



## بررسی خواص و مورفولوژی پوشش نانولایه طلا ایجاد شده بر روی صفحات دوقطبی در پیل سوختی به روش اسپاترینگ

محمد تقی بهرامی پور<sup>۱\*</sup>، سید محمود ربیعی<sup>۱</sup> و مجتبی جعفریان<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران  
۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی مواد، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۱/۱۱/۰۲، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۱/۱۲/۰۲، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۱/۱۲/۲۸

### چکیده

در این پژوهش، بررسی خواص و مورفولوژی پوشش نانولایه طلا ایجاد شده بر روی صفحات دوقطبی در پیل سوختی با استفاده از روش اسپاترینگ انجام شد. بررسی مورفولوژی و ریزساختار سطحی نمونه‌ها به ترتیب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) صورت گرفت. همچنین به منظور ارزیابی میزان هدایت الکتریکی نمونه‌های پوشش داده شده، مقاومت الکتریکی آنها اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی حاکی از تشکیل نانولایه طلا با مورفولوژی مناسب و هموار بر روی سطح می‌باشد. همچنین با استناد به نتایج تست مقاومت الکتریکی، مقاومت نمونه‌های پوشش داده شده با لایه‌ای به ضخامت ۲۰ nm از طلا در حدود نصف مقاومت نمونه بدون پوشش بوده و این مساله نشان دهنده افزایش چشمگیری در هدایت الکتریکی نمونه‌های پوشش داده شده می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** نانولایه طلا، پوشش دهی، هدایت الکتریکی، اسپاترینگ، مورفولوژی.

### ۱- مقدمه

پیل‌های سوختی نسبت به سایر روش‌های تولید الکتریسته کاربردهای فراوانی را برای آنها بوجود آورده است. در شکل ۱ نمونه‌ای از پیل‌های سوختی پلیمری آورده شده است. استفاده از پیل‌های سوختی در زیر دریایی‌ها، سفینه‌های فضایی، کشتی‌ها، هواپیماها، اتوبوس‌ها و انواع خودروهای سواری گسترش یافته است. همچنین پیل‌های سوختی می‌توانند منبع تامین نیروی برق برای مناطق حساسی نظیر بانک‌ها، مراکز معاملات سهام، بیمارستان‌ها و مراکز رایانه‌ای باشند [۱۱-۱۵].

پیل سوختی خود منبع انرژی نیست ولی به کمک آن انرژی شیمیایی به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل

پیل‌های سوختی به علت عدم ایجاد آلودگی، جایگزین‌های خوبی برای سوخت‌های فسیلی، جهت تولید الکتریسته محسوب می‌شوند [۵-۱].

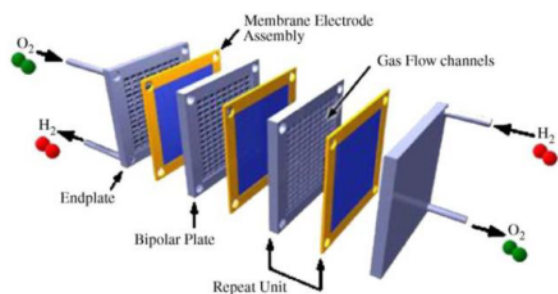
در بین انواع پیل‌های سوختی، پیل‌های سوختی پلیمری (Proton Exchange Membrane Fuel Cell: PEMFC) با داشتن ویژگی‌هایی از قبیل بازدهی بالا، درجه حرارت کاری پایین، راه‌اندازی سریع و سازه محکم جایگاه خاصی پیدا نموده‌اند. از این پیل‌ها می‌توان در کاربردهای همراه با حرکت و یا ثابت استفاده نمود [۶-۱۱]. ویژگی‌های

\* عهده‌دار مکاتبات: محمدتقی بهرامی پور

نشانی: بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، گروه مهندسی مواد، دانشکده مکانیک

تلفن: ۰۳۴۲-۳۲۲۰۱۱۱، دورنگار: ۰۳۴۲-۳۲۲۰۱۱۱، پست الکترونیکی: mtb1391@yahoo.com

و ۳۰٪ هزینه یک استک را تشکیل می‌دهند [۲۴]. به همین دلیل وزن، حجم و هزینه یک استک پیل سوختی با انتخاب مناسب جنس و شکل کانال‌های عبور جریان به صورت چشمگیری بهبود خواهد یافت [۲۷-۲۵].



شکل ۲: اجزای اصلی یک استک پیل سوختی [۲۸].

صفحات دو قطبی سه وظیفه دیگر نیز بر عهده دارند [۲۹-۳۵]:

- ۱- انتقال حرارت از سطح پیل
- ۲- جلوگیری از نشت گاز و یا سیال خنک‌کننده به بیرون از سل
- ۳- جداسازی سل‌های مختلف از یکدیگر در استک مواد مورد استفاده در ساخت صفحات BP، به سه دسته تقسیم می‌شوند.

۱- مواد غیر فلزی: انواع گرافیت غیر متخلخل (EK400، EK20 و غیره)

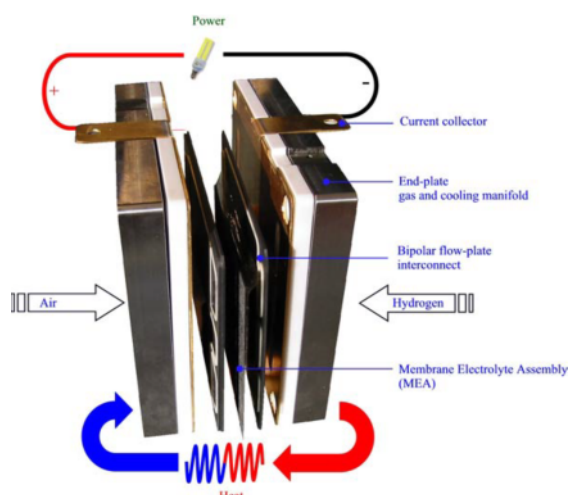
۲- مواد فلزی: با پوشش و بدون پوشش

۳- کامپوزیت‌ها: پلیمر-کربن، پلیمر-فلز

از مزایای استفاده از مواد فلزی در ساخت صفحات BP می‌توان به استحکام مکانیکی بالا، رسانایی الکتریکی و حرارتی خوب و سهولت در ایجاد شیارهای جریان سیال به روش استامپینگ اشاره نمود [۴۰-۳۵]. ولی به دلیل آنکه دمای محیط داخل پیل‌های سوختی حدود  $80^{\circ}\text{C}$  و pH آن بین ۲ الی ۳ می‌باشد، خوردگی صفحات فلزی در پیل سوختی بسیار بالا بوده که این مساله باعث مسمومیت غشاء MEA و کاهش رسانایی یونی آن خواهد شد. بعلاوه تشکیل یک لایه ناشی از خوردگی روی سطح صفحه BP فلزی باعث بالا رفتن مقاومت الکتریکی شده و در نتیجه جریان خروجی کاهش می‌یابد. هر چند در تحقیقات آزمایشگاهی برای ساخت صفحات BP، استفاده از فولاد

می‌گردد. یک تک واحد (Monocell) پیل سوختی پلیمری، از اجزای زیر تشکیل شده است [۱۶]:

- ۱- صفحات دو قطبی (Bipolar Plate: BP)
- ۲- صفحات انتهایی (End Plate)
- ۳- صفحات جمع‌کننده جریان (Collector Plate)
- ۴- مجموعه غشای الکترولیتیکی یا MEA (Membrane Electrode Assembly)



شکل ۱: پیل سوختی پلیمری [۱۶].

غشای الکترولیتیکی شامل پلیمری از جنس نفیون (Nafion) است که مواد کاتالیستی آندی و کاتدی در دو طرف آن قرار گرفته‌اند. به چند تک واحد پیل سوختی که در کنار یکدیگر بین دو صفحه انتهایی قرار گرفته و پیل واحد را تشکیل می‌دهند توده پیل (Stack) گفته می‌شود. شکل ۲ نشان دهنده اجزای اصلی یک استک پیل سوختی می‌باشد.

در پیل‌های سوختی پلیمری بر اثر واکنش بین سوخت (هیدروژن) و گاز اکسیدان (اکسیژن)، جریان الکتریسیته، آب و گرما تولید می‌گردد [۲۳-۱۶].

صفحات دو قطبی (BP) از اصلی‌ترین اجزای یک پیل سوختی محسوب می‌گردد.

وظایف اصلی آن رساندن سوخت و اکسیژن به سطح موثر پیل (سطح عبور یون‌های پروتون  $\text{H}^+$ )، خارج ساختن موادی که در اثر واکنش ایجاد می‌شود، جمع‌آوری و انتقال جریان برق به کانکتورها و نگهداری سل‌ها در داخل استک می‌باشد. صفحات دو قطبی مجموعاً بیش از ۶۰٪ وزن پیل

اتم‌های خارج شده به سمت زیرلایه حرکت کرده و بر روی آن کندانس شده تشکیل پوشش می‌دهند. روش پوشش‌دهی یونی، در واقع روشی اصلاح شده یا توسعه یافته دو روش قبلی می‌باشد و به عنوان یک فرآیند مجزا و مستقل تعریف نمی‌شود [۶۱-۵۰].

اگر در ضمن فرآیندهای تبخیری در خلا و یا رسوب پراکنشی، پتانسیل منفی زیادی بر روی زیرلایه اعمال گردد، به نحوی که توسط یون‌های مثبت موجود در پلاسما بمباران شود فرآیند به پوشش‌دهی یونی مرسوم می‌شود. در میان این روش‌ها لایه‌نشانی در خلا به روش اسپاترینگ یکی از پرکاربردترین روش‌های لایه‌نشانی فیزیکی می‌باشد که در سیستم‌های خلا انجام می‌گیرد. با این روش می‌توان مواد رسانا و نارسانا را روی سطوح مختلف پوشش داد [۵۸-۵۵].

از معایب روش پوشش‌دهی یونی می‌توان به اتصال نمونه به الکتروود با ولتاژ بالا، نیاز به کار کردن در یک فشار گازی بالا، مشکل بودن پوشش‌دهی موضعی و عدم پوشش‌دهی سطوح داخلی اشاره کرد. همچنین در روش پراکنشی امکان تولید پوشش‌های آلیاژی وجود داشته و چسبندگی بهتر و آلودگی کمتر نسبت به روش‌های تبخیری حاصل خواهد شد. به همین دلیل در این پژوهش از روش پراکنشی جهت اعمال پوشش استفاده شد [۶۱-۵۹].

در این پژوهش نانولایه طلا به روش اسپاترینگ بر روی صفحات دوقطبی در پیل سوختی پوشش داده شد و خواص الکتریکی و مورفولوژی سطح مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

### ۲-۱- مواد اولیه

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش، فولاد زنگ‌نزن 316L بواسطه مقاومت به خوردگی بالا و قیمت پایین آن انتخاب شد. آنالیز شیمیایی فلز پایه در جدول ۱ آورده شده است. صفحات فولاد زنگ‌نزن 316L با ضخامت ۰/۱ mm پس از آماده‌سازی در ابعاد ۲×۲ cm تهیه شدند. همچنین طلا مورد استفاده طلا ۱۸ عیار بوده که حاوی ۷۵ درصد فلز طلا و ۲۵ درصد فلز مس بود.

ضدزنگ با ترکیب‌های خاص، نظیر فولاد آستنیک (Austenitic 349) و فریتیک (Ferritic AISI 446) بدون هرگونه پوشش نتیجه مطلوبی داده است ولی با توجه به آنکه مشکل خوردگی فلز به طور کامل رفع نشده است، توصیه می‌شود که برای ساخت صفحات BP از پوشش‌های مناسب مقاوم در برابر خوردگی و اکسیداسیون استفاده گردد [۴۳-۴۰].

در ساخت صفحات BP با پوشش، می‌توان از طلا، آلومینیوم، فولاد ضدزنگ، تیتانیوم و نیکل استفاده نمود. وایند (Wind) [۱۳]، صفحات BP از جنس فولاد ضدزنگ 316L با پوشش طلا و لی (Lee) [۱۴] نیز صفحات BP از همان جنس که توسط روش الکتروشیمیایی سطح آن را عملیات داده و سپس با یک جنس مناسب پوشانده شده بود را مورد آزمایش قرار دادند و نشان دادند که عملکرد آنها با حالتی که از صفحات گرافیتی استفاده شده قابل مقایسه است. برای ساخت صفحات BP از جنس فلز بهترین انتخاب فولاد ضدزنگ 316L می‌باشد که با روش‌های ماشینکاری، اچینک (Etching) و پرسکاری (Embossing)، شیارهای مربوط به عبور گاز و سیال خنک کننده روی سطح آن ایجاد می‌گردد [۵۱-۴۷]. سپس برای پوشش سطح فلز از روش‌های پوشش‌دهی یونی (Ion Plating)، تبخیر حرارتی (Thermal Evaporation) و پراکنشی (Sputtering) استفاده می‌گردد [۵۸-۵۲]. روش تبخیر در خلا از یک منبع بخار و یک زیرلایه در یک محفظه خلا استفاده می‌شود. در این روش ابتدا ماده پوشش به بخار تبدیل می‌شود، سپس انتقال بخار روی سطح قطعه صورت گرفته و در نهایت جوانه‌زنی و رشد پوشش بر روی قطعه صورت می‌گیرد. در روش پراکنشی ماده مورد نظر جهت لایه‌نشانی یا همان هدف در مقابل زیرلایه و در فشار اولیه  $10^{-6}$  تا  $10^{-10}$  torr قرار می‌گیرد. معمول‌ترین شیوه تامین یون، عبور مداوم گازی همچون آرگون است که فشار را به ۱ تا ۱۰۰ torr افزایش داده و قوس درخشان یا همان پلاسما را تشکیل می‌دهد. اختلاف پتانسیل منفی بین ۰/۵ تا ۵ kV به هدف اعمال می‌شود [۶۱-۵۹]. یون‌های آرگون تولید شده با انرژی زیاد جذب نمونه پوشش یا هدف شده و بنابراین توسط یک فرآیند انتقال گشتاور، اتم‌های نمونه پوشش از آن جدا می‌شوند.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی فولاد زنگ‌نزن 316L (درصد وزنی).

فلزات	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Fe
درصد وزنی	۰/۰۲۱	۱/۸۲	۰/۰۲۹	۰/۰۱	۰/۵۸	۱۶/۳۲	۱۰/۵۴	۲/۱۲	۰/۴۷	۰/۰۳	۶۸/۰۶



شکل ۳: تصاویری از نمونه‌های صفحات دوقطبی در پیل سوختی بدون پوشش.



شکل ۴: نمونه پوشش داده شده با نانولایه طلا به روش اسپاترینگ.

### ۳-۱- بررسی ریزساختار توسط AFM

شکل ۵ تصاویر مربوط به نمونه‌های صفحات دوقطبی قبل از اعمال پوشش می‌باشد. توپوگرافی سطحی AFM مربوط به نمونه ۵a در مقیاس  $5 \times 5 \mu\text{m}$  و نمونه‌های ۵b و ۵c در مقیاس  $10 \times 10 \mu\text{m}$  نشان داده شده است. دستگاه AFM مورد استفاده جهت انجام آنالیز از نوع شبه تماسی بوده، چرا که با توجه به ماهیت این روش نیروهای عرضی، که بیشترین آسیب را به نمونه‌ها در مد تماسی وارد می‌کند، وجود ندارد و دقت اندازه‌گیری مدهای شبه تماسی با دقیق‌ترین روش‌های تماسی برابری می‌کند. همچنین بر خلاف روش غیرتماسی که سیگنال نیرو بدلیل دوری از سطح کوچک است و منجر به کاهش دقت اندازه‌گیری می‌شود سیگنال نیرو در روش شبه تماسی

### ۲-۲- پوشش دهی طلا

نمونه‌های فولادی صفحات دوقطبی قبل از پوشش توسط استون و اتانول تمیزکاری شده و در دستگاه اسپاترینگ مدل KYKY, SCB-12 قرار داده شدند. دستگاه مجهز به ضخامت‌سنج کریستالی از جنس کوارتز، کاتد ۲ اینچی، پمپ خلا یک مرحله‌ای بود.

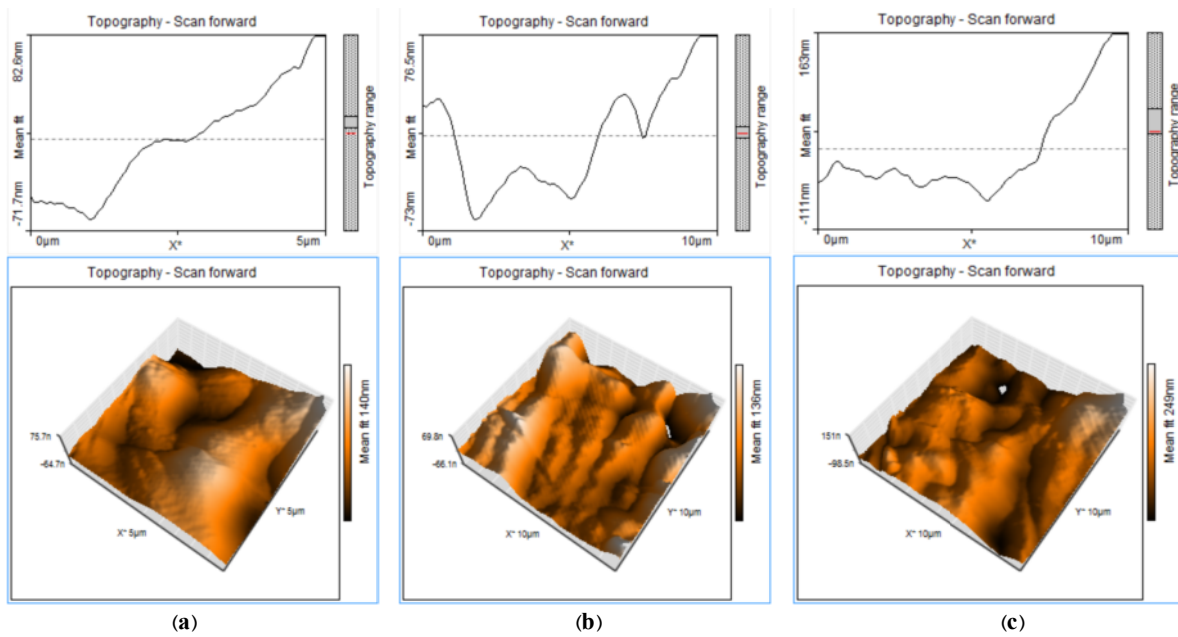
سپس نمونه‌ها با وارد نمودن گاز آرگون تحت ولتاژ ۴ kV و جریان ۲۰ mA به مدت زمان ۲۴۰ ثانیه در خلا به میزان  $2 \times 10^{-6}$  torr تحت عملیات پوشش قرار گرفتند. لایه‌ای از طلا به ضخامت ۲۰ nm بر روی نمونه‌ها پوشش داده شد. با توجه به اینکه دستگاه دارای ضخامت‌سنج کریستالی (کریستال کوارتز) بوده، در نتیجه پس از رسیدن ضخامت پوشش به مقدار مورد نظر، دستگاه به طور خودکار عملیات پوشش‌دهی را به پایان رساند.

### ۲-۳- بررسی‌های خواص سطحی پوشش طلا

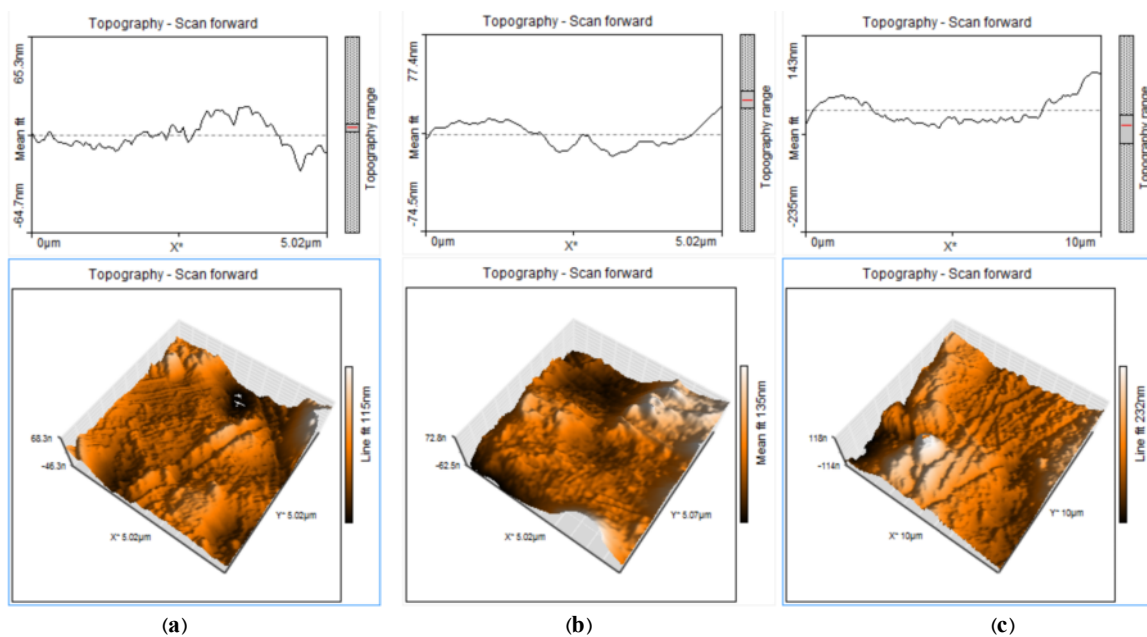
به منظور مشاهده و ارزیابی تغییرات ایجاد شده در مورفولوژی و ریزساختار سطح، نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips 30XL و میکروسکوپ نیروی اتمی مدل Easyscan2 Flex AFM مورد ارزیابی قرار گرفت. زبری سطح با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و به کمک نرم افزار Nanosurf easyScan 2 مورد بررسی قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی از دستگاه مقاومت‌سنج Keithley 2602I استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۳ تصویری از نمونه پیل سوختی از جنس فولاد زنگ‌نزن 316L قبل از عملیات پوشش‌دهی و شکل ۴ تصویری از نمونه پوشش داده شده از طلا به روش اسپاترینگ با ضخامت ۲۰ nm می‌باشد.



شکل ۵: توپوگرافی سطحی نمونه صفحات دوقطبی پیل سوختی قبل از اعمال پوشش طلا، (a) مقیاس  $5 \times 5 \mu\text{m}$ ، (b) مقیاس  $10 \times 10 \mu\text{m}$  و (c) مقیاس  $10 \times 10 \mu\text{m}$ .



شکل ۶: توپوگرافی سطحی نمونه صفحات دوقطبی پیل سوختی بعد از عملیات اسپاترینگ، (a) مقیاس  $5.02 \times 5.02 \mu\text{m}$ ، (b) مقیاس  $5.02 \times 5.02 \mu\text{m}$  و (c) مقیاس  $10 \times 10 \mu\text{m}$ .

متناوب به تیرگی که یک لایه فرومغناطیس در پشت آن لایه‌نشانی شده است، نویز بسیار کمتر می‌شود و در نتیجه سیگنال به نویز افزایش می‌یابد. در نتیجه با دامنه‌هایی کوچکتر از قبل می‌توان سیگنال قابل قبولی بدست آورد. استفاده از دامنه‌های کمتر به معنی کاهش نیروی عمودی

مناسب است. همچنین به دلیل مدت زمان بسیار کمتری که سوزن در تماس مؤثر با سطح است (به سطح نیروی دافعه وارد می‌کند) فشار مؤثر سوزن در این روش از مدهای تماسی کمتر است. همچنین با استفاده از القاگرهای غیرمکانیکی، مانند اعمال میدان مغناطیسی

تصویر  $Ve$  حفره‌ای بر روی نمونه اولیه دیده می‌شود. در این فرآیند اتم‌های تولید شده از منبع به سمت زیرلایه حرکت می‌کنند. انتقال آنها به سطح زیرلایه، به فشار درونی محفظه رسوب‌دهی بستگی دارد. میانگین پوشش آزاد به معنی میانگین فاصله‌ای است که اتم‌ها و یا مولکول‌ها قبل از برخورد به اتم یا مولکول گازی دیگر، طی می‌کنند. این فاصله با سطح مقطع برخورد اتمی و غلظت مولکول‌های گاز رابطه عکس دارد. بنابراین میانگین پوشش آزاد با فشار رابطه عکس دارد. اگر فاصله بین منبع و زیرلایه  $L$  باشد، مقدار عدد کونادسن ( $l/L=K_n$ ) نحوه انجام واکنش‌ها را در حین فرآیند نشان می‌دهد [۱۸-۱۳]:

۱- اگر  $K_n > 0.1$  باشد، فرآیند رسوب به آرامی انجام می‌شود.

۲- اگر  $0.1 < K_n < 1$  باشد، سرعت رسوب مطلوب بوده و فرآیند رسوب به راحتی انجام می‌شود.

۳- اگر  $K_n < 1$  باشد، اتم‌ها و مولکول‌های گازی، به سرعت با یکدیگر و با دیواره‌های محفظه برخورد کرده و قبل از رسوب روی زیرلایه مورد نظر، روی دیواره‌های محفظه می‌نشینند.

در دستگاه مورد استفاده جهت انجام عملیات پوشش‌دهی فاصله منبع تا زیرلایه حدوداً برابر با  $5\text{ cm}$  بوده و بنابراین مقدار عدد کونادسن برابر با  $0.2$  محاسبه می‌شود، بنابراین در این شرایط سرعت رسوب مطلوب بوده و فرآیند رسوب به راحتی انجام می‌شود.

همانطور که در تصاویر  $Yd$  و  $Yf$  مشاهده می‌شود، مورفولوژی به واسطه تشکیل رسوبی از نانولایه طلا بر روی نمونه مورد نظر بهبود یافته و سطحی هموار تشکیل شده است بگونه‌ای که حتی حفرات و تمامی پستی و بلندی‌های موجود تا حدودی برطرف شده و سطحی هموار تشکیل شده است.

### ۳-۳- بررسی هدایت الکتریکی

به منظور بررسی تاثیر نانولایه طلا پوشش داده شده بر روی صفحات دوقطبی مقاومت نمونه‌های بدون پوشش اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه گردید. شکل ۹ نشان دهنده نمودار ولت-آمپر در بازه  $50\text{ mA}$  تا  $50\text{ mA}$  و منحنی مقاومت بدست آمده با توجه به مقادیر ولتاژ و آمپر

سوزن به سطح است. بر این اساس امکان مطالعه سطوح نرم و حساس با دقت‌های بالا میسر می‌شود در حالیکه این مساله در مدهای تماسی ممکن نیست. همانطور که ملاحظه می‌شود سطح نمونه‌ها از زبری بالایی برخوردار می‌باشد. مقادیر میانگین زبری نمونه‌های خام، محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: میانگین زبری سطح نمونه‌های خام بدون پوشش.

۱۶/۵۸۱ nm	۵a
۱۹/۹۶۴ nm	۵b
۲۳/۴۹۵ nm	۵c

شکل ۶ مربوط به تصاویر نمونه‌های پوشش داده شده می‌باشد. میانگین زبری نمونه‌ها پس از اعمال پوشش محاسبه و در جدول ۳ آورده شده است.

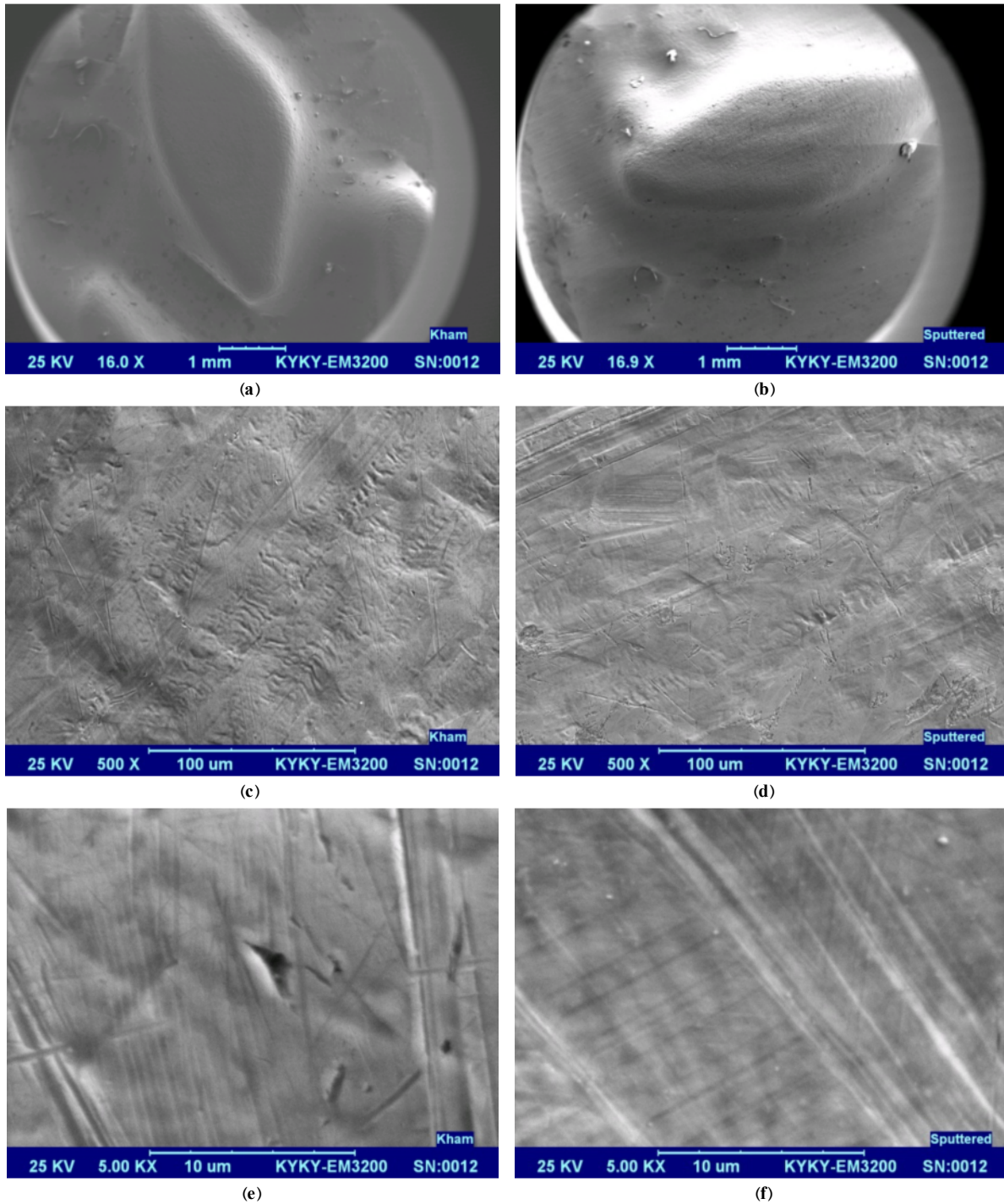
جدول ۳: میانگین زبری سطح نمونه‌ها پس از اعمال پوشش.

۱۳/۰۷۷ nm	۶a
۱۲/۰۲۹ nm	۶b
۱۴/۴۹۹ nm	۶c

در شکل ۶، توپوگرافی سطحی AFM مربوط به نمونه‌های  $6a$  و  $6b$  در مقیاس  $5/0.2 \times 5/0.2 \mu\text{m}$  و نمونه  $6c$  در مقیاس  $10 \times 10 \mu\text{m}$  نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر میانگین زبری‌های نمونه‌ها ملاحظه می‌شود که پس از اعمال پوشش زبری تا حدودی کاهش پیدا کرده فیلم نسبتاً یکنواختی ایجاد شده است.

### ۳-۲- بررسی مورفولوژی پوشش توسط SEM

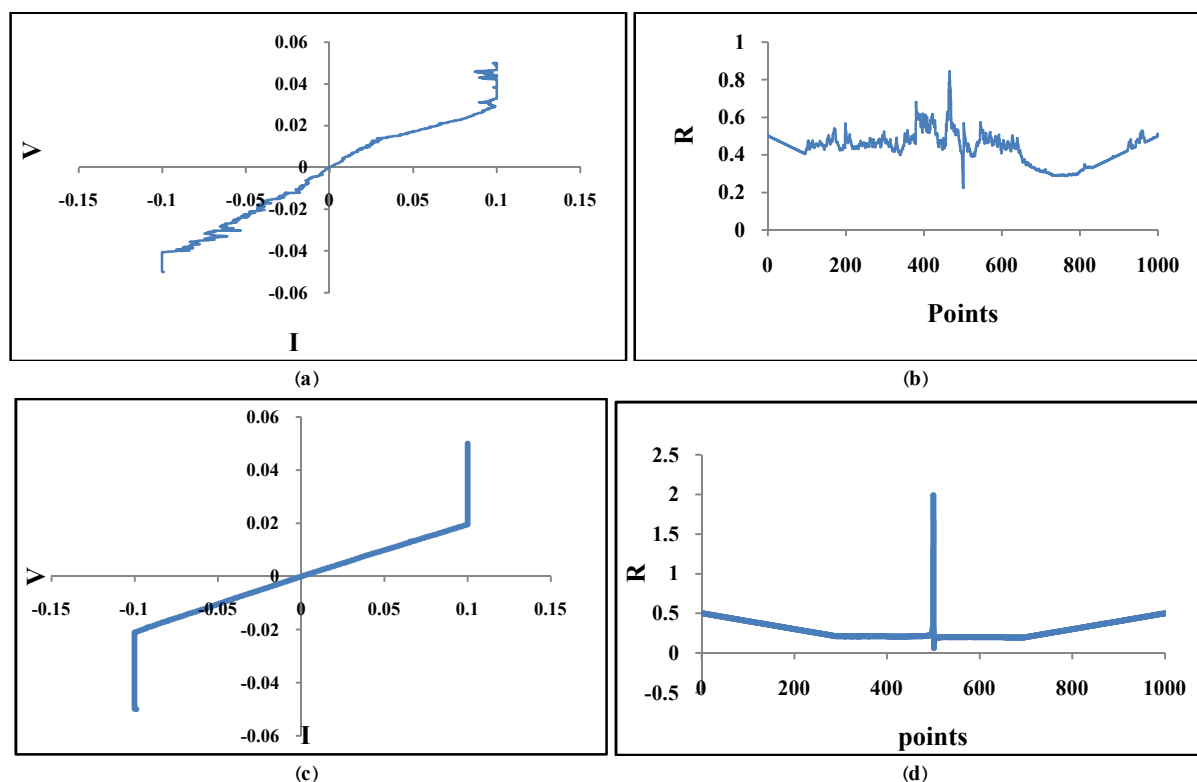
شکل ۷ مربوط به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از صفحات دوقطبی قبل و بعد از اعمال پوشش می‌باشد. تصاویر از قسمت‌های مختلف نمونه و در بزرگنمایی‌های مختلف تهیه شده است. تصاویر  $7a$  و  $7b$  در بزرگنمایی  $16$ ، تصاویر  $7c$  و  $7d$  در بزرگنمایی  $500$  و تصاویر  $7e$  و  $7f$  در بزرگنمایی  $5000$  تهیه شده‌اند. مورفولوژی سطحی نمونه‌ها قبل از اعمال پوشش همانطور که در تصاویر  $7c$  و  $7e$  ملاحظه می‌شود بسیار غیریکنواخت و دارای پستی و بلندی‌های فراوانی در نقاط مختلف می‌باشد حتی در



شکل ۷: تصاویر SEM از صفحات دوقطبی، (a) بزرگنمایی ۱۶ بدون پوشش، (b) بزرگنمایی ۱۶ با پوشش، (c) بزرگنمایی ۵۰۰ بدون پوشش، (d) بزرگنمایی ۵۰۰ با پوشش، (e) بزرگنمایی ۵۰۰۰ بدون پوشش و (f) بزرگنمایی ۵۰۰۰ با پوشش

حاصل نشده و منحنی در برخی نقاط با افزایش ناگهانی و کاهش مقدار مقاومت همراه است. با توجه به نمودار شکل ۹c منحنی ولت-آمپر پس از اعمال پوشش نشان دهنده افزایش ولتاژ به همراه افزایش جریان به صورت نسبتاً

و طبق فرمول  $R=V/I$  می‌باشد. با توجه به فاقد پوشش بودن نمونه، لذا همانگونه که در تصویر ۹a ملاحظه می‌شود نمونه مقاومت مشخص و ثابتی نداشته و به همین دلیل خطوط صاف و یکنواختی پس از انجام آزمایش



شکل ۸: (a) منحنی ولت-آمپر نمونه بدون پوشش، (b) منحنی مقاومت نمونه بدون پوشش، (c) منحنی ولت-آمپر نمونه بعد از اعمال پوشش نانولایه طلا و (d) منحنی مقاومت نمونه بعد از اعمال پوشش نانولایه طلا.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانولایه طلا به روش اسپاترینگ بر روی صفحات دوقطبی فولاد زنگ‌نزن 316L در پیل سوختی پوشش داده شد و به بررسی مورفولوژی پوشش حاصله و خواص مربوط به هدایت الکتریکی آن پرداخته شد. طبق نتایج بدست آمده زبری سطح نمونه‌ها بعد از اعمال پوشش کاهش یافته است. همچنین نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده سطحی هموار و پوشش‌دهی مناسب بر روی صفحات دوقطبی می‌باشد. از اهداف اعمال پوشش نانولایه طلا بر روی صفحات دوقطبی کاهش هرچه بیشتر مقاومت الکتریکی بوده که این امر توسط اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه بعد از پوشش‌دهی نشان دهنده نتیجه مثبت اعمال پوشش نانولایه طلا بر روی صفحات دوقطبی در پیل سوختی بوده است. از پیل‌های سوختی پوشش داده شده با نانولایه طلا می‌توان در کشتی‌های تجاری و نظامی در مواردی همچون تامین برق اضطراری، تولید انرژی الکتریکی، خصوصاً در

خطی می‌باشد که طبق فرمول و پس از محاسبه مقدار مقاومت نمودار شکل ۹d حاصل می‌شود که کاهش مقاومت و سپس یکنواختی و در نهایت افزایش جزیی مقاومت مشاهده می‌شود.

در میانه نمودار افزایش ناگهانی در مقاومت مشاهده می‌شود که با توجه به یکنواختی مقاومت در آن قسمت می‌توان این حالت را به خطای دستگاهی نسبت داده و از آن در محاسبه میانگین مقاومت چشم‌پوشی نمود. طبق محاسبات میانگین مقادیر مقاومت‌های محاسبه شده در ۱۰۰۰ نقطه از نمونه، مقاومت نمونه پوشش داده شده به روش اسپاترینگ  $0.43564 \text{ m}\Omega$  و مقاومت نمونه پوشش داده شده به روش اسپاترینگ  $0.29356 \text{ m}\Omega$  می‌باشد که با توجه به محاسبات کاهش چشمگیری در مقاومت رخ داده است و در نتیجه پس از اعمال پوشش نانولایه طلا افزایش هدایت الکتریکی بواسطه آلیاژی بودن طلای مورد استفاده که با توجه به اینکه نه تنها طلا بلکه مس موجود در آن نیز هادی جریان الکتریسیته می‌باشند این مساله رخ داده است.



303, 2004, 68.  
 [23] Z. Zhan, S.A. Barnett, *Science*, **308**, 2005, 844.  
 [24] D.P. Davies, P.L. Adcock, M. Turpin, S.J. Rowen, *Journal of Applied Electrochemistry*, **30**, 2000, 101.  
 [25] A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, *International Journal of Hydrogen Energy*, **30**, 2005, 1297.  
 [26] D. Kumar, R.C. Sharma, *European Polymer Journal*, **34**, 1998, 1053.  
 [27] H. Wang, J.A. Turner, *J. Power Sources*, **128**, 2004, 193.  
 [28] R.G. Rajendran, *MRS Bull.*, **30**, 2005, 587.  
 [29] O. Savadogo, *J. New Mater. Electrochem. Syst.*, **1**, 1998, 47.  
 [30] F. Mighri, M.A. Huneault, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 2004, 1755.  
 [31] R.C. Talar, S. Rabii, *Phys. Rev. B*, **25**, 1982, 4126.  
 [32] T. Zhang, X.H. Wang, Z.M. Zhang, *New Chem. Mater.*, **2**, 1996, 13.  
 [33] A.A. Kulikovskiy, *J. Power Sources*, **160**, 2006, 431.  
 [34] S.T. Hong, K.S. Weil, *J. Power Sources*, **168**, 2007, 408.  
 [35] E.N. Balko, R.J. Lawrance, US Patent 4, 339, 322 (1982).  
 [36] R.H. Blunk, C.L. Tucker, Y. Yoo, D.J. Lisi, US patent 6, 607, 857 (2003).  
 [37] S. Kitta, H. Uchida, M. Watanabe, *Electrochim. Acta*, **3**, 2007, 2025.  
 [38] A. Faghri, Z. Guo, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **48**, 2005, 3891.  
 [39] J. Huang, D.G. Baird, J.E. McGrath, *J. Power Sources*, **150**, 2005, 110.  
 [40] R.A. Mercuri, US Patent 6, 923, 631, B2 (2005).  
 [41] L. Du, S.C. Jana, *J. Power Sources*, **172**, 2007, 734.  
 [42] W.P. Wang, C.Y. Pan, J.S. Wu, *J. Phys. Chem. Solids*, **66**, 2005, 1695.  
 [43] V.V. Nikam, R.G. Reddy, *J. Power Sources*, **152**, 2005, 146.  
 [44] S. Jin, E. Ghali, A.T. Morales, *J. Power Sources*, **162**, 2006, 294.  
 [45] Y. Fu, M. Hou, G. Lin, J. Hou, Z. Shao, B. Yi, *J. Power Sources*, **5**, 2008, 282.  
 [46] R. Dweiri, J. Sahari, *J. Power Sources*, **171**, 2007, 424.  
 [47] B.D. Cunningham, D.G. Baird, *J. Power Sources*, **168**, 2007, 418.  
 [48] B.K. Kakati, D. Deka, *Electrochim. Acta*, **52**, 2007, 7330.  
 [49] L.N. Song, M. Xiao, Y.Z. Meng, *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 2006, 2156.  
 [50] S.H. Munson-McGee, *Phys. Rev. B*, **43**, 1991, 3331.  
 [51] Y. Liu, L. Gao, *Carbon*, **43**, 2005, 47.  
 [52] S.H. Lee, E. Cho, S.H. Jeon, J.R. Youn, *Carbon*, **45**, 2007, 2810.  
 [53] W. Bauhofer, J.Z. Kovacs, *Compos. Sci. Technol.*, **69**, 2009, 1486.  
 [54] J.B. Bai, A. Allaoui, *Composites A*, **34**, 2003, 689.  
 [55] J. Li, J.K. Kim, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 2007, 2114.  
 [56] S. Park, S. Rouff, *Nat. Nanotechnol.*, **4**, 2009, 217.  
 [57] Y. Li, K. Wang, J. Wei, Z. Gu, Z. Wang, J. Luo, D. Wu, *Carbon*, **43**, 2005, 31.  
 [58] I. Balberg, *Carbon*, **40**, 2002, 139.  
 [59] H.N. Yu, S.S. Kim, I.U. Hwang, *Composite Structures*, **86**, 2008, 285.  
 [60] N.S. Choi, K.H. Yew, W.U. Choi, S.S. Kim, *J. Power Sources*, **172**, 2007, 404.  
 [61] B.D. Cunningham, J. Huang, D.G. Baird, *J. Power Sources*, **165**, 2007, 764.

آبها و بنادری که قوانین زیست محیطی سختی در آنها حاکم است، تولید بخشی از توان لازم برای ایجاد نیروی رانش در شرایط کاری خاص همانند حرکت با سرعت زیاد، تولید توان الکتریکی برای شبکه برق کشتی و در صورت نیاز برای ایجاد رانش در کشتی‌هایی که مجهز به سیستم رانش الکتریکی هستند (همانند شناورهای نظامی دارای سیستم یکپارچه الکتریکی) مورد استفاده قرار گیرد.

## مراجع

- [1] S.E. Bozbag, C. Erkey, *The Journal of Supercritical Fluids*, **62**, 2012, 1.  
 [2] S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 2012, 981.  
 [3] L. Chikh, V. Delhorbe, O. Fichet, *Journal of Membrane Science*, **368**, 2011, 1.  
 [4] S. Giddey, S.P. Badwal, F.T. Ciacchi, D. Fini, B.A. Sexton, F. Glenn, P.W. Leech, *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 2010, 2506.  
 [5] D. Chrenko, F. Gao, B. Blunier, D. Bouquain, A. Miraoui, *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 2010, 6863.  
 [6] A.D. Bonaccorso, J.T. Irvine, *International Journal of Hydrogen Energy*, **37**, 2012, 19337.  
 [7] B.G. Pollet, *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 2010, 11986.  
 [8] A.K. Kralj, *Energy*, **35**, 2010, 1433.  
 [9] Y. Dong, Q. Zhang, X. Su, Q. Zhou, *Progress in Organic Coatings*, **76**, 2013, 662.  
 [10] X. Su, Q. Zhou, Q. Zhang, Y. Zhang, H. Zhang, *Applied Surface Science*, **257**, 2011, 6095.  
 [11] A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, *Int. J. Hydrogen Energy*, **30**, 2005, 1297.  
 [12] Y. Wang, D.O. Northwood, *J. Power Sources*, **163**, 2006, 500.  
 [13] J. Wind, R. Spah, W. Kaiser, G. Bohm, *J. of Power Sources*, **105**, 2002, 256.  
 [14] X. Li, I. Sabir, *International Journal of Hydrogen Energy*, **30**, 2005, 359.  
 [15] H. Wang, J.A. Turner, *J. Power Sources*, **128**, 2004, 193.  
 [16] Y. Wang, D.O. Northwood, *J. Power Sources*, **165**, 2007, 293.  
 [17] Y. Wang, D.O. Northwood, *Int. J. Hydrogen Energy*, **32**, 2007, 895.  
 [18] Y. Wang, D.O. Northwood, *Electrochim. Acta*, **52**, 2007, 6793.  
 [19] L. Ma, S. Warthesen, D.A. Shores, *J. New Mater. Electrochem. Syst.*, **3**, 2000, 221.  
 [20] M.P. Brady, K. Weisbrod, I. Paulauskas, R.A. Buchanan, K.L. More, H. Wang, M. Wilson, F. Garzon, L.R. Walker, *Scripta Mater.*, **50**, 2004, 1017.  
 [21] M.J. Kelly, B. Egger, G. Fafilek, J.O. Besenhard, H. Kronberger, G.E. Nauer, *Solid State Ionics*, **176**, 2005, 2111.  
 [22] D.A. Boysen, T. Uda, C. Chisholm, S.M. Haile, *Science*,