لایه‌نشانی الکتروفورتیکی فریت کبالت بر روی فولاد زنگ‌نزن ۴۳۰ به عنوان اتصال دهنده در پیل سوختی اکسید جامد

رضا ایران‌خواه*[۱]، بابک رئیسی دهکردی[۲] و امیرمقصودی‌پور[۳]

[۱]کارشناس ارشد، پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

[۲]دانشیار، پژوهشکده سرامیک،پژوهشگاه مواد و انرژی

[۳]استادیار، پژوهشکده سرامیک،پژوهشگاه مواد و انرژی

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۲/۲/۹، **تاریخ دریافت نسخهٔ اصلاح شده:** ۱۳۹۲/۲/۱۸،**تاریخ پذیرش قطعی:** ۱۳۹۲/۰۲/۱۸

چکیده اسپینل‌ها دارای هدایت الکتریکی خوب و ضریب انبساط حرارتی نزدیک به اتصال دهنده‌های فلزی در پیل سوختی اکسید جامد می‌باشند. در دمای کاری پیل سوختی اکسید جامد (۶۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد) در صورت استفاده از اتصال دهنده‌های فلزی، نفوذ کروم از طریق لایه اکسید کروم به کاتد باعث مسمومیت آن می‌شود. برای جلوگیری از این پدیده بایستی اتصال دهنده پوشش داده شود. در این مقاله اسپینل فریت کبالت ($CoFe_2O_4$) به روش حالت جامد سنتز و بر روی فولاد زنگ نزن ۴۳۰ به روش لایه‌نشانی الکتروفورتیک در میدان الکتریکی اعمالی ۳۰۰ ولت پوشش داده شد. نمونه دارای پوشش و نمونه بدون پوشش در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت در اتمسفر هوا سینتر و سپس تحت اکسیداسیون سیکلی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵۰۰ ساعت قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی تاثیر محیط احیایی بر مقاومت به اکسیداسیون، نمونه پوشش داده شده در اتمسفر هیدروژن/آرگون (با نسبت ۵ به ۹۵ درصد حجمی) در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت سینتر و سپس تحت اکسیداسیون سیکلی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵۰۰ ساعت قرار گرفت.نتایج اکسیداسیون نشان داد ثابت سرعت اکسیداسیون در نمونه دارای پوشش که ابتدا در محیط هیدروژن/آرگون سینتر شده نسبت به نمونه سینتر شده در هوا، ۲۲۷۰ برابر کاهش یافت.

کلمات کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد، اتصال‌دهنده، اسپینل، لایه‌نشانی الکتروفورتیکی، مقاومت به اکسیداسیون.

Electrophoretic deposition of $CoFe_2O_4$ coating for solid oxide fuel cellinterconnects

Reza.Irankhah*, BabakRaeisi Dehkordi[1]and Amir Maghsoudipour[1]

[1]Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran

Abstract Spinels have excellent electrical conductivity and good thermal expansion coefficient (TEC) matching to the SOFC metallic interconnects. Under solid oxide fuel cell (SOFC) operating temperature (600_850 ºC), the use of ferritic stainless steels results in Cr migration via Cr_2O_3 scale into the cathode where cathode poisoning is caused. In order to minimize poisoning of the cathode, the interconnect material has to be coated.In the present study, Co-Fe spinel powder was synthesized through a solid state reaction. In the next step, the electrophoretic deposition (EPD) method was used to apply the $CoFe_2O_4$ spinel, as an oxidation-resistant layer, on SUS 430 in a potential of 300 V. The coated and uncoated samples were then pre-sintered in air at 900 °C for 3 h followed by cyclic oxidation at 800 °C for 500 h. In order to study the effect of reducing pre-sintering atmosphere on oxidation resistance, the coated specimen was pre-sintered in 5% H_2/Ar at 900 °C for 3 h followed by cyclic oxidation at 800 °C for 500 h. The investigation of the oxidation resistance of the samples revealed that the K_p for pre-sintered coating in 5% H_2balArwas nearly 2270 times smaller than that of the one pre-sintered in air.

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

***عهده دار مکاتبات**

نشانی: کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی

تلفن: - ، **دورنگار:** - ، **پیام نگار:**babakraissi@yahoo.com

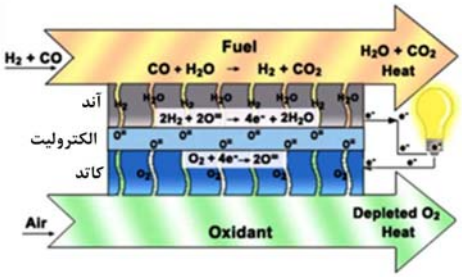
۱- مقدمه

پیل سوختی دستگاهی است که سوخت‌هایی مانند هیدروژن، متانول، گاز طبیعی، هوا و اکسیژن را به برق، آب و حرارت تبدیل می‌کند. پیل سوختی شبیه یک باطری بوده ولی بر خلاف باطری نیاز به انبارش شارژ ندارد و تا زمانی که سوخت و هوای مورد نیاز پیل تامین شود سیستم کار خواهد کرد.پیل-های سوختی بر اساس الکترولیت مورد استفاده و دمای کاری به چند دسته‌ی پلیمری، کربنات مذاب، قلیایی و اکسید جامد تقسیم می‌شوند [۱و۲]. در شکل ۱ شمایی از اجزاء پیل سوختی اکسید جامد[1] و مکانیزم عمل آن نشان داده شده است. اکسیژن در مرز هوا – الکترولیت – کاتد احیاء می‌گردد و یون‌های اکسیژن از طریق الکترولیت به مرز آند – الکترولیت – سوخت رسیده و با سوخت هیدروژن واکنش داده و تولید بخار آب و الکتریسیته می‌نماید. این چرخه تا زمانی که سوخت به الکترودها برسد تکرار می‌گردد [۳و ۴].

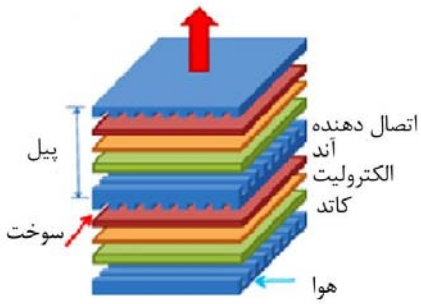
همان‌طور که در شکل (۱– الف) مشخص است، اتصال دهنده در یک چیدمان پیل سوختی اکسید جامد آند یک سلول را به کاتد سلول مجاور متصل می‌نماید. هدف از به کار بردن اتصال دهنده، اتصال سلول‌ها به صورت سری با یکدیگر بوده به طوری که بتوان الکتریسیته تولیدی توسط سلول‌ها را به صورت یک–جا جمع آوری نمود[۶].مقاومت در برابر احیاء و اکسیداسیون در دمای بالا(پیل سوختی اکسید جامد در دمای بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد کار کرده [۲] و اتصال دهنده همزمان در معرض سوخت و گاز اکسیدان قرار دارد)، پایداری شیمیایی در برابر گازهای احیایی و اکسیدان، هدایت الکتریکی خیلی بالا، دانسیته بالا، مقاومت به خزش بالا، هدایت حرارتی خوب، مقاومت در برابر مسمومیت گوگرد، تطابق انبساط حرارتی با سایر اجزاء پیل، قیمت مواد مصرفی کم و قیمت ساخت پایین از جمله مواردی است که یک اتصال دهنده در پیل سوختی اکسید جامد می‌بایددارا باشد [۷].بر این اساس اتصال دهنده‌ها می‌توانند سرامیکی یا فلزی باشند[۶]. در بین مواد سرامیکی مورد استفاده در پیل سوختی اکسید جامد، کرومیت لانتانیوم[2] آلائیده شده با عناصری نظیر کبالت، آهن، نیکل، منیزیوم، مس، استرانسیوم، کلسیم و وانادیوم بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما قیمت بالا، مشکلات زینتر نمودن و تاب برداشتن این نوع اتصال دهنده‌ها [۷] باعث شده تا مهندسین علم مواد از مواد فلزی به عنوان جایگزینی برای این اتصال دهنده‌ها استفاده کنند. مواد فلزی به دلیل دارا بودن مزایایی هم‌چون قیمت پایین، تافنس بالا و ساخت آسان می-توانند به عنوان جایگزین اتصال دهنده‌های سرامیکی مورد استفاده قرار گیرند. اگر چه در این اتصال دهنده‌ها نیز مشکلاتی نظیر افزایش مقاومت الکتریکی و هم‌چنین نفوذ کروم به بیرون از اتصال دهنده در طی زمان کارکرد پیل باعث کاهش کارایی الکتروشیمیایی پیل می‌گردند [۶]. یکی از راه‌حل‌های مناسب برای کاهش این مشکلات، استفاده از یک پوشش محافظ بر روی سطح اتصال دهنده‌ها می‌باشد [۸]. اسپینل‌ها یک‌دسته از این نوع پوشش‌ها می‌باشند. این پوشش‌ها به دلیل دارا بودن ضرایب انبساط حرارتی در حدود 10^{-6}/K× (۱۲–۱۱) که با فولادهای زنگ‌نزن فریتی (اتصال دهنده) تطابق حرارتی بسیار خوبی دارند [۹]، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. اسپینل فریت کبالت نیز در دمای ۲۵ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای ضریب انبساط حرارتی10^{-6}/K× ۱۱/۸می‌باشد [۱۰]. همچنین پوشش‌های اسپینلی در جذب کروم که از طریق لایه اکسیدی به سطح پوسته اکسیدی می‌آیند توانایی خوبی داشته و در نتیجه مسمومیت کاتد به حداقل می‌رسد [۱۱].

1. Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

2. $LaCrO_3$



ب



الف

شکل ۱.الف) پیل سوختی اکسید جامد و طرز قرار گیری اجزاء آن ب) اصول عملکرد پیل سوختی اکسید جامد [۳ و ۵].

۲-روش آزمایش

۲-۱- سنتز اسپینل

در این مقاله از دو پیش ماده اکسید کبالت (Co_3O_4) و کربنات منگنز (Fe_2O_3)به منظور سنتز اسپینل $CoFe_2O_4$ استفاده شد. این دو پیش ماده با نسبت استوکیومتری در محیط اتانول به مدت ۲۴ ساعت مخلوط و سپس در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۲ ساعت کلسینه گردید.به منظور ریزتر شدن اندازه ذرات سنتز شده، از آسیاب‌کاری مکانیکی استفاده شد. پودر سنتز شده به مدت ۶ ساعت در دستگاه آسیاب مکانیکی با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه آسیاب گردید. در نهایت از پودر سنتز شده آنالیز تفرق اشعه ایکس به عمل آمد. این آنالیز با دستگاه مدل PW3710 شرکت فیلیپس انجام شد.توزیع اندازه ذرات اسپینل سنتز شده با دستگاه PSA(شرکت FRITSH آلمان)، تعیین ضخامت پوشش با میکروسکوپ نوری (مدل Olympus ژاپن) و بررسی مرفولوژی پوشش‌ها قبل و بعد از اکسیداسیون با میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل StereoScan S 360 انگلستان) انجام شد.

۲-۲- لایه‌نشانی الکتروفورتیکی و آزمون اکسیداسیون

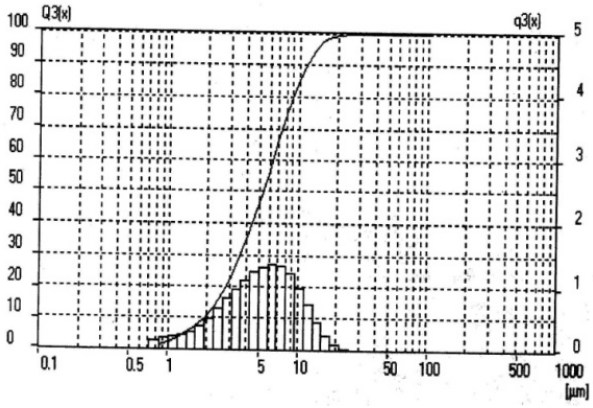
زیرلایه مورد استفاده جهت لایه‌نشانی از فولاد زنگ نزن ۴۳۰ انتخاب گردید. ابتدا زیرلایه‌ها با ابعاد (cm×cm×mm)

استفاده از پوشش‌های اسپینلی فریت کبالت به منظور جلوگیری از نفوذ کروم به سطح اتصال دهنده با روش الکتروپلیت[1] [۱۰] توسط محققین دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. اما در بین روش‌های لایه‌نشانی، لایه نشانی الکتروفورتیکی نسبت به دیگر روش‌های لایه نشانی مرسوم دارای مزایای زیادی بوده که از بین آنها می‌توان به بازدهی بالا، به صرفه بودن فرآیند از لحاظ قیمت و فرآیند ساده و آسان اشاره نمود [۸ و ۱۲]. در این روش با اعمال میدان الکتریکی به ذرات معلق و پراکنده شده در یک سوسپانسیون، می‌توان آن‌ها را بر روی الکترود مورد نظر لایه‌نشانی نمود [۱۲].

بر اساس آخرین مطالعات نویسندگان این مقاله، تاکنون لایه‌نشانی اسپینل فریت کبالت به روش الکتروفورتیکی[2]انجام نگرفته است. در تحقیق حاضر ابتدا ذرات اسپینل فریت کبالت به روش حالت جامد سنتز و سپس با روش لایه‌نشانی الکتروفورتیکی بر روی فولاد زنگ‌نزن ۴۳۰ لایه‌نشانی شدند. در نهایت از لایه‌های تهیه شده آزمون اکسیداسیون به عمل آمد.

1.Electroplating
2.Electrophoretic deposition

x–pertنشان داد که ماده سنتز شده بـا کـارت اسـتاندارد شـماره ۱۱۲۱-۰۰۱ تطابق کامل دارد.



شکل ۲.توزیع اندازه ذرات اسپینل $CoFe_2O_4$.

۳-۲- لایه‌نشانی الکتروفورتیکی

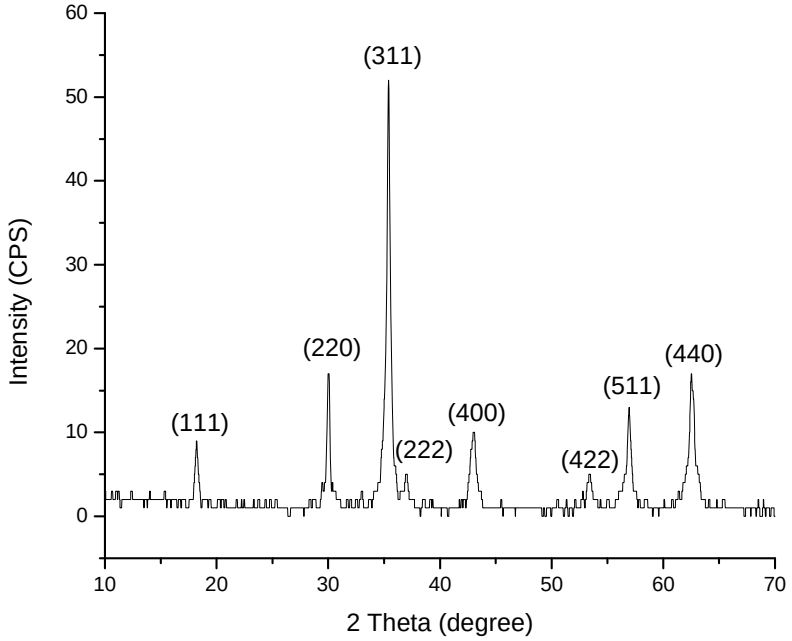
برای لایه‌نشانی اسپینل فریت کبالت، ابتـدا سوسپانسـیون استن حاوی پودر اسپینل با غلظت ۱ گرم بر لیتر تهیـه و سـپس این سوسپانسیون به منظور یکنواخت‌سازی بـه مـدت ۱۵ دقیقـه آلتراسونیک شد. در نهایت لایه‌نشانی بر روی دو طرف الکتـرود فولادی ۴۳۰ در میدان الکتریکـی ۳۰۰ ولـت درمـدت زمـان ۶۰ ثانیه انجام شد. سطح پوشش ایجاد شـده توسـط میکروسـکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. در شـکل (۴) تصـویر SEM لایـه نشست نشان داده شده است. همان‌طور که قابل مشـاهده اسـت، سـطح نشسـت کـاملا یکنواخـت و عـاری از تـرک مـی‌باشـد. ضخامت این لایه با میکروسکوپ نوری،با استفاده از اندازه‌گیری اختلاف فوکوس بین زیرلایه و سطح پوشش، حدود ۲۰ میکرون تخمین زده شد.

۳×۲×۲ تهیه و سپس به منظور زدودن ناخالصی‌ها و چربی‌ها بـا استن شستشو و خشک گردیدند. لایه‌نشـانی الکتروفـورتیکی در محیط استن و در شـدت میـدان الکتریکـی ۳۰۰ ولتبـه مـدت ۱ دقیقه در فاصله الکترود ۱ سانتی‌متر انجام شد. در نهایت نمونـه-های دارای پوشش در دو محـیط هـوا و هیـدروژن/آرگـون (بـا نسبت حجمی ۵ به ۹۵)در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مـدت ۳ ساعت سینتر و سـپس تحـت اکسیداسـیون سـیکلی طـی ۱۰ سیکل ۵۰ ساعته در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد قـرار گرفتنـد. پس از اتمام هر سیکل نمونه‌ها توسط ترازوی بـا دقـت ۵ رقـم اعشار وزن شـده و در نهایـت تغییـرات وزن طـی سـیکل‌هـای اکسیداسیونی بر حسب زمان اکسیداسیون رسم گردید.

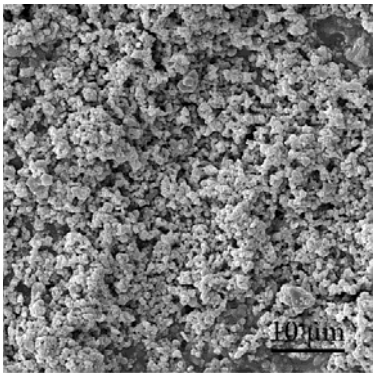
۳- نتایج و بحث

۳-۱-مشخصه‌یابی اسپینل

در فرآینـد لایـه‌نشـانی الکتروفـورتیکی نیـاز بـه یـک سوسپانسیون پایدار از ذرات می‌باشد و از آن‌جایی کـه هـر چـه ابعاد ذرات معلق در محیط لایه‌نشانی درشت‌تر باشند، سـریع‌تـر ته‌نشین می‌شوند و در نتیجه سوسپانسیون پایدار حاصـل نمـی-گردد، بنابراین به منظور حصـول ذراتـی بـا انـدازه کمتـر از ۱۰ میکرون، عملیات آسیاب‌کاری نهایی بعد از فرآیند سـنتز اسـپینل انجام گردید.نتایج این آنالیز در شکل (۲) نشان داده شده اسـت. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با این روش می‌تـوان بـه انـدازه ذراتی با میانگین۵ میکرون دست یافت که این اندازه ذرات برای لایه‌نشانی مناسب می‌باشند.نتـایج آنـالیز تفـرق اشـعه ایکـس از اسپینل سنتز شده (شکل ۳) نشـان داد کـه ایـن مـاده کـاملاً بـه صورت خالص سنتز شده و تمامی پیک‌هـای موجـود مشخصـه ایـن مـاده مـی‌باشـند. بررسـی ایـن مـاده توسـط نـرم افـزار



شکل ۳. آنالیز تفرق اشعه ایکس اسپینل $CoFe_2O_4$.



شکل ۴. تصویر SEM از سطح پوشش خام لایه نشانی شده در میدان اعمالی ۳۰۰ ولت به مدت ۱ دقیقه.

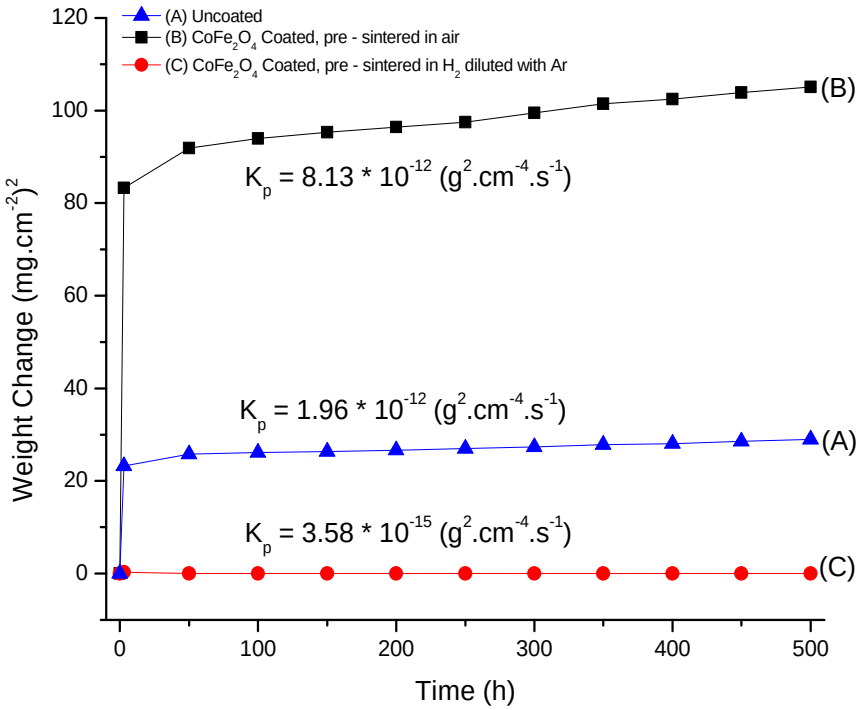
۳-۳- بررسی مقاومت به اکسیداسیون

در شکل (۵) تغییرات وزن نمونه‌های بدون پوشش (منحنی A)و نمونه دارای پوشش که ابتدا در محیط هوا سینتر شده (منحنی B) آورده شده است.

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 بوسیله رابطه فیک قابل اثبات

است. ثابت سرعت پارابولیک اکسیداسیون طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود [۱۳].

$$\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^2 = K_p.t \qquad \text{(معادله ۱)}$$



شکل ۵. تغییر وزن بر حسب زمان در نمونه‌های A) بدون پوشش B) دارای پوشش فریت کبالت که ابتدا در محیط هوا سینتر شده C) دارای پوشش فریت کبالت که ابتدا در محیط هیدروژن/آرگون سینتر شده.

در معادله (۱) ΔW تغییرات وزن، A سطح نمونه، K_p ثابت سرعت اکسیداسیون و t زمان اکسیداسیون است. همان‌طور که در شکل (۵) قابل مشاهده است تغییر وزن نمونه بدون پوشش نسبت به نمونه دارای پوشش که ابتدا در هوا سینتر شده‌اند کمتر می‌باشد. به طوری که بعد از ۵۰۰ ساعت اکسیداسیون، تغییر وزن آن‌ها به ترتیب برابر ۰/۰۰۵۳۸ و ۰/۰۱۰۲ گرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. هم‌چنین از آن‌جایی که عمده تغییر وزن در ۳ ساعت ابتدایی اتفاق می‌افتد، بنابراین برای کاهش این تغییر وزن و افزایش مقاومت به اکسیداسیون، ابتدا نمونه پوشش داده شده را در محیط هیدروژن/آرگون سینتر نموده و سپس اکسیداسیون در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵۰۰ ساعت انجام شد. تغییر وزن این نمونه بعد از ۵۰۰ ساعت اکسیداسیون برابر با ۰/۰۰۰۰۲۶ گرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد (شکل ۵ منحنی C). با مقایسه ثابت سرعت اکسیداسیون (K_p) نمونه‌های دارای پوشش که ابتدا در دو محیط هوا (منحنی B) و هیدروژن/آرگون (منحنی C) سینتر شده‌اند، می‌توان

نتیجه گرفت که این ثابت در نمونه سینتر شده در محیط هیدروژن/آرگون نسبت به نمونه دیگر ۲۲۷۰ برابر کاهش می‌یابد. بنابراین با سینتر اولیه پوشش در محیطی عاری از اکسیژن می‌توان مقاومت به اکسیداسیون نمونه را افزایش داد.

تصاویر SEM از نمونه بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده شده بعد از ۵۰۰ ساعت اکسید شدندر شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، نمونه بدون پوشش بعد از ۵۰۰ ساعت اکسیداسیون در مناطقی از سطح دچار جدایش پوسته اکسیدی شده است. همچنین با مقایسه تصاویر SEM دو نمونه دارای پوشش که ابتدا در دو محیط هوا و هیدروژن/آرگون سینتر شده‌اند، می‌توان به این نکته پی برد که پوشش‌های سینتر شده در هوابر خلاف پوشش‌های سینتر شده در هیدروژن/آرگون بعد از ۵۰۰ ساعت اکسیداسیون دچار ترک شده‌اند و یکی از دلایل تغییر وزن بالاتر این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های سینتر شده در محیط هیدروژن/آرگون همین مناطق بوده که باعث نفوذ راحت‌تر اکسیژن و تغییر وزن بیشتر نمونه می‌گردد.

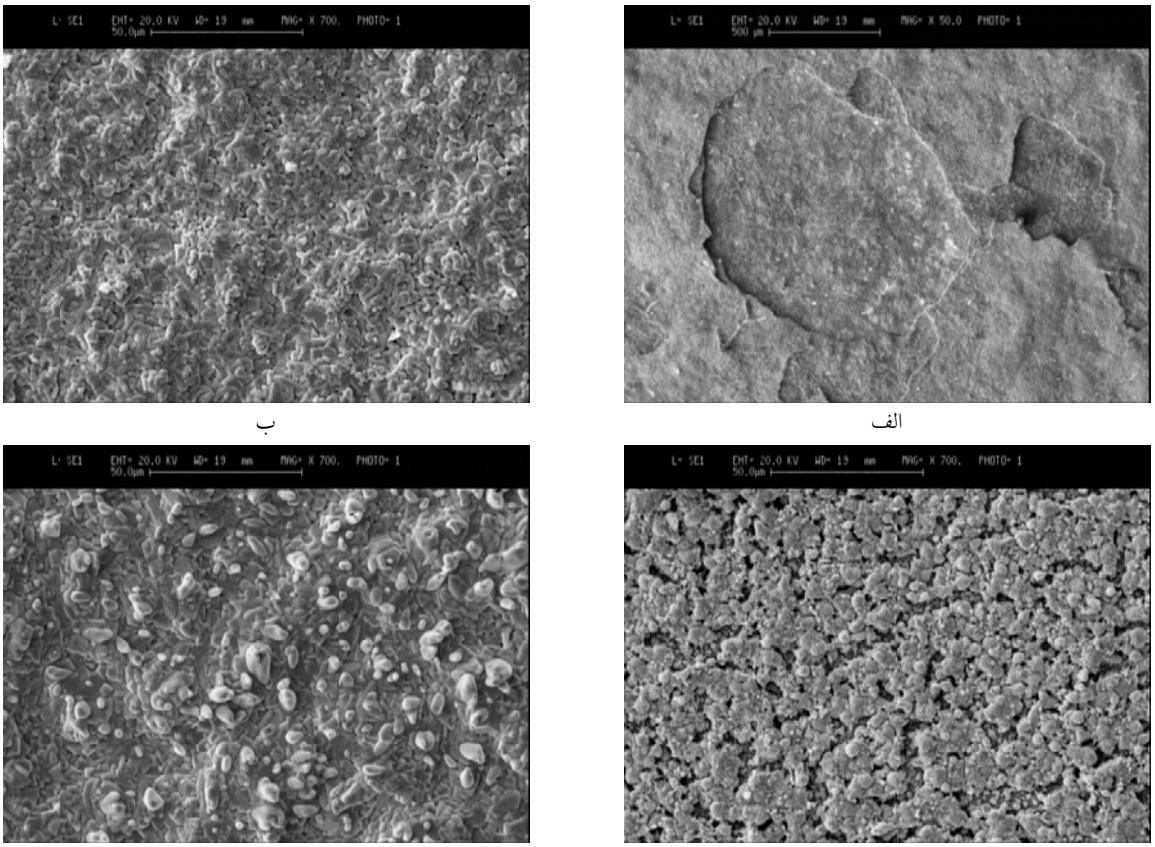
۳-۶- بررسی آنالیز شیمیایی سطح نمونه‌ها

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر گردیدیکی از مشکلات استفاده از اتصال‌دهنده‌های فلزی، نفوذ کروم از زیرلایه و تبخیر آن به شکل $CrO_2(OH)_2$ و یا CrO_3می‌باشد. این ترکیبات باعث مسموم شدن کاتد پیل سوختی اکسید جامد و کاهش کارایی پیل می‌شوند [۱۴]. به همین منظور برای جلوگیری از نفوذ کروم به بیرون از زیرلایه از پوشش‌های محافظ استفاده می‌شود.در تحقیق حاضر نیز از پوشش اسپینلی فریت کبالت به همین منظور استفاده شد. برای بررسی عناصر موجود در سطح نمونه بعد از اکسیداسیون، از آنالیز EDS استفاده شد. این آنالیز از سطح نمونه‌های بدون پوشش و دارای پوشش اسپینلی فریت کبالت (شکل ۶–ب، ج و د در بزرگنمایی ۷۰۰ برابر) به عمل آمد. نتایج این آنالیز در جدول (۱) آورده شده است.

با توجه به داده‌های حاصل از آزمون EDS در جدول ۱، مشاهده می‌شود که عنصر کروم در نمونه بدون پوشش نسبت به دو نمونه دارای پوشش سینتر شده در هوا و هیدروژن/آرگون به ترتیب۱/۷۵ و ۳۵ برابر بیشتر به سطح پوشش نفوذ کرده است. بنابراین این پوشش توانایی کافی برای جلوگیری از نفوذ کروم و افزایش مقاومت به اکسیداسیون را داراست.

۴-نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با روش لایه‌نشانی الکتروفورتیکی می‌توان پوشش‌هایی یکنواخت و بدون ترک ایجاد نمود. هم‌چنین نتایج تاثیر محیط سینتر اولیه بر روی ثابت سرعت اکسیداسیون نشان داد که با سینتر نمودن نمونه‌ها در محیط هیدروژن/آرگون نسبت به محیط هوا می‌توان ثابت سرعت اکسیداسیون را تا ۲۲۷۰ برابر کاهش داد. علاوه بر این پوشش‌های اسپینلی فریت کبالت باعث کاهش نفوذ کروم از زیرلایه به مقدار۳۵ برابر گردید.



شکل ۶.تصاویر SEM از سطح نمونه‌ها بعد از ۵۰۰ ساعت اکسیداسیون الف)بدون پوشش ب)بدون پوشش (از مناطقی که دچار جدایش نشده‌اند) ج) دارای پوشش ابتدا سینتر شده در هوا د) دارای پوشش ابتدا سینتر شده در هیدروژن/آرگون.

جدول ۱.نتایج بررسی EDS سطحی از نمونه‌ها.

عنصر (درصد وزنی) / نام نمونه	اکسیژن	کروم	منگنز	آهن	کبالت
بدون پوشش	۳۸/۷۰	۱۶/۳۱	۳/۳۵	۴۰/۹۰	۰/۷۴
دارای پوشش – ابتدا سینتر در هوا	۳۷/۳۱	۹/۳۰	۱/۵۱	۴۲/۵۷	۹/۳۰
دارای پوشش – ابتدا سینتر در هیدروژن/آرگون	۳۶/۷۲	۰/۴۶	۰/۷۵	۵۰/۸۹	۱۱/۱۸

مراجع

1. Nguyen Q Minh, Takehiko Takahashi. *Science and Technology of Ceramic Fuel Cells*. Elsevier. USA (1995) 1-7.
2. BoudgheneStambouliA, TraversaE. Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 6[5](2002) 433-455.
3. Lai, K., et al. A quasi-two-dimensional electrochemistry modeling tool for planar solid oxide fuel cell stacks. *Journal of Power Sources*. 196 [6](2011) 3204-3222.
4. G. Hoogers. *Fuel Cell Technology Handbook*. CRC Press, Boca Raton, FL. (2003).
5. Yang Z, Xia G-G, Maupin GD, Stevenson JW. Conductive protection layers on oxidation resistant alloys for SOFC interconnect

applications. *Surface and Coatings Technology*.201[7](2006)4476-83.

6. Yoo J, Woo S-K, Yu JH, Lee S, Park GW. $La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$ and $(Mn_{1.5}Co_{1.5})O_4$ double layer coated by electrophoretic deposition on Crofer22 APU for SOEC interconnect applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 34[3] (2009)1542-7.
7. Wincewicz KC, Cooper JS. *Taxonomies of SOFC material and manufacturing alternatives. Journal of Power Sources*. 140[2](2005) 280-96.
8. Zhang H, Zhan Z, Liu X. *Electrophoretic deposition of $(Mn,Co)_3O_4$ spinel coating for solid oxide fuel cell interconnects. Journal of Power Sources*. 196 [19] (2011)8041-7.
9. Qu, W., et al. *Electrical and microstructural characterization of spinel phases aspotential coatings for SOFC metallic interconnects. Journal of Power Sources*. 153 [1] (2006) 114-124.
10. Bi ZH, Zhu JH, Batey JL. $CoFe_2O_4$ spinel protection coating thermally converted from the electroplated Co–Fe alloy for solid oxide fuel cell interconnect application. *Journal of Power Sources*. 195 [11] (2010)3605-11.
11. Shaigan N, Qu W, Ivey DG, Chen W. 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*. 195 [6] (2010) 1529-42.
12. LaxmidharBesra, Meilin Liu. A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). *Progress in Materials Science*. 52 [1] (2007) 1-61.
13. Hua B, Zhang W, Wu J, Pu J, Chi B, Jian L. A promising $NiCo_2O_4$ protective coating for metallic interconnects of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*.195 [21] (2010) 7375-9.
14. Fergus, J.W, *Synergism in the design of interconnect alloy–coating combinations solid for oxide fuel cells*. Scripta Material A. 65 [2] (2011) 73-77.