بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای سیاوش خبازیان پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان ایجاد و بررسی خواص تریبولوژیکی پوشش نانو کامپوزیتی نیکل – نانو لوله کربنی توسط رسوب الکتروشیمیایی** در تاریخ ١٣٨٩/٤/١٤ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مواد – نانو فناوری پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر سهراب سنجابی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر تقی شهرابی فراهانی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر رسول صراف مأموری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد قربانی	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر رسول صراف مأموری	دانشیار	

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی نگارنده سیاوش خبازیان در رشته مواد- نانوفناوری است که در سال۱۳۸۹ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر سهراب سنجابی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب سیاوش خبازیان دانشجوی رشته مواد- نانوفناوری مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مواد- گروه نانوفناوری (نانومواد)

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

ایجاد و بررسی خواص تریبولوژیکی پوشش های نانوکامپوزیتی نیکل- نانولوله های کربنی به روش رسوب الکتروشیمیایی

نگارش
سیاوش خبازیان

استاد راهنما:
دکتر سهراب سنجابی

تیر ماه ۱۳۸۹

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم به پاس مهربانی شان، زحماتشان، صبر و یاریشان که همیشه پناه من بودند و لحظه لحظه زندگیشان را صرف روزها و شبهای من کردند.

خواهران و برادرم که مرا بال پریدن بودند.

و تمامی دوستانم که همیشه من را یار و یاور بودند.

تشکر و قدر دانی

از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر سنجابی برای هر آنچه به من آموخت و تمامی بزرگان علم و دانش، اساتید گرانقدری که بی منت می کوشند تا به ما بیاموزند. آنان که گرمی کلامشان و فروغ نگاهشان و صمیمیت رفتارشان لذت افتخار شاگردیشان را صد چندان نمود.

از دوستان عزیزم در دانشگاه تربیت مدرس، آقایان مهندس بهرام عبداللهی، حسین حسن نژاد، دکتر ابراهیم برزگری، مجید چیت ساز، بهنام پاک بیرامی و سید مهدی حسینی.

چکیده

هدف از این تحقیق افزایش درصد حجمی نانولوله های کربنی در پوشش های نانو کامپوزیتی تهیه شده به روش رسوب الکتروشیمیایی به کمک روش رسوب الکتروفورز بوده است. در ابتدا نانو لوله های کربنی توسط عملیات اسید شویی عامل دار و کوتاه شدند. در ادامه پوشش نانو کامپوزیتی نیکل- نانولوله کربنی به دو روش متفاوت ایجاد شد. در روش اول که روش دو مرحله ای می باشد، نانولوله های کربنی به روش الکتروفورزیز بر روی زیر لایه های متفاوت پوشش دهی شدند تا پارامتر های بهینه برای بوجود آوردن پوشش مناسب به دست آید، سپس با آبکاری نیکل بر روی این پوشش از حمام وات، پوشش نانو کامپوزیتی ایجاد شد. در حالیکه در روش دوم پوشش های نانوکامپوزیتی از روش آبکاری کامپوزیتی ایجاد شدند. در این روش پارامتر های تاثیر گذار در آبکاری که شامل نحوه آماده سازی نانولوله های کربنی، چگالی جریان، غلظت نانولوله ها در حمام و سرعت تلاطم حمام هستند مورد بررسی قرار گرفتند. ساختار و خواص مورفولوژیکی پوشش ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، آنالیز تفرق اشعه ایکس و میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین خواص خوردگی از طریق آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵ درصد کلرید سدیم و خواص سایشی توسط آزمون ***Pin-on disck*** ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که درصد نانولوله های کربنی در پوشش های دو مرحله ای ۱۲ درصد وزنی و برای پوشش های تک مرحله ای ماکزیمم ۵/۹ درصد وزنی می باشد. همچنین سختی پوشش های نانوکامپوزیتی دو مرحله ای افزایش ۳۵ درصدی نسبت به تک مرحله ای و ۵۱ درصدی نسبت به نیکل خالص، نشان می دهد. در روش تک مرحله ای نانولوله های کوتاه به میزان بیشتری در پوشش به به روش همرسوبی جای می گیرند و سختی بیشتری نسبت به پوشش حاوی نانولوله بلند از خود نشان می دهند. هنگامی که نانولوله های بلند در زمینه نیکل قرار می گیرند شدت جریان خوردگی تا میزان یک هشتم (۰/ ۲۸۶$\mu A/cm^2$) نسبت به نیکل خالص (۱/۴۷$\mu A/cm^2$) کاهش پیدا می کند، در صورتی که برای پوشش های نانوکامپوزیتی حاوی نانولوله های کوتاه جریان خوردگی به میزان یک سوم کاهش پیدا می کند.

واژگان کلیدی: *نانولوله کربنی، پوشش نانو کامپوزیتی، آبکاری الکتریکی، الکتروفورزیز، خوردگی*

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

فصل ۱: مقدمه ۱

فصل ۲: مروری بر منابع ۴

۲-۱- معرفی و ساختار نانولوله های کربنی ۵

۲-۲- خواص نانولوله های کربنی ۷

۲-۲-۱- خواص مکانیکی ۷

۲-۲-۲- خواص الکتریکی ۸

۲-۲-۳- خواص دیگر ۸

۲-۳- توزیع و پایدارسازی نانولوله های کربنی در حلال های آبی و آلی ۹

۲-۳-۱- عامل دار کردن غیر کوالانس ۹

۲-۳-۲- عامل دار کردن کوالانس و کوتاه کردن طول نانولوله ها ۱۲

۲-۳-۲-۱- استفاده از محیط با قدرت اکسید کنندگی پایین ۱۳

۲-۳-۲-۲- استفاده از محیط با قدرت اکسید کنندگی بالا ۱۴

۲-۴- رسوب دهی به روش الکتروفورز ۱۵

۲-۴-۱- ایجاد سوسپانسیون پایدار حاوی نانولوله کربنی ۱۶

۲-۴-۲- رسوب الکتروفورز نانولوله ها از سوسپانسیون ۱۸

۲-۴-۳- تاثیر میدان الکتریکی بر نانولوله های کربنی چند دیواره ۱۹

۲-۵- رسوب الکتروشیمیایی نیکل ۲۰

۲-۵-۱- آبکاری نیکل نانوکریستال ۲۱

۲-۵-۲- خواص پوشش های نیکل ۲۳

۲-۶- آبکاری کامپوزیتی ۲۵

۲-۶-۱- تاریخچه ۲۵

۲-۶-۲- روش های تعلیق و پایدارسازی نانو ذارت در حمام آبکاری ۲۶

۲-۶-۲-۱ استفاده از روش های فیزیکی ۲۶

۲-۶-۲-۲ استفاده از روش های شیمیایی ۲۶

۲-۶-۳- مکانیسم های افزایش استحکام پوشش های نانوکامپوزیتی ۲۷

۲-۶-۳-۱- افزایش استحکام پوشش در اثر پراکندگی ۲۷

۲-۶-۳-۲- افزایش استحکام پوشش از طریق ریزدانه شدن زمینه ۲۷
۲-۶-۴- مکانیسم رسوب الکتریکی همزمان ۲۸
۲-۶-۴-۱- مدل گاگلیلمی ۲۹
۲-۶-۴-۲- مدل سلیس ۳۱
۲-۶-۵- تاثیر پارامتر های گوناگون بر روی فرآیند رسوب الکتریکی همزمان ۳۲
۲-۶-۵-۱- ترکیب و ساختار کریستالی ذرات ۳۲
۲-۶-۵-۲- اندازه ذرات ۳۳
۲-۶-۵-۳- غلظت ذرات ۳۴
۲-۶-۵-۴- چگالی جریان ۳۵
۲-۶-۵-۵- تلاطم الکترولیت ۳۶
۲-۶-۵-۶- ترکیب شیمیایی حمام ۳۸
۲-۶-۵-۷- افزودنی ها ۳۸
۲-۶-۵-۸- اثر دما ۳۹
۲-۷- پوشش های نانوکامپوزیتی نیکل-نانولوله کربنی ۴۰
فصل ۳: روش تحقیق ۴۶
۳-۱- مقدمه ۴۷
۳-۲- مواد اولیه و تجهیزات ۴۷
۳-۳- آماده سازی نانولوله ها ۴۸
۳-۳-۱- ایجاد گروه های عاملی ۴۸
۳-۳-۲- کوتاه کردن نانو لوله ها و ایجاد گرو های عامل دار ۴۹
۳-۴- آماده سازی زیر لایه ها جهت آبکاری ۴۹
۳-۵- آماده سازی زیر لایه و رسوب الکتروفورز نانولوله ها ۴۹
۳-۵-۲- آبکاری نمونه های پوشش داده شده توسط الکتروفورز ۵۱
۳-۶- آبکاری نمونه های نیکل خالص ۵۲
۳-۶-۱- ترکیب شیمیایی حمام ۵۲
۳-۶-۲- شرایط آبکاری نمونه های نیکل خالص ۵۲
۳-۶-۳- شرایط آبکاری نانو کامپوزیتی ۵۳
۳-۶-۳-۱- نمونه های تهیه شده جهت بررسی چگالی جریان ۵۳
۳-۶-۳-۲- نمونه های تهیه شده جهت بررسی غلظت نانولوله ها ۵۴
۳-۶-۳-۳- نمونه های تهیه شده جهت بررسی تاثیر تلاطم بر آبکاری ۵۵

۳-۷- ارزیابی خواص ۵۵
۳-۷-۱- آنالیز گروه های عاملی توسط FT-IR ۵۵
۳-۷-۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ۵۶
۳-۷-۳- اندازه گیری سختی ۵۶
۳-۷-۴- آزمون نانوسختی ۵۶
۳-۷-۵- بررسی نمونه ها به وسیله تفرق اشعه ایکس ۵۷
۳-۷-۶- بررسی خواص خوردگی ۵۷
۳-۷-۷- بررسی خواص سایشی پوشش ها ۵۸
فصل ۴: نتایج و بحث ۵۹
۴-۱- آماده سازی نانولوله ها ۶۰
۴-۲- پوشش الکتروفورز نانولوله ها ۶۳
۴-۲-۱- مقدمه ۶۳
۴-۲-۲- پوشش دهی از محلول DMF ۶۴
۴-۲-۳- پوشش دهی نانولوله های کوتاه شده از آب ۶۶
۴-۲-۴- پوشش دهی نانولوله های بلند از آب ۶۸
۴-۲-۵- آبکاری پوشش حاصل از الکتروفورز ۷۰
۴-۳- آبکاری کامپوزیتی به روش معمول ۸۱
۴-۳-۱- تاثیر چگالی جریان ۸۱
۴-۳-۲- تاثیر غلظت حمام ۸۶
۴-۳-۳- تاثیر سرعت همزدن ۹۰
۴-۳-۴- بررسی ساختار کریستالی پوشش ها بوسیله XRD ۹۵
۴-۳-۵- نتایج خوردگی ۹۷
۴-۳-۶- خواص سایشی ۱۰۱
نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۰۳
منابع و مراجع ۱۰۶

فهرست شکل‌ها

عنوان ..... صفحه

شکل(۲-۱) هیبریداسیون انواع ساختار های کربن الف)الماس ب)گرافیت ج) نانولوله کربنی د) فولرین ۶

شکل(۲-۲) شماتیک نحوه اثر سورفوکتنت در پایدارسازی نانولوله ها ۱۰

شکل(۲-۳) نمودار انرژی پتانسیل بر حسب فاصله بین دو نانولوله ۱۱

شکل(۲-۴) نحوه جذب و توزیع سورفوکتنت های مختلف بر سطح نانولوله ها ۱۲

شکل(۲-۵) تصویر TEM و شماتیک باز شدن نانولوله های کربنی توسط عملیات اسید شویی ۱۴

شکل(۲-۶) تصویر شماتیک سل رسوب دهی به روش الکتروفورز ۱۶

شکل(۲-۷) تصویر SEM پوشش های نانولوله های کربنی به دست آمده از محلول A) آب B) اتانول ۱۷

شکل(۲-۸) شماتیک قطبیده شدن نانولوله ها در میدان الکتریکی در دوجهت طولی و عرضی ۲۰

شکل(۲-۹) تاثیر چگالی جریان بر اندازه دانه های نیکل ۲۲

شکل(۲-۱۰) نمودار هال پچ برای مواد مختلف نشان دهنده شکست رابطه هال پچ در اندازه دانه های مختلف ۲۳

شکل(۲-۱۱) نمودار ضریب اصطکاک بر حسب سیکل در اندازه دانه های مختلف نیکل ۲۴

شکل(۲-۱۲) روش های مختلف برای همزدن الکترولیت برای کاربرد های صنعتی A) هم زدن توسط پره از بالا، B) صفحه شناور با حرکت رفت و برگشتی، C) پمپ کردن الکترولیت، D) استفاده از همزن مغناطیسی، E) استفاده از دیسک دوار، F) استفاده از سیلندر دوار ۲۶

شکل(۲-۱۳) . تصویر شماتیک توزیع نانوذرات آلومینیوم در زمینه نیکل و اثر جوانه زایی آن ۲۸

شکل(۲-۱۴) مکانیسم هم رسوبی ذرات در زمینه فلزی ۳۲

شکل(۲-۱۵) تاثیر ساختار کریستالی نانوذرات در میزان هم رسوبی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم ۳۳

شکل(۲-۱۶) اثر اندازه ذرات اکسید سیلیسیوم در میزان مشارکت در پوشش ۳۴

شکل(۲-۱۷) تاثیر غلظت نانوذرات در حمام آبکاری بر میزان نانوذرات SiC در پوشش نیکل ۳۵

شکل(۲-۱۸) تاثیر سرعت همزن در هنگام رسوب نشانی بر میزان مشارکت نانوذرات تفلون در زمینه نیکلی. ۳۶

شکل(۲-۱۹) اثر اعمال امواج فراصوت بر مورفولوژی پوشش ها کامپوزیتی نیکل-تیتانیا در شدت اعمالی الف) ۰ وات ب) ۱۰۰ وات ج) ۳۰۰ وات ۳۷

شکل(۲-۲۰) تاثیر غلظت یون های نیکل در الکترولیت بر سختی و میزان همرسوبی نانوذرات آلومینا..... ۳۸

شکل(۲-۲۱) تاثیر ساخارین بر سختی پوشش های نیکل ۳۹

شکل(۲-۲۲) تاثیر درجه دمای حمام آبکاری بر میزان مشارکت نانوذرات SiC در پوشش ۴۰

شکل(۲-۲۳) اثر غلظت نانولوله های کربنی در الکترولیت بر میزان مشارکت نانولوله ها در پوشش..... ۴۱

شکل(۲-۲۴) شماتیک در بر گرفته شدن نانولوله ها در پوشش با گذشت زمان آبکاری ۴۱

شکل(۲-۲۵) شماتیک نانولوله در بر گرفته شده در زمینه نیکل و محل های مناسب بر روی سطح نانولوله ها برای احیای یون های نیکل ۴۲

شکل(۲-۲۶) اثر نانولوله ها بر نرخ خوردگی در مقایسه با نیکل و فولاد کربنی..... ۴۲

شکل(۲-۲۷) تاثیر درصد وزنی نانولوله ها و نوع پایدار ساز بر میکروسختی پوشش های نانوکامپوزیتی ۴۴

شکل(۲-۲۸) اثر غلظت نانولوله ها در الکترولیت بر پلاریزاسیون کاتدی ۴۴

شکل(۲-۲۹) الف) تاثیر چگالی جریان بر میزان نانولوله ها در پوشش ب) سختی پوشش..... ۴۵

شکل(۳-۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانولوله ها..... ۴۷

شکل(۴-۱) تصویر SEM نانولوله های A) اولیه B)کوتاه شده بعد از توزیع کردن در استون و پیپت کردن روی لام شیشه ای..... ۶۰

شکل(۴-۲) توزیع طولی نانولوله های کربنی ۶۱

شکل(۴-۳) طیف A FT-IR) نانولوله های اولیه B) نانولوله های کوتاه شده..... ۶۲

شکل(۴-۴) تصویر پوشش حاصل از محلول DMF در ولتاژ اعمالی A) ۱۵۰ B) ۲۰۰ C)۳۰۰ ولت ۶۵

شکل(۴-۵) نمودار شدت جریان بر حسب زمان فرایند ۶۶

شکل(۴-۶) تصویر پوشش حاصل از الکتروفورز A) میدان اعمالی ۱۵۰ B V/CM) ۳۰۰ V/CM..... ۶۷

شکل(۴-۷) A) پوشش حاصل از ولتاژ اعمالی ۲۰۰ بزرگنمایی کم B) ولتاژ اعمالی ۱۵۰ C) ولتاژ اعمالی ۲۰۰ D) ولتاژ اعمالی ۳۰۰ در بزگنمایی بیشتر..... ۶۹

شکل(۴-۸) تصویر FE-SEM پوشش بعد از گذشت ۲ دقیقه آبکاری ۷۲

شکل(۴-۹) تصویر FE-SEM از دو ناحیه مختلف پوشش پس از گذشت ۳ دقیقه آبکاری ۷۳

شکل(۴-۱۰) تصویر پوشش نهایی با گذشت زمان ۵ دقیقه آبکاری A) توسط C,B SEM) بزرگنمایی بیشتر توسط FE-SEM ۷۴

شکل(۴-۱۱) تصویر AFM پوشش نانوکریستال نیکل بر روی زیر لایه مسی از دو نمای متفاوت ۷۴

شکل(۴-۱۲) تصویر AFM توپوگرافی سطح پوشش نانوکامپوزیتی در دو مقیاس مختلف ۷۵

شکل(۴-۱۳) تصویر شماتیک فرایند با افزایش زمان آبکاری A) جوانه زنی یون های نیکل، B) تشکیل کلاستر های نیکل بر روی تمام سطح نانولوله C) پوشش نهایی ۷۶

شکل(۴-۱۴) نتایج تفرق اشعه ایکس برای A) پوشش نیکل خالص B) پوشش نانوکامپوزیتی ۷۸

شکل(۴-۱۵) نمودار بار اعمالی بر حسب عمق نفوذ پروب برای پوشش های نیکل خالص و نیکل نانوکامپوزیتی .. ۷۹

شکل(۴-۱۶) نمودار تاثیر چگالی جریان بر درصد نانولوله در پوشش ۸۲

شکل(۴-۱۷) تاثیر چگالی جریان بر میکروسختی پوشش ۸۳

شکل(۴-۱۸) مورفولوژی پوشش هی نانوکامپوزیتی حاوی نانولوله های بلند در چگالی جریان A) ۴ A)۸ C) ۱۰ آمپر بر دسیمتر مربع ۸۴

شکل(۴-۱۹) تصویر میکروسکوپی پوشش های نانوکامپوزیتی حاوی نانولوله های کوتاه در چگالی جریان A) ۴ B) ۸ C) ۱۰ آمپر بر دسیمتر مربع ۸۵

شکل(۴-۲۰) تاثیر غلظت حمام آبکاری بر درصد نانولوله ها در پوشش ۸۷

شکل(۴-۲۱) تاثیر غلظت حمام آبکاری بر میکروسختی پوشش ۸۸

شکل(۴-۲۲) تصویر SEM پوشش های حاصله از الف) حمام ۰/۶ گرم بر لیتر نانولوله های بلند ب) حمام ۱ گرم بر لیتر حاوی نانولوله های کوتاه ۸۸

شکل(۴-۲۳) تصویر FE-SEM پوشش حاوی نانولوله های کوتاه کلوخه شده حاصل از حمام ۱ گرم بر لیتر ۸۹

شکل(۴-۲۴) تصویر FE-SEM از سطح پوشش نانوکامپوزیتی حاوی ۵/۹۸ درصد وزنی نانولوله ۹۰

شکل(۴-۲۵) اثر سرعت همزن بر میزان همرسوبی نانولوله ها ۹۱

شکل(۴-۲۶) اثر سرعت همزن بر سختی پوشش نانوکامپوزیتی ۹۲

شکل(۴-۲۷) تصویر پوشش هی نانوکامپوزیتی A) حاوی نانولوله های کوتاه B) حاوی نانولوله های بلند ۹۳

شکل(۴-۲۸) تصویر و آنالیز نقشه ای پوشش های نانوکامپوزیتی حاوی A) نانولوله های بلند B) کوتاه ۹۴

شکل(۴-۲۹) نتایج تفرق اشعه ایکس برای A) پوشش نیکل B) پوشش حاوی نانولوله های بلند C) پوشش حاوی نانولوله های کوتاه ۹۵

شکل(۴-۳۰) منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک پوششهای نانوکامپوزیتی حاوی نانولوله های کوتاه و نیکل خالص ۹۸

شکل(۴-۳۱) منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک پوششهای نانوکامپوزیتی حاوی نانولوله های بلند و نیکل خالص ۱۰۰

شکل(۴-۳۲) نمودار ضریب اصطکاک بر حسب چرخه ۱۰۰

فهرست جدول‌ها

عنوان ..... صفحه

جدول (۲-۱) مقایسه ای بین خواص مکانیکی نانولوله های کربنی و دیگر مواد ۷

جدول (۲-۲) خواص و برخی کاربرد های نانولوله های کربنی ۹

جدول (۲-۳) شرایط مختلف ایجاد سوسپانسیون حاوی نانولوله های کربنی ۱۷

جدول (۲-۴) ترکیب شیمیایی و خواص حاصل از آبکاری الکتریکی از حمام وات ۲۲

جدول (۲-۵) نتایج حاصل از تست خوردگی پوشش های نیکل در اندازه دانه های مختلف ۲۴

جدول (۲-۶) تاثیر غلظت نانولوله ها و نوع سورفوکتنت بر میزان همرسوبی در پوشش ۴۳

جدول (۳-۱) مشخصات نانولوله های خریداری شده ۴۸

جدول (۳-۲) شرایط رسوب دهی نانولوله های کربنی ۵۰

جدول (۳-۳) شرایط آبکاری نیکل بر روی سطح پوشش حاصل از الکتروفورزیز ۵۱

جدول (۳-۴) ترکیب شیمیایی حمام آبکاری نیکل خالص ۵۲

جدول (۳-۵) شرایط آبکاری پوشش نیکل خالص ۵۳

جدول (۳-۶) شرایط آبکاری برای بررسی اثر چگالی جریان ۵۴

جدول (۳-۷) شرایط پوشش دهی برای بررسی اثر غلظت الکترولیت ۵۴

جدول (۳-۸) شرایط آبکاری برای بررسی اثر تلاطم بر فرآیند آبکاری ۵۵

جدول (۴-۱) میزان پایداری نانولوله ها در محیط های مختلف در غلظت ۰/۱ گرم بر لیتر ۶۲

جدول (۴-۲) نتایج حاصل از رسوب الکتروفورز نانولوله ها از محلول های مختلف ۶۴

جدول (۴-۳) نتایج حاصل از آزمون نانوسختی ۷۹

جدول (۴-۴) بیشینه سختی و مقدار نانولوله ها در پوشش ها پس از تعیین شرایط بهینه آبکاری ۹۳

جدول (۴-۵) اندازه دانه های نیکل به دست آمده از رابطه شرر ۹۶

جدول (۴-۶) نتایج حاصل از منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک پوشش های حاوی نانولوله های کوتاه شده و نیکل خالص ۹۹

جدول (۴-۷) نتایج حاصل از منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک پوشش های حاوی نانولوله های بلند و نیکل خالص..... ۱۰۰

فصل ۱

مقدمه

با اینکه آبکاری الکتریکی[1] یا به عبارت دیگر رسوب الکتروشیمیایی[2] نسبت به روش های دیگر پوشش دهی به نظر قدیمی تر به نظر می رسد ولی همچنان جایگاه خود را به عنوان یکی از مهمترین فرآیند های پوشش دهی در میان دیگر روش ها حفظ کرده است. آبکاری الکتریکی به دلیل انعطاف پذیری عملیاتی توانسته طیف گسترده ای از نیاز های صنعتی را برآورده کند. با گذشت زمان و نیاز به خواص بهبود یافته تر رده جدیدی از پوشش هایی تحت عنوان پوشش های کامپوزیتی زمینه فلزی[3]*(MMCs)* بوسیله آبکاری الکتریکی و توسط همرسوبی بوجود آمدند، در این روش ذرات فاز تقویت کننده از طریق همرسوبی و مهاجرت ذرات باردار در میدان الکتریکی جذب الکترود شده و در زمینه فلزی قرار می گیرند. اگرچه از روش های دیگر پوشش دهی مانند الکترولس، پاشش حرارتی و رسوب شیمیایی از فاز بخار و ... می توان این رده از پوشش ها را اعمال کرد ولی آبکاری به دلیل سادگی، قیمت پایین، انعطاف بالای فرآیند و شرایط کاری مناسب نسبت به دیگر روش ها برتری دارد. با استفاده از فازهای کامپوزیتی مختلف می توان به خاصیت مورد نظر در پوشش های *MMCs* دست یافت. به عنوان مثال از پوشش های الکتروکاتالیست و فوتوکاتالیست گرفته تا پوشش های خود روان کننده برای مقاصد ضد سایشی را می توان اشاره کرد.

با گشوده شدن درب های جدید به سوی علم و صنعت از طریق دروازه نانو، آبکاری الکتریکی توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نمود. تا کنون کلیه نانو ساختار های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی به روش آبکاری تهیه شده اند. ساخت پوشش های نانو ساختار با خواص کاملا متفاوت با پوشش های معمولی به راحتی توسط آبکاری الکتریکی بر روی زیرلایه مورد نظر امکان پذیر شده است. با اینکه درصد وزنی نانوذرات در پوشش های حاصل از رسوب الکتروشیمیایی کمتر از نوع میکرونی خود هستند ولی به علت توزیع یکنواخت در زمینه فلزی خواص مشابه و یا بهتر را تضمین می کنند. شرایط آبکاری در حضور نانوذرات نسبت به حمام خالص تا حدودی متفاوت می باشد. پوشش های

---

[1] *electroplating*
[2] *Electrodeposition*
[3] *Metal Matrix Composite*

نیکل دارای خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی در حد مطلوب بوده بطوری که توانسته طیف وسیعی از نیاز های صنعتی را برآورده کند، برای مثال این پوشش برای مقاصد ضد سایشی، فرسایشی، خوردگی و ... مورد استفاده قرار می گیرد. از کاربرد های نوین پوشش های نیکل می توان استفاده از آن در سیستم های میکروالکترومکانیکی[1] و نانو الکترومکانیکی[2] مانند میکروسوئیچ ها، میکروماشین ها و غیره اشاره کرد. با اضافه کردن نانوذرات به زمینه نیکل از طریق آبکاری الکتریکی می توان خواص آن را تا حد زیادی بهبود بخشید. چنانچه طی تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده شده است استفاده از نانو ذرات تفلون در زمینه نیکلی اگرچه موجب کاهش سختی پوشش می شود ولی باعث ایجاد خاصیت خود روان کنندگی می گردد که برای مقاصد مهندسی و کاهش نرخ سایش و حفاظت از فلز پایه و زمینه نیکل استفاده می شود. نانولوله های کربنی چند دیواره تشکیل شده از لایه های در هم پیچیده گرافین، دارای خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی بسیار مطلوب بوده و با اضافه کردن آن به زمینه نیکل می توان خاصیت خود روان کنندگی، کاهش نرخ خوردگی و افزایش سختی و غیره را حاصل نمود. این تحقیق شامل دو قسمت است.

در بخش اول تحقیق با بکار گیری رسوب الکتروفورز و آبکاری متعاقب آن، پوشش های نانوکامپوزیتی نیکل و نانولوله کربنی ایجاد شدند و خواص آنها مورد بررسی قرار می گیرند. لازم به ذکر است که این روش برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفته است. از مزایای این روش می توان سادگی عملیات، کاهش هزینه های تولید، افزایش درصد وزنی نانولوله ها در پوشش و همچنین بهبود خواص مکانیکی پوشش را نام برد. با توجه به پایداری پایین نانولوله ها در محیط های آبی و آلی، نانو لوله ها آماده سازی شده و سپس در حمام وات نیکل توزیع می شوند. یکی از پارامتر های تاثیر گذار در پوشش نحوه آماده سازی نانولوله های کربنی می باشد که تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو در قسمت دوم با استفاده از روش معمول آبکاری کامپوزیتی، پارامتر های تاثیر گذار بر فرایند آبکاری و خواص پوشش ایجاد شده بررسی می شود.

[1] *Micro Electromechanical System*
[2] *Nano Electromechanical System*