

ستز و لایه‌نشانی الکتروفوریتیکی اسپینل منگنز - کبالت بر روی فولاد زنگ‌نزن ۴۳۰ بعنوان اتصال دهنده در پیل سوختی اکسید جامد و بررسی مقاومت به اکسیداسیون آن

رضا ایران‌خواه^{۱*}، امیر مقصودی‌پور^۲ و بابک رئیسی دهکردی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه مواد و انرژی

^۲ استادیار، پژوهشگاه مواد و انرژی

^۳ دانشیار، پژوهشگاه مواد و انرژی

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۱/۴/۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۱/۱۰/۱۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۱/۱۰/۱۹

چکیده اسپینل‌های منگنز - کبالت بدلیل دارا بودن خواصی همچون هدایت الکتریکی بالا و انبساط حرارتی متناسب، به عنوان پوشش برای اتصال دهنده‌های فلزی استفاده می‌شوند. در این مقاله اسپینل $MnCo_2O_4$ به روش حالت جامد ستز و بر روی فولاد زنگ نزن ۴۳۰ به روش الکتروفورزیس پوشش داده شد. مرفولوژی لایه نشست در سه ولتاژ ۳۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ ولت بررسی گردید و در نهایت نمونه دارای پوشش بهینه و بدون پوشش در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت در اتمسفر هوا زیتتر و سپس تحت اکسیداسیون سیکلی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵۰۰ ساعت قرار گرفت. نتایج تفرق اشعه ایکس نشان داد که فاز اسپینل $MnCo_2O_4$ تشکیل شده است. نسبت ثابت سرعت اکسیداسیون در نمونه بدون پوشش به نمونه دارای پوشش نیز برابر ۰/۶۳ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی لایه‌نشانی الکتروفوریتیکی، اتصال دهنده، اسپینل، مقاومت اکسیداسیون، پیل سوختی اکسید جامد.

MnCo₂O₄ coating on SUS 430 ferritic stainless steel by electrophoretic deposition for interconnect applications in solid oxide fuel cells.

R. Irankhah^{*1}, A. Maghsoudipour¹ and B. Raissi Dehkordi¹

¹Material and Energy Research Center, Karaj, Iran

Abstract $MnCo_2O_4$ Spinel has good properties such as electrical conductivity, thermal and structural stability, as well as good thermal expansion match to ferritic stainless steel interconnects. In this paper we prepared nominal composition of $MnCo_2O_4$ by solid state reaction and applied onto the surface of the SUS 430 ferritic stainless steel by electrophoretic deposition. The coated alloy, together with the uncoated as a comparison, is cyclically oxidized in air at 800 °C for 500h. The surface morphology and oxidation behavior are characterized. The results indicate that the oxidation resistance is significantly enhanced by the protective coating with a parabolic rate constant of 1.96×10^{-12} ($g^2 \cdot cm^{-4} \cdot s^{-1}$). The coating layer acts as an effective barrier against chromium migration into the outer oxide layer and prevents weight gain.

Keyword Electrophoretic Deposition, Interconnect, Spinel, Oxidation Resistance, Solid Oxide Fuel Cell.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی

تلفن: -، دورنگار: -، پیام نگار: r.irankhah@gmail.com

۱- مقدمه

پیل سوختی^۱ دستگاهی است که می‌تواند انرژی شیمیایی یک سوخت را از طریق یک واکنش الکتروشیمیایی بین سوخت و اکسیدکننده به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی و (حرارت) تبدیل کند [۱]. این دستگاه‌ها بر اساس دمای کاری به چند دسته کلیایی، متانولی، کربنات مذاب، پلیمری و اکسید جامد تقسیم می‌شوند [۲]. پیل‌های سوختی اکسید جامد به دلیل اینکه بازدهی تبدیل انرژی بالاتری نسبت به سیستم‌های موتور حرارتی مرسوم و دیگر پیل‌های سوختی دارند، گزینه‌های خوبی از نظر تبدیل انرژی در آینده به حساب می‌آیند [۳]. پیل‌های سوختی اکسید جامد^۲ به دلیل بالا بودن دمای عملیاتی (۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد)، می‌توانند سوخت‌هایی مانند متان و گاز طبیعی را به صورت مستقیم مصرف کنند و در نتیجه بازده بالاتری داشته باشند (۵۰ الی ۶۵ درصد). با این حال پیل سوختی اکسید جامد معایبی نیز دارد، اگرچه کار در دمای بالا مزیت این نوع پیل محسوب می‌شود اما عیب نیز محسوب می‌شود. زیرا احتیاج به موادی دارد که در آن دما پایدار بماند و با محیط واکنش ندهد [۲]. در بین چهار جزء این پیل یعنی، آند، کاتد، الکترولیت و اتصال دهنده، مواد مورد استفاده در اتصال دهنده به دلیل این‌که شرایط متفاوتی نسبت به آند و کاتد از لحاظ قرارگیری در معرض گازهای کمپلکس، آب بندها و سیکل‌های حرارتی دارند بایستی بیشتر مورد توجه قرار گیرند [۳]. اتصال دهنده در یک چیدمان^۳ پیل سوختی اکسید جامد، آند یک پیل را به کاتد پیل مجاور بطور فیزیکی و الکتریکی متصل می‌نماید. هدف از بکار بردن اتصال دهنده، اتصال پیل‌ها به صورت سری با یکدیگر و افزایش توان می‌باشد. از آنجایی که اتصال دهنده‌های پیل سوختی اکسید جامد از دو طرف در معرض محیط احيایی و اکسیدی در دماهای بالا قرار دارد، بنابراین بایستی خیلی پایدار باشند. اتصال دهنده‌ها می‌توانند سرمایه‌ی فلزی باشند. قیمت ساخت اتصال دهنده‌های سرمایه‌ی مانعی در برابر استفاده از

آن‌ها از لحاظ اقتصادی به شمار می‌آید. اتصال دهنده‌های مورد استفاده در پیل سوختی اکسید جامد بایستی دارای هدایت الکتریکی، مقاومت در برابر اکسیداسیون، نفوذ ناپذیری در برابر گازها، پایداری شیمیایی در برابر سوخت‌های مورد استفاده در پیل باشند [۴].

کاهش دمای کاری پیل‌های سوختی اکسید جامد به ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد این امکان را خواهد داد تا از آلیاژهایی مقاوم به اکسیداسیون به عنوان جایگزینی برای سرمایه‌های کرومیت لانتانیم مرسوم که به عنوان اتصال دهنده به کار می‌روند، استفاده نمود. فولادهای زنگ نزن فریتی یکی از آلیاژهای مورد استفاده به عنوان اتصال دهنده در پیل سوختی اکسید جامد می‌باشند که به دلیل تشکیل پوسته اکسیدی هادی الکتریسته و قیمت کم آن بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر چه بعضی از معایب نظیر افزایش مقاومت الکتریکی در طی کار و نفوذ کروم از پوسته اکسیدی و رسیدن به کاتد پیل سوختی اکسید جامد که باعث کاهش کارایی الکتروشیمیایی پیل می‌گردند، نیز در این فولادها وجود دارند. یکی از مهم‌ترین و موثرترین روش‌ها جهت بهبود خواص اتصال دهنده‌ها، استفاده از پوشش‌هایی که دارای هدایت بهتری بوده و همچنین باعث کاهش رشد پوسته اکسیدی و تبخیر کروم می‌گردند، می‌باشد [۵]. استفاده از پوشش‌های اسپینلی منگنز - کبالت توسط محققین متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال آقایان لارینگ و نربی [۶] اسپینل $MnCo_2O_4$ را به عنوان پوشش برای اتصال دهنده‌ها مفید دانسته و چن^۴ و همکارانش [۷] این اسپینل را بر روی فولاد ۴۳۰ به روش دوغابی پوشش داده و با این روش پایداری سطح فولاد زنگ نزن فریتی را بهبود داده و مقاومت سطحی^۵ زیرلایه فولادی را کاهش دادند.

به طور کلی تاکنون پوشش‌های متفاوت و با ترکیبات مختلف بر روی فولادهای زنگ نزن با روش‌های لایه‌نشانی متعددی ایجاد و خواص آنها بررسی گردیده است [۸]. اما در

¹ Fuel Cell² Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)³ Stack⁴ Chen⁵ Area Surface Resistance

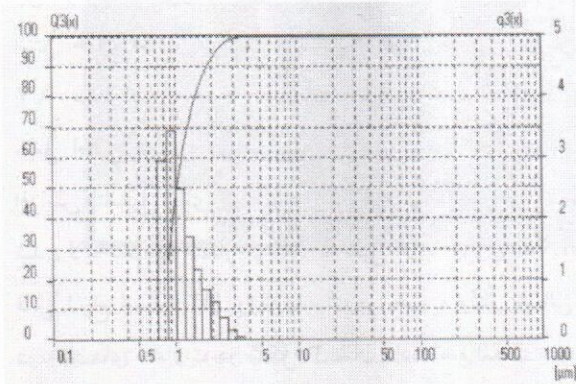
۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص اسپینل $MnCo_2O_4$

هدایت الکتریکی اسپینل $MnCo_2O_4$ حدود $60(S/cm)$ و ضریب انبساط حرارتی^۱ آن برابر با $10^{-6} \times 9/7$ بر درجه سانتی‌گراد در دمای بین ۲۵ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده که این مقدار برای فولاد ۴۳۰ برابر با $10^{-6} \times (11-10)$ بر درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۱۰]. از آنجایی که اتصال دهنده‌ها در طی کار در معرض سیکل‌های حرارتی قرار می‌گیرند بنابراین به منظور جلوگیری از جدایش پوشش از اتصال دهنده از موادی که ضریب انبساط حرارتی نزدیکی به یکدیگر دارند استفاده می‌شود [۱۱]. لذا می‌توان از این پوشش برای فولادهای زنگ نزن فریتی استفاده نمود.

۳-۲- بررسی میانگین اندازه ذرات اسپینل سنتز شده

نتایج آنالیز توزیع اندازه ذرات^۲ از اسپینل $MnCo_2O_4$ در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با این روش می‌توان به اندازه ذرات کمتر از ۵ میکرون دست یافت. هر چه ابعاد ذرات معلق در یک مایع درشت‌تر باشند، سریع‌تر ته‌نشین می‌شوند و از آنجایی که در لایه‌نشانی الکتروفوریتیکی نیاز به یک سوسپانسیون پایدار از ذرات می‌باشد، بنابراین عملیات آسیاب‌کاری نهایی در فرآیند سنتز به همین منظور انجام گردید.



شکل ۱. توزیع اندازه ذرات اسپینل $MnCo_2O_4$.

زمینه لایه‌نشانی به روش الکتروفوریتیکی، تحقیقات کمتری صورت گرفته است. در این روش با اعمال یک میدان الکتریکی می‌توان ذرات معلق در سوسپانسیون را بر سطح اتصال دهنده پوشش داد. ارزان و ساده بودن و هم‌چنین کنترل مورفولوژی و ضخامت پوشش، ایجاد پوشش‌های یکنواخت روی زیر لایه‌های با اشکال پیچیده، سرعت‌های پوشش‌دهی بالاتر و قیمت پایین‌تر از جمله مزایای این روش به شمار می‌آیند [۹]. در این تحقیق اسپینل $MnCo_2O_4$ سنتز و به روش الکتروفوریتیکی بر روی فولاد زنگ نزن ۴۳۰ لایه‌نشانی گردید و خواص آن از جمله مقاومت اکسیداسیونی بررسی گردید.

۲- روش آزمایش

در این مقاله از دو پیش ماده اکسید کبالت (Co_3O_4) و کربنات منگنز ($MnCO_3$) به منظور سنتز اسپینل $MnCo_2O_4$ استفاده شد. این دو پیش ماده با نسبت استوکیومتری در محیط تر اتانول به مدت ۲۴ ساعت مخلوط و سپس در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت کلسینه گردید. آنالیز تفرق اشعه ایکس از نمونه با دستگاه مدل PW3710 شرکت فیلیپس انجام شد. به منظور ریزتر شدن اندازه ذرات سنتز شده از آسیاب‌کاری مکانیکی به مدت ۶ ساعت با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد. زیرلایه مورد استفاده جهت لایه‌نشانی از فولاد زنگ نزن ۴۳۰ انتخاب گردید. ابعاد زیرلایه جهت پوشش دهی $2cm \times 2cm$ انتخاب شد. زیرلایه‌ها ابتدا با استن شستشو و خشک گردیدند. لایه-نشانی الکتروفوریتیکی در محیط استن در ولتاژهای متفاوت انجام شد. بعد از بررسی پوشش‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل Stereo Scan S6) و میکروسکوپ نوری (مدل OLYMPUS) از نقطه نظر وجود ترک و یکنواخت بودن آنها، بهترین لایه انتخاب و پیش ریزتر در هوا در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و اکسیداسیون در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی آنها انجام شد.

¹ Thermal Expansion Coefficient

² Particle Size Analysis

۳-۳- بررسی فازی اسپینل سنتز شده

نتایج آنالیز تفرق اشعه ایکس از اسپینل سنتز شده (شکل ۲) نشان داد که این ماده کاملاً به درستی سنتز شده و تمامی پیک‌های موجود مشخصه این ماده می‌باشند. بررسی توسط نرم افزار X'Pert HighScore نشان داد که ماده سنتز شده با کارت استاندارد شماره ۰۴۸۲ - ۰۸۴ - ۰۱ تطابق کامل دارد.

۳-۴- بررسی تاثیر ولتاژ اعمالی بر مورفولوژی پوشش

برای لایه‌نشانی اسپینل منگنز - کبالت، از استن به عنوان محیط لایه‌نشانی استفاده گردید. سوسپانسیون مورد استفاده با غلظت ثابت ۱ گرم بر لیتر و فاصله بین الکترودها ۱ سانتی‌متر و سطح نشست به مساحت ۴ سانتی‌متر مربع می‌باشد. ولتاژهای اعمالی ۳۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ ولت و زمان‌های نشست ۳۰ و ۶۰ ثانیه برای لایه‌نشانی انتخاب گردید.

ایجاد یک سوسپانسیون پایدار در لایه‌نشانی الکتروفوریتیکی یکی از مهم‌ترین بخش‌های این فرآیند می‌باشد. جهت ایجاد پایداری سوسپانسیون استن حاوی اسپینل، از دولایکس استفاده شد.

به منظور بررسی دقیق‌تر نقش دولایکس بر رفتار نشست پودر اسپینلی نتایج به دست آمده از آزمون اندازه‌گیری پتانسیل زتا مورد توجه قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این آزمون با افزودن یک قطره دولایکس به سوسپانسیون استن حاوی پودر اسپینلی، پتانسیل زتای ذرات در محیط از ۹/۷- میلی‌ولت به ۳۹/۵ میلی‌ولت افزایش یافت که این خود عامل اصلی پایداری سوسپانسیون محسوب می‌شود. به دنبال افزایش پتانسیل زتای ذرات، افزایش نرخ نشست و نیز متراکم شدن لایه نشست انتظار می‌رود که دلیل آن با تئوری DLVO^۱ قابل شرح است [۱۲]. وزن نشست بر حسب ولتاژ اعمالی و در زمان‌های متفاوت در شکل ۳ نشان داده شده است. همان-

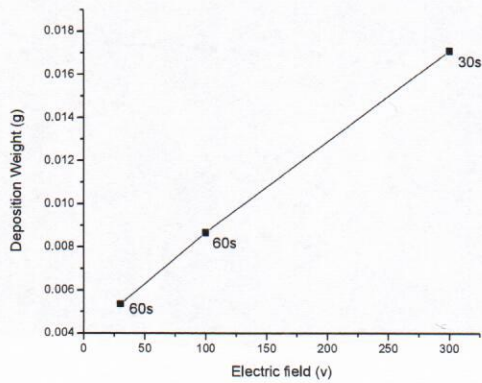
طور که انتظار می‌رود طبق رابطه هاماکر^۲ وزن نشست در ولتاژهای بالاتر بیشتر می‌باشد [۱۳].

در ولتاژ ۳۰۰ ولت در استن، لایه نشست به دلیل وزن نشست بالاتر نسبت به ولتاژ ۱۰۰ ولت دارای ضخامت بیشتری بوده و به دلیل خروج حلال از آن باعث ترک دار شدن لایه می‌گردد [۱۴]. در شکل ۴ ب و ۴-د به ترتیب تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پوشش‌ها در ولتاژ ۳۰۰ ولت دچار ترک گردیده‌اند.

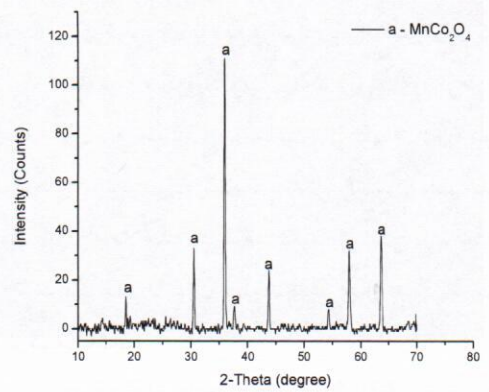
۳-۵- بررسی مقاومت به اکسیداسیون

نمونه لایه‌نشانی شده بدون ترک در ولتاژ ۱۰۰ ولت به مدت ۶۰ ثانیه برای انجام آزمایش اکسیداسیون بر روی آن انتخاب و در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به منظور اتصال هر چه بهتر پوشش به زیرلایه در محیط هوا پیش‌زیتر گردیده و پس از آن در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تست اکسیداسیون سیکلی بمدت ۵۰۰ ساعت انجام گرفت. هر سیکل شامل حرارت‌دهی نمونه‌ها از دمای محیط تا دمای مورد نظر تحت اتمسفر هوا با نرخ ۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و نگهداری آنها در آن دما به مدت ۵۰ ساعت و نهایتاً خنک کردن آنها در کوره تا دمای محیط بود. نمونه‌ها طی ۱۰ سیکل ۵۰ ساعته و در مجموع ۵۰۰ ساعت در دمای مورد نظر حرارت دیدند. پس از اتمام هر سیکل نمونه‌ها توسط ترازوی با دقت ۵ رقم اعشار وزن شده و در نهایت تغییرات وزن طی سیکل‌های اکسیداسیونی بر حسب زمان اکسیداسیون رسم گردید (شکل ۵).

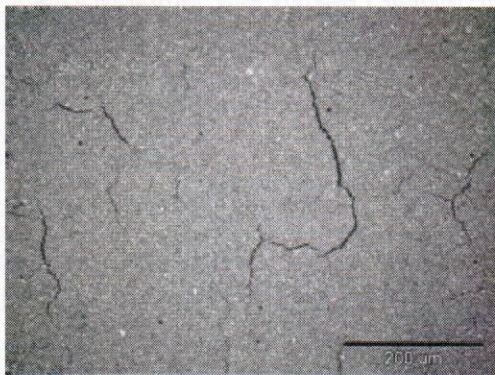
^۱ Derjaguin and Landau, Verwey and Overbeek^۲ Hamaker



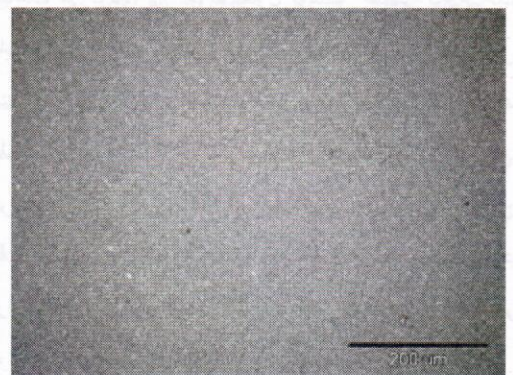
شکل ۳. تغییرات وزن نشست بر حسب ولتاژ اعمالی و زمان.



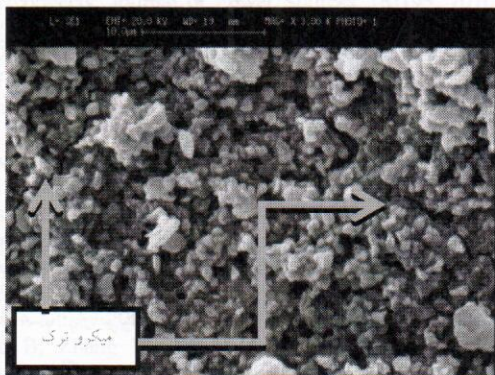
شکل ۲. آنالیز تفرق اشعه ایکس اسپینل $MnCo_2O_4$.



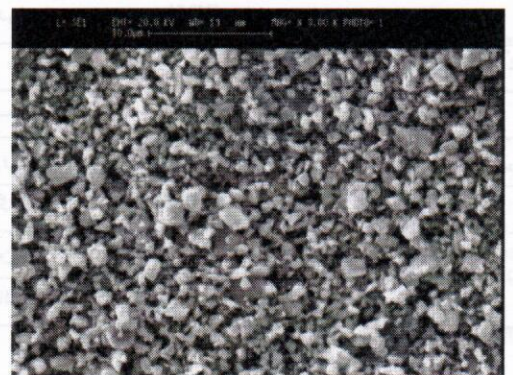
ب



الف



د



ج

شکل ۴. تصاویر پوشش خام الف) تصویر میکروسکوپ نوری از پوشش ایجاد شده در ولتاژ اعمالی ۱۰۰ ولت به مدت ۶۰ ثانیه. ب) ولتاژ ۳۰۰ ولت به مدت ۳۰ ثانیه. ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در ولتاژ ۱۰۰ ولت به مدت ۶۰ ثانیه. د) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در ولتاژ ۳۰۰ ولت به مدت ۳۰ ثانیه.

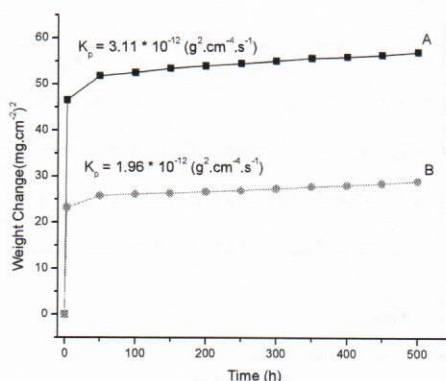
بدون پوشش حدود ۰/۶۳ به دست آمد که دلالت بر محافظت خوب این پوشش از زیرلایه در برابر نفوذ اکسیژن می‌کند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از اکسیداسیون به مدت ۵۰۰ ساعت از نمونه بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده شده در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، نمونه پوشش داده شده بعد از ۵۰۰ ساعت اکسیداسیون هم‌چنان عاری از هرگونه جدایش و یا ترک می‌باشد.

۳-۶- بررسی آنالیز شیمیایی سطح نمونه‌ها

از سطح نمونه‌های با و بدون پوشش در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر آنالیز EDX به عمل آمد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد، در نمونه بدون پوشش عنصر کروم حدوداً ۴ برابر بیشتر از نمونه دارای پوشش به سطح زیرلایه نفوذ کرده است. یکی از دلایل انتخاب این پوشش‌ها در اتصال دهنده‌ها جلوگیری از نفوذ کروم و رسیدن آن به سطح زیرلایه می‌باشد. زیرا در شرایط کاری SOFC کروم باعث تشکیل ترکیباتی نظیر $CrO_2(OH)_2$ و CrO_3 شده که مسموم شدن کاتد را در پی دارد [۱۶]. بنابراین این پوشش توانایی کافی برای جلوگیری از نفوذ کروم و افزایش مقاومت به اکسیداسیون را داراست.

جدول ۱. نتایج بررسی EDX سطحی از نمونه‌ها.

عنصر (درصد وزنی)	بدون پوشش	پوشش داده شده
اکسیژن	۳۸/۷۰	۳۷/۱۵
کروم	۱۶/۳۱	۳/۰۵
منگنز	۳/۳۵	۳/۲۴
آهن	۴۰/۹۰	۳۷/۱۷
کیالت	۰/۷۴	۱۹/۳۹

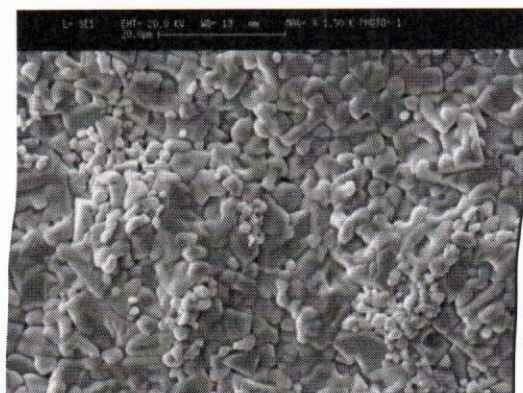


شکل ۵. تغییر وزن بر حسب زمان در نمونه‌های (A) بدون پوشش و (B) پوشش داده شده با $MnCO_2O_4$.

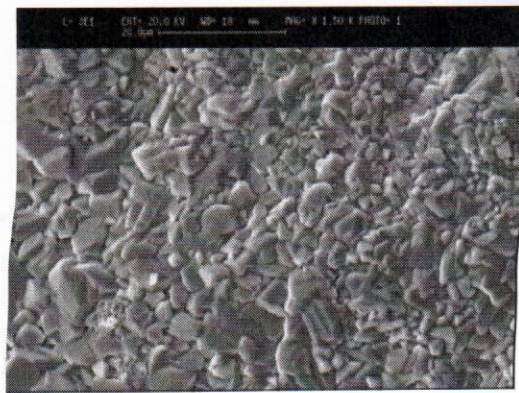
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در نمونه بدون پوشش در سیکل اول اکسیداسیون افزایش وزن چشم‌گیر بوده و بعد از آن به دلیل تشکیل پوسته‌های اکسیدی نظیر اکسید کروم روند اکسیداسیون با شیب ملایم طی شده است. رفتار اکسیداسیون نمونه‌های بدون پوشش و با پوشش طبق تئوری واگنر به صورت سهمی‌وار می‌باشد. در این تئوری فرض می‌شود انتقال یون‌ها بین لایه‌های اکسیدی به وسیله نفوذ شبکه‌ای انجام می‌گیرد. بنابراین این تئوری زمان پارابولیکی را برای رشد لایه اکسیدی پیش بینی می‌کند که به وسیله رابطه فیک قابل اثبات است. ثابت سرعت پارابولیک اکسیداسیون طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۵].

$$\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^2 = K_p \cdot t \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه ۱ ΔW تغییرات وزن، A سطح نمونه، K_p ثابت سرعت پارابولیک و t زمان اکسیداسیون است. نسبت ثابت سرعت اکسیداسیون در نمونه پوشش داده شده به نمونه



(ب)



(الف)

شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های بعد از اکسیداسیون (الف) دارای پوشش (ب) بدون پوشش.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با روش الکتروفورزیس می‌توان پوشش‌هایی بدون ترک و یکنواخت ایجاد نمود. همچنین با استفاده از پوشش‌های اسپینلی کبالت - منگنز می‌توان سرعت اکسیداسیون فولاد زنگ‌نزن ۴۳۰ و نفوذ کروم از زیرلایه را چهار برابر کاهش داد. ثابت سرعت اکسیداسیون به میزان ۱/۶ برابر در نمونه دارای پوشش کاهش یافت.

مراجع

- Ebrahimifar H, Zandrahimi M. Mn coating on AISI 430 ferritic stainless steel by pack cementation method for SOFC interconnect applications. *Solid State Ionics*. 2011;183(1):71-9.
- Electrical Conductivity and Thermal Expansion of Spinel at Elevated Temperatures.
- Yang Z, Xia G-G, Li X-H, Stevenson JW. (Mn,Co)₃O₄ spinel coatings on ferritic stainless steels for SOFC interconnect applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007;32(16):3648-54.
- Wu, J. and X. Liu, Recent Development of SOFC Metallic Interconnect. *Journal of Materials Science & Technology*, (4)26, 2010, 293 - 305.
- M.F. De Riccardis , D. Carbone , A. Rizzo , "A novel method for preparing and characterizing alcoholic EPD suspensions " *Journal of Colloid and Interface Science* 307 (2007) 109-115.
- Shaigan, N., et al., A review of recent progress in coatings, surface modifications and alloy developments for solid oxide fuel cell ferritic stainless steel interconnects. *Journal of Power Sources*, (6)195, 2010, 1529 - 1542.
- W.Z. Zhu, S.C. Deevi, *Mater. Res. Bull.* (38), 2003, 957-972.
- Panigrahi S, Bhattacharjee S, Besra L, Singh BP, Sinha SP. Electrophoretic deposition of doped ceria: Effect of solvents on deposition microstructure. *Journal of the European Ceramic Society*. 2010;30(5):1097-103.
- Besra L, Liu M. A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). *Progress in Materials Science*. 2007;52(1):1-61.
- S. T. B. Sigh, cracking in drying colloidal films. *Physical review letters*, 2007,98, 218302-4.
- Hua B, Zhang W, Wu J, Pu J, Chi B, Jian L. A promising NiCo₂O₄ protective coating for metallic interconnects of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*. 2010;195(21):7375-9.
- Fergus, J.W., Synergism in the design of interconnect alloy-coating combinations solid for oxide fuel cells. *Scripta Materialia*, 2011. 65(2): p. 73-77.
- Nguyen Q. Minh , Takehiko Takahashi, " Science and Technology of Ceramic Fuel Cells", Elsevier, USA, 1995.
- A. Boudghene Stambouli, E. Traversa, " Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 6, Issue 5, October 2002, Pages 433-455.
- Zhang H, Zhan Z, Liu X. Electrophoretic deposition of (Mn,Co)₃O₄ spinel coating for solid oxide fuel cell interconnects. *Journal of Power Sources*. 2011;196(19):8041-7.
- Yoo J, Woo S-K, Yu JH, Lee S, Park GW. La_{0.8}Sr_{0.2}MnO₃ and (Mn_{1.5}Co_{1.5})O₄ double layer coated by electrophoretic deposition on Crofer22 APU for SOEC interconnect applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;34(3):1542-7.