



بررسی افزایش سختی سطح فولاد ضد زنگ ۳۱۶ کم کربن با استفاده از پوشش آلومینیم فسفات آمورف

تارا بازدار^{۱*}، عبدالمجید اسلامی^۲، احمد منشی^۳، فاطمه سادات سیدان^۴، علیرضا عباسلو^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران،

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران،

۳. استاد، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

۴. دکترای تخصصی، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران،

۵. کارشناسی ارشد، مدیر تحقیق و توسعه مجتمع مس شهر بابک، کرمان، ایران.

* ایمیل نویسنده مسول: tara.bazdar@ma.iut.ac.ir

چکیده

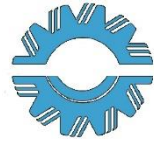
در این تحقیق روکش آلومینیم فسفات آمورف بر روی سطح فولاد ضد زنگ ۳۱۶ کم کربن برای افزایش سختی و مقاومت شیمیایی اعمال گردید. آمورف بودن به معنی نداشتن ساختار کریستالی و مرز دانه در نتیجه نداشتن ضعف‌های مربوط به این دو پارامتر است. در این سنتز از محلول‌های پیشساز آلومینیم نیترات نه آب و محلول اکسیدی فسفر در اتانول استفاده شد. ۱۵ دقیقه تا دمای ۷۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا سل شفاف با ۷۵ درصد وزنی آلومینیم فسفات و نسبت مولی آلومینیم به فسفر ۱/۷۵ حاصل شود. بعد از اجرای عمل فعالسازی سطح صفحات فولادی و غوطه وری در سل آلومینیم فسفات در سه مرحله یک دقیقه ای به مدت ۲۴ ساعت در ۶۵ درجه سانتیگراد خشک و ۳۰ دقیقه در ۵۰۰ درجه سانتیگراد حرارت دهی شد. الگوی تفرق اشعه ایکس وجود هلال فاز آمورف را نشان داد که با مقداری آلومینیم اضافی کنترل میشود. تصاویر میکروسکوب الکترونی روبشی و آنالیز طیف سنجی نشان داد که کنده شدن روکش در نمونه‌های فعال شده با ماربل بهتر از آکوارجیا و لوریا میباشد. آزمون میکروسختی بر روی نمونه عملیات حرارتی شده در ۵۰۰ درجه سانتیگراد حاکی از افزایش حدود سه برابری سختی در مقایسه با فلز زیر لایه بود.

کلمات کلیدی: آلومینیم فسفات آمورف، پوشش، سختی، فولاد

مقدمه

تقسیم بندی‌های زیادی برای مکانیزم‌های تخریب قطعات مهندسی صورت گرفته است؛ ولی تخریب قطعات در کاربردهای صنعتی معمولاً به یکی از شکل‌های خستگی، خوردگی، خزش و رهایی دمایی، خوردگی خستگی، خوردگی سایشی، خسارت هیدروژنی، سایش، موارد خاص دیگر اتفاق می‌افتد. به طور کلی جلوگیری از تخریب قطعات صنعتی به سه روش عمده تغییر پارامترهای محیطی مثل دما، pH، رطوبت، جریان هوا و... و پارامترهای کاری مثل میزان بار اعمالی، سرعت چرخش جسم و...، استفاده از یک ماده مقاوم به عوامل محیطی و استفاده از پوشش محافظ صورت می‌گیرد. مزایا و معایب هریک از این روش‌ها به شرایط کاری و اقتصادی بستگی دارد. به طور مثال گاهی تغییر ماده در ساخت قطعات به دلیل شرایط اقتصادی یا مد نظر بودن یک ویژگی خاص از ماده، میسر نیست [۱، ۲]. از طرف دیگر تغییر محیط در اکثر مواقع به دلیل شرایط کاری ویژه امکان پذیر نمی‌باشد. به همین دلیل هر ساله مطالعات زیادی بر روی پوشش‌های مهندسی جدید و اصلاح پوشش‌های موجود صورت می‌گیرد. از جمله این پوشش‌ها می‌توان به پوشش‌های اکسیدی برای مقابله با اکسیداسیون و خوردگی، پوشش‌های سد حرارتی، پوشش‌های مقاوم به سایش، پوشش‌های آلی و یا کامپوزیتی اشاره کرد [۳].

پوشش‌های سرامیکی اغلب برای حفاظت فلز پایه از خوردگی، خوردگی داغ، اکسیداسیون و به حداقل رساندن خسارات ناشی از سایش استفاده می‌شود. کاربرد مهم دیگر پوشش‌های سرامیکی کاهش دمای فلز زیر لایه در مصارف پوشش‌های سد حرارتی است [۴]. مواد سرامیکی دارای خواص زیادی از جمله مقاومت در برابر اکسیداسیون، خوردگی و حرارت می‌باشند [۵].



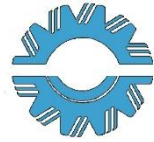
آلومینیم فسفات یک ترکیب معدنی است که شکل هیدراته آن در طبیعت به شکل کانی برلینیت یافت می‌شود [۶]. این ماده دارای چگالی پایین (۲/۵۶ گرم بر سانتی متر مکعب)، نقطه ذوب بالا (۱۸۰۰ درجه سانتی گراد) و سختی بالا (۶/۵ موس) است. نفوذ اکسیژن در این ماده بسیار پایین است که باعث می‌شود این ماده مقاومت عالی در برابر اکسیداسیون از خود نشان دهد [۷]. همچنین این ماده از لحاظ شیمیایی خنثی است و این ویژگی باعث می‌شود که این ماده با بسیاری از فلزات و سرامیک‌ها نظیر کاربید سیلیسیم و آلومینا سازگار باشد. به علاوه این مواد دارای ابعادی خوب مقاومت به سایش و ظرفیت تحمل بار بالایی هستند. این خواص مطلوب در کنار در دسترس بودن مواد اولیه و روش ساده و کم هزینه تولید آن باعث شده که در سال‌های اخیر در بسیاری از کاربردهای صنعتی نظیر کاتالیزورها، بایندهای مورد استفاده در صنعت دیرگداز، کامپوزیت‌ها بتن‌های ضد آب و ... مورد استفاده قرار بگیرد [۷، ۸]. کانی برلینیت دارای ساختار تریگونال ($a=b=c$)، $\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$ مشابه ساختار کوارتز است. که اتم‌های فسفر جانشین اتم‌های سیلیسیم و اتم‌های آلومینیم جایگزین اتم‌های اکسیژن شده است. این ماده با جذب حرارت دچار تغییرات پلی مورفیک با افزایش حجم زیاد می‌شود. این تغییرات پلی مورفیک همانند رفتار آلوتروپیک اکسید سیلیسیم است [۷-۹]. آلومینیم فسفات در دمای ۸۷۰ درجه سانتی گراد به شبه تریدمیت و در دمای ۱۴۷۰ درجه سانتی گراد به شبه کریستوبالیت تبدیل می‌شود. تغییرات پلی مورفیک آلومینیم فسفات استفاده از آن را به عنوان پوشش مهندسی به خصوص در دمای بالا محدود می‌کند. زیرا افزایش حجم ناشی از این تغییرات باعث ایجاد تنش در پوشش شده و موجب ترک خوردن یا پوسته شدن آن می‌شود که این امر لزوم ایجاد پوشش‌های آلومینیم فسفات آمورف با پایداری دمایی زیاد و خواص مطلوب را تقویت می‌کند. با این حال از آلومینیم فسفات کریستالی نیز به عنوان پوشش‌های زیست فعال و یا پوشش‌های مقاوم به اکسیداسیون در دمای پایین استفاده شده است [۱۰]. آلومینیم فسفات آمورف که با نام تجاری سربلک نیز شناخته می‌شود [۷]، ماده‌ای با پایداری دمایی بالا و مقاومت زیاد در برابر اکسیداسیون است، که می‌تواند در کاربردهای مختلف به عنوان پوشش استفاده شود. همچنین این ماده مقاومت به خوردگی خوبی نیز داشته و برای آب بندی پوشش‌های دیرگداز استفاده می‌شود. عدم تمایل برقراری پیوند با سطح مقابل باعث می‌شود که این ماده گزینه مناسبی برای پوشش مقاوم به سایش باشد [۴، ۱۱، ۱۲].

رسانایی حرارتی بسیار پایین این ماده (۱/۵-۱ وات بر متر کلون) در مقایسه با فیوزد سیلیکا و زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ) که به طور معمول به عنوان پوشش‌های سد حرارتی استفاده می‌شوند، می‌توان منجر به استفاده این ماده در پوشش‌های سد حرارتی شود. آلومینیم فسفات دارای ضریب نشر حرارتی بالایی بوده، اما به دلیل تغییرات پلی مورفیک این ماده، استفاده از آن در کاربردهای مورد نیاز که معمولاً در شرایط دما بالا انجام می‌شوند، ممکن نیست. به همین دلیل استفاده از آلومینیم فسفات آمورف اخیراً در کاربردهای فضایی و نظامی کاربرد زیادی پیدا کرده است [۷، ۱۱].

مواد آمورف به دلیل نداشتن مرز دانه و آرایش منظم اتمی دارای مقاومت به خوردگی خوبی هستند، اما نبود مرز دانه در مورد استحکام مکانیکی یک نقص محسوب می‌شود. مواد آمورف به دلیل ساختار شیشه‌ای و نبود صفحات لغزشی بسیار ترد و شکننده هستند. لذا نیاز به تقویت این مواد از طریق کامپوزیت کردن افزایش پیدا می‌کند. بدون شک آلومینیم فسفات آمورف نیز مانند سایر مواد آمورف از استحکام مکانیکی خوبی برخوردار نیست. خواص مکانیکی آلومینیم فسفات آمورف را با یک ماده سرامیکی دارای استحکام مکانیکی بیشتر مثل کاربید سیلیسیم می‌توان تقویت نمود [۱۳].

مواد و روش تحقیق

سل آلومینیم فسفات با استفاده از دو محلول پیشساز ساخته شد. در محلول اول که محلول پیشساز آلومینیم بود از مقدار مشخصی نمک آلومینیم نترات نه آبه به عنوان منبع آلومینیم و از اتانول به عنوان حلال و در پیشساز دوم از فسفرپنتاکسید محلول در اتانول به عنوان منبع فسفر استفاده شد. پس از انحلال کامل، پیشساز دوم به پیشساز اول اضافه شد و پس از دقایقی، حین اختلاط بر روی همزن مغناطیسی، تا دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت پانزده دقیقه حرارت داده شد تا سل شفاف با ۷۵٪ وزنی آلومینیم فسفات و با نسبت مولی آلومینیم به فسفر ۱/۷۵ به ۱ حاصل شود [۱۴].



در تمامی مراحل انجام این تحقیق از نمونه‌های فولاد ضد زنگ ۳۱۶ کم کربن با ابعاد $4 \times 20 \times 20$ میلی متر استفاده شد. مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها یکسان و شامل سنباده زنی تا مش ۲۵۰۰، پولیش با استفاده از دوغاب آلومینا، شستشو التراسونیک در استون و سپس آبکشی با اتانول و آب مقطر بود. برای فعالسازی سطح نمونه از سه محلول اسیدی متفاوت شامل آکوارجیا، ماربل و لوریا استفاده شد [۱۵]. نمونه‌ها به مدت مشخص و یکسان در محلول‌های اسیدی فعال سپس آبکشی و خشک شدند. بلافاصله در سه مرحله ۱ دقیقه‌ای در سل آلومینیم فسفات رقیق شده با سرعت کم غوطه‌ور شدند. در هر مرحله پس از خروج نمونه از محلول با سرعت بسیار کم، نمونه‌ها با دمش هوای گرم خشک شدند.

جدول ۱ آنالیز فازی زیر لایه فولاد ضد زنگ ۳۱۶ کم کربن

عنصر	آهن	کربن	کروم	نیکل	مولیبدن	منگنز	سیلیسیم
	Fe	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
درصد وزنی	۶۸٫۱۸	۰٫۰۲	۱۸٫۱۲	۱٫۰۹	۲٫۱	-	۰٫۷

جدول ۲ ترکیب شیمیایی محلول‌های فعالسازی استفاده شده در فرایند پوشش دهی

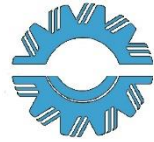
محلول فعالسازی	ترکیبات
۱ ماربل	آب ۵۰ میلی لیتر مس دو سولفات ۱۰ گرم هیدروکلریک اسید
۲ آکوارجیا	آب ۲۵ میلی لیتر اسید نیتریک ۲۵ میلی لیتر هیدروکلریک اسید ۲۵ میلی لیتر
۳ لوریا	آب ۲۰ میلی لیتر اسید نیتریک ۲۰ میلی لیتر سولفوریک اسید ۱۰ میلی لیتر

پس از اتمام فرایند پوشش دهی، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۵ درجه سانتی گراد خشک و سپس به کوره جهت انجام عملیات حرارتی در دمای ۵۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه منتقل شدند. برای این منظور از کوره با نرخ ۱ درجه بر دقیقه استفاده شد.

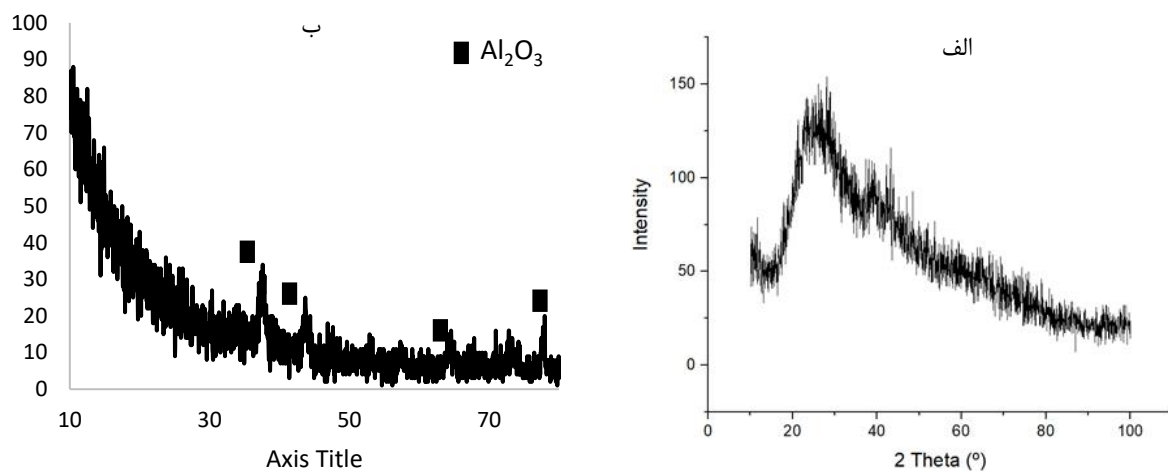
آزمون فازی با استفاده پراش پرتو ایکس بر سل خشک و عملیات حرارتی شده مطابق با عملیات اعمالی در دو دمای ۵۰۰ (پودر اول) و ۹۰۰ درجه سانتی گراد (پودر دوم) انجام شد. سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخصه یابی و به دنبال آن آزمون میکروسختی به روش ویکرز با نیروی ۰٫۰۲۵ کیلوگرم در سه نقطه بر روی نمونه‌ها انجام شد.

یافته‌ها و بحث

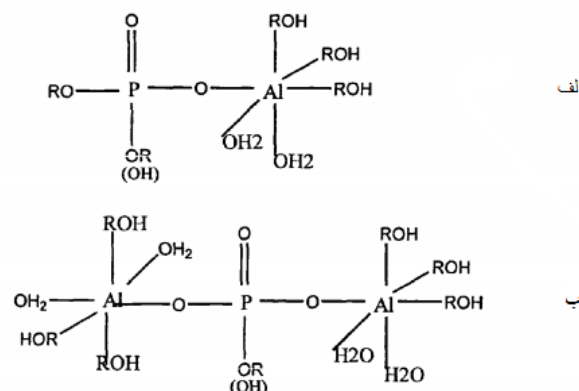
الگوی حاصل از پراش پرتو ایکس بر روی پودر اول (شکل ۲-الف) هلال فاز آمورف را در زاویه پراش ۱۰ تا ۲۰ درجه ($20 < 2\theta < 40^\circ$) نشان داد که این الگو حاکی از آن است که آلومینیم فسفات ساختار آمورف خود را تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد حفظ می‌کند. الگو پراش اشعه ایکس پودر دوم (شکل ۲-ب) نمایانگر آغاز جوانه زنی پوشش در حدود ۹۰۰ درجه سانتی گراد است. یکی از دلایل پایداری دمای بالا فاز آمورف این ماده، حضور مقدار اضافی آلومینیم نسبت به مقدار استوکیومتری است. بلافاصله پس از انحلال اسید فسفریک در اتانول، استرهای فسفاتی تشکیل می‌شوند. با اضافه کردن آلومینیم نیترات به



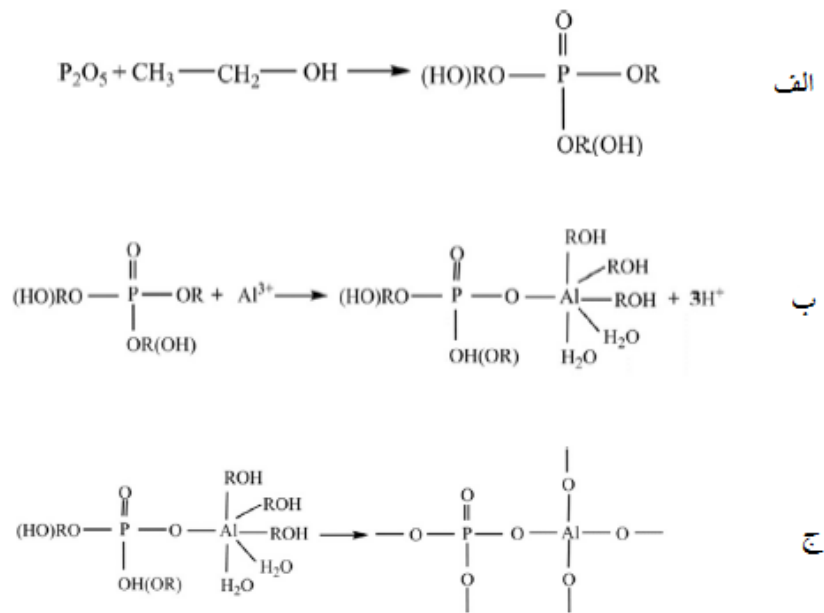
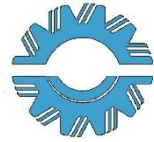
محلول استرهای فسفاتی، فسفر و آلومینیم واکنش داده، توسط گروه‌های هیدروکسیل به هم متصل می‌شوند و پیوندهای P-O-Al تشکیل می‌دهند. بخش فسفاتی که کمی استری شده، ساختار پلیمری تشکیل می‌دهد که می‌تواند کاتیون‌های فلزی را در خود حبس کند. در صورتی که مقدار آلومینیمی که با فسفر وارد واکنش می‌شود بیشتر از مقدار استوکیومتری باشد، در ترکیب حاصل علاوه بر پیوندهای Al-O-P پیوندهای Al-O-Al نیز به وجود می‌آید. این پیوندهای جدید با گروه‌های Al-O-P پیوند برقرار می‌کند و زنجیره‌های P-O-Al-O-Al تشکیل می‌دهند. تعدادی از اتم‌های آلومینیم با P-O پیوند برقرار نکرده، به زنجیره استر متصل می‌شوند و تشکیل پیوند Al-O-Al می‌دهند. این پیوندها مانع جوانه زنی بلورهای آلومینا و آلومینیم فسفات شده و پایداری حالت آمورف را افزایش می‌دهند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پایداری حرارتی آلومینیم فسفات آمورف توسط مقدار اضافه آلومینیم کنترل می‌شود [۱۶].



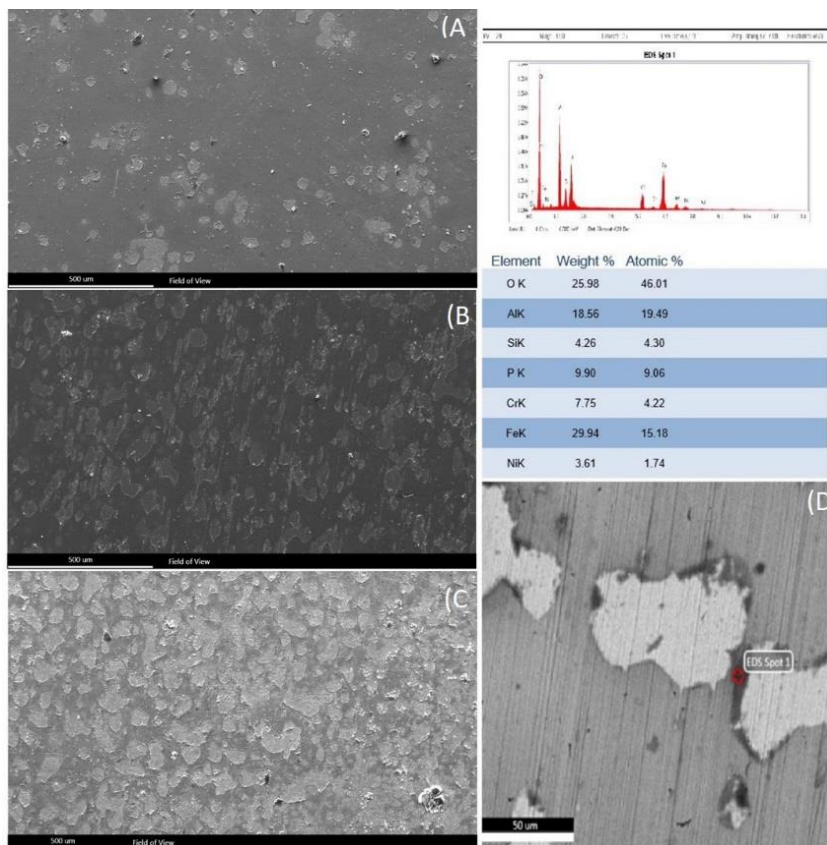
شکل ۱. الگو پراش پرتو ایکس آلومینیم فسفات عملیات حرارتی شده در (الف) پودر اول (ب) پودر دوم.



شکل ۲. (الف) پیوند استرهای فسفاتی با اتم‌های آلومینیم و تشکیل کمپلکس‌های آلومینیم فسفات (ب) برقراری پیوند بین مولکول‌های آب و اتم‌های آلومینیم [۷]



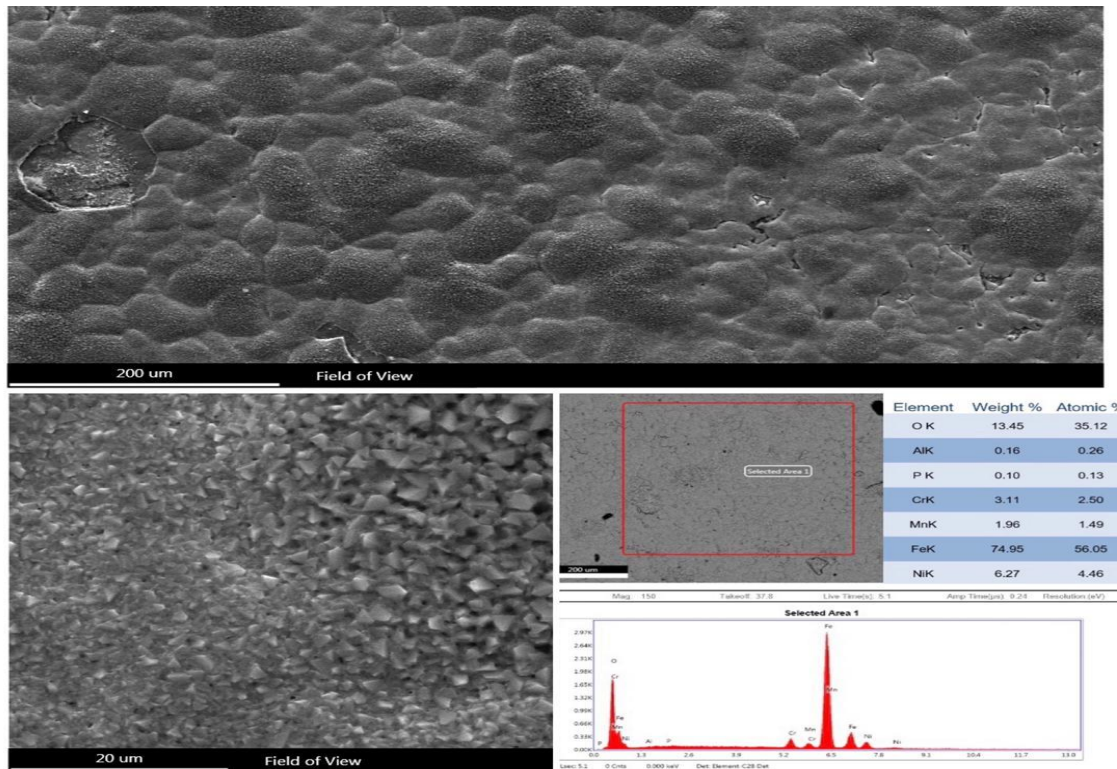
شکل ۳. روند واکنش پلی استر شدن در سنتز آلومینیم فسفات آمورف [۷]



شکل ۴. تصاویر سطح پوشش آلومینیم فسفات پس از فعال سازی سطح نمونه ها با (A) محلول ماربل (B) محلول آکوا رجیا (C) محلول لوریا و نتیجه آزمون EDS از ناحیه مشخص شده در سطح نمونه (A)

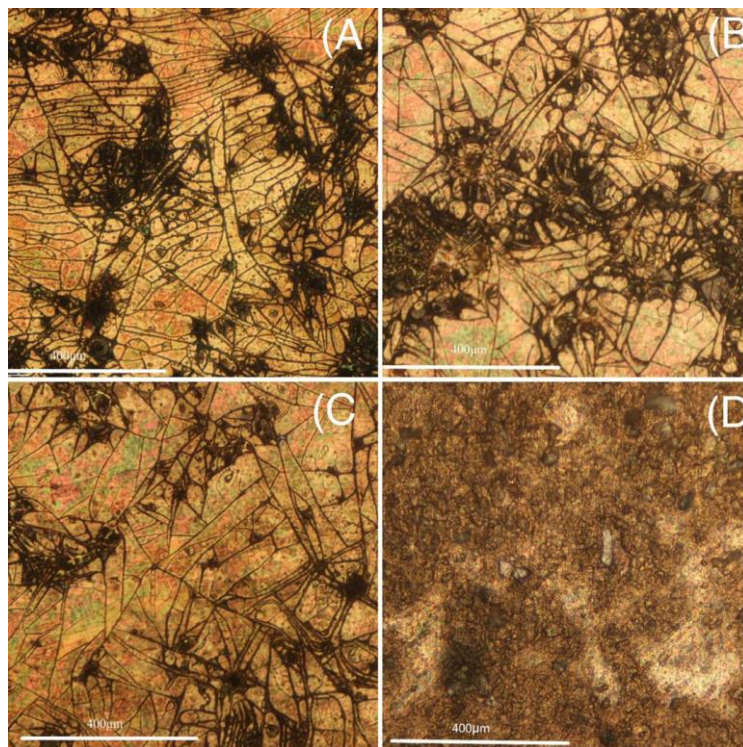


طی واکنش فسفر با الکل، علاوه بر استرهای فسفات می‌تواند اسید فسفریک و آلکیل فسفات نیز به وجود می‌آید. استرهای فسفات با اتم‌های آلومینیم واکنش داده و در نتیجه کمپلکس‌های آلومینیم فسفات تولید می‌کند. تصویر شماتیک این پیوندها در محلول حاوی آب و الکل در شکل ۲ نشان داده شده است. هرچه تراکم گروه‌های استری (الف) و (ب) در محلول بیشتر باشد، ساختار پلیمری طولانی تری تشکیل می‌شود. واکنش پلی استر سازی در سنتز آلومینیم فسفات در محلول به صورت شکل ۳- (الف) اتفاق می‌افتد. در نتیجه این واکنش، استر آلومینیم فسفات با ساختار مطابق با شکل ۳- (ب) حاصل می‌شود که پس از تجزیه حرارتی به آلومینیم فسفات مطابق با شکل ۳- (ج) تبدیل می‌شود.



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پوشش آلومینیم فسفات عملیات حرارتی شده با در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد و نتایج EDS آزمون

تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پوشش (شکل ۵) نشان داد که در برخی نواحی، پوشش کنده شده و در نتیجه جزایری از زیر لایه تشکیل شده است. در نمونه‌های فعال شده با ماربل تعداد این جزایر نسبت به سایر محلول‌های فعالسازی کمتر است که می‌توان دلیل این کاهش را قدرت اسیدی کمتر این محلول نسبت به سایر محلول‌های فعالسازی دانست. در نتیجه در مراحل بعدی تنها از محلول ماربل به عنوان محلول فعالسازی استفاده شد. همچنین مشخص شد پوشش دارای تخلخل زیاد و عدم چسبندگی در بعضی نواحی است، پیش بینی شد با افزایش دما تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد که دمایی کمتر از دمای جوانه زنی کریستالی ذکر شده در تحقیقات قبلی است، پوشش متراکم‌تری نسبت به دمای ۵۰۰ درجه حاصل شود. لیکن با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) که نشان دهنده ساختار کاملاً متفاوت و مقدار اکسیژن و آهن بیشتری نسبت به عملیات حرارتی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد است، می‌توان فهمید که به دلیل حضور اکسیژن در اتمسفر کوره علاوه بر ترکیب پوشش، اکسید آهن به مقدار قابل توجهی در پوشش آلومینیم فسفات حضور دارد.



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح پوشش آلومینیم فسفات پس از فعال سازی با استفاده از (A) آکوا رجیا (B) لوریا (C) ماربل و (D) نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد

آزمون میکرو سختی انجام شده بر روی نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد، با بار اعمالی ۰/۰۲۵ کیلوگرم در سه نقطه مختلف از سطح پوشش حاکی از افزایش حدود ۳ برابری سختی نمونه در مقایسه با فلز زیر لایه می‌باشد. این مقدار سختی در مقایسه با مقدار ذکر شده در مقالات که در مقیاس موس می‌باشد، کمتر است که می‌تواند ناشی از درگیری جزئی فلز زیر لایه به دلیل ضخامت نانومتری پوشش باشد.

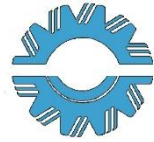
مکانیزم سختی در این پوشش وجود پیوندهای قوی از جنس پیوندهای شیمیایی فسفاتی بین فسفر آلومینیم و اکسیژن است که در ساختار آمورف ایجاد شده است. علاوه بر مقاومت در برابر تغییر شکل به واسطه این پیوندهای قوی، عدم وجود مرزدانه نیز به افزایش سختی کمک می‌کند، زیرا مرزدانه در سیستم‌های کریستالی مناطق کم تراکم بوده و احتمال به وجود آمدن ترک در اثر نیروهای وارده را افزایش می‌دهد. وجود ساختار آمورف بدون مناطق کم تراکم مرزدانه و ایجاد شدن پیوندهای شیمیایی فسفاتی سختی بالایی به این پوشش بخشیده است.

جدول ۳ نتایج آزمون میکرو سختی پوشش

بار	سختی میانگین VH	
۰/۰۲۵ کیلوگرم	۵۷۷/۸	پوشش
۱۰ کیلوگرم	۱۸۸	زیر لایه

نتیجه گیری :

- با بررسی مورفولوژی سطحی پوشش می‌توان دریافت که محلول ماربل به دلیل قدرت اسیدی کمتر برای فعالسازی سطح زیر لایه مناسب تر است.



- پوشش آلومینیم فسفات آمورف پایداری حرارتی قابل قبولی داشته و می‌تواند به عنوان پوشش‌های با کارکرد دما بالا مورد توجه قرار گیرد.
- برقراری پیوندهای شیمیایی فسفاتی بین فسفر، اکسیژن و آلومینیم موجب افزایش سختی زیرلایه تا حدود سه برابر می‌شود.

تشکر و قدر دانی

با سپاس فراوان از تحقیق و توسعه مجتمع مس شهر بابک و حمایت‌های بی دریغشان

مراجع

- [1] Meetham G. (1986). Use of protective coatings in aero gas turbine engines. *Materials science and technology* 2(3). pp 290-294.
- [2] Pomeroy M. (2005). Coatings for gas turbine materials and long term stability issues. *Materials & design* 26(3). pp 223-231.
- [3] Shi F. (2012). *Ceramic Coatings: Applications in Engineering*. Intech Open, 249.
- [4] Song R. (2003). Hydrogen permeation resistance of plasma-sprayed Al₂O₃ and Al₂O₃-13wt.% TiO₂ ceramic coatings on austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology* 168(2-3). pp 191-194.
- [5] Salman S, Köse R, Urtekin L, Findik F. (2006). An investigation of different ceramic coating thermal properties. *Materials & design* 27(7). pp 585-590.
- [6] Xu R, Pang W, Yu J, Huo Q, Chen J. (2008). Chemistry of zeolites and related porous materials: synthesis and structure, pp 253-255.
- [7] sambasivan S, Steiner, KA. High Temperature Amorphous Composition Based on Aluminium Phosphate, 2004. US Patent No. 0011245
- [8] Sambasivan S, Steiner, KA, Rangan, KK. Aluminum Phosphate Coatings, 2007. US Patent No. 7,311,944 B2
- [9] sambasivan S, Steiner, KA, Rangan, KK. (2010). Aluminum Phosphate Coatings, Patent No. 0297000 A1
- [10] Li N, Zhong M, Xu Z, Zhang Z. (2018). Polyesterification synthesis of amorphous aluminum phosphate thermal radiation material with high infrared emissivity. *Materials Letters* 213(pp 335-337).
- [11] Liu M, Hu H, Zheng Y. (2017). Effects of three sealing methods of aluminum phosphate sealant on corrosion resistance of the Fe-based amorphous coating. *Surface and Coatings Technology* 309. pp 579-589.
- [12] Wu F, Zhang X, Zhao, Taolin L, Li X, Man C. Renjie. (2015). Multifunctional AlPO₄ coating for improving electrochemical properties of low-cost Li [Li₀. 2Fe₀. 1Ni₀. 15Mn₀. 55] O₂ cathode materials for lithium-ion batteries. *ACS applied materials & interfaces* 7(6). pp 3773-3781.
- [13] Walker L, Marotto V, Rafiee M, Koratkar N, Corral E. (2011). Toughening in graphene ceramic composites. *ACS nano* 5(4). pp 3182-3190.
- [14] Sayyed F, Enayati, M. (2019). On structure and oxidation behaviour of non-stoichiometric amorphous aluminium phosphate coating. *Surface Engineering* 35(8). pp 670-676.
- [15] Bramfitt B, Benschoter A. (2001). *Metallographer's guide: practice and procedures for irons and steels*. Asm International. pp 360-367.
- [16] Sayyed FS, Enayati, MH. (2018). Evaluating oxidation behavior of amorphous aluminum phosphate coating. *Applied Surface Science* 455. pp 821-830.