





دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

مشخصه‌یابی پوشش‌های نانوکامپوزیتی $Ni-SiC-CNT$ تولید شده به روش

آبکاری الکتریکی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته شناسایی و انتخاب مواد

محمد حسین مصلی نژاد

استاد راهنما

دکتر علی شفیعی



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته شناسایی و انتخاب مواد آقای محمدحسین مصلی نژاد
تحت عنوان

مشخصه یابی پوشش های نانو کامپوزیتی $Ni-SiC-CNT$ تولید شده به روش آبکاری
الکتریکی

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۲۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر علی شفیعی

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر سید محمود منیر واقفی

۲- استاد داور

دکتر عبدالمجید اسلامی

۳- استاد داور

دکتر کیوان رئیسی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ " : از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند؛ از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر علی شفیعی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند؛ از اساتید داور جناب آقای دکتر سید محمود منیر واقفی و جناب آقای دکتر عبدالمجید اسلامی که زحمت داور بی پایان‌نامه را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق
موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

تقدیم ...

به ساحت مقدس حضرت اباصالح المهدی (عج)

تقدیم با بوسه بر دستان پدرم

به او که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا مردانگی سخاوت، سکوت، مهربانی و

پدرم

اکنون حاصل دستان خسته ات رمز موفقیتم شد.

به خودم تبریک می گویم که تو را دارم و دنیا با همه بزرگیش مثل تو را

ندارد

پدرم راه تمام زندگیست

پدرم دلفروشی همیشگیست

تقدیم به مادر عزیزتر از جانم

مادرم هستی من ز هستی توست تا هستم و هستی دارمت دوست

غمگسار جاودانی مادر است

چشم سار مهربانی مادر است

تقدیم به همسرم

که سایه مهربانیش سایه سار زندگیم می باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود.

فهرست مطالب

فهرست مطالب	هشت
فهرست اشکال	۵۵
فهرست جداول	سیزده
چکیده	۱
فصل اول مقدمه	۲
فصل دوم مروری بر مطالب	۴
۱-۲ فرآیند آبرکاری الکتریکی	۴
۱-۲-۱ رسوب‌دهی الکتروشیمیایی بوسیله جریان مستقیم	۶
۱-۲-۲ آبرکاری الکتریکی نیکل	۸
۲-۲ آلومینیوم و آلیاژهای آن	۱۱
۱-۲-۲-۱ آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴	۱۲
۲-۲-۲ آبرکاری روی آلومینیوم	۱۳
۳-۲ کامپوزیت	۱۴
۱-۳-۲ پوشش‌های کامپوزیتی	۱۵
۲-۳-۲ آبرکاری پوشش‌های کامپوزیتی	۱۵
۴-۲ معرفی چند اصطلاح	۲۰
۱-۴-۲ سایش	۲۰
۲-۴-۲ اصطکاک	۲۱
۳-۴-۲ روانکار	۲۲
۵-۲ رفتار سایشی پوشش‌های کامپوزیتی Ni-CNT	۲۳
۶-۲ رفتار سایشی پوشش‌های Ni-SiC	۲۵
۷-۲ سختی پوشش‌های با زمینه نیکل (Ni-CNT و Ni-SiC)	۲۹
۸-۲ مورفولوژی پوشش‌های زمینه نیکلی (Ni-CNT و Ni-SiC)	۳۴
۹-۲ جمع بندی	۳۷
فصل سوم مواد و روش‌ها	۳۸
۱-۳ مواد	۳۸
۱-۱-۳ کاتد و آند	۳۸
۲-۱-۳ میکرو پودر SiC و آماده سازی آن	۴۰
۳-۱-۳ نانولوله کربن و آماده سازی آن	۴۰

۴۱	..... ۳-۱-۴ حمام آبکاری
۴۲	..... ۳-۲ فرآیند پوشش دهی
۴۲	..... ۳-۲-۱ فعال سازی سطح آلومینیوم
۴۳	..... ۳-۲-۲ فرآیند آبکاری الکتریکی
۴۴	..... ۳-۳ مشخصه یابی پوشش ها
۴۴	..... ۳-۳-۱ بررسی مقطع پوشش با استفاده از میکروسکوپ نوری
۴۵	..... ۳-۳-۲ بررسی مورفولوژی سطحی با استفاده از SEM و AFM
۴۵	..... ۳-۳-۳ محاسبه درصد حجمی ذرات در پوشش
۴۵	..... ۳-۳-۴ آنالیز EDX
۴۵	..... ۳-۳-۵ آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)
۴۵	..... ۳-۳-۶ اندازه گیری سختی
۴۶	..... ۳-۳-۷ آزمون سایش
۴۸	..... فصل چهارم یافته ها و بحث
۴۸	..... ۴-۱ مقطع پوشش های S5 ، S10 و S15
۵۰	..... ۴-۲ تصاویر توپوگرافی پوشش های I3 و I6
۵۵	..... ۴-۳ مورفولوژی پوشش های Ni-SiC و Ni-SiC-CNT
۶۱	..... ۴-۴ آنالیز XRD و محاسبه اندازه دانه
۶۴	..... ۴-۵ نتایج آزمون نانو سختی
۶۷	..... ۴-۶ محاسبه درصد حجمی فاز تقویت کننده
۶۸	..... ۴-۷ نتایج آزمون سایش
۶۸	..... ۴-۷-۱ نمودار کاهش جرم
۷۰	..... ۴-۷-۲ مطالعه سطوح سایش
۷۵	..... فصل پنجم نتیجه گیری

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲. بوجود آمدن خودبخود بار در فصل مشترک فلز-محلول برای یک فلز غوطه‌ور شده درون الکترولیت ۵
- شکل ۲-۲. اجزای اصلی سیستم الکترولیز جریان مستقیم ۶
- شکل ۳-۲. پروفیل غلظت یون فلزی به عنوان تابعی از فاصله از سطح کاتد ۸
- شکل ۴-۲. طبقه‌بندی آلیاژهای آلومینیوم کار شده ۱۲
- شکل ۵-۲. سازه بال هواپیما که در ساخت آن از سری آلیاژ آلومینیوم ۲۰۰۰ (مانند ۲۰۲۴) و ۷۰۰۰ (مانند ۷۰۷۵) استفاده می‌گردد ۱۳
- شکل ۶-۲. مراحل هم‌نشست و تلفیق ذرات جامد درون رسوب: تشکیل ابر یونی (۱)، انتقال بوسیله جریان هم‌رفت (۲)، انتقال بوسیله نفوذ (۳)، واکنش کاهشی (۴)، جذب سطحی ۱۷
- شکل ۷-۲. تصویر TEM نانولوله‌های چند دیواره هم‌محور با قطرهای داخلی و خارجی متفاوت ۱۸
- شکل ۸-۲. تمام بلورهای SiC از تشکیل پیوند کوالانسی بین یک اتم کربن و چهار اتم سیلیسیم تشکیل شده است ۱۹
- شکل ۹-۲. شمایی از دو حالت سایش الف (خراشان ب) چسبان ۲۱
- شکل ۱۰-۲. تغییرات ضریب اصطکاک به عنوان تابعی از تعداد سیکل‌ها برای پوشش Ni و Ni-CNT ۲۴
- شکل ۱۱-۲. شمایی از ایجاد روانکاری با استفاده از MWCNT (الف) قبل از تست سایش و (ب) بعد از تست سایش ۲۴
- شکل ۱۲-۲. تغییرات نرخ سایش پوشش‌های Ni و Ni-CNT بازاری تغییر میزان CNT ۲۵
- شکل ۱۳-۲. تصویر SEM مربوط به خط سایش پوشش Ni-CNT (الف) تشکیل لایه اکسیدی (ب) وجود CNT در لبه خط سایش ۲۵
- شکل ۱۴-۲. تصاویر SEM خطوط سایش پوشش‌هایی که از حمام‌های با غلظت متفاوت ایجاد شده است: الف) ۵ g/l (ب) ۱۰ g/l (ج) ۱۰ g/l ۲۶
- شکل ۱۵-۲. تاثیر غلظت ذره تقویت کننده بر نرخ سایش پوشش‌های کامپوزیتی Ni-SiC ۲۶
- شکل ۱۶-۲. تاثیر درصد وزنی SiC بر نرخ سایش پوشش نانو کامپوزیتی Ni-SiC ۲۷
- شکل ۱۷-۲. تصویر SEM خط سایش مربوط به پوشش Ni تقویت شده با نانو ذرات SiC ۲۷
- شکل ۱۸-۲. شکل گیری بافت مرجع [۲۰۰] در الگوی پراش پرتو ایکس پوشش کامپوزیتی Ni/Nano SiC ۲۸
- شکل ۱۹-۲. تصاویر SEM مربوط به سطوح سایش پوشش‌های الف) نیکل خالص، کاهش جرم = ۱۵/۱ mg (ب) Ni-2vol% SiC، کاهش جرم = ۱۲/۰۳ mg (ج) Ni-5.2vol% SiC، کاهش جرم = ۷/۰۵ mg (د) Ni-9.8%vol SiC، کاهش جرم = ۴/۲۹ mg ۲۹
- شکل ۲۰-۲. تاثیر غلظت ذرات درون الکترولیت بر ریزسختی پوشش Ni-SiC ۳۰
- شکل ۲۱-۲. کسر حجمی ذرات SiC درون پوشش بازاری غلظت‌های مختلف SiC درون محلول ۳۰
- شکل ۲۲-۲. سختی و یکرز پوشش‌های کامپوزیتی Ni-SiC حاوی ذرات SiC با سه اندازه متفاوت و پوشش نیکل خالص ۳۰
- شکل ۲۳-۲. رابطه بین سختی پوشش کامپوزیتی Ni-SiC با غلظت SiC و CTAB در الکترولیت ۳۲
- شکل ۲۴-۲. رابطه بین ریزسختی و درصد وزنی نانو ذرات SiC در پوشش ۳۲
- شکل ۲۵-۲. نمودار تغییر سختی پوشش با افزایش کسر حجمی CNT ۳۳
- شکل ۲۶-۲. نمودار تغییر اندازه دانه زمینه با افزایش کسر حجمی CNT در پوشش ۳۳
- شکل ۲۷-۲. نمودار تغییرات سختی و یکرز با غلظت CNT در حمام آبکاری ۳۳
- شکل ۲۸-۲. تغییرات الف) درصد وزنی CNT در پوشش (ب) سختی پوشش در اثر تغییر دانسیته جریان آبکاری ۳۴
- شکل ۲۹-۲. تصویر SEM مورفولوژی پوشش الف) نیکل و (ب) Ni-nano SiC ۳۴
- شکل ۳۰-۲. الگوی XRD پوشش الف) نیکل خالص (ب) Ni-nano SiC ۳۵
- شکل ۳۱-۲. مورفولوژی سطحی پوشش‌های کامپوزیتی Ni-SiC در شرایط مختلف الف) هم‌زدن مکانیکی (ب) هم‌زدن اولتراسونیک و مکانیکی ۳۵
- شکل ۳۲-۲. مورفولوژی پوشش نیکل الف) بدون CNT (ب) با CNT ۳۶

- شکل ۲-۳۳. مورفولوژی سطحی پوشش‌های کامپوزیتی *Ni-CNT* که تحت دانسیته جریان‌های الف) $2 A/dm^2$ ب) $4 A/dm^2$ ج) $4 A/dm^2$ د) $12 A/dm^2$ بدست آمده است. ۳۶
- شکل ۳-۱. دیسک‌های آماده شده جهت فرآیند آبرکاری الکتریکی. ۳۹
- شکل ۳-۲. آند نیکلی مورد استفاده. ۳۹
- شکل ۳-۳. روند نمای انجام پروژه. ۴۱
- شکل ۳-۴. شمای کلی فرآیند آبرکاری الکتریکی. ۴۳
- شکل ۳-۵. دستگاه سنجش نانوسختی ساخت شرکت *CSM*. ۴۶
- شکل ۳-۶. الف) فرورونده بر کوویچ و ب) اثر فرورونده بر کوویچ بر سطح. ۴۶
- شکل ۳-۷. دستگاه سایش پین روی دیسک مورد استفاده در این پروژه. ۴۷
- شکل ۴-۱. تصویر متالوگرافی مربوط به نمونه‌های: الف) *S5*، ب) *S10* و ج) *S15*. ۴۹
- شکل ۴-۲. نمودار توزیع ضخامت پوشش در سطح نمونه (مربوط به شکل ۱-۴ الف). ۵۰
- شکل ۴-۳. سطح مقطع یک سطح زبر و توزیع جریان در نزدیکی سطح کاتد. ۵۰
- شکل ۴-۴. مشخصات سطحی و تصاویر *AFM* (الف) دوبعدی، ب) سه بعدی و ج) سه بعدی با بزرگنمایی بالاتر مربوط به زیرلایه پولیش شده. ۵۱
- شکل ۴-۵. مشخصات سطحی و تصاویر *AFM* (الف) دوبعدی، ب) سه بعدی و ج) سه بعدی با بزرگنمایی بالاتر مربوط به نمونه *I3* (پوشش نیکل خالص با دانسیته جریان آبرکاری $2Adm$). ۵۲
- شکل ۴-۶. مشخصات سطحی و تصاویر *AFM* (الف) دوبعدی، ب) سه بعدی و ج) سه بعدی با بزرگنمایی بالاتر مربوط به نمونه *I6* (پوشش نیکل خالص با دانسیته جریان آبرکاری $2Adm$). ۵۳
- شکل ۴-۷. نمودار زبری نمونه زیرلایه پولیش شده در ۴ مسیر متفاوت. ۵۴
- شکل ۴-۸. نمودار زبری نمونه *I3* (پوشش نیکل خالص با دانسیته جریان آبرکاری $3Adm$) در ۴ مسیر متفاوت. ۵۴
- شکل ۴-۹. نمودار زبری نمونه *I6* (پوشش نیکل خالص با دانسیته جریان آبرکاری $6Adm$) در ۴ مسیر متفاوت. ۵۵
- شکل ۴-۱۰. تصویر *SEM* از مورفولوژی پوشش‌های الف) *S5*، ب) *S10* و ج) *S15*. ۵۶
- شکل ۴-۱۱. تشکیل ترک در اثر نشست ذرات تقویت کننده در سطح پوشش. ۵۶
- شکل ۴-۱۲. تصویر *SEM* سطح نمونه *SC6* در حالت الف) *SE* و ب) *BSE*. ۵۷
- شکل ۴-۱۳. فرآیند پیشنهادی برای تشکیل برآمدگی در سطح پوشش. ۵۸
- شکل ۴-۱۴. تصویر *SEM* از مورفولوژی سطح پوشش *SC2* در قسمت برآمدگی تجمع ذرات *SiC* دیده می‌شود. ۵۸
- شکل ۴-۱۵. تصویر *SEM* مربوط به سطح مقطع پوشش *SC6*. ۵۹
- شکل ۴-۱۶. تصویر *SEM* سطح مقطع پوشش *SC6*. ۵۹
- شکل ۴-۱۷. تصویر *SEM* مورفولوژی سطحی پوشش *SC6* در بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر (الف) و ۵۰۰۰ برابر (ب). ۶۰
- شکل ۴-۱۸. شمایی از مکانیزم پیشنهادی توسط آرای و همکاران [۱۵] برای تشکیل فیبرهای پوشیده از نیکل بر سطح پوشش. ۶۰
- شکل ۴-۱۹. سطح مقطع پوشش *SC2* خوشه‌های *CNT* در اندازه‌های مختلف با پیکان علامت گذاری شده‌اند. ۶۱
- شکل ۴-۲۰. نمودار الگوی پراش پرتوی ایکس همه نمونه‌ها. ۶۲
- شکل ۴-۲۱. نمودار ویلیامسون-هال مربوط به نمونه *S5* که با استفاده از ۴ پیک اول موجود در الگوی *XRD* این نمونه رسم شده است. ۶۳
- شکل ۴-۲۲. تصویر مساحت ناحیه تماس. ۶۴
- شکل ۴-۲۳. نمودارهای نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمون نانوسختی پوشش *S10* (الف) نیرو و عمق نفوذ فرورونده بر حسب زمان و ب) نیرو بر حسب عمق نفوذ فرورونده. ۶۵
- شکل ۴-۲۴. نمودارهای نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمون نانوسختی پوشش *SC6* (الف) نیرو و عمق نفوذ فرورونده بر حسب زمان و

- ب) نیرو بر حسب عمق نفوذ فرورونده. ۶۶
- شکل ۴-۲۵. نتایج آزمون نانو سختی نمونه ها که از سطح مقطع پوشش ها انجام گرفته است ۶۷
- شکل ۴-۲۶. تغییرات هم‌نشست ذرات *SiC* با غلظت ذرات *SiC* در حمام مربوط به *S5*، *S10* و *S15* (نمونه‌های بدون *CNT*). ۶۸
- شکل ۴-۲۷. تغییرات هم‌نشست ذرات *SiC* با غلظت *CNT* در حمام مربوط به نمونه‌های *S10*، *SC2* و *SC6*. ۶۸
- شکل ۴-۲۸. نمودار کاهش جرم نمونه‌های *S5*، *S10*، *S15* و *SC6*. ۶۹
- شکل ۴-۲۹. تصویر *SEM* مربوط به خط سایش نمونه *S5*. ۷۰
- شکل ۴-۳۰. نحوه تشکیل نواحی جوش سرد و جدا شدن قسمتی از پوشش تحت تنش برشی. ۷۱
- شکل ۴-۳۱. تصویر *SEM* خط سایش نمونه *S10* (برزگنمایی ۱۵۰ برابر). ۷۱
- شکل ۴-۳۲. تصویر *SEM* خط سایش نمونه *S10* (برزگنمایی ۵۰۰ برابر). ۷۲
- شکل ۴-۳۳. نتیجه آنالیز *EDX* مربوط به ناحیه علامت گذاری شده در شکل ۴-۳۲. ۷۲
- شکل ۴-۳۴. تصویر *SEM* خطوط سایش نمونه *S15*. ۷۳
- شکل ۴-۳۵. تصویر *SEM* خطوط سایش نمونه *SC2* (الف) در برزگنمایی ۲۵۰ برابر و ب) برزگنمایی ۷۵۰ برابر (منطقه مشخص شده در تصویر الف). ۷۳
- شکل ۴-۳۶. تصویر *SEM* سایش نمونه *SC6*. ۷۴

فهرست جداول

جدول ۱-۲. ترکیب اسمی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴.....	۱۳
جدول ۲-۲. مروری بر پوشش‌های کامپوزیتی تولید شده به روش آبکاری الکتریکی.....	۱۶
جدول ۱-۳. ترکیب زیرلایه مورد استفاده.....	۳۹
جدول ۲-۳. مشخصات نانولوله کربن مورد استفاده در این پروژه.....	۴۰
جدول ۳-۳. ترکیب حمام واتر جهت آبکاری الکتریکی نیکل.....	۴۱
جدول ۴-۳. شرایط فرآیند آبکاری پوشش‌ها.....	۴۲
جدول ۵-۳. فرآیند فعال‌سازی سطح آلومینیوم پیش از آبکاری.....	۴۳
جدول ۶-۳. کدگذاری نمونه‌های تولید شده در این پژوهش.....	۴۴
جدول ۱-۴. مشخصات ضخامت پوشش حاصل از ۹ تصویر (مربوط به نمونه S5).....	۴۹
جدول ۲-۴. نتایج محاسبات اندازه دانه زمینه نیکل با استفاده از روش ویلیامسون-هال.....	۶۳

چکیده

سطوح قطعات و مواد به دلیل ساختار اتمی آن‌ها، آسیب پذیرترین محل برای حملات متعدد هستند. بنابراین لازم است تمهیداتی جهت حفظ سطح از این حملات اندیشیده شود. یکی از این راه حل‌ها، ایجاد پوشش بر سطح است که به روش‌های گوناگونی صورت می‌پذیرد. از این میان روش آبرکاری الکتریکی بدلیل هزینه‌های پایین تولید، سهولت تولید و آسان بودن کنترل فرآیند از اهمیت بالایی برخوردار است. در این فرآیند از طریق کنترل ترکیب و پارامترهای عملیات محلول می‌توان خواص رسوب الکتریکی را در دامنه وسیعی تغییر داد. با استفاده از این روش می‌توان پوشش‌های کامپوزیتی نیز بر سطح ایجاد کرد. پژوهش‌های زیادی در زمینه تولید پوشش‌های کامپوزیتی زمینه نیکل به روش آبرکاری الکتروشیمیایی انجام گرفته است. در این رابطه استفاده از ذرات کاربید سیلیسیم به عنوان عامل تقویت کننده در زمینه نیکلی بسیار مورد توجه بوده است. هم‌چنین به منظور بهبود خواص تریبولوژیکی پوشش، از کربن به صورت گرافیت و یا نانولوله کربن استفاده شده است. در بیشتر پژوهش‌ها SiC و CNT به صورت جداگانه در زمینه نیکل مورد استفاده قرار گرفته اند. در این پژوهش، ابتدا پوشش‌های کامپوزیتی $Ni-SiC$ در سه غلظت متفاوت ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم در لیتر ذره تقویت کننده با استفاده از فرآیند آبرکاری الکتریکی بر روی یک زیرلایه آلومینیومی تولید شدند. پس از بررسی بهترین نمونه از لحاظ مقاومت به سایش، تاثیر نانو لوله های کربنی در دو غلظت ۲ و ۶ گرم بر لیتر به عنوان تقویت کننده در کنار ذرات SiC در بهترین نمونه مرحله قبل بررسی گردید. نانو سختی و مقاومت به سایش نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سطح و مقطع پوشش‌ها هم‌چنین خطوط سایش با استفاده از میکروسکوپ SEM مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی تاثیر دانسیته جریان بر زبری سطح، مورفولوژی زیرلایه و پوشش‌های نیکل خالص در دو دانسیته جریان $3 A/dm^2$ و $6 A/dm^2$ با استفاده از میکروسکوپ AFM بررسی شد. آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) نیز برای بررسی هم‌نشست ذرات تقویت کننده در پوشش انجام شد. افزایش دانسیته جریان از $3 A/dm^2$ تا $6 A/dm^2$ تغییر محسوسی در پارامتر Ra ایجاد نکرد و تنها شکل کلی پستی‌ها و بلندی‌های سطحی تغییر پیدا کرد. افزایش غلظت ذرات SiC در حمام از $5 g/l$ (نمونه $S5$) به $10 g/l$ (نمونه $S10$) منجر به بهبود خواص سایشی پوشش گردید. وجود نانولوله‌های کربنی در سطح پوشش منجر به افزایش هم‌نشست ذرات SiC از $17/64$ درصد حجمی در نمونه $S10$ (نمونه تولید شده در حمام با غلظت $10 g/l SiC$) به $20/27$ درصد حجمی در نمونه $SC6$ (نمونه تولید شده در حمام با غلظت $10 g/l SiC$ و $6 g/l CNT$) شد، هم‌چنین حضور CNT منجر به برهم خوردن توزیع ذرات SiC در پوشش شد. استفاده از CNT تا حد معینی در کنار SiC منجر به بهبود سختی و مقاومت به سایش پوشش $Ni-SiC$ گردید، به طوری که افزایش CNT تا میزان $6 g/l$ منجر به افزایش سختی از 451 ویکرز در نمونه $S10$ به 508 ویکرز در نمونه $SC6$ ، باعث افزایش مدول الاستیک پوشش از $145/49 GPa$ در نمونه $S10$ به $169/61 GPa$ در نمونه $SC6$ شد و هم‌چنین کاهش جرم نمونه پس از آزمون سایش در نمونه $SC6$ $41/6\%$ نسبت به نمونه $S10$ بهبود پیدا کرد.

کلمات کلیدی: پوشش نانو کامپوزیتی، آبرکاری الکتریکی، نیکل، نانولوله کربنی، نانو سختی.

فصل اول

مقدمه

فلزات و غیر فلزاتی که برای تولید آن‌ها به مقدار هنگفتی انرژی نیاز است، اساس تمدن امروزی را تشکیل می‌دهند. تکامل آن‌ها شکل کلی دنیایی که در آن زندگی می‌کنیم را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند. بسیاری از ابزارها، قطعات و تجهیزات صنعتی و غیرصنعتی از این مواد تشکیل می‌شوند. این مواد در بیشتر موارد دارای عمر محدودی هستند که این مورد به میزان قابل توجهی به تاثیر عوامل خارجی و شرایط کاری قطعه بستگی دارد. معمولاً بین اجزایی که در تماس با یکدیگر هستند برهم کنش مکانیکی بوجود می‌آید. گاهی اوقات قطعه از طرف محیط دچار حمله شیمیایی یا الکتروشیمیایی شده که این موارد تضعیف کارکرد قطعه را در بر خواهد داشت.

سطوح قطعات و مواد به دلیل ساختار اتمی آن‌ها، آسیب پذیرترین محل برای حملات متعدد هستند. همانطور که گفته شد طبیعت این حملات می‌تواند مکانیکی، شیمیایی، الکتروشیمیایی و یا حرارتی باشد. هر یک از این تاثیرات می‌توانند بطور جداگانه یا با هم خود را نشان دهند. هر چه مواد اولیه کم‌یاب تر می‌شوند نیاز است که بازده کارکرد قطعات افزایش یابند. از طرفی هزینه‌های گزاف انرژی نیز توجهی برای استفاده بهینه از قطعات محسوب می‌شود. بنابراین لازم است تمهیداتی جهت حفظ سطح از این حملات اندیشیده شود. یکی از این راه‌ها ایجاد پوشش بر سطح قطعات است که به روش‌های گوناگونی صورت می‌پذیرد. صرف نظر از نوع روش پوشش دهی لازم است پیش از اعمال پوشش عملیات آماده سازی و پاک سازی انجام شود. شیوه‌های اعمال پوشش شامل روش‌های تبخیری (*PVD* و *CVD*)، روش‌های پاشش حرارتی، استفاده از مواد آلی، آبکاری و... است. از این میان، روش

آبکاری بدلیل هزینه پایین تولید، سهولت تولید و آسان بودن کنترل فرآیند از اهمیت بالایی برخوردار است. فرآیند رسوب‌دهی فلز می‌تواند به وسیله جریان الکتریکی از یک منبع خارجی یا به وسیله افزودن کاهنده‌های بسیار قوی که واکنش کاتدی-آندی را ایجاد می‌کنند، صورت پذیرد. بسته به این که از کدام روش برای این کار استفاده می‌شود به این فرآیندها رسوب‌دهی الکتروشیمیایی یا آبکاری یا رسوب‌دهی به روش الکترولس گفته می‌شود [۱].

آبکاری نیکل یکی از رایج‌ترین فرآیندهای آبکاری فلزات است؛ بیش از نیمی از نیکل تولید شده در دنیا به شکل پوشش مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل استفاده زیاد از این فلز ترکیب خواص متنوع و مفیدی است که این فلز از خود نشان می‌دهد [۲].

آلومینیوم پر مصرف‌ترین فلز غیر آهنی محسوب می‌شود و در حال حاضر در حدود ۲۴ تن در سال مورد مصرف قرار می‌گیرد. این فلز بدلیل دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالا و شکل پذیری آسان کاربردهای متعددی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوا فضا، صنایع ساختمانی و صنایع نظامی پیدا کرده است [۳].

از آنجایی که این فلز در حالت خالص داری استحکام پایینی است نمی‌توان از آن به عنوان اجزای ساختاری استفاده کرد. بنابراین معمولاً این فلز با عناصر آلیاژی مختلف ترکیب شده و محصولاتی تولید می‌شود که برای کاربردهای زیادی قابل استفاده است. بدلیل وزن سبک و هدایت حرارتی بالا از آلیاژهای آلومینیوم برای کاربردهای تریبولوژیک مانند قطعات موتور و محصولات ورزشی استفاده می‌شود. با این وجود استفاده از آن‌ها بدلیل مقاومت به سایش و استحکام کم محدود شده است [۴ و ۵]. برای حل مشکل مقاومت به سایش آلومینیوم لازم است سطح در برابر سایش مقاوم گردد که این کار با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله پوشش‌دهی به روش آبکاری الکتریکی صورت می‌پذیرد.

مطالعات زیادی در زمینه تولید و مشخصه‌یابی پوشش‌های کامپوزیتی زمینه نیکل به روش آبکاری انجام شده است. در این پوشش‌ها از ذرات اکسیدی، کاربیدی و نیتریدی به عنوان ذرات تقویت کننده استفاده می‌شود. در این پژوهش‌ها تاثیر شرایط آبکاری از قبیل دانسیته جریان، بر میزان هم‌نشست ذرات درون پوشش، تاثیر اندازه ذرات بر خواص پوشش مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش و سختی این پوشش‌ها نیز ارزیابی شده است [۶-۹]. دسته دیگر این از پژوهش‌ها به بررسی تاثیر *CNT* بر ریزساختار، مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش و سختی پوشش نیکل پرداخته‌اند [۱۰-۲۰].

در بررسی‌ها و مطالعات انجام شده، به نظر می‌رسد که تاکنون در مورد اثر *CNT* بر خواص، مورفولوژی و سختی پوشش‌های کامپوزیتی *Ni-SiC* تحقیقی صورت پذیرفته است. هدف از انجام این پروژه بررسی خواص سایشی، سختی و مورفولوژی پوشش نانو کامپوزیتی *Ni-SiC-CNT* اعمال شده بر روی زیرلایه آلومینیومی است. انتظار می‌رود استفاده از *CNT* خواص سایشی پوشش کامپوزیتی *Ni-SiC* را بهبود بخشد.

فصل دوم

مروری بر مطالب

۱-۲ فرآیند آبکاری الکتریکی

شاید به جرات بتوان تاریخچه آبکاری را به ۲۰۰۰ سال قبل نسبت داد. گفته می‌شود که در زمان اشکانیان برای نخستین بار از باتری اشکانی برای آبکاری طلا استفاده می‌شده است. به طوری که محلول آبکاری طلا با استفاده از اسیدهای *Humic* (اسیدهای پیچیده ی آلی که در طبیعت به علت تجزیه ی سبزی های پلاسیده بوجود می‌آید) و یا با استفاده از چرم فاسد و دباغی نشده حیوانات ساخته می‌شده است. در این فرضیه که به فرضیه کونینگ^۱ مشهور است توضیحاتی در مورد نحوه انجام فرآیند آبکاری طلا با استفاده از این باتری آورده شده است [۲۱].

شیمی دان ایتالیایی، لویجی برونگاتلی^۲، فرآیند آبکاری را در سال ۱۸۰۵ انجام داد. برونگاتلی فرآیند رسوب‌دهی الکتروشیمیایی طلا را با استفاده از پیل ولتایی انجام داد. ۴۰ سال بعد جان رایت^۳ از بیرمنگهام انگلیس کشف نمود که پتاسیم سیانید الکتروولت مناسبی برای آبکاری طلا و نقره است. دیگر مخترعین نیز کارهای مشابهی را انجام دادند. اختراعات متعددی در زمینه فرآیند آبکاری در سال ۱۸۴۰ به ثبت رسید. خانواده الینگتون^۴ برای اولین بار در زمینه فرآیند آبکاری اختراع به ثبت رساندند. بنابراین فرآیند آبکاری از دیرباز تاکنون نقش بسیاری مهمی را در صنعت مهندسی سطح ایفا نموده است. روش‌های الکتروشیمیایی ایجاد پوشش‌های فلزی بسیار مورد توجه است چرا که با

1 Köning

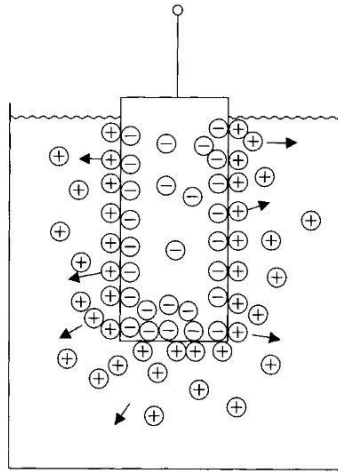
2 Luigi Brugnatelli

3 John Write

4 Elington

تغییر شرایط آزمایشگاهی به میزان بسیار زیادی قابل کنترل است. لایه‌های فلزی، آلیاژی، و کامپوزیتی را می‌توان به روش الکتروشیمیایی به صورت لایه‌های چند جزئی رسوب داد [۲۲].

فرآیند رسوب‌دهی فلز می‌تواند به وسیله جریان الکتریکی از یک منبع خارجی یا به وسیله افزودن کاهنده‌های بسیار قوی که واکنش کاتدی-آندی را ایجاد می‌کنند، صورت پذیرد. بسته به این که از کدام روش برای این کار استفاده می‌شود به این فرآیندها رسوب‌دهی الکتروشیمیایی یا آبکاری یا رسوب‌دهی به روش الکترولس گفته می‌شود. مبانی فرآیند آبکاری فلز در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود زمانی که فلز وارد محلول الکترولیت می‌شود، تحت شرایط خاصی یک انحلال خودبه‌خود رخ می‌دهد که به موجب آن، اتم‌های فلز از ساختار فلز جدا شده و یون‌های باردار مثبت (کاتیون) تشکیل می‌دهند و به درون الکترولیت می‌روند.



شکل ۱-۲. بوجود آمدن خودبخود بار در فصل مشترک فلز-محلول برای یک فلز غوطه‌ور شده درون الکترولیت [۱].

در نتیجه این انحلال آندی، مقدار زیادی از بار مثبت در فاصله بسیار نزدیک از الکتروود فلزی ایجاد می‌گردد. با حرکت این یون‌ها، میزان مساوی از بار مخالف منفی به جا می‌ماند. جذب بار الکترواستاتیک اثری مخالف داشته و یون‌های با بار مثبت را به سمت فلز با بار منفی می‌کشاند. این فرآیند که می‌توان آن را به عنوان یک تعادل پویا تعریف نمود به صورت معادله (۱-۲) نشان داده می‌شود:



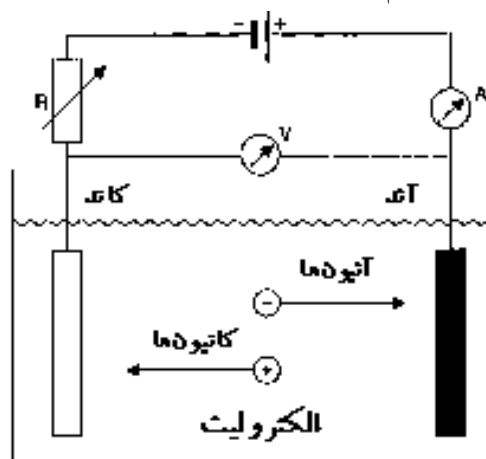
پیکان دو جهته به این معنی است که تعادل در دو جهت واکنش با نرخ برابر بوجود می‌آید. اختلاف پتانسیل $\Delta\varphi = \varepsilon_{Me}/\varepsilon_{MeZ^{+}}$ (که گاهی اوقات به عنوان اختلاف پتانسیل فلز-محلول شناخته می‌شود) برای یک فلز خاص، غوطه‌ور شده درون محلول با ترکیب استاندارد، pH و دمای مشخص، ثابت است.

فرآیند انحلال آندی و نشست فلز بر کاتد شامل انتقال بار بوده در نتیجه می‌توان برای آند و کاتد جریان الکتریکی

تعریف نمود که آن را به ترتیب به صورت I_a و I_c نشان می‌دهند. در حالت تعادل جریان کاتدی و آندی برابر بوده و در نتیجه هیچ شار خالصی از جریان وجود نخواهد داشت. در حالت تعادل هیچ واکنش خالصی رخ نخواهد داد ولی چنانچه فلز به یک مدار باز متصل نباشد، برای نمونه به یک منبع تامین الکترون وصل باشد این تعادل به هم می‌خورد، و الکترون‌های بیشتری به فلز منتقل می‌شود و کاتیون‌های بیشتری را به خود جذب می‌کند. در این صورت فلز کاتدی بوده و عمل رسوب‌دهی بر آن رخ می‌دهد. در صورتی که فلز به یک چاه الکترون^۱ متصل باشد، فلز دارای بار مثبت شده و به عبارت دیگر آندی شده و دفع کاتیون‌ها و در نتیجه انحلال آندی تقویت می‌شود. حالت اول اساس آبرکاری الکتریکی را تشکیل می‌دهد. این فرآیند با استفاده از جریان مستقیم و پالسی صورت می‌پذیرد.

۱-۱-۲ رسوب‌دهی الکتروشیمیایی بوسیله جریان مستقیم

الکترولیز جریان مستقیم در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. در این شکل دو الکتروود درون محلول غوطه ور شده و به خروجی منبع جریان متصل شده‌اند. کاتد که بر آن فرآیند رسوب‌دهی اتفاق می‌افتد می‌تواند فلز، نیمه رسانا یا غیر فلز رسانا مانند گرافیت باشد. در این شکل هم‌چنین آند نیز نشان داده شده است.



شکل ۲-۲. اجزای اصلی سیستم الکترولیز جریان مستقیم [۱].

هدف اولیه استفاده از آند، برقراری مدار الکتریکی است. این الکتروود هم‌چنین وظیفه برقراری تعادل و خنثی بودن محلول از لحاظ بار الکتریکی پس از نشست یون‌ها را به عهده دارد. البته مورد دوم ممکن است همیشه برقرار نباشد. آندها به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند. اولین دسته از این آندها، فدا شونده بوده و هم جنس با پوشش مورد نظر انتخاب می‌شود. برای نمونه برای ایجاد پوشش نیکل، جنس آند باید نیکل خالص باشد. دسته دوم، آندهای دائمی هستند که معمولاً از جنس پلاتین پوشش داده شده با تیتانیوم ساخته می‌شود.

استفاده از منبع جریان خارجی، تعادل نشان داده شده در رابطه (۱-۲) را به هم می‌زند و بسته به قطبیت منبع، واکنش

^۱ Electron sink

به سمت راست یا چپ منحرف می شود. آند حل می شود و کاتیون های شکل گرفته به سمت کاتد حرکت می کنند. آنیون های موجود نیز به سمت آند حرکت می نمایند. بنابراین به واسطه حرکت این یون ها در محلول، جریان الکتریکی برقرار می گردد. این جریان تحت عنوان جریان یونی یا هدایت الکترولیتیک شناخته می شود. یکی از موارد مهم در فرآیند رسوب دهی الکتروشیمیایی مکانیزمی که بر اساس آن فلز از محلول به کاتد تحویل داده می شود و هم چنین روش هایی که بر اساس آن می توان کاتیون های از دست رفته در محلول را جبران نمود، است. نرخی که در آن یون های تازه به کاتد تحویل داده می شوند به شرایط هیدرودینامیک غالب در سطح یا نزدیک کاتد بستگی دارد. یون ها تحت سه مکانیزم اصلی به سطح الکتروود می رسند که عبارتند از:

۱. مهاجرت (تحت شیب پتانسیلی)
۲. نفوذ (تحت شیب غلظتی)
۳. هم رفت (بدلیل حرکت مایع محلول)

الف- مهاجرت

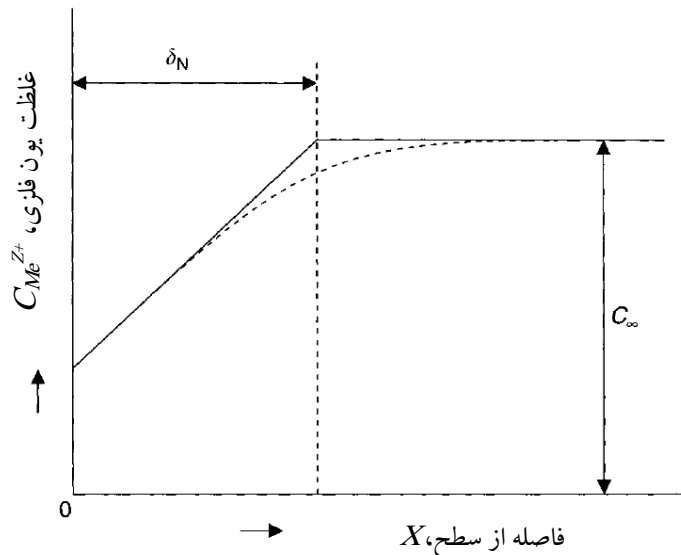
ولتاژ اعمالی بین دو الکتروود در یک محلول الکترولیت، یک میدان الکتریکی بین آن ها ایجاد می کند. با فرض این که هدایت الکترولیتی محلول در تمام نقاط آن یکسان باشد، شیب پتانسیلی به وسیله تقسیم نمودن ولتاژ اعمالی بین دو الکتروود بر فاصله بین دو الکتروود به دست می آید. بزرگی این شیب، نرخ حرکت یون ها در محلول را مشخص می کند. در این جا عبارت "مهاجرت" به عنوان حرکت لایه باردار در محلول تحت شیب پتانسیل تعریف می گردد. این اثر در سرتاسر محلول برقرار است و به واسطه آن آنیون به سمت آند و کاتیون به سمت کاتد حرکت می نماید. یون ها بسته به طبیعت یون، ویسکوزیته محلول و شیب پتانسیلی دارای یک سرعت مشخص خواهند بود. میزان این سرعت بسیار پایین و در حد میکرومتر بر ثانیه است.

ب- هم رفت

برخلاف مکانیزم انتقال قبلی و بعدی که شامل حرکت گونه ها در محلول است، هم رفت را می توان حرکت واکنش دهنده ها و ... را به همراه الکترولیت نامید. این مکانیزم بوسیله حرکت توده محلول، مثلاً به وسیله هم زدن، یا به وسیله گردش طبیعی یک مایع به دلیل تفاوت در دانسیته ناشی از اثرات حرارتی، بوجود می آید. این مکانیزم در ناحیه بسیار نزدیک به الکتروود که در آنجا لایه نفوذی تشکیل می شود بسیار ناچیز است. در لایه نفوذی انتقال عوامل بیشتر به واسطه نفوذ اتفاق می افتد. حرکت هم رفت نه تنها عوامل را تا لایه نفوذی انتقال می دهد، بلکه ضخامت لایه نفوذی توسط جریان هم رفت تعیین می گردد. هر چه میزان هم زدن شدیدتر باشد، ضخامت لایه نفوذی نیز کمتر می شود.

ج- نفوذ

انتقال لایه باردار و غیر باردار از لایه نفوذی، یک مرحله مانده به انتقال نهایی بار به الکتروود محسوب می‌شود. در این جا نیرو محرکه شیب غلظتی است که به صورت رسمی تر به صورت پتانسیل شیمیایی نشان داده می‌شود. غلظت گونه‌ها در سطح الکتروود، در حالت مدار باز بسیار بیشتر از توده محلول است. با این وجود زمانی که جریان برقرار باشد، لایه شیمیایی با انجام واکنش از سطح الکتروود حذف شده و یک شیب غلظتی بوجود می‌آید. تمایل حرکت نمونه‌ها از نواحی با غلظت بالا به نواحی با غلظت پایین عاملی است که فرآیند نفوذ را پیش می‌برد و در قانون نفوذ فیک آورده شده است. در یک محلول ثابت و بدون هم رفت اجباری، ضخامت لایه نفوذی برابر 0.2 میلیمتر خواهد بود. تحت شرایط هم رفت اجباری این ضخامت به 0.001 میلیمتر کاهش می‌یابد. معمولاً فرض می‌شود تنها مکانیزم انتقال در لایه نفوذی، مکانیزم نفوذ است.



شکل ۲-۳. پروفیل غلظت یون فلزی به عنوان تابعی از فاصله از سطح کاتد [۱].

پروفیل فاصله-غلظت در شکل ۲-۳ رسم شده است. در این شکل، الکتروود به عنوان یک خط عمودی در سمت چپ نمودار نشان داده است. خط چین عمودی نشان دهنده لبه بیرونی لایه غلظتی است. با توجه به این شکل، غلظت واکنش دهنده‌ها با نزدیک شدن به سطح کاتد کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، واکنش دهنده‌ها پس از رسیدن به سطح کاتد به سرعت واکنش می‌دهند [۱].

۲-۱-۲ آبرکاری الکتریکی نیکل

همان‌گونه که قبلاً بیان شد، آبرکاری نیکل یکی از رایج‌ترین فرآیندهای آبرکاری فلزات است و بیش از نیمی از نیکل تولید شده در دنیا به شکل پوشش مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل استفاده زیاد از این فلز ترکیب خواص متنوع و مفیدی است که این فلز از خود نشان می‌دهد. یکی از مزایای این فلز تمایل به تشکیل لایه روئین است که خاصیت مقاومت به خوردگی در بسیاری از محیط‌ها را به وجود می‌آورد. در زیر به مزایای این فلز پرداخته می‌شود: