

بررسی رسانش الکتریکی صفحات اتصال دهنده مورد استفاده در پیل های سوختی اکسید جامد در حضور اسپینل های منگنز

مرتضی زند رحیمی^۱، هادی ابراهیمی فر^{۲*}

۱- دانشیار بخش مهندسی مواد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی مواد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

*H.Ebrahimifar@eng.uk.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۶/۱۸)

چکیده

آلیاژهای کروم دار بهترین مواد برای صفحات اتصال دهنده مورد استفاده در پیل های سوختی اکسید جامد هستند. به هر حال مشکل کاهش رسانش الکتریکی در طی اکسایش دمای بالا باید حل شود. هدف از این پژوهش بررسی رفتار الکتریکی فولاد فریتی زنگ نزن AISI 430 پوشش داده شده به روش سمانتاسیون فشرده در یک مخلوط پایه پودری منگنز می باشد. رسانش الکتریکی به عنوان تابعی از زمان اکسایش در دمای ۷۵۰ °C و به عنوان تابعی از دما به وسیله ی آنیل کردن نمونه ها از دمای ۴۰۰ تا ۹۰۰ °C بررسی شد. نتایج نشان دادند که لایه ی پوشش داده شده در طی فرآیند اکسایش تبدیل به اسپینل های Mn_3O_4 و $MnFe_2O_4$ شد. این اسپینل ها به بهبود رسانش الکتریکی نمونه های پوشش دار نسبت به نمونه های بدون پوشش می انجامد.

واژه‌های کلیدی:

رسانش الکتریکی، پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)، فولاد زنگ نزن AISI 430، اسپینل های منگنز، سمانتاسیون فشرده.

۱- مقدمه

سوختی اکسید جامد در نظر گرفته می شوند که به طور فیزیکی گازهای سوختی و اکسید کننده را از هم جدا می کند. همچنین این صفحات گازها را در الکترودها توزیع می کنند و اتصال الکتریکی بین پیل ها را برقرار می کنند [۱]. به دلیل دمای کاری نسبتاً بالای این پیل ها، صفحات اتصال دهنده باید دارای ویژگی هایی چون، مقاومت به اکسایش در دمای بالا در اتمسفر کاری کاتد و آنود، رسانش الکتریکی بالا و تطابق ضریب انبساط

پیل های سوختی اکسید جامد (SOFCs) گزینه های نوید بخشی برای دستگاه های تبدیل انرژی هستند. این دستگاه ها دارای بازدهی انرژی بیشتری نسبت به دستگاه های موتوری حرارتی قدیمی و نسبت به سایر انواع پیل های سوختی دارند و در حال حاضر بالاترین دما را در میان انواع پیل های سوختی دارند. صفحات اتصال دهنده به عنوان یک جزء اصلی در پیل های

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد زنگ نزن فریتی AISI 430 با ترکیب شیمیایی داده شده در جدول ۱ استفاده شد. به منظور انجام آزمایشات اکسایش دمای بالا، نخست منگنز توسط عملیات سمانتاسیون فشرده بر روی زیرلایه زنگ نزن فریتی رسوب داده شد. برای ایجاد پوشش از این فولاد قطعاتی به ابعاد mm ۱۰×۵×۲ تهیه شد. در مرحله‌ی بعد نمونه‌ها با کاغذ سنباده SiC تا شماره ۱۲۰۰ پولیش و با دستگاه آلتراسونیک در محلول استون و متانول چربی زدائی شد. از پودرهای منگنز، اکسید آلومینیوم و کلرید آمونیوم با دانه بندی ۱۵۰، ۱۸۰-۷۰ و ۲۴۰ میکرون برای عملیات سمانتاسیون فشرده استفاده شد. به منظور بهینه کردن کیفیت پوشش، عوامل موثر در فرآیند سمانتاسیون فشرده مورد بررسی قرار گرفتند. این عوامل شامل میزان فعال کننده در مخلوط پودر (۶-۱ wt.%)، دما (۹۰۰ °C - ۷۰۰) و زمان پوشش دهی (۷-۳ h) انتخاب شدند. به طور کلی، مقدار نامناسب فعال کننده در مخلوط پودر (مقدار کم یا زیاد) منجر به تولید پوشش متخلخل می شود. برای فعال کردن واکنش های شیمیایی و رسوب منگنز بر روی زیر لایه، حداقل دمای ۷۰۰ °C لازم است.

افزایش دما یا زمان پوشش دهی منجر به ضخیم تر شدن لایه ی پوشش می شود. اما در کاربرد صفحات اتصال دهنده، لایه نازک تر پوشش به منظور رسانش الکتریکی بالاتر و بازدهی بیشتر ضروری است. بهترین ترکیب پودر بدست آمده توسط پژوهشگران، به صورت ۱۰٪ وزنی Mn، ۳٪ وزنی NH₄Cl به عنوان فعال کننده و ۸۷٪ وزنی Al₂O₃ است و مناسب ترین دما و زمان برای بدست آوردن بهترین کیفیت پوشش از لحاظ چسبندگی و عدم تخلخل ۸۰۰ °C به مدت زمان ۵ ساعت می باشد. برای انجام عملیات پوشش دهی از کوره تحت گاز آرگون استفاده شد.

برای اندازه گیری رسانش الکتریکی نمونه های پوشش دار و بدون پوشش از تجهیزات نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شد. سیم های پلاتینی به یک طرف نمونه ها که پولیش داده شده بودند

حرارتی عالی با سایر اجزا باشد. کاهش دمای کاری سلول های سوختی اکسید جامد به کمتر از ۸۰۰ °C، استفاده از آلیاژهای فلزی به عنوان صفحات اتصال دهنده را مقدور می سازد. این صفحات اتصال دهنده به طور گسترده از فولادهای زنگ نزن مانند UNS 430، Hitachi ZMG 232، Crofer 22 و AISI 430 ساخته می شوند. فولادهای فریتی دارای مزیت هایی مانند قیمت پائین، دسترسی آسان، رسانش الکتریکی و گرمایی بالا و تطابق ضریب انبساط حرارتی با سایر اجزاء سرامیکی هستند. یک عیب اتصال دهنده های فلزی، رشد لایه ی اکسیدی بر روی سطح است که باعث افزایش مقاومت ماده و افزایش مقاومت تماسی می شود و همچنین این لایه اکسیدی مستعد به ترک خوردن است. همچنین تبخیر کروم در پوسته اکسیدی باعث آلودگی پیل می شود [۲]. همه ی این عوامل موجب کاهش بازدهی این نوع مبدل ها می شوند. یکی از موثرترین اقدامات برای بهبود ویژگی های صفحات اتصال دهنده، استفاده از یک لایه پوشش محافظ و رسانا برای ایجاد رسانش الکتریکی بهتر، کاهش رشد پوسته اکسیدی و کاهش تبخیر کروم است [۳-۴]. پژوهش های جدید بر روی ایجاد پوشش های محافظ - رسانا متمرکز شده اند. روش های گوناگونی برای ایجاد پوشش بر روی فولادهای زنگ نزن فریتی به کار رفته است. این روش ها شامل آبکاری الکتریکی [۵-۸]، رسوب الکتروشیمیایی آندی [۹]، رسوب الکتروشیمیایی کاتدی و سمانتاسیون فشرده است [۱۰-۱۳]. روش سمانتاسیون فشرده به دلیل هزینه ی کم، چسبندگی خوب رسوب ایجاد شده بر روی زیر لایه و کاربرد گسترده مورد توجه قرار گرفته است.

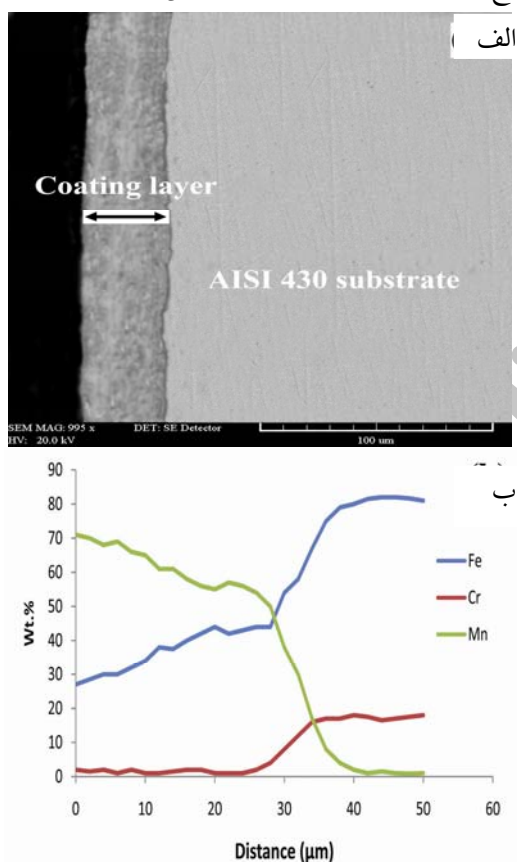
با توجه به اینکه اسپینل های منگنز دارای رسانش الکتریکی خوب در شرایط کاری پیل های سوختی اکسید جامد هستند [۱۴] و تا کنون پژوهشی در مورد ایجاد پوشش منگنز به روش سمانتاسیون فشرده بر روی هیچ آلیاژی برای کاربرد صفحات اتصال دهنده در پیل های سوختی اکسید جامد انجام نگرفته است، در این پژوهش این نوع پوشش با استفاده از روش سمانتاسیون فشرده ایجاد شد و اثر لایه پوشش بر روی رسانش الکتریکی بررسی شد.

اصلی کم شد. اندازه گیری رسانش الکتریکی به عنوان تابعی از دما و زمان در هوای ساکن در کوره الکتریکی انجام شد. برای تعیین فازهای موجود در پوشش از پراش پرتو ایکس استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ایجاد پوشش بر روی زیر لایه

شکل ۲ تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (شکل ۲ الف) از سطح مقطع عرضی نمونه پوشش داده شده و توزیع عناصر آلیاژی در لایه پوشش (شکل ۲ ب) را نشان می دهد.

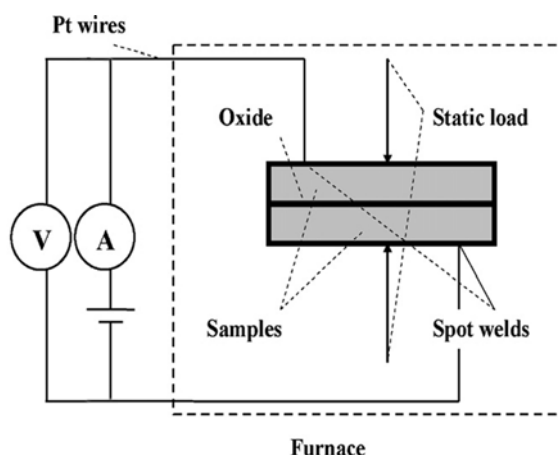


شکل (۲): (الف) تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و (ب) الگوی EDS عناصر نفوذی از سطح مقطع عرضی نمونه پوشش داده شده تحت گاز آرگون بعد از ۵ ساعت آنیل همدمای در 800°C .

پوشش ایجاد شده چسبندگی کاملی بر روی زیر لایه داشته و هیچ گونه جدایش، ناپیوستگی و تخلخلی بین زیر لایه و پوشش

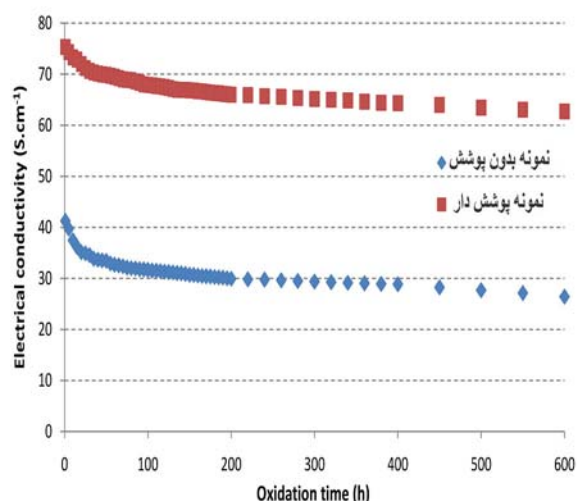
جوش نقطه ای داده شد. به منظور جلوگیری از چسبیدن نمونه ها به یکدیگر و آلیاژ شدن و ایجاد نتایج نادرست، نمونه های جوش داده شده با سیم های پلاتینی به مدت ۲۴ ساعت در دمای 750°C پیش اکسایش شدند. برای جلوگیری از عدم اتصال احتمالی نمونه ها از اتصالات نگه دارنده استفاده شد. به منظور اندازه گیری مقادیر رسانش الکتریکی از یک منبع جریان ثابت، با چگالی جریان $50.0\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ استفاده شد و ولتاژ توسط ولت متر در هر ۳۰ دقیقه اندازه گیری شد. با استفاده از قانون اهم و اطلاعات بدست آمده مقادیر رسانش الکتریکی محاسبه شد. به منظور به دست آوردن مقاومت توزیع شده در سیم های پلاتینی جدول (۱): مشخصات شیمیایی و فیزیکی مواد اولیه

مشخصات فیزیکی	مشخصات شیمیایی	مواد اولیه
	۱۷/۴٪ کروم،	
	۰/۹۲٪ منگنز،	فولاد زنگ نزن
	۰/۸۵٪ سیلیسیم،	فرتی
$10 \times 5 \times 2\text{ mm}^3$	۰/۱۲٪ کربن و	AISI 430
	۸۰/۷٪ آهن	
۱۵۰ میکرون	خلوص ۹۹/۵٪+	پودر منگنز
۷۰-۱۸۰ میکرون	خلوص ۹۹٪+	پودر Al_2O_3
۲۴۰ میکرون	خلوص ۹۹/۳٪+	پودر NH_4Cl



شکل (۱): منبع جریان ثابت، آمپر متر، ولت متر و گیره نگه دارنده برای اندازه گیری رسانش الکتریکی.

و زیر لایه، دو سیم پلاتینی به دو طرف یک نمونه ی بدون پوشش جوش داده شدند و نتایج بدست آمده از نتایج آزمایش

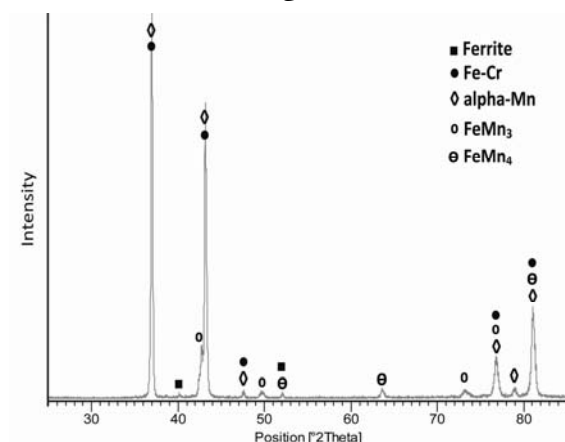


شکل (۴): مقادیر رسانش الکتریکی اندازه گیری شده به عنوان تابعی از زمان اکسایش در دمای 750°C .

وجود اکسید کروم ناشی از نفوذ به بیرون کاتیون کروم و واکنش با آنیون اکسیژن است. کرومیا (Cr_2O_3) در زیر لایه اسپینل تشکیل خواهد شد. وجود فاز سیلیکا ناشی از وجود سیلیسیم در فولاد است. در فولادهایی که بیشتر از ۰/۵ درصد سیلیسیم دارند یک فیلم شبکه مانند پیوسته از سیلیکا در حین اکسایش تشکیل می شود [۱۷].

در نمونه‌ی پوشش دار، فاز Cr_2O_3 ، Fe_2O_3 و اسپینل‌های Mn_3O_4 و MnFe_2O_4 مشاهده می شود. شدت کمتر پیک های مربوط به فازهای Cr_2O_3 و Fe_2O_3 در نمونه های پوشش دار نسبت به نمونه های بدون پوشش نشان دهنده محدود شدن آهنگ نفوذ توسط لایه ی پوشش و تشکیل این فازها است. مقدار کمتر رسانش الکتریکی برای نمونه های بدون پوشش نسبت به نمونه های پوشش دار به دلیل رشد بیشتر لایه اکسیدی کرومیا و همچنین تشکیل لایه اکسیدی سیلیکا است. زیرا اسپینل $(\text{Mn,Cr})_3\text{O}_4$ نتوانسته است به عنوان یک مانع در مقابل نفوذ عمل کند و رشد لایه کرومیا را محدود سازد. رسانش الکتریکی اسپینل های Mn_3O_4 و MnFe_2O_4 بسیار بیشتر از رسانش الکتریکی کرومیا در دمای 750°C است [۱۷].

دیده نمی شود. شکل ۳ الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه پوشش داده شده را نشان می دهد که شامل فازهای CrMn_3 و FeMn_4 می باشد. در این الگو فازهای فریت و FeCr نیز مشاهده می شود که مربوط به زیر لایه می باشند.



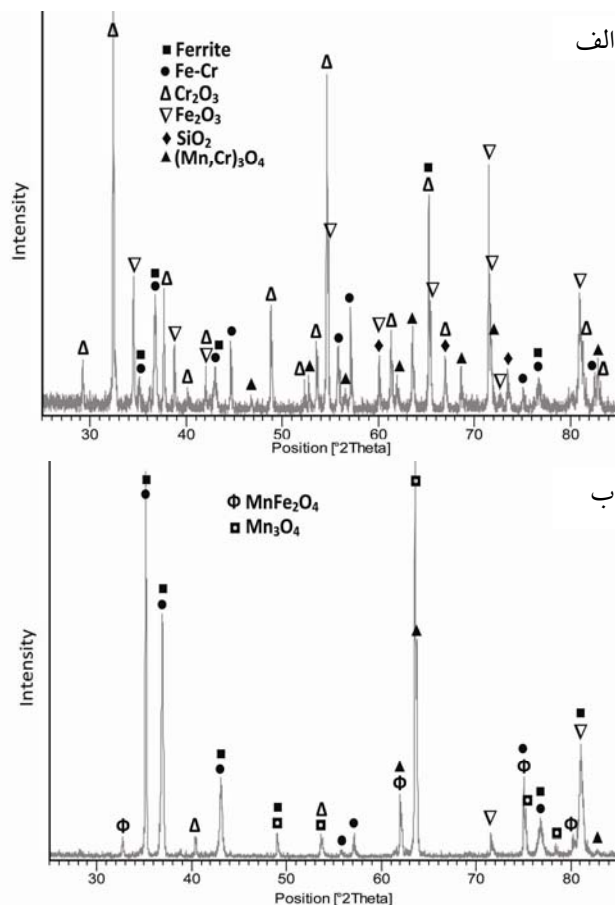
شکل (۳): الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) از نمونه پوشش داده شده با منگنز.

۳-۲- بررسی رسانش الکتریکی در اکسایش همدم

مقادیر رسانش الکتریکی برای نمونه های پوشش داده شده و نمونه های بدون پوشش به عنوان تابعی از زمان اکسایش در دمای ثابت 750°C در شکل ۴ نشان داده شده است. این مقادیر برای نمونه های پوشش دار در تمامی زمان ها بیشتر از نمونه های بدون پوشش است. مقدار رسانش الکتریکی برای نمونه های پوشش داده شده بعد از ۶۰۰ ساعت حدود $62/72 \text{ S.cm}^{-1}$ و برای نمونه های بدون پوشش حدود $26/43 \text{ S.cm}^{-1}$ بود.

شکل ۵ الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) دو نمونه ی بدون پوشش و پوشش دار را که به مدت ۶۰۰ ساعت تحت اکسایش بودند نشان می دهد. در نمونه ی بدون پوشش فازهای SiO_2 ، Cr_2O_3 ، Fe_2O_3 ، و اسپینل $(\text{Mn,Cr})_3\text{O}_4$ مشاهده می شود. فازهای فریت و FeCr مربوط به زیر لایه هستند. وجود اسپینل های $(\text{Mn,Cr})_3\text{O}_4$ بر روی زیر لایه بدون پوشش مربوط به فولادهای زنگ نزن فریتی است که مقدار کمی منگنز دارند. وقتی که آلیاژ در معرض دماهای 850°C - 650°C قرار می گیرد لایه اسپینل که غیر محافظ است بر روی سطح تشکیل می شود [۱۵-۱۶].

یون ها توسط ترکیبات اسپینل موجود در لایه ی پوشش منگنز کاهش یافته است (شکل ۶ ب). در نمونه ی بدون پوشش، لایه ی اکسید کروم چسبندگی خوبی بر روی زیر لایه ندارد. این مسئله می تواند در اثر عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی کرومیا ($9/6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) و سیلیکا ($0/55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) و همچنین تشکیل شبکه ی سیلیکا در فصل مشترک پوسته و زیر لایه باشد [۱۸ - ۱۹]. در این نمونه تخلخل ها و حفره های زیادی در لایه ی اکسید، و ما بین لایه ی اکسید و زیر لایه دیده می شود. این حفرات در اثر نفوذ به بیرون کاتیون های کروم، سیلیسیم و منگنز از مرزخانه ها در طی اکسایش ایجاد می شوند. کاهش رسانش الکتریکی نمونه های بدون پوشش نسبت به نمونه های پوشش دار (شکل ۴) به عوامل گوناگونی بستگی دارد. مهمترین عامل تشکیل لایه ی اکسیدی کرومیا و ضخامت بیشتر آن در نمونه های بدون پوشش نسبت به نمونه های پوشش دار است. با توجه به اینکه رسانش الکتریکی اسپینل $(\text{Mn,Cr})_3\text{O}_4$ و کرومیا کمتر از زیر لایه فلزی است [۲۰ - ۲۱]، با افزایش ضخامت این لایه ها در نمونه بدون پوشش رسانش الکتریکی نیز کاهش می یابد. عامل دیگر را می توان به تشکیل فاز سیلیکا در نمونه های بدون پوشش نسبت داد. رسانش الکتریکی سیلیکا کمتر از زیر لایه فلزی و اسپینل های منگنز (Mn_3O_4 و MnFe_2O_4) است. بنابراین تشکیل یک لایه ی عایق سیلیکا به طور موثر می تواند مقاومت الکتریکی فولادهای حاوی سیلیسیم را تحت تاثیر قرار دهد. در نمونه های بدون پوشش (شکل ۶ الف) بروز عیوبی همانند حفره و سوراخ در فصل مشترک بین فلز و پوسته اکسیدی نیز می تواند باعث کاهش رسانش الکتریکی شود. این عیوب چسبندگی پوسته اکسیدی را به زیر لایه فلزی کاهش می دهند و منجر به کاهش سطح تماس واقعی بین پوسته اکسیدی و زیر لایه ی فلزی شده و در نتیجه باعث کاهش رسانش می شوند. رسانش الکتریکی بالاتر در نمونه های پوشش داده شده با منگنز نسبت به نمونه بدون پوشش را می توان به عوامل متعددی نسبت داد. این عوامل شامل رسانش الکتریکی زیادتر ترکیبات اسپینل موجود در لایه ی پوشش (Mn_3O_4 و MnFe_2O_4) نسبت به کرومیا،



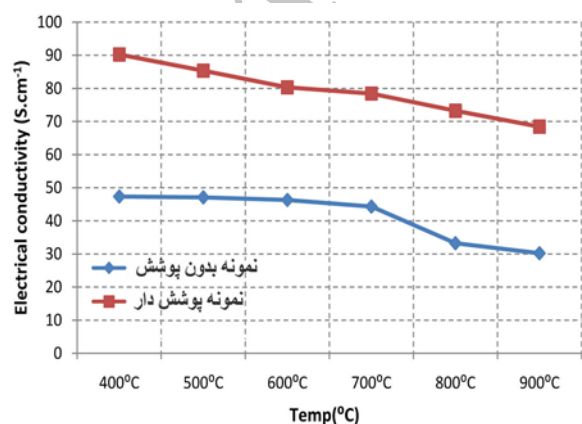
شکل (۵): الگوی الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه: (الف) بدون پوشش و (ب) پوشش داده شده بعد از ۶۰۰ ساعت اکسایش همدمما در دمای 750°C .

البته پوسته ی کرومیا در هر دو نمونه ی پوشش دار و بدون پوشش تشکیل شده است ولی مقادیر رسانش الکتریکی بیشتر در نمونه های پوشش دار نشان دهنده ی ضخامت کم این پوسته و محدود شدن رشد این پوسته است. شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح مقطع عرضی نمونه بدون پوشش (شکل ۶ الف) و نمونه پوشش داده شده را (شکل ۶ ب) بعد از ۶۰۰ ساعت اکسایش همدمما نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود لایه اکسید کروم در نمونه پوشش داده شده با منگنز نیز تشکیل شده که این مسئله در پژوهشهای دیگر پژوهشگران نیز مشاهده شده است [۶ و ۱۷]. در نمونه بدون پوشش (شکل ۶ الف) ضخامت لایه ی اکسید کرومیا تقریباً $5 \mu\text{m}$ است، در حالی که رشد این لایه به دلیل کاهش آهنگ نفوذ

بدون پوشش و پوشش دار بعد از پیش اکسایش به مدت ۲۴ ساعت در دمای 750°C اندازه گیری شد. شکل ۷ مقادیر رسانش الکتریکی را به عنوان تابعی از دما نشان می دهد. با افزایش دما، مقادیر رسانش الکتریکی کاهش پیدا می کند. این استدلال می تواند به وسیله ی معادله ی زیر اثبات شود [۲۲]. رسانش الکتریکی یک آلیاژ اکسید شده را می توان به وسیله ی معادله ی زیر بیان کرد:

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{T}{\sigma^* \exp(-E_c/kT)} = \frac{T}{\sigma^*} \exp\left(\frac{E_c}{kT}\right) \quad (1)$$

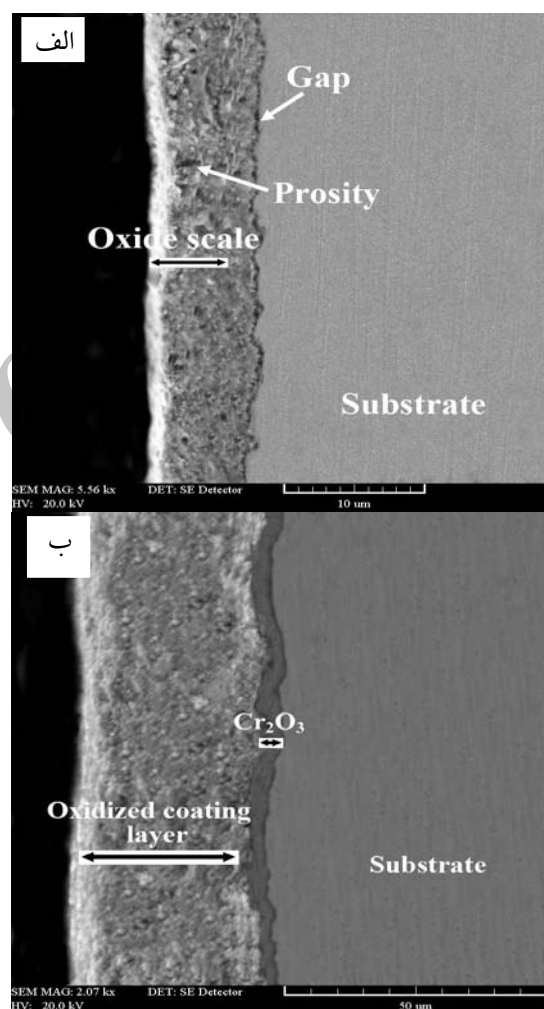
در این معادله σ : رسانش الکتریکی، σ^* : ثابت سهمی، E_c : انرژی فعال سازی برای رسانش، k : ثابت بولتزمن و T : دما است. بر اساس این معادله، افزایش دما منجر به کاهش مقادیر رسانش الکتریکی می شود. همچنین در دماهای بالاتر، ضخامت بیشتری از لایه پوشش و زیر لایه تحت تاثیر واکنش های اکسایش قرار خواهد گرفت و بنابراین ضخامت لایه اکسیدی کرومیا افزایش خواهد یافت و بر اساس معادله ی بالا، رسانش الکتریکی کاهش خواهد یافت. در تمامی دماها، رسانش الکتریکی نمونه های پوشش دار بالاتر از نمونه های بدون پوشش است. این امر به دلیل ضخامت بیشتر پوسته ی اکسیدی کرومیا در نمونه های بدون پوشش در مقایسه با نمونه های پوشش دار است.



شکل (۷): رسانش الکتریکی به عنوان تابعی از دما برای نمونه های پوشش

دار و بدون پوشش در دماهای بین $400-900^{\circ}\text{C}$.

اسپینل $(\text{Mn,Cr})_3\text{O}_4$ و سیلیکا است. عامل دیگر عدم وجود فاز سیلیکا در الگوی پراش پرتوهای ایکس نمونه های پوشش داده شده با منگنز است که منجر به چسبندگی بیشتر لایه ی پوشش بر روی زیر لایه می شود. این پدیده منجر به افزایش سطح تماس واقعی لایه ی پوشش و زیر لایه و در نتیجه افزایش رسانش الکتریکی می شود.



شکل (۶): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح مقطع عرضی نمونه (الف) بدون پوشش و (ب) پوشش داده شده بعد از ۶۰۰ ساعت اکسایش همدم در دمای 750°C .

۳-۳- بررسی رسانش الکتریکی در اکسایش غیرهمدم

به منظور بررسی اثر دما بر روی رسانش الکتریکی، رسانش الکتریکی در دماهای مختلفی ($400-900^{\circ}\text{C}$) برای نمونه های

سوختی اکسید جامد را افزایش می دهد.

۲- رسانش الکتریکی بعد از ۶۰۰ ساعت اکسایش همدمای در دمای 750°C برای نمونه های پوشش دار $62/72\text{ S cm}^{-1}$ و برای نمونه های بدون پوشش $26/43\text{ S cm}^{-1}$ بدست آمد.

۳- مقدار کمتر انرژی فعال سازی رسانش الکتریکی نمونه های پوشش دار ($0/04\text{ eV}$) نسبت به نمونه های بدون پوشش ($0/053\text{ eV}$) به علت رسانش الکتریکی بالاتر اسپینل های منگنز نسبت به اکسید های آهن و کروم است.

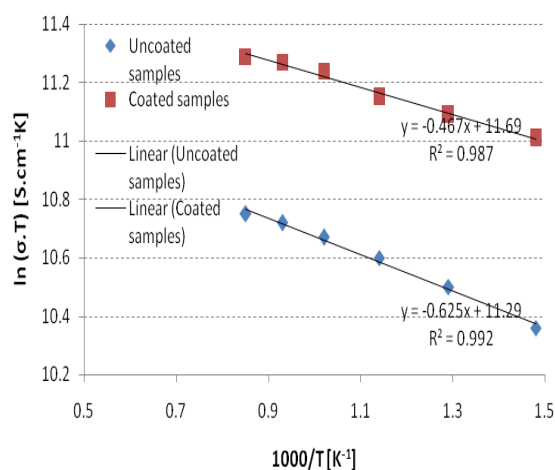
۵- تشکر و قدردانی

این پژوهش با همکاری سازمان انرژی های نوی ایران (سانا) انجام گرفته است و نویسندگان کمال تقدیر و تشکر را از این سازمان به دلیل حمایت های مالی دارند.

۶- مراجع

- [1] K. Huang, P.Y. Hou, J.B. Goodenough, "Characterization of iron-based alloy interconnects for reduced temperature solid oxide fuel cells", *Solid State Ionics*, Vol. 129, pp. 237-250, 2000.
- [2] J. W. Fergus, "Metallic interconnects for solid oxide fuel cells", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 397, pp. 271-283, 2005.
- [3] W. Z. Zhu and S.C. Deevi, "Development of interconnect materials for solid oxide fuel cells", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 348, No. 1-2, pp. 227-243, 2003.
- [4] Z. Yang, G. Xia, G. Maupin and J. Stevenson, "Conductive protection layers on oxidation resistant alloys for SOFC interconnect applications", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 201, pp. 4476-4483, 2006.
- [5] X. Chen, P.Y. Hou, C.P. Jacobson, S.J. Visko, and L.C. De Jonghe, "Protective coating on stainless steel interconnect for SOFCs: Oxidation kinetics and electrical properties", *Solid State Ionics*, Vol. 176, pp. 425-433, 2005.
- [6] Z. Yang, G. Xia, S.P. Simner and J.W. Stevenson, "Thermal growth and performance of manganese cobaltite spinel protection layers on ferritic stainless steel SOFC interconnects", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 152, pp. 1896-1901, 2005.
- [7] Z. Yang, G. Xia, S.P. Simner and J.W. Stevenson,

رسانش الکتریکی کرومیا به طور چشم گیری کمتر از نمونه های پوشش دار است [۲۱]. رسانش الکتریکی بیشتر اسپینل های منگنز نسبت به پوسته اکسیدی کرومیا و اکسید آهن را با استفاده از انرژی فعال سازی رسانش الکتریکی نیز می توان اثبات کرد. انرژی فعال سازی مقاومت الکتریکی به طور همزمان شامل آهنگ اکسایش و رسانش لایه ی اکسیدی است. E_a را می توان به صورت مستقیم از رابطه ی بین $\ln(\sigma.T)$ و $1/T$ از معادله ی ۱ به دست آورد (شکل ۸). مقدار انرژی فعال سازی رسانش الکتریکی نمونه های بدون پوشش $0/053\text{ eV}$ و نمونه های پوشش دار $0/04\text{ eV}$ به دست آمد. مقدار کمتر انرژی فعال سازی رسانش الکتریکی نمونه های پوشش دار منجر به رسانش الکتریکی بیشتر این نمونه ها نسبت به نمونه های بدون پوشش شد و این کاستی مربوط به وجود ترکیبات اسپینل منگنز بر روی نمونه های پوشش دار است.



شکل (۸): نمودار $\ln(\sigma.T)$ بر حسب $1/T$ برای نمونه های پوشش دار و بدون پوشش در دماهای بین $400-900^{\circ}\text{C}$.

۴- نتیجه گیری

۱- استفاده از ترکیبات اسپینل Mn_3O_4 و MnFe_2O_4 رسانش الکتریکی فولاد فریتی زنگ نزن مورد استفاده در پیل های

- Electrochemical Society, Vol. 150, pp. 243-248, 2003.
- [16] T. Brylewski, M. Nanko, T. Maruyama and T. Przybylski, "Application of Fe-16Cr ferritic alloy to interconnector for a solid oxide fuel cell," *Solid State Ionics*, Vol. 143, pp. 131-150, 2001.
- [17] N. Shaigan, D.G. Ivey and W. Chen, "Oxidation and electrical behavior of nickel/lanthanum chromite-coated stainless steel interconnects", *Journal of power sources*, Vol. 183, pp. 651-659, 2008.
- [18] N. Shaigan, W. Qu, D. G. Ivey and W. Chen, "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*, Vol. 195, pp. 1529-1542, 2010.
- [19] S. Fontana, R. Amendola, S. Chevalier, P. Piccardo, G. Cabocho, M. Vivani, R. Molins and M. Sennour, "Metallic interconnects for SOFC: Characterisation of corrosion resistance and conductivity evaluation at operating temperature of differently coated alloys", *Journal of Power Sources*, Vol. 17, pp. 652-662, 2007.
- [20] K. Huang, P.Y. Hou, J.B. Goodenough, "Reduced area specific resistance for iron-based metallic interconnects by surface oxide coatings", *Materials Research Bulletin*, Vol. 36, pp. 81-95, 2001.
- [21] A. Holt, P. Kofstada, "Electrical conductivity and defect structure of Cr_2O_3 . II. Reduced temperatures ($< 1000^\circ\text{C}$)", *Solid State Ionics*, Vol. 69, pp. 137-143, 1994.
- [22] W.Z. Zhu and S.C. Deevi, "Opportunity of metallic interconnects for solid oxide fuel cells: a status on contact resistance", *Materials Research Bulletin*, Vol. 38, pp. 957-972, 2003.
- " $(\text{Mn},\text{Co})_3\text{O}_4$ spinel coatings on ferritic stainless steels for SOFC interconnect applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 3648-3654, 2007.
- [8] Z. Yang, G. Xia and J.W. Stevenson, " $\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_4$ Spinel Protection Layers on Ferritic Stainless Steels for SOFC Interconnect Applications", *Electrochemical and Solid-State Letters*, Vol. 8A, pp. 168-170, 2005.
- [9] W. Wei, W. Chen and D.G. Ivey, "Anodic electrodeposition of nanocrystalline coatings in the Mn-Co-O system", *Chemistry of Materials*, Vol. 19, pp. 2816-2822, 2007.
- [10] P. Wei, X. Deng, M.R. Bateni, and A. Petric, "Oxidation and electrical conductivity behavior of spinel coatings for metallic interconnects of solid oxide fuel cells", *Corrosion*, Vol. 63, pp. 529-536, 2007.
- [11] X. Deng, P. Wei, M.R. Bateni and A. Petric., "Cobalt plating of high temperature stainless steel interconnects", *Journal of Power Sources*, Vol. 160, pp. 1225-1229, 2006.
- [12] Y. S. Chou, J.W. Stevenson, and P. Singh, "Effect of aluminizing of Cr-containing ferritic alloys on the seal strength of a novel high-temperature solid oxide fuel cell sealing glass," *Journal of Power Sources*, Vol. 185, pp. 1001-1008, 2008..
- [13] Z. D. Xiang and P.K. Datta, "Pack aluminisation of low alloy steels at temperatures below 700°C ", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 184, pp. 108-115, 2004.
- [14] A. Petric and H. Ling, "Electrical Conductivity and Thermal Expansion of Spinel at Elevated Temperatures" *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 90, pp. 1515-1520, 2007.
- [15] T. Horita, Y. Xiong, K. Yamaji, N. Sakai and N. Yokokawa, "Evaluation of Fe-Cr alloys as interconnects for reduced operation temperature SOFCs", *Journal of the*