نمودار زبری سطحی پوشش‌های زیرکونیا و نانو کامپوزیت زیرکونیا- آلومینا تحت بارهای مختلف ۵۰ و ۶۰ میلی نیوتن نشان داده شده، با افزایش بار از ۵۰ به ۶۰ میلی نیوتن هر دو پوشش زیرکونیا و نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا رفتار پلاستیکی بیشتری در مقابل حرکت فرورنده از خود نشان داده‌اند، که در منحنی زبری سطحی بصورت تپه‌ای در مسیر حرکت فرورونده مشخص است.

دلیل این امر می تواند ناشی از رفتار کاملا تردی باشد که پوشش ها در بار ۵۰ میلی نیوتن از خود نشان داده، در واقع نیروی ۵۰ میلی نیوتن برای حرکت نابجایی‌های کم بوده، اما در بار ۶۰ میلی نیوتن نابجایی‌ها حرکت نموده و با ایجاد تغییر فرم پلاستیک منجر به جمع شوندگی پوشش در طول مسیر و انتهای مسیر حرکت فرورونده گردیده است. در بررسی پوشش‌های زیرکونیا و نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا، به خوبی مشخص است که حضور آلومینا منجر به افزایش تغییر فرم پلاستیک و حرکت سخت تر نابجایی‌ها گردیده است، این امر تایید کننده افزایش استحکام ماده، انعطاف پذیری و سختی، بوسیله تشکیل محلول جامد است [۲۳، ۲۸ و ۲۹]. در واقع حضور ذرات ثانویه آلومینا با ایجاد پیوستگی پوشش، کاهش ترک و در نهایت ایجاد تنش‌های داخلی از حرکت بیش از حد نابجایی‌ها تحت بار ۶۰ میلی نیوتن جلوگیری کرده، که بصورت انباشتگی پوشش در طول مسیر، لبه‌ها و انتهای مسیر قابل مشاهده است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

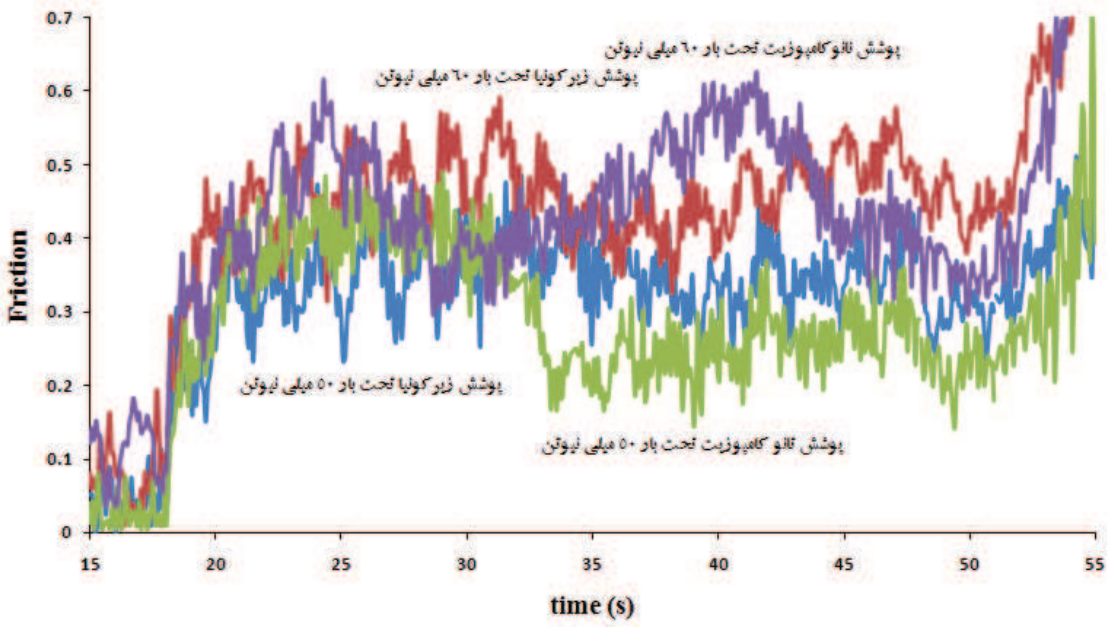


شکل ۷- تصویر خراش پوشش‌های زیرکونیا و نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا تحت بارهای اعمالی الف) ۵۰ میلی نیوتن و ب) ۶۰ میلی نیوتن.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

در شکل ۸ نمودار ضریب اصطکاک پوشش‌های زیرکونیا و نانو کامپوزیت زیرکونیا- آلومینا نشان داده شده است، که ضریب اصطکاک میانگین آنها به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۳۲ در بار ۵۰ میلی نیوتن و ۰/۴۸ و ۰/۵۱ در بار ۶۰ میلی نیوتن است. در بار اعمالی ۵۰ میلی نیوتن مطابق منحنی‌های سایشی و نمودارهای زبری سطحی مسیر حرکت فرورونده، رفتار سایشی تابع مکانیزم سایش خراشان همراه با مکانیزم شخم زنی باشد، در واقع، پدیده شخم‌زنی همراه با تغییر فرم الاستیک و پلاستیک می‌باشد و همین امر می‌تواند با ایجاد موانعی در هنگام فرایند سایش قطعات منجر به افزایش اصطکاک و نهایتا کاهش مقاومت سایشی پوشش زیرکونیا نسبت به پوشش نانو کامپوزیت زیرکونیا- آلومینا گردد. در واقع بار ۵۰ میلی نیوتن، توانایی ایجاد تغییر فرم پلاستیک و حرکت قابل توجه نابجایی‌ها را برای پوشش نانو کامپوزیت زیرکونیا – آلومینا نداشته، که همین امر بیانگر غالب بودن مکانیزم سایش خراشان برای پوشش نانو کامپوزیت است. اگرچه در ابتدا اندکی تغییر فرم پلاستیک در مسیر حرکت فرورونده اتفاق افتاده است، که این می‌تواند ناشی از تنش‌های ناشی از تشکیل پوشش همگن و یکپارچه نانو کامپوزیت باشد [۲۳و ۲۸]. اما با افزایش نیروی اعمالی به ۶۰ میلی نیوتن، مکانیزم سایش خراشان همراه با مکانیزم برشی در پوشش نانو کامپوزیت زیرکونیا- آلومینا حاکم است، که به صورت پستی و بلندی‌های مشخصی در منحنی سایشی پوشش نانوکامپوزیت قابل مشاهده است، در واقع بالاتر بودن استحکام پوشش نانوکامپوزیت نسبت به پوشش زیرکونیا و همچنین کافی بودن نیروی ۶۰ میلی نیوتن برای حرکت دادن نابجایی‌ها منجر به مقاومت بیشتر پوشش نانوکامپوزیت در برابر فرورونده گردیده است.



شکل ۸- نمودار ضریب اصطکاک پوشش‌های زیرکونیا و نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا تحت بارهای اعمالی ۵۰ و ۶۰ میلی نیوتن.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

۴- نتیجه‌گیری

در ایـن مقالـه پوشـش زیرکونیـا و پوشـش نانوکامپوزیـت زیرکونیا- آلومینا به روش سل-ژل بر روی سطح آلومینیـوم ۲۰۲۴ اعمال شـد. نتـایج بیـانگر تـشکیل پوشـش همگـن، یکنواخت و تقریبا عاری از ترک بـا حـضور آلومینـا در کنـار زیرکونیا است. گستردگی و پهـن شـدن منحنـی GIXRD بیانگر آمـورف بـودن پوشـش‌هـای اعمـال شـده در دمـای عملیات حرارتی ۱۵۰ درجه سانتیگراد است. در واقـع حـضور آلومینا به دلیل دارا بودن ضـریب انبـساط حرارتـی کمتـری نسبت به زیرکونیا و بعنوان عامل پایدار کننده از رشد ترک‌ها و ایجاد نواقص در حـین عملیـات حرارتـی ممانعـت نمـوده است. میانگین زبری سطح (Sa) پوشش زیرکونیا و پوشـش نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا بـه ترتیـب ۰/۸۴۹ و ۰/۲۹۸ نانومتر است، که به خوبی بیانگر کاهش زبـری سـطحی بـا حضور جزء ثانویـه آلومینـا حـدود ۶۵ درصـد اسـت. حـضور آلومینا بـا بهبـود رفتـار مکـانیکی هماننـد سـختی و مـدول الاستیک به مقدار ۴۶ درصد و ۲۴ درصد نسبت بـه پوشـش زیرکونیا، منجر بهبود رفتار سایشی و حـاکم شـدن مکـانیزم سایش خراشان همراه با مکانیزم برشی با ضریب اصـطکاک ۰/۵۱ گردیده است.

مراجع

[1] G. R. Salazar-Banda, K. I. B. Eguiluz, A. J. Motheo, and S. A. S. Machado, "Environmentally friendly sol-gel-based anticorrosive coatings on aluminum alloy 2024," Materials Research, Vol. 16 ,pp. 1315-1324, 2013.

[2] M. A. Dominguez-Crespo, A. Garcia-Murillo, A.M. Torres-Huerta, F.J. Carrillo-Romo, E. Onofre-Bustamante, C. Yanez-Zamora "Characterization of ceramic sol–gel coatings as an alternative chemical conversion treatment on commercial carbon steel"Electrochimica Acta, Vol. 54, pp. 2932–2940, 2009.

[3] E. Celik, I. Keskin, I. Kayatekin, F. Ak Azem, E. Özkan, "Al2O3–TiO2 thin films on glass substrate by sol–gel technique"Materials Characterization, Vol. 58, pp. 349–357, 2007.

[4] Takashi Goto, High-speed deposition of zirconia films by laser-induced plasma CVD, Solid State Ionics, Vol. 172, pp. 225–229, 2004.

[5] Lihua Gao, HongboGuo, Liangliang Wei, Chenyi Li, Shengkai Gong, Huibin Xu, Microstructure and mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings prepared by plasma spray physical vapor deposition, Ceramics International, Vol. 41, pp. 8305-8311, 2015.

[6] A. Etiemble, C. Der Loughian, M. Apreutesei, C. Langlois, S. Cardinal, J.M. Pelletier, J.-F. Pierson, P. Steyer, Innovative Zr-Cu-Ag thin film metallic glass deposed by magnetron PVD sputtering for antibacterial applications, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 707, pp. 155-161, 2017.

[7] Lavollée Claire, Gressier Marie, Garcia Julien, Sobrino Jean-Michel, Reby Jean, Menu Marie-Joëlle, Rossi Stefano, Fedel Michele, New architectured hybrid sol-gel coatings for wear and corrosion protection of low-carbon steel, Progress in Organic Coatings, Vol. 99, pp. 337-345, 2016.

[8] Y. Adraider, Y.X. Pang, F. Nabhani, S.N. Hodgson, M.C. Sharp, A. Al-Waidh, Fabrication of zirconium oxide coatings on stainless steel by a combined laser/sol–gel technique, Ceramics International, Vol. 39, pp. 9665-9670, 2013.

[9] D. Wang, G. P. Bierwagen, "Sol–gel coatings on metals for corrosion protection", Progress in Organic

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

1-x xerogels (x= 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4) from FTIR, 29 Si and 17 O MAS NMR and EXAFS," Physical Chemistry Chemical Physics1, pp. 2527-2533, 1999.

[19] F. Andreatta, P. Aldighieri , L. Paussa , R. Di Maggio, S. Rossi , L. Fedrizzi, Electrochemical behaviour of ZrO2 sol–gel pre-treatments on AA6060 aluminium alloy, ElectrochimicaActa, Vol. 52, pp. 7545–7555, 2007.

[20] E. Celik, I. Keskin, I. Kayatekin, F. A. Azem, E. Özkan, Al2O3–TiO2 thin films on glass substrate by sol–geltechnique. Materials Characterization, Vol. 58, pp. 349–357, 2007.

[21] C. A. Hernández-Barrios, C. A. Cuao, M. A. Jaimes, A. E. Coy, F. Viejo, Effect of the catalyst concentration, the immersion time and the aging time on the morphology, composition and corrosion performance of TEOS-GPTMS sol-gel coatings deposited on the AZ31 magnesium alloy, Surface and Coatings Technology, Vol. 325, pp. 257-269, 2017.

[22] J. Wang, J. Ge, H. Hou, M. Wang, G. Liu, G. Qiao, Y. Wang, Design and sol–gel preparation of SiO2/TiO2 and SiO2/SnO2/SiO2–SnO2 multilayer antireflective coatings, Applied Surface Science, Vol. 422, pp. 970-974, 2017.

[23] A. Shanaghi, A. R. Sabour Rouhaghdam, S. Ahangarani, P. K. Chu, Effect of plasma CVD operating temperature on nanomechanical properties of TiC nanostructured coating investigated by atomic force microscopy, Materials Research Bulletin, Vol. 47, pp. 2200-2205, 2012.

[24] P. Huu Le, S. P. Chiu, S. R. Jian, Ch. Wei Luo, J. Y. Lin, J. J. Lin, K. H. Wu, M. Gospodinov, Nanomechanical, structural, and transport properties of Bi3Se2Te thin films, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 679, pp. 350-357, 2016.

[25] C. H. Tasi, Y. C. Tseng, S. R. Jian, Y. Y. Liao, C. M. Lin, P. F. Yang, D. L. Chen, Coatings, Vol. 64, pp. 327–338, 2009.

[10] S.M. Attia, J. Wang, G. Wu, J. shen, J. Ma, Review on sol-gel derived coatings: process, techniques and optical application ,Journal of Materials Sicience and Technology, Vol. 18, pp. 211-218, 2002.

[11] B. Zeng, D. Xu, M. Tang,Y. Xiao, Y. Zhou, R. Xiong, Z. Li, Y. Zhou, Improvement of resistive switching performances via an amorphous ZrO2layer formation in TiO2-based forming-free resistive random access memory. Journal of Applied Physics, Vol. 116, p. 124514, 2014.

[12] A. Muawia, L. Yook, T. Ling, A. Musa, and A. Santhana, A large response range reflectometric urea biosensor made from Silica-Gel nanoparticles, Sensors (Basel)14, pp. 13186–13209, 2014.

[13] C. A. Kawaguti, L. A. Chivacci, S. H. Pulcinelli, C. V. Santilli, V. Briois, Structural features of phosphateand sulfatemodified zirconia prepared by sol–gel route, Journal of Sol-Gel ScienceTechnology, Vol. 32, pp. 91-97, 2004.

[14] N. Agoudjil, S. Kermadi, and A. Larbot, Synthesis of inorganic membrane by sol–gel process, Desalination, Vol. 223, pp. 417-424, 2008.

[15] X. Bokhimi et al., Tetragonal nanophase stabilization in nondoped sol–gel zirconia prepared with different hydrolysis catalysts, Journal of solid state chemistry, Vol. 135, pp. 28-35, 1998.

[16] M. Ocaña, V. Fornés, and C. J. Serna, A simple procedure for the preparation of spherical oxide particles by hydrolysis of aerosols, Ceramics international, Vol. 18, pp. 99-106, 1992.

[17] S. K. Tiwari, Manju Tripathi, Raghuvir Singh, Electrochemical behavior of zirconia based coatings on mild steel prepared by sol–gel method, Corrosion Science, Vol. 63, pp. 334–341, 2012.

[18] D. Pickup, G. Wallidge, R. Newport, and M. Smith, "Structure of (ZrO 2) x (SiO 2)

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]

H. J. Chen, C. W. Luo, J.Y. Juang, Nanomechanical properties of Bi2Te3 thin films by nanoindentation, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 619, pp. 834-838, 2015.

[26] H. Huang, I. Dobryden, N. Ihrner, M. Johansson, H. Ma, J. Pan, P. M. Claesson, Temperature-dependent surface nanomechanical properties of a thermoplastic nanocomposite, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 494, pp. 204-214, 2017.

[27] M. Kuru, A. E. Ozmetin, A. Ozmetin, O. Sahin, The role of heat treatment on the structural and nano-mechanical properties of SmCo5 thin films grown by RF magnetron sputtering technique, Ceramics International, Vol. 43, pp. 3893-3899, 2017.

[28] G. Mallikarjunachari, Pijush Ghosh, Analysis of strength and response of polymer nano thin film interfaces applying nanoindentation and nanoscratch techniques, Polymer, Vol. 90, pp. 53-66, 2016.

[29] S. Miyake, S. Yamazaki, Nanoscratch properties of extremely thin diamond-like carbon films, Wear, Vol.. 305, pp. 69-77, 2013.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.2.1.0]