پوشش نانو کامپوزیتی Ni-WC-TiO₂ بر زیرلایه فولادی به روش آبکاری پالسی معکوس و مقایسه آن با آبکاری پالسی

مجتبی بابائی نژاد'، منصور فرزام'*، هادی اسکندری"، ایمان دانایی ٔ

کارشناسی ارشد، ^{۲، ۳ و *}دانشیار، مهندسی ایمنی و بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران
* نویسنده مسئول: farzam@put.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱

چکیدہ

در این مقاله، پوشش Ni-WC-TiO2 با جریان پالسی (' PC) بر روی نمونههای St-37 (۱ تا ۵) و با جریان پالسی معکوس (* PRC) بر روی نمونههای (۶ تا ۹) بوجود آمدند. به منظور بررسی مورفولوژی پوششها از تصاویر میکروسکوپی روبشی انتشار میدانی (* FE-SEM) استفاده شد. پوشش حاصل از جریان پالسی معکوس دارای یکنواختی و ریزدانگی بیشتری نسبت به جریان پالسی می باشد. نتایج ^{*} EDS نشان داد که عناصر کربن، تنگستن، تیتانیوم، اکسیژن و نیکل در هر دو نوع جریان آبکاری بر روی سطح تشکیل شده اند. عملکرد ضد خوردگی پوششها از طریق آزمونهای ^۵ EIS و پلاریزاسیون بررسی گردید. تحلیل نتایج این آزمونها بهبود عملکرد ضد خوردگی نمونههای PRC را نسبت به نمونههای PC نشان داد. نتایج حاکی از این بود که صورنانوذرات WC و CD باعث کاهش مقاومت انتقال بار (R_c)، نمونه ۶، (Chm.cm²) مین داد. نتایج حاکی از این بود که شد، این نمونه همچنین دارای کمترین مقاومت پلاریزاسیون (R_c)، نمونه ۶، (Chm.cm²) و پیشترین جریان خوردگی (مونه نسبت به دیگر نمونههای مورد آزمون می باشد. کاهش مقاومت انتقال بار (R_c)، نمونه ۶، (Chm.cm²) و پیشترین جریان خوردگی (مونه نسبت به دیگر نمونههای مورد آزمون می باشد. کاهش دانسیته جریان از ۴.۰ به ۲۰۰ آمپر، باعث توزیع غیریکنواخت نانوذرات و نسبت به دیگر نمونههای مورد آزمون می باشد. کاهش دانسیته جریان از ۴.۰ به ۲۰۰ آمپر، باعث توزیع غیریکنواخت نانوذرات و میشا مدن اندازه کریستال ها در این پوشش شد که در نهایت باعث افزایش دانسیته جریان خوردگی در این نمونه شد. طبق نتایج مشاهده شد که نمونه (پوشش حاصل از جریان پالسی معکوس) دارای عملکرد ضد خوردگی بهتری نسبت به سایر نمونهها می باشد (2مین می بود که سختی نمونه ها در جریان ایکاری PRC پیشتر از جریان آبکاری است.

کلیدواژه: پوشش نانو کامپوزیتی، رسوب دهی الکتروشیمیایی، جریان پالسی و پالسی معکوس، کاربید تنگستن

¹ Pulsed current

² Pulsed reverse current

³ Field emission scanning electron microscopy

⁴ Energy dispersive spectroscopy

⁵ Electrochemical impedance spectroscopy

Ni-WC-TiO₂ Nanocomposite Coating on Steel Substrate by Reverse Pulse Plating Method and its Comparison with Pulse Plating

M. Babaei Nezhad¹, M. Farzam^{2*}, H. Eskandary³, I. Danaee⁴

¹ M.Sc. Student, ^{2, 3, 4} Associate Professor, Safety and Technical Inspection Engineering, Petroleum University of Technology.

* Corresponding Author: farzam@put.ac.ir

Submission: 2023, 03, 21 Acceptance: 2023, 07, 22

Abstract

In this study, Ni-WC-TiO₂ coating was produced by pulsed current (PC) on St-37 samples (1-5) and by pulsed reverse current (PRC) on samples (6-9). In order to investigate the morphology of the coatings, field emission scanning microscopic (FE-SEM) images were used. The coating resulting from the pulsed reverse current has more uniformity and fineness than the pulsed current. The EDS results showed that Carbon, tungsten, titanium, oxygen and nickel elements were formed on the surface in both plating currents. The anti-corrosion performance of the coatings was investigated through EIS and polarization tests. The analysis of the results of these tests showed the improvement of the anti-corrosion performance of PRC samples compared to PC samples. The results indicated that the presence of WC and TiO2 nanoparticles decreased the R_{ct} (charge transfer resistance) of sample 6, R_{ct} =99.77 (ohm.cm²) compared to other samples, this sample also has the lowest R_p (polarization resistance), $R_p=233.57$ (ohm.cm²) and the highest icorr (corrosion current) is i_{corr}=3.46E-5 (μ A/cm²) compared to other tested samples. Decreasing the current density from 0.4 to 0.3 amps caused the non-uniform distribution of nanoparticles and the crystal size in this coating and finally increased the corrosion current density in the sample. According to the results, it was observed that sample 9 (pulse reverse current coating) has better anti-corrosion performance than other samples, R_P =4933.1 (ohm.cm²). Vickers hardness test was used to check the mechanical properties of the coatings and the results indicated that the hardness of the samples in the PRC plating current is higher than that of the PC plating current.

Keywords: Nano-composite coating, Electrodeposition, Pulsed current and Pulsed reverse current, Tungsten carbide

۱_ مقدمه

قطعات صنعتي در معرض محيطهاي خورنده و نيروهاي ييچيده ی مکانیکی، دمایی، سایشی و ... میباشند که به ویژه در سطح آنها ظاهر میشوند [1]. اعمال یوشش های نانو کامیوزیتی بر روی سطح یکی از روشهای بهبود عیوب سطحی ناشی از سایش، خوردگی، خستگی و یا شکست می باشد [2]. از جمله عوامل خورنده در صنایع نفت و گاز میتوان دی اکسید کربن, هیدروژن, نمکها و آب را نام برد. با افزایش در دسترس بودن نانوذرات در سالهای اخیر، ایجاد پوششهای مستحکم شده با نانوذرات در حال رشد است. ذرات با ابعاد نانو، رسوب دهی يوشش های لايه نازک را امکان يذير ساخته اند. به نحوی که ممكن است در ساخت ابزار آلات برش، پاتاقانها، اجزاي موتور و خودروسازی مورد توجه زیادی قرار بگیرند[4] ,[3]. پوشش های کامپوزیتی زمینه فلزی نسل جدیدی از پوشش ها هستند که به دلیل خواص منحصر به فردی مانند مقاومت به سایش خوب، تمایل به خوردگی کم و سختی بالا امروزه کاربرد زیادی دارند و توجه زیادی را در صنعت و علم سطوح به خود اختصاص داده اند[6] ,[1]. این پوششها از دو جز تشكيل شده اند. ۱.زمينه ۲ .تقويت كننده ۲ . نيكل يكي از مناسب ترین و معمول ترین فلزات است که به عنوان زمینه در پوشش های کامپوزیتی به کار میرود که دلیل آن را میتوان سهولت آبکاری کنترل شده آن و خواص ضد خوردگی و چسبندگی مطلوب آن دانست. ذرات تقویت کننده میتوانند اکسیدها (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃)، کاربیدها(SiC,WC)، الماس ويا تركيبي از اين مواد باشند [7] . [6] . قرار گرفتن نانوذرات تقویت کننده در زمینه نیکل، باعث

قرار گرفتن نانودرات نفویت کنده در رمینه نیکل، باعت افزایش مکانهای جوانه زنی نیکل و ریزدانه شدن آن و همچنین

اصلاح جهت گیری ترجیحی دانه ها و تغییر خواص آن ها می شود [3]. با کنترل شرایط فرآیند، امکان رسیدن به یک پوشش نانو کامپوزیتی دارای زمینه ای با بلورهای نانومتری وجود دارد. این پوشش ها به روش های مختلفی مانند رسوب فیزیکی بخار ^۳، رسوب شیمیایی بخار^۴ و رسوبدهی الکتریکی^۵ (آبکاری الکتریکی^۶) ساخته می شوند که از بین آن ها آبکاری الکتریکی به دلیل مزایای زیاد روش مناسبی میباشد. آبکاری الکتریکی فرایندی است که در آن با استفاده از جریان برق لایه ناز کی از یک فلز روی سطح فلزی دیگر رسوب داده میشود. اعمال جربان مستقیم (^۷ DC), جریان مستقیم پالسی (PDC)

^۸) و جریان معکوس پالسی (PRC) میباشند[2]. در آبکاری با جریان مستقیم تنها با تغییر پارامتر چگالی جریان میتوان رفتار مکانیکی و ضد خوردگی پوششها را بررسی کرد, اما در آبکاری جریان پالسی میتوان با استفاده از پارامترهای زمان روشن (^۹ Ton)، زمان خاموش (^۱ Toff) و چگالی جریان اوج Ip خواص پوشش را بررسی کرد که این یکی از مزیتهای اصلی این روش میباشد. جریانهای پالسی را میتوان به دو دسته کلی تک قطبی و دوقطبی تقسیم کرد. جریانهای پالسی تک قطبی که تمام پالسها دارای یک قطبیت میباشند. به جریان اعمالی به جهت سادگی

همان جریان پالسی(PC) گفته می شود. هر پالس مرکب از یک زمان وصل یا Ton که پتانسیل یا جریان اعمال می شود و یک زمان قطع یا Toff که جریان صفر اعمال می شود، می باشد. در جریان های پالسی دوقطبی که قطبیت پالس ها در مدت زمان فرآیند تغییر داده می شود و در بازه هایی جریان کاتدی و در

- ¹ Matrix
- ² Reinforcement
- ³ Physical vapor deposition
- ⁴Chemical vapor deposition
- ⁵ Electrodeposition
- ⁶ Electroplating
- ⁷ Direct current
- ⁸ Pulsed direct current
- ⁹ On-time
- ¹⁰ Off-time

٩

بازههایی جریان آندی اعمال می شود. به جریان اعمالی در این حالت جریان پالسی معکوس (PRC) گفته میشود. در این حالت مدت زمانی را که جریان کاتدی اعمال میشود را با ^۱ Tc نشان میدهند ولی به جای T_{off} یک زمان انحلال وجود دارد که در آن جریان آندی اعمال می شود که مشخصه آن T_{AA} ۲ می باشد [8].

در آبکاری با جریان پالسی مسقیم یا معکوس، پتانسیل و یا جريان به سرعت بين دو مقدار مختلف متناوب مي شود كه منجر به یک سری پالس با دامنه، مدت و قطبیت یکسان می شود. در اين روش با تنظيم دامنه و عرض پالس ميتوان تر كيب و ضخامت لايه رسوب را كنترل كرد. با انجام اين كار ميتوانيم تعداد دانههای روی سطح را به شدت افزایش دهیم و رسوبات ریزتر و خواص مکانیکی بهتر نسبت به پوششهای معمولی تولید كنيم [9].

تحقیقات نشان داده است زمانیکه از جریان پالسی معکوس استفاده مي گردد، پوشش از خواص مطلوب تري مانند سختي، چسبندگی، مقاومت به خوردگی و سایش، نسبت به جریان مستقیم و پالسی مستقیم برخوردار است. همچنین پوششهای تولید شده به این روش نرم، متراکم، ریزدانه و تقریبا بدون تخلخل و حفره هستند. اخیرا کسید فلزات واسطه از جمله دی اکسید تیتانیوم (TiO₂) توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. TiO2 به عنوان یک نیمه هادی مهم از خواص اپتیکی، الکترونیکی، مقاومت به خوردگی و زیست ساز گاری برخوردار است. این ماده به عنوان یک فوتو کاتالیست و ترکیب خود تمیزشونده جهت تجزیه آلایندههای هوا به کار میرود. ذرات TiO₂ مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی یوشش زمینه نیکل را بطور چشمگیری بهبود میبخشد. پژوهشگران پوشش Ni-TiO₂ را تولید کردند و مشاهده کردند که دی اکسید تیتانیوم سختی، مقاومت به سایش و خوردگی یوشش زمینه نیکلی را افزایش میدهد[2]. ذرات WC به دلیل سختی و نقطه ذوب بالا، می توانند سختی و خواص تریبولوژیکی پوشش را بهبود بخشند. در تحقیقات گزارش شده است، وجود ذرات

WC در پوشش کامپوزیتی Ni-WC باعث بوجود آمدن مناطق جدید جوانه زنی می شود، که این امر سبب ریزتر شدن ساختار و کاهش تخلخل پوشش نسبت به حالت بدون WC خواهد شد. همچنین وجود ذرات سخت WC موجود در زمینه، سبب میشود که میزان تغییر فرم پلاستیکی زمینه پوشش کمتر شده و ساختار پوشش نیز ریزتر شود. لذا سختی پوشش افزایش چشمگیری پیدا می کند[1]. پژوهشگران زیادی به تولید پوششهای کامپوزیتی زمینه نیکلی حاوی ترکیبات مختلف نانوذرات پرداختند و خواص آنها را مورد بررسی قرار داده اند که نتایج برخی از این پژوهش ها بدین صورت میباشند:

سبزی و همکاران، تاثیر چگالی جریان بر توزیع نانوذرات ZrO₂ و رفتار خوردگی یوشش Ni-Cu-ZrO₂ را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که افزایش چگالی جریان منجر به کاهش اندازه دانهها و افزایش جریان خوردگی در پوشش میشود. همچنین نتایج آنالیز EDS نشان داد که افزایش دانسیته جریان منجر به افزایش درصد وزنی نیکل و کاهش درصد وزنی ZrO₂ در يوشش ميشود [10] .

بحرالعلوم و همکاران خواص مکانیکی پوشش Ni-Al₂O₃ را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شد که با افزایش چگالی جریان، سختی پوششهای کامپوزیت -Ni Al₂O₃ كاهش مىيابد. همچنين در اين تحقيق اثر افزايش سیکل کاری و فرکانس بر روی پوشش بررسی شد و نتایج حاکی از آن بود که با افزایش سیکل کاری و فرکانس میزان سختى در پوشش كاهش مىيابد[11].

وانگ و همکاران، پوشش های Ni-ZrO₂ را با جریان های آبکاری الکتریکی (PC، DC و PRC) تولید کردند. پوشش های جریان PC در مقایسه با پوشش های جریانی (DC, PRC) مورفولوژی ریزتر و فشرده تری داشتند. سختی يوششهاي كاميوزيت با جريان يالسي معكوس بيشتر از جریانهای PC و DC بود که به دلیل ترکیب پالایش دانه با مکانیزمهال-یچ و تقویت پراکندگی با مکانیزم Orowan مى باشد [12]. 1.

¹ Cathodic time

² Anodic time

فرزام و همکاران، به بررسی مقاومت خوردگی و سایش پوشش Ni–TiO2برداختند. ریزسختی این پوشش ها بیشتر از پوشش های نیکل خالص است که به دلیل تقویت پراکندگی ذرات در زمینه پوشش میباشد.پوشش هایNi–TiO2 عمدتاً به دلیل سختی بالا و ضریب اصطکاک پایین مقاومت سایشی بالایی دارند. ذرات TiO2 از خوردگی موضعی به عنوان یک مانع فیزیکی جلو گیری میکند و مقاومت در برابر خوردگی پوشش را بهبود می خشد[13].

سورندر و همکاران، ویژگیهای پوششهای Ni–WC را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش مقدار WC، ضریب اصطکاک این پوشش کاهش و سختی پوشش افزایش یافت[14].

جلالی و همکاران، سختی پوشش نانو کامپوزیت Ni-Co-WC را با آبکاری جریان پالسی معکوس بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش نانوذرات WC، باعث تغییر در مورفولوژی پوشش پایه آلیاژ Ni-Co می شود و اندازه دانه ها کاهش می یابد. همچنین با افزودن ذرات سخت سرامیکی، سختی پوشش از ۳۹۷ ویکرز به ۴۶۱ ویکرز افزایش یافت [15].

از آنجایی که تا به امروز تحقیقی در زمینه تولید پوششهای نانوکامپوزیتی Ni-WC-TiO2 صورت نگرفته است، انتظار میرود این پوششها خواص بهتری نسبت به پوششهای -Ni WC و Ni-TiO2 داشته باشند. لذا در پژوهش حاضر پوششهای Ni-WC-TiO2 به دو روش آبکاری پالسی معکوس و پالسی مستقیم ایجاد شدند و خواص آنها با یکدیگر مقایسه خواهد شدند.

۲_ مواد و روش تحقیق

زیرلایهها از جنس فولاد ST37 با ابعاد cm³ ۵×۲×۱ به عنوان کاتد و نیکل خالص با ابعاد cm³×۴×۵. • به عنوان آند انتخاب

شد. مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش همگی با خلوص بالا ساخت شرکت مرک آلمان میباشند.

آماده سازی سطح

زیرلایه های فولادی با استفاده از استون چربی زدایی شدند، سپس توسط کاغذ سنباده های ۲۲۰ تا ۲۵۰۰، سنباده زنی شدند و سطح نمونه ها با پارچه نمدی پرداخت شد تا به سطح آینه برسند. پس از پولیش کاری به منظور چربی زدایی، سطح هر قطعه به مدت ۲ دقیقه با استفاده از حلال استون شسته شد. سپس جهت اعمال پوشش سطح پشتی نمونه با چسب پلی اتیلنی پوشانده شد. به منظور فعال سازی سطح نمونهها و حذف اکسیدهای سطحی، هر نمونه به مدت یک دقیقه در اسید کلریدریک ۵۰ درصد حجمی قرار داده شد و در نهایت با آب مقطر شسته شدند.

تهیه پوشش

برای آبکاری الکتریکی با جریان پالسی از منبع تغذیه پالسی مدلSL120-PRC ساخت شرکت سیلیکون پاور استفاده گردید. این دستگاه قابلیت ایجاد موج مربعی و مربعی معکوس در محدوده ی ۱۰ تا ۱۰ کیلوهرتز را دارد. نمونههای نیکلی به عنوان آند به قطب مثبت و نمونههای فولادی به عنوان کاتد به قطب منفی منبع تغذیه متصل شدند. آند و کاتد به صورت قطب منفی منبع تغذیه متصل شدند. آند و کاتد به صورت موازی و در فاصله ۵ سانتی متر از یکدیگر در حمام آبکاری قرار گرفتند. قبل از انجام فرآیند آبکاری به جهت اینکه نانوذرات در الکترولیت به صورت یکنواخت توزیع شود، محلول توسط دستگاه آلتراسونیک پروب دار به مدت ۳۰ دقیقه ممگن سازی شد و همچنین در حین عملیات آبکاری از همزن مغناطیسی استفاده شد. شرایط و ترکیب حمام آبکاری در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۱ _ تر کیبات شیمیایی فولاد St-37

ولاد	مس	كربن	منگنز	سيليسيوم	نيكل	كروم	فسفر	گوگرد	آهن
ST3	0.3	0.16	0.3-1.2	0.35	0.18	0.3	0.025	0.02	

مقدار	حمام
265 g/l	(NiSO4.6H2O)سولفات نيكل
48 g/l	(NiCl2.6H2O)كلرايد نيكل
30 g/l	(H3BO3)اسيد بوريک
0.1 g/l	(SDS)سديم دودسيل سولفات
2.5 g/l	(TiO2) تيتانيا
2.5 g/l	(WC) کاربید تنگستن
45 °C	دما
4.5	pН

جدول۲ ـ شرایط و ترکیب حمام رسوب دهنده پوشش نانوکامپوزیتی Ni-WC-TiO2

شده در هر آزمون بر روی سطح مقطع نمونهها ۱۰۰ گرم و مدت زمان اعمال بار ۱۵ ثانیه بود. برای به دست آوردن سختی پوششها در هر نمونه، سختی سه نقطه مختلف بدست آمد و میانگین این سه نقطه به عنوان سختی پوشش در نظر گرفته شد.

آزمون امپدانس

آزمون امپدانس با جریان AC توسط دستگاه اتولب آزمون امپدانس با جریان PGSTA 302N Potentiastat/Galvanostat به منظور انجام آزمون امپدانس الکتروشیمیایی، نمونههای آماده سازی شده قبل از آزمون با اتانول /۹۶ شستشو داده شدند. در این آزمون از منبع ولتاژ متناوب با دامنه ۱۰m۷ و در محدوده ی فرکانسی ۱۰KHz تا ۱۰MHz استفاده شد. پاسخ امپدانس نمونهها پس از ۳۰ دقیقه غوطه وری در محلول خورنده %ACI 3.5% حول پتانسیل مدار باز سیستم ثبت شدند. با تشکیل یک سل سه الکترودی (شامل الکترودهای پلاتین به عنوان شمارنده، الکترود کالومل و نمونههای فلزی به عنوان الکترود کاری) آزمون امپدانس الکتروشیمیایی انجام شد.

آزمون پلاريزاسيون تافلي

پس از انجام آزمون امپدانس الکتروشیمیایی بلافاصله آنالیز پلاریزاسیون پتانسیودینامیک انجام گرفت. آزمون پلاریزاسیون توسط دستگاه PGSTAT 302N پلاریزاسیون توسط دستگاه Dotentiostat/Galvanostat نجام شد. تمامی آزمونهای خوردگی در دمای محیط انجام شد. جهت روبش پتانسیل از سمت کاتدی به سمت آندی انتخاب گردید و سرعت روبش جهت جلو گیری از آگلومره شدن نانوذرات از فعال کننده سطحی آنیونی سدیم دودسیل سولفات(SDS) استفاده گردید. جهت تنظیم pH از محلول آمونیاک استفاده گردید. در این فرآیند نمونههای شماره ۱تا ۶ با جریان پالسی مستقیم و نمونههای ۶تا ۹ با جریان پالسی معکوس پوشش دهی شدند. جدول۳ شرایط رسوب دهی نمونهها را نشان میدهد.

آزمونهای شناسایی آزمون FESEM

به منظور بررسی ریزساختار و نحوه توزیع نانوذرات در سطح پوشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل MIRA III ساخت شرکت TE-SCAN استفاده شد. آنالیزهای EDS و MAP نیز با همین میکروسکوپ به منظور شناسایی عناصر موجود درون پوشش در آزمایشگاه بیم گستر تابان انجام گرفت. تصاویر میکروسکوپی پوشش های حاصل از جریان پالسی (نمونههای ۱٫۳٫۹) و پوشش های حاصل از جریان پالسی معکوس (نمونههای ۹٫۹٫۹) با یکدیگر مقایسه شدند و مورت گرفت.

سختي سنجي

از دستگاه (CV 400 dat) از دستگاه Bowers Instrument (CV 400 dat) تحت استانداردASTM E384 برای انجام آزمون سختی پوشش ها استفاده شد. بدین منظور ابتدا پس از تهیه مقطع از پوشش ها و انجام مانت سرد و پولیش، با استفاده از ریزسختی سنجی ویکرز، مقطع پوشش ها مورد سختی قرار گرفت. بار اعمال پتانسیل ۱mv/s در نظر گرفته شد. با تشکیل یک سل سه **۳ ـ نتایج و بحث** الکترودی (شامل الکترودهای پلاتین به عنوان شمارنده، **آزمونهای شناسایی** الکترود کالومل و نمونههای فلزی به عنوان الکترود کاری) تصاویر ریز ساختاری تهیه شده توسط FESEM در شکل ۱ آزمون امپدانس الکتروشیمیایی گرفته شد.

(hr) زمان	On-Time (ms)	Forward- Backward	(A/dm2) چگالی جریان	جریان آبکاری	شماره نمونه
0.5	10	7-3	0.3	PC	1
0.5	100	9-1	0.3	PC	2
0.5	1000	6-4	0.3	PC	3
0.5	10	7-3	0.4	PC	4
0.5	10	7-3	0.5	PC	5
0.5	10	7-3	0.3	PRC	6
0.5	100	9-1	0.3	PRC	7
0.5	1000	6-4	0.3	PRC	8
0.5	10	7-3	0.4	PRC	9

جدول۳ ـ شرایط رسوبدهی الکتریکی پوشش ها



شکل ۱ ـ تصاویر FESEM با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰۰ - جریان پالسی ((الف-۳. آمپر) و (ب-۴. آمپر)) و جـریان پالسی معکـوس ((ج-۳. آمپر))

مطابق شکل ۱ پوشش های نانوکامپوزیتی ساخته شده با جریان PRC یکنواختی بهتر و ساختار دانه ریزتری نسبت به پوشش های بهدست آمده با جریان PC دارند. در هر دو نوع جریان آبکاری (PC,PRC) با افزایش دانسیته جریان اندازه دانه های پوشش نانوکامپوزیتی Ni-WC-TiO2 کوچکتر شده و خود پوشش نیز متراکم تر شده است. در آبکاری با جریان پالسی نرخ جوانه زنی رسوب در حال رشد با دانسیته جریان اعمالی متناسب است. استفاده از دانسیته جریان بالا قادر به تولید پوشش با دانه بندی ریزتر است. نرخ جوانه زنی

$$(\gamma) = k_1 \exp\left(\frac{-k_2}{|\eta|}\right) \tag{1}$$

که در این رابطه K₁ ثابت تناسب، K₂ حاوی IP است، که میزان انرژی مورد نیاز برای جوانه زنی را مشخص می کند و η اضافه ولتاژ اعمال شده است. بر اساس این رابطه هر چقدر IP افزایش یابد، اضافه ولتاژ نیز افزایش می یابد و منجر به افزایش نرخ جوانه زنی و ایجاد دانههای ریزتر می شود.

هیستوگرام

برای بررسی توزیع اندازه ذرات قابل مشاهده در تصاویر FESEM، قطر ۵۰ عدد از نانوذرات توسط نرم افزار image Digimizer اندازه گیری شد و هیستو گرام توزیع اندازه ذرات به صورت زیر در شکل۲ آمده است.

نتایج دقیق تر در جدول۴ آورده شده است.



شکل ۲ ـ نمودارهای هیستو گرام جریان پالسی (الف-ب) جریان پالسی معکوس (ج-د)

فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره پیاپی ۴۹ (سال سیزدهم ـ ۳۹)، پاییز ۱۴۰۲

پوشش نانو کامپوزیتی Ni-WC-TiO2 بر زیرلایه فولادی به روش آبکاری پالسی معکوس و مقایسه آن با آبکاری ...

مربوط به جریان پالسی مستقیم (نمونه۴) است. برای بررسی آنالیز عنصری و پراکندگی عناصر موجود در پوشش نانوکامپوزیتی PC-TiO₂ جریانهای آبکاری (PC و PRC)، از آزمونهای EDS و MAP استفاده گردید. با توجه به شکل۲ و جدول۴ میتوان نتیجه گرفت که اندازه نانوذرات در جریان پالسی معکوس ریزتر از جریان پالسی مستقیم است. همچنین کوچکترین اندازه نانوذره مربوط به جریان پالسی معکوس (نمونه ۹) و بزرگترین اندازه نانوذره

نانو کامپوزیتی Ni-WC-TiO ₂	زه ذرات در پوشش	رامترهای توزیع اندا	جدول ۴ _ پا
---------------------------------------	-----------------	---------------------	-------------

بزرگترین اندازه ذره (nm)	کوچکترین اندازه ذره (nm)	انحراف معیار (nm)	اندازه میانگین ذرات (nm)	تعداد اندازه ^ع یری دانهها در تصاویر	شماره نمونه
356.89	81.22	63.24	172.44	50	1
432.42	41.65	74.74	217.25	50	4
123.56	45.45	15.74	85.96	50	5
184.20	33.16	32.02	89.33	50	6
85.98	33.64	12.80	53.23	50	9



شکل۳ ـ طیف EDS و آنالیز کمی برای جریان آبکاری PC (نمونه ۱)



شکل۴ ـ طيف EDS و آناليز کميبراي جريان آبکاري PC (نمونه۶)



شکل۵ ـ تصاویر نقشه آنالیز عنصری مربوط به جریان پالسی (نمونه ۱)



شکل۶ ـ تصاویر نقشه آنالیز عنصری مربوط به جریان پالسی معکوس (نمونه۶)

سطح در روش آبکاری پالسی معکوس می تواند بیشتر باشد. از آنجایی که آزمون ایدکس بصورت نقطه ای است و ترکیب عناصر به محل انجام آزمون وابسته می باشد از آنالیز MAP برای دید واقع بینانه تر استفاده می گردد، چون آزمون از سطح پوشش به عمل می آید. شکل ۵و۶ نقشه و نحوه پراکندگی عناصر تقویت کننده پوشش نانو کامپوزیتی -Ni یراکندگی عناصر نقویت کننده پوشش نانو کامپوزیتی ع-Ni و رسوب بیشتر عنصر نیکل در جریان آبکاری پالسی معکوس نسبت به پالسی مستقیم است.

خواص مکانیکی پوشش سختی سنجی ویکرز در شکل۷ تغییرات سختی پوشش های نانو کامپوزیتی Ni-WC-TiO₂ برای هر دو جریان آبکاری آمده است. شکل ۳و۴ نشان میدهد که در هر دو نوع جریان آبکاری پالسی مشتقیم و پالسی معکوس عناصر نیکل، تنگستن، اکسیژن، تیتانیوم و کربن همگی شناسایی شده اند که مربوط به پوشش نانو کامپوزیتی Ni-WC-TiO2 هستند، که شکل گیری موفقیت آمیز پوشش روی بستر را اثبات میکنند. با توجه به جدول کمیعناصر شناسایی شده با آزمون EDS مشخص میشود که در آبکاری با جریان پالسی (نمونه۱)، بیشترین درصد وزنی عناصر مربوط به تنگستن، اکسیژن و نیکل بوده است و در جریان پالسی معکوس (نمونه۶) عنصر نیکل با درصد وزنی عناصر مربوط به تنگستن، اکسیژن و معکوس بسیار بیشتر از جریان پالسی مستقیم است و با توجه به نزدیک بودن ضریب انبساط حرارتی بین فولاد و نیکل، میتوان به این موضوع پی برد که میزان چسبندگی پوشش به



شکل۷ ـ سختی پوشش های نانو کامپوزیتی Ni-WC-TiO2 برای جریان پالسی (نمونه ها ۱ تا ۳:۳۰ آمپر, نمونه ۴: ۰.۴ آمپـر و نمـونه ۵: ۵. ۰ آمپر) و برای جریان پالسی معکوس (نمونه ۶ و۹و۸ : ۳. ۰ آمپر و نمونه ۹ : ۰.۴ آمپر)

> در شکل ۷ نتایج سختی پوششهای نانو کامپوزیتی قابل مشاهده است. با افزودن ذرات تقویت کننده به زمینه نیکلی و رسوب همزمان در پوشش, ریزسختی پوشش در هر دو نوع جریان آبکاری(PRc PRc) افزایش پیدا می کند. میزان سختی در هر کدام از جریانهای آبکاری تقریبا نزدیک بهم میباشند. همینطور سختی پوششها در جریان پالسی معکوس بیشتر از جریان پالسی مستقیم میباشد. در هر دو نوع جریان آبکاری الکتریکی با افزایش چگالی جریان میزان سختی پوششها کاهش مییابد. . ترتیب سختی نمونهها در جریان

پالسی معکوس و پالسی مستقیم به شرح زیر است: PC((544) 5 < (655) 2 < (652) 2 < (659) 1 : (وبکرز) PRC((وبکرز) 9 < (767) 5 < (768) 5 : (وبکرز) 9 : (وبکرز)

اگر بخواهیم اثر سیکل کاری روی سختی پوششهای نانوکامپوزیتی حاصل از جریانهای پالسی و پالسی معکوس را بصورت جداگانه بررسی کنیم خواهیم داشت: برای جریان پالسی مستقیم:

جدول۵ ـ تاثیر سیکل کاری بر روی سختی پوشش های جریان پالسی

سختی (ویکرز)	سیکل کاری (٪)
639	60
655	70
652	90

19

761 769 768

779 778 776 774 Hardness (Hv) 772 770 768 766 764



شکل ۹ ۔ نمودار سختی پوشش های حاصل از جریان پالسی معکوس بر حسب سیکل کاری

جدول۶ ـ تاثیر سیکل کاری بر روی سختی پوشش های جریان پالسی معکوس

سیکل کاری (٪)

60

70

سختی (ویکرز)

شکل ۸ ـ نمودار سختی پوشش های حاصل جریان پالسی بر حسب سیکل کاری

براي جريان پالسي معكوس:



با توجه به شکلهای ۸و۹ برای هر دو جریان آبکاری با افزایش سیکل کاری، سختی پوششها ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش یافته است که این رفتار یکسان سختی پوششها در جریانهای پالسی و پالسی معکوس را نشان میدهد. اما با این تفاوت که وقتی چرخه کاری از ۷۰٪ به ۹۰٪ افزایش مییابد میزان افت سختی در پوششهای پالسی معکوس نسبت به پالسی مستقیم بیشتر است.

آزمون امپدانس (EIS)

مطابق شکل ۱۰، در منحنی نمونههای اعمال شده در جریان پالسی (به جز نمونه ۲)، یک نیم دایره خازنی و یک نیم دایره القایی قابل مشاهده است که مربوط به مقاومت انتقال بار/پوشش و عنصر القاگر است. با این حال، در نمونههای

اعمال شده با جریان پالسی معکوس (و همچنین در نمونه ۲)، تنها یک حلقه خازنی مربوط به مقاومت انتقال بار / پوشش مشاهده می شود. وجود عنصر القایی و نیم دایره القایی با پدیده های مختلفی مرتبط بوده است که فرآیندهای جذب و واجذب گونه های خورده شده و کاهش یافته در سطح یکی از مهمترین آن ها می باشد. همانطور که در این شکل ها نشان داده شده است، نمونه ۹ دارای یک نیم دایره خازنی با بیشترین شعاع است که نشان دهنده مقاومت بالای این نمونه در برابر خوردگی است و در نمونه ۶، قطر نیم دایره خازنی مترین مقدار بوده است. همچنین مدول امپدانس در کمترین فرکانس (شکل ۱۱) که نماینده مقاومت کلی سیستم در برابر خوردگی است نیز همین روند را برای نمونه ۹ و نمونه ۶ نشان



شکل ۱۰ ـ نمودار نایکوئیست پوشش های حاصل از جریان پالسی (الف) و جرریان پالسی معکوس (ب)



فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره پیاپی ۴۹ (سال سیزدهم ــ ۳۹)، پاییز ۱۴۰۲ پوشش نانو کامپوزیتی Ni-WC-TiO2 بر زیرلایه فولادی به روش آبکاری پالسی معکوس و مقایسه آن با آبکاری …

[Downloaded from journal.ica.ir on 2025-07-24]



شکل۱۱ ـ نمودارهای بد-اندازه امپدانس (الف-جریان پالسی مستقیم _ ج: جریان پالسی معکوس) و نمودارهای بد-زاویه فاز (ب: جریان پالسی مستقیم _ د: جریان پالسی معکوس)

خازن ایده آل از یک عنصر فاز ثابت استفاده شود. دلیل این جایگزینی در بسیاری از موارد مربوط به ناهمگنی سطح در اثر زبری میکروسکوپی سطح الکترود است. انطباق دادههای حاصل از مدل سازی الکتروشیمیایی در (شکل ۱۲) نشان داده مده است. مشاهده می شود که نتایج حاصل از مدلسازی بر روی نتایج آزمایشگاهی به خوبی منطبق شده است که این به معنای صحت نتایج حاصل از این مدلسازی است. نتایج حاصل از این انطباق در جدول7 نشان داده شده است. استفاده از مدار معادل یکی از روش های پذیرفته شده برای بررسی نتایج حاصل از آزمون EIS است. مدار معادل مورد استفاده برای این مدل سازی برای نمونه های دارای عنصر القاگر و فاقد آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این مدار معادل، Rs مقاومت محلول است و همچنین Qct و Rct به ترتیب عنصر فاز ثابت و مقاومت مربوط به پوشش هستند، L عنصر القاگر و RL مقاومت مربوط به این عنصر میباشند. به منظور تطبیق صحیح مدار معادل ارائه شده بر روی داده های آزمایشگاهی امپدانس، لازم است به جای



شکل۱۲ ـ مدار معادل مورد استفاده برای (الف) منحنی حاوی عنصر القاگر و (ب) فاقد عنصر القاگر

RL	L (Henry/cm2)	Rct	n	Qdl (S.secn/cm2)	RS (ohm.cm2)	نمونه
(ohm.cm2)	(;)	(ohm.cm2)		()	()	
21.22	4724	252.90	0.66	3.44 E-4	13.37	1
_	Ι	927.45	0.92	3.74 E-5	7.97	2
161.1	7251	900.23	0.77	2.69 E-4	71.09	3
9.73	5909	178.68	0.63	4.42 E-4	10.03	4
21.87	3974	292.66	0.72	3.01 E-4	13.95	5
_	_	99.77	0.71	2.32 E-4	10.41	6
-	-	1057	0.70	1.13 E-4	8.73	7
_	_	949.6	0.73	4.20 E-5	57.21	8
-	-	2097	0.72	1.05 E-5	7.67	9

جدول ۲ ـ نتایج حاصل از مدلسازی دادههای آزمون امپدانس بر روی مدار معادل های الکتروشیمیایی مناسب

به طور کلی مقاومت انتقال بار را می توان معیاری برای سنجش مقاومت خوردگی کل سیستم در نظر گرفت. با توجه به جدول مشخص می شود که در اینجا نمونه ۹ و سپس نمونههای ۷ و ۸ بیشترین میزان مقاومت انتقال بار را دارند. این نتایج می تواند نشان

دهد که نمونه های اعمال شده در جریان معکوس ساخته شده عموماً مقاومت خوردگی بالاتری نسبت به نمونه های اعمال شده در جریان مستقیم دارند. اما این روند برای نمونه ۶ مشاهده نشد و این نمونه کمترین مقاومت به خوردگی را در بین نمونه ها داشت. از طرفی در بین نمونه های اعمال شده در جریان مستقیم، نمونه ۲ و ۳ دارای بالاترین مقاومت و نمونه ۶ کمترین مقاومت به خوردگی را در بین این نمونه ها داشتند.

آزمون پلاریزاسیون نمودارهای پلاریزاسیون برای بررسی رفتار خوردگی یوشش های نانو کامیوزیتی Ni-WC-TiO2 در شکل ۱۳

نمایش داده شده است.

مطابق شکل ۱۳ کاهش چگالی جریان هر دو شاخه آندی و کاتدی در نمونههای ۲ و ۳ در بین نمونههای اعمال شده با جریان پالسی و همچنین نمونه ۹ در بین نمونههای اعمال شده با جریان پالسی معکوس میتواند بیانگر کاهش سینتیک واکنشهای آندی و کاتدی در این نمونهها یاشد. همچنین از منحنیها مشخص است که نمونه ۶ دارای بالاترین چگالی جریان خوردگی و در نتیجه نرخ خوردگی بالاتری در بین نمونهها است. در جدول۵ پارامترهای حاصل از برون یابی تافل مربوط به آزمون پلاریزاسیون از جمله پتانسیل خوردگی RP دانسیته جریان خوردگی تلاریزاسیون ۹ و شاخه آندی β و کاتدی عβ، مقاومت پلاریزاسیون ۹ و



شکل۱۳ ـ منحنیهای پلاریزاسیون مربوط به پوششهای جریان پالسی (الف) و جریان پالسی معکوس (ب)

در رابطه ۳، Ew، اکی والان وزنی و p دانسیته نمونه ی در حال خورده شدن می باشد. با توجه به نتایج گزارش شده در جدول ۸ مشخص است که نمونه ۹ دارای بالاترین مقاومت به خوردگی در بین تمامی نمونه ها بوده است. این می تواند به این دلیل باشد که در جریان معکوس، افزایش نرخ هسته منجر به اندازه دانه کوچکتر می شود. با کوچکتر شدن مرزهای دانه، نفوذ جریان خورنده به زیرلایه دشوار می شود. از این رو، در جدول۸ مقادیر مقاومت پلاریزاسیون از رابطه ۲و سرعت خوردگی از رابطه۳ به دست آمده است.

$$R_p = (\beta_a \times \beta_c) / (2.303 \times i_{corr} \times (\beta_a)$$
 (۲)
+ β_c))
CR = $3.27 \times 10^{-3} \times i_{corr} \text{ Ew } / \text{ p}$ (۲)

[Downloaded from journal.ica.ir on 2025-07-24]

فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره پیاپی ۴۹ (سال سیزدهم ـ ۳۹)، پاییز ۱۴۰۲ پوشش نانو کامپوزیتی Ni-WC-TiO2 بر زیرلایه فولادی به روش آبکاری پالسی معکوس و مقایسه آن با آبکاری ...

> پوشش های دانه های کوچکتر مقاومت به خوردگی را افزایش دادند. نانوذرات WC و TiO₂ در پوشش های کامپوزیتی جریان PC مقاومت به خوردگی را در مقایسه با پوشش های جریان PC افزایش داد. نمونه ۶ با تایید نتایج آزمایش امپدانس، کمترین مقاومت خوردگی را داشت. همچنین مشخص شده است که در بین نمونه های اعمال شده

با جریان معکوس پس از نمونه ۹، بیشترین مقاومت و در نتیجه کمترین میزان خوردگی متعلق به نمونه ۷ و سپس نمونه ۸ و در بین نمونه های اعمال شده در جریان مستقیم، بیشترین مقاومت در برابر خوردگی است. و بنابراین کمترین میزان خوردگی مربوط به نمونه ۲ و ۳ است که نتایج آزمایش امپدانس را نیز کاملا تایید میکند.

Rp(ohm.cm2)	CR (mm/year)	icorr (µA/cm2)	Ecorr SCE (V)	-βc(v.dec-1)	βa(v.dec-1)	نمونه
249.62	9.6041	0.000881	-0.42671	0.63818	2.4511	1
1640.7	0.18509	1.59E-05	-0.71673	0.1459	0.10242	2
1505.2	0.19355	1.67E-05	-0.37957	0.07252	0.41717	3
296.94	0.34893	3.20E-05	-0.51291	0.038423	0.050838	4
379.42	0.26274	2.41E-05	-0.33892	0.039507	0.045079	5
233.57	0.37772	3.46E-05	-0.45367	0.035338	0.039417	6
2342.2	0.16859	1.45E-05	-0.68847	0.090037	0.59761	7
1458	0.26075	3.35E-05	-0.39939	0.12375	1.2264	8
4933.1	0.1728	1.59E-05	-0.3746	0.2027	1.6109	9

جدول۸ ـ پارامترهای حاصل از برون یابی تافل شاخههای آندی و کاتدی در آزمون پلاریزاسیون

نتيجه گيري

۱- تصاویر FESEM نشان داد که پوشش جریان پالسی معکوس دارای ساختاری یکنواخت تر و ریزدانه تر نسبت به پوشش های جریان پالسی دارد و با افزایش دانسیته جریان پوشش های دانه ریزتری خواهیم داشت.

۲- نتایج هیستو گرام نشان داد که بزر گترین اندازه متوسط نانوذرات برای جریان پالسی۲۱۷.۲۵ نانومتر و کوچکترین اندازه متوسط نانوذرات برای جریان پالسی معکوس ۳۰.۲۳ نانومتر است. همینطور کوچکترین اندازه نانوذره مربوط به جریان پالسی معکوس (نمونه۹) با مقدار ۸۵.۹۸ نانومتر و بزرگترین اندازه نانوذره مربوط به جریان پالسی مستقیم (نمونه۹) با مقدار ۸۵.۹۸ نانومتر و بزرگترین اندازه نانوذره مربوط به جریان پالسی مستقیم (نمونه۹) با مقدار ۸۵.۹۸ نانومتر و بزرگترین اندازه نانوذره مربوط به جریان پالسی مستقیم (نمونه۹) با مقدار ۸۵.۹۸ نانومتر و بزرگترین اندازه نانوذره مربوط به جریان پالسی مستقیم (نمونه۹) با مقدار ۸۹.۹۸ نانومتر و بزرگترین اندازه نانوذره مربوط به جریان پالسی مستقیم (نمونه۹) با مقدار ۲۰۲۲ نانومتر است. ۳ - در بررسی خواص ضد خوردگی با استفاده از آزمون EIS به این نتیجه خواهیم رسید که نمونههای پوشش داده شده با روش آبکاری با جریان پالسی معکوس (PRC) عمدتاً در مقایسه با نمونههای با روش (PC) مقاومت به خوردگی بیشتری دارند. اما مشاهده شد که این فرآیند برای نمونه شماره ۶ رعایت نشده و این نمونه کمترین مقاومت به خوردگی را دارد. همچنین در بین نمونههای با روش (PC) مقاومت به خوردگی بیشتری دارند. اما مشاهده شد که این فرآیند برای نمونه شماره ۶ رعایت نشده و این نمونه کمترین مقاومت به خوردگی را دارد. همچنین در بین نمونههای تهیه شده به روش (PC) مقاومت به خوردگی را دارد. همچنین در بین نمونههای تهیه شده به روش (PC) نمونههای شماره ۲ و ۳ دارای بیشترین مقاومت به خوردگی و نمونه شماره ۴ کمترین مقاومت به خوردگی و نمونه شماره ۴ کمترین مقاومت به خوردگی و نمونه شماره ۴ کمترین مقاومت به خوردگی را در بین این نمونهها دارند.

۴- با استفاده از جدول۵، با توجه به اینکه (R_{ct} (ohm.cm²)) معیاری از مقاومت کل سیستم در برابر خوردگی است، می توان نتیجه گرفت که نمونههای پوشش داده شده با روش (PC) عمدتاً مقاومت به خوردگی بیشتری نسبت به نمونههای با روش (PC) دارند، اما این روند برای نمونه شماره (۶) مشاهده نشد و این نمونه کمترین مقاومت به خوردگی را دارد. به عبارت دیگر بیشترین میزان خوردگی را در بین نمونهها دارد.

۵- با توجه به نتایج جدول ۶ نمونه شماره ۹ دارای بیشترین مقاومت در برابر خوردگی در بین نمونهها و نمونه شماره ۶ دارای کمترین مقاومت در برابر خوردگی در بین نمونهها و نمونه شماره ۶ دارای کمترین مقاومت در برابر خوردگی بوده و این نتایج تایید کننده نتایج آزمون امپدانس خواهد بود.
۶- با مقایسه سختی نمونههای پوشش داده شده با جریان PC و PRC به این نتیجه خواهیم رسید که سختی نمونههای پوشش داده شده با جریان PC و PRC به این نتیجه خواهیم رسید که سختی نمونههای پوشش داده شده با جریان PC و PC به این نتیجه خواهیم رسید که سختی نمونههای پوشش داده شده با جریان PC و PC به این نتیجه خواهیم رسید که سختی نمونههای پوشش داده شده با جریان PC و PC به این نتیجه خواهیم رسید که سختی نمونههای پوشش داده شده با جریان PC و PC به این نتیجه خواهیم رسید که سختی نمونههای پوشش داده شده با جریان PC و PC به این نتیجه خواهیم رسید که سختی نمونههای پوشش داده شده با جریان PC و PC به این نتیجه خواهیم رسید که سختی نمونههای پوشش داده شده با جریان PC و PC به این نتیجه خواهیم رسید که سختی نمونههای پوشش داده شده با جریان PC است و این می تواند به دلیل تر کیب کامل نانوذرات شده با SPC و WC بسیار بیشتر از سختی باشد. همچنین اگر بخواهیم مقایسه ای از سختی پوششها در روشهای CP و PC داشته باشیم، خواهیم

داشت:

مر اجع

۱ (۹۵۵) > ۲(۹۵۹) > ۹(۹۵۹) > ۹(۹۵۹) > ۹(۹۵۹) > ۹(۹۵۹) > ۹(۹۵۹) > ۹(۹۵۹) > ۵(۹۹۹) : (ویکرز) جریان پالسی معکوس ۶ (۷۷۹) > ۷ (۷۶۱) > ۸ (۷۶۱) > ۹(۲۵۶) : (ویکرز) جریان پالسی معکوس ۷- با توجه به نتایج شکل ۸و۹ به این نتیجه خواهیم رسید که در هر دو جریان آبکاری پالسی و پالسی معکوس, با افزایش سیکل کاری, سختی پوشش های نانو کامپوزیتی ابتدا افزایش و سپس کاهش مییابد و میزان افت سختی در پوشش جریان پالسی معکوس بیشتر است.

- S. Rezagholi beigy, A. Dolati, Electrodeposition of Ni-WC Nano-Composite coating, Iranian Corrosion Association, 11th National Corrosion congress 2009.
- [2] S. Mohajery, M. Ghorbani, Electrodeposition of Ni-TiO₂ Nano-Composite coating in Watts bath, 15th National Surface Engineering Seminar, 2013.
- [3] S. Moosavi, M. Zeraati, S. Sharafy, Ni-WC-Al₂O₃ by pulse current, 6th International Conference on Materials Engineering and Metallurgy, 2017.
- [4] M. Farzam, Corrosion engineering and metal protection. 2011.
- [5] A. Noori, M. Farzam, I. Danaee, D. Zaree, The presence of glass flake and cerium nitrate on the anti-corrosion effect of epoxy phenolic, 20th National Congress of Corrosion, 2022.
- [6] H. Khorsand, N. Kiaee, Ni-Al2O3 Nano-Composite coatings, 2th National gas hydrate Conference of Iran 2013.
- [7] M. Surender, B. Balasubramaniam, R.," Wear characterization of electrodeposited Ni–WC composite Coatings", Tribology International, Vol. 37, Pp.743–749, 2004.
- [8] M. Jalali, B. Lotfi, Micro-Structure and hardness of Ni-Co-WC Nano-Composite coating by pulsed reverse current, 3th Conference on materials Engineering's, metallurgy and mining, 2017.
- [9] M.S. Chandrasekar, Malathy Pushpavanam, Pulse and pulse reverse plating—Conceptual, advantages and applications, Elsevier, 2008.
- [10] M, Sabzi, et al., Electroplating process of pulsed current of Ni-Cu-ZrO₂ Nano-composite coatings; the effect of process current density on the distribution of ZrO₂ Nano-particles and corrosion behavior of the coating. The 18th National Surface Engineering Conference. 2018.
- [11] M, Bahrololoom, R. Sani, The influence of pulse plating parameters on the hardness and wear resistance of nickel–alumina composite coatings. Surface and Coatings Technology, 2005. 192(2-3): Pp. 154-163.
- [12] W, Wang, et al., Fabrication and characterization of Ni–ZrO₂ composite nano-coatings by pulse electrodeposition. Scripta Materialia, 2005. 53(5): Pp. 613-618.
- [13] M. Farzam, P. Baghery, et al., Ni–TiO₂ nanocomposite coating with high resistance to corrosion *and wear*. Surface and Coatings Technology, 2010. 204(23): Pp. 3804-3810.
- [14] P. Pal,and A. Ghosh, Influence of TiO₂ Nano-particles on charge carrier transport and cell performance of PMMA-LiClO₄ based Nano-composite electrolytes. Electrochemical Acta, 2018. 260: Pp. 157-167.
- [15] A, Amadeh, et al., Corrosion Behavior of Pulse Electrodeposited Nanostructure Ni–SiC Composite Coatings. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2010. 10(8): Pp. 5383-5388.