

آبکاری آلیاژ روی- نیکل بر روی فولاد با استفاده از جریان منقطع

علیرضا نصر اصفهانی* و محمود حیدرزاده سهی**

گروه علمی فناوری اتصالات، مرکز تحقیقات فناوری و ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۸۱/۷/۲۷- دریافت نسخه نهایی ۸۳/۳/۲۴)

چکیده - در این پژوهش با استفاده از آبکاری الکتریکی به دو روش جریان مستقیم (DC) و منقطع (Pulse)، پوششهای آلیاژی روی-نیکل روی ورقه های فولادی ایجاد شد. آن گاه پوششهای پدید آمده از نظر توپوگرافی، ساختار، ترکیب شیمیایی، یکسانی ضخامت، سختی و رفتار خوردگی مورد بررسی قرار گرفتند. یافته های تحقیق نشان می دهد ضخامت پوششهای حاصل از روش منقطع نسبتاً یکنواخت است. افزایش درصد زمان روشن و نیز کاهش چگالی جریان، باعث افزایش درصد نیکل و سختی این پوششها خواهد شد. نتایج حاصل از تاثیر عوامل زمان روشن و فرکانس بر روی دانه بندی و ساختار پوشش نشان می دهد که کاهش این دو عامل باعث ریزتر شدن ساختار می شود. بررسی رفتار خوردگی پوششها نشان می دهد پوششهایی که حدود ۱۳٪ نیکل دارند، رفتار خوردگی مناسبتری خواهند داشت. همچنین بررسی پوششها توسط میکروسکوپ الکترونی نشان می دهد که چگونگی و سرعت فرایند پوشش دهی تاثیر به سزایی در رفتار خوردگی آنها خواهد داشت. لذا با توجه به اینکه پوششهای منقطع دارای ساختار هرمی مثلثی شکل و کاملاً یکنواخت است، در نتیجه رفتار خوردگی مناسبتری از خود نشان می دهند.

واژگان کلیدی: آبکاری الکتریکی، آبکاری منقطع، آبکاری مستقیم، پوشش دهی الکتریکی، آلیاژ روی- نیکل، گالوانیزه فولاد، زمان روشن، زمان خاموش، مقاومت به خوردگی

Zinc-Nickel Binary Alloy Electrodeposition of Steel Using Pulse Current

A. Nasr-Esfahany and M. Heydarzadeh Sohi

Joining Section, Manufacturing and Technology Research Center, Malek Ashtar University of Technology
Department of Material Engineering, Tehran University

Abstract: Zinc-Nickel electrodeposits have been widely adopted for surface treatment of automobile steel sheet for high corrosion resistance. In this work the effect of pulse parameters on the Zn-Ni alloy electrodeposits was investigated. The hardness, thickness, corrosion resistance and composition of deposits thus produced were investigated. The surface topography of the deposits was also observed in SEM and results are reported. It has been shown that the thickness of the pulse electrodeposits

** - دانشیار

* - مربی

was almost even. The hardness in the pulse electrodeposits increased by increasing the on-time period and by decreasing the current density. It was also noticed that increasing the on-time period increases the nickel content of the deposit. Pulse electrodeposits had fine structure and the structure become finer by reducing the on-time period and pulse frequency. The corrosion behaviors of the deposits were then investigated. The results showed that the corrosion resistance of the DC electrodeposits improves in their nickel content increases. Pulse electrodeposits show the same behavior, but deposits with about 13% nickel show maximum corrosion resistance.

Keywords: Electroplating, Electro deposition, Pulse plating, DC plating, Alloy plating, Zinc-nickel(Zn-Ni), coating, galvanizing, steel, corrosion resistance, on-time, off-time

فهرست علائم

Ni	فلز نیکل	Zn	فلز روی
T	دما	f	فرکانس جریان منقطع
ton	زمان روشن در جریان منقطع	On-Time	درصد زمان روشن در یک سیکل
I_{peak}	حداکثر شدت جریان مورد استفاده در آبکاری منقطع	ic	شدت جریان خوردگی
I	شدت جریان مورد استفاده در آبکاری مستقیم	v	سرعت تغییر ولتاژ در آزمایش خوردگی

۱- مقدمه

فعالیتها در راستای تاثیر پارامترهای آبکاری به طور مجزا بر ساختار پوشش و بهبود رفتار خوردگی آن متمرکز شده است. در صورتی که مطالعه چندان در خصوص تاثیر این پارامترها بر یکنواختی پوشش و امکان حذف اضافه شونده‌ها صورت نگرفته است.

در این تحقیق ضمن به دست آوردن شرایط بهینه برای پوشش دهی آلیاژهای روی-نیکل با دو روش آبکاری الکتریکی مستقیم و منقطع، خواص شیمیایی و فیزیکی آنها به طور یک جا نسبت به یکدیگر مقایسه و تاثیر چگالی جریان بر یکنواختی ضخامت پوشش در نقاط مختلف نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

قبل از فرایند پوشش دهی، ورقه‌هایی از فولاد ساده کربنی با ابعاد $50 \times 20 \times 1$ میلی متر تهیه و فرایندهای آماده‌سازی سطحی شامل اکسید زدایی، چربی شویی و سپس پولیش الکتریکی بر روی آنها انجام گرفت. آن گاه پوشش آلیاژی روی-نیکل با دو روش آبکاری الکتریکی مستقیم و منقطع طبق جدولهای (۱) و (۲) بر روی نمونه‌های مورد نظر ایجاد شد. برای مطالعه یکنواختی پوشش، در هر نمونه در سه نقطه با استفاده از

جریان الکتریسیته مورد استفاده در آبکاری الکتریکی^۱ می‌تواند به دو صورت مستقیم^۲ و منقطع^۳ باشد. بررسیهای انجام شده نشان داده است که پوششهایی که به روش منقطع^۴ ایجاد می‌شوند، نسبت به پوششهای روش مستقیم^۵ دارای مزیتهایی از قبیل مقاومت به خوردگی^۶ و مقاومت سایشی^۷ بالاتر [۲۱ و ۲]، ساختار و ترکیب شیمیایی کنترل شده [۳-۷] و همچنین یکسانی ضخامت و صافی سطح بیشتر [۸ و ۹] خواهد بود.

در پوششهای منقطع علاوه بر عواملی از قبیل دانسیته جریان، دما، pH و غلظت حمام می‌توان پارامترهای درصد زمان روشن، فرکانس و شکل جریان را نیز موثر دانست. در نتیجه کیفیت و ساختار و ترکیب آلیاژی به گونه‌ای است که می‌توان خواص فوق را بهبود بخشید [۳].

آبکاری الکتریکی آلیاژ روی-نیکل به منظور پوشش دهی ورقه‌های فولادی در بدنه اتومبیل به کار می‌رود [۱۰]. این پوششها بالاترین مقاومت به خوردگی را در میان پوششهای آلیاژی روی دارند. تشکیل فاز گاما با ساختار هگزاگونال و دانه‌بندی مثلث القاعده از عمده ترین دلایل افزایش مقاومت به خوردگی این آلیاژها بیان شده است [۱۱-۱۴]. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان دهنده آن است که عموم

جدول ۱- شرایط حمام مورد استفاده در آبکاری آلیاژی روی- نیکل

نوع آبکاری	سولفات روی (gr/lit)	سولفات نیکل (gr/lit)	سولفات سدیم (gr/lit)	دما (°C)	pH
مستقیم (DC)	۲۰۰-۳۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۶۰	۵۰-۶۰	۲
منقطع (Pulse)	۱۱۰	۸۰	۱۵۰	۷۰-۸۰	۲

جدول ۲- نحوه تغییر عوامل مورد استفاده در آبکاری آلیاژی روی- نیکل

شماره نمونه	درصد زمان روشن (%)	زمان روشن در یک سیکل (m sec.)	کل زمان روشن (sec.)	میانگین چگالی جریان (A/dm ²)	پیک چگالی جریان (A/dm ²)	فرکانس (HZ)
D1	-	-	۱۲۰	۲۳	-	-
D2	-	-	۶۰	۱۵	-	-
D3	-	-	۶۰	۱۱	-	-
D4	-	-	۱۲۰	۲۰	-	-
P1	۱۰	۰/۲	۱۲	۶	۶۰	۵۰۰
P2	۱۰	۰/۴	۱۰۰	۶	۶۰	۲۵۰
P3	۴۰	۰/۸	۱۲	۱۸	۴۵	۵۰۰
P4	۴۰	۱/۶	۵۰	۶	۱۵	۲۵۰
P5	۶۰	۰/۶	۷۰	۳۰	۵۰	۱۰۰۰
P6	۶۰	۱/۲	۵۰	۲۴	۴۰	۵۰۰

روش مغناطیسی اندازه گیری ضخامت صورت گرفت. مورفولوژی و ریز ساختار پوشش با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^۸ ارزیابی شد و تحلیل شیمیایی نمونه‌ها نیز به روش EDAX مورد بررسی قرار گرفت. سختی سنجی به روش ویکرز و با استفاده از وزنه ۵۰ گرمی در مقطع پوششها انجام گرفت. رفتار خوردگی تمام نمونه‌ها با روش پلاریزاسیون الکتروشیمیایی^۹ و در شرایط محلول آبی سه درصد کلرور سدیم، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت (تغییر پتانسیل) یک میلی ولت در ثانیه و با حضور الکتروود مرجع جیوه‌ای (کالومل) مورد بررسی قرار گرفت.

۳- ارائه و بررسی نتایج

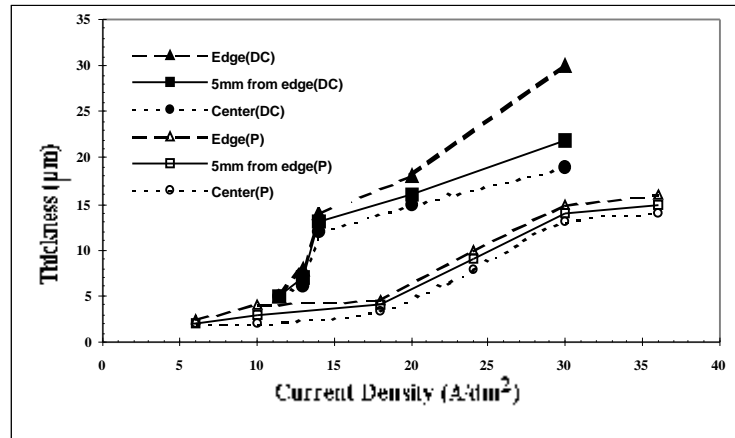
۳-۱- ضخامت پوشش

در آبکاری الکتریکی به روش مستقیم معمولاً ضخامت پوشش در لبه‌ها نسبت به نقاط مرکزی زیادتر است. در نتیجه یک پوشش نا یکنواخت به وجود خواهد آمد. به این حالت اثر استخوان سگی^{۱۰} می‌گویند. شکل (۱) تغییرات ضخامت

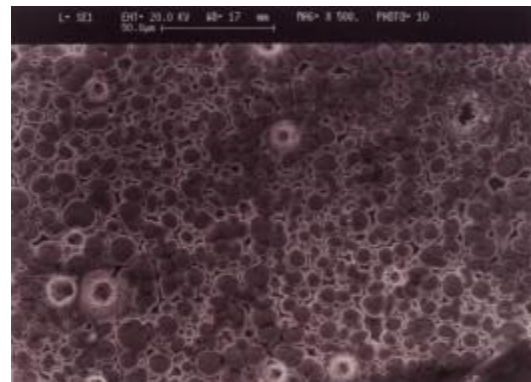
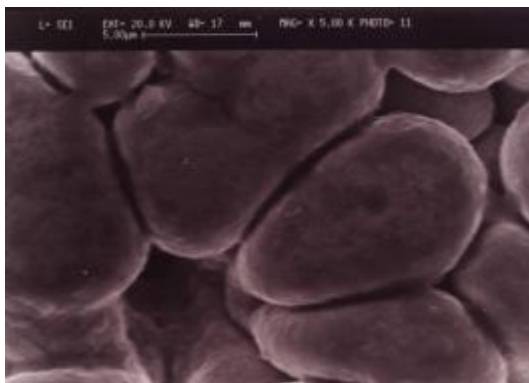
پوششهای حاصل از آبکاری الکتریکی مستقیم و منقطع را برحسب دانسیته جریان نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که اختلاف ضخامت پوشش در لبه نمونه‌ها نسبت به وسط آنها در روش منقطع کمتر از روش مستقیم است. در لحظه‌ای که جریان قطع می‌شود (زمان خاموش^{۱۱})، فرایند رسوب گذاری نیز متوقف می‌شود. در این لحظه لبه لایه‌های پوشش با محیط اطراف واکنش داده و محصولات به جا مانده در لبه‌ها موجب به تعویق افتادن فرایند رسوب گذاری در این نقاط می‌شود. در نتیجه در سیکل بعدی هیچ نقطه خاصی برای رسوب گذاری مجدد ارجحیت ندارد و همه جای قطعه به طور همزمان پوشش می‌شود. به این ترتیب ضخامت پوشش در تمام نقاط نسبتاً یکسان خواهد بود [۱۵].

۳-۲- ساختار پوششها

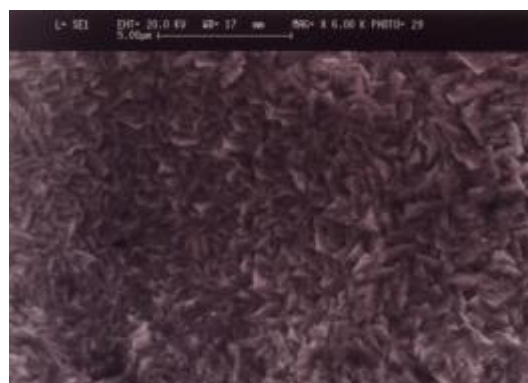
پوششهای به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح نمونه‌های آبکاری



شکل ۱- مقایسهٔ اختلاف ضخامت در پوششهای منقطع و مستقیم



شکل ۲- تصویر SEM از سطح پوشش حاصل از روش مستقیم با ترکیب آلیاژی $Zn=0.52/8$ و $Ni=0.47/2$ و شرایط آبکاری $I=11 A/dm^2$; $T=60^\circ C$; $pH=2$ نحوهٔ رشد پوشش و ایجاد حفره



شکل ۳- تصویر SEM از سطح پوشش حاصل از روش منقطع با ترکیب آلیاژی $Zn=0.81/7$ و $Ni=0.18/3$ و شرایط آبکاری $f=170 HZ$; $t_{on}=2/4 m sec$; $On-Time=40\%$; $I_{peak}=40 A/dm^2$

شده به روش مستقیم و منقطع را نشان می‌دهد. شکل (۲) نشان می‌دهد که در روش مستقیم، پوشش به صورت گلوله‌ای^{۱۲} رشد خواهد کرد. این شکل همچنین نحوه اتصال این گلوله‌ها را به یکدیگر نشان می‌دهد. ولی شکل (۳) نشان می‌دهد که در روش منقطع نحوه رشد به صورت لایه لایه^{۱۳} و دانه‌ها به شکل هرمهای مثلث القاعده^{۱۴} خواهند بود. در این پوششها کاهش زمان روشن^{۱۵} باعث ریزتر شدن دانه بندی^{۱۶} و یکنواختی آنها خواهد شد، شکل (۴). علت آن را می‌توان ناشی از یکنواخت شدن محلول در لحظه زمان خاموش دانست. به این صورت که هر چه این زمان زیادتر باشد، محلول فرصت بیشتری دارد تا یکنواخت شود و از طرفی همان گونه که گفته شد، پسیو شدن لبه لایه‌های به وجود آمده بهتر انجام می‌شود. در نتیجه جوانه زنی لایه‌های بعدی با توجه به نیروی کشش سطحی می‌تواند از وسط لایه‌های قبلی انجام شود. همچنین با توجه به ساختار آلیاژهای روی نیکل که عموماً به صورت هگزگونال است [۶، ۱۶ و ۱۷] این لایه‌ها به صورت هرمی شکل رشد می‌کنند.

۳-۳- ترکیب آلیاژی پوشش

شکل (۵) نتایج حاصل از تاثیر پارامترهای آبکاری منقطع را بر تحلیل عنصری پوششها نشان می‌دهد. این نتایج مشخص می‌کند که افزایش درصد زمان روشن، کاهش چگالی جریان^{۱۷} و نیز کاهش فرکانس^{۱۸} باعث افزایش درصد نیکل خواهد شد. در این رابطه می‌توان گفت با توجه به اینکه نیکل نجیبتر^{۱۹} از روی است، در نتیجه افزایش چگالی جریان تاثیر زیادی در پلاریزاسیون^{۲۰} آن خواهد گذاشت که موجب کاهش درصد نیکل در پوشش می‌شود. افزایش فرکانس نیز به این مفهوم است که فرایند به سمت آبکاری مستقیم متمایل می‌شود در نتیجه پلاریزاسیون افزایش یافته و درصد فلز نیکل کاهش خواهد یافت. اما در رابطه با درصد زمان روشن باید گفت در نتیجه اختلاف پتانسیلی که با شروع زمان روشن بر روی حمام اعمال می‌شود، نزدیکترین یونهاى مثبت فلزی و غیر فلزی اطراف کاتد احیا شده و به دنبال آن کاتیونهای سایر نقاط نیز به سمت کاتد به حرکت در می‌آیند. از طرفی با توجه به اینکه

سیستم آلیاژی روی نیکل یک سیستم بی قاعده^{۲۱} است [۱۷]، در نتیجه دانسیته جریان حدی نیکل کنترل کننده خواهد بود و هر چه زمان روشن زیادتر شود، یونهای نیکل زیادتری احیا می‌شود و به این ترتیب درصد نیکل در پوشش زیادتر خواهد شد.

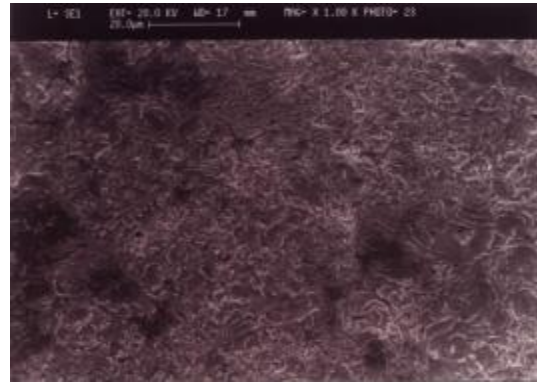
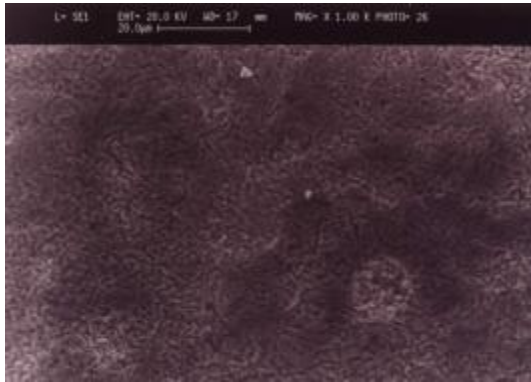
۳-۴- سختی پوشش

شکل (۶) نتایج حاصل از اندازه‌گیری سختی در مقطع پوشش را نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که افزایش چگالی جریان موجب کاهش سختی می‌شود و در پوششهای منقطع علاوه بر چگالی جریان، درصد زمان روشن نیز موثر است. به این صورت که کاهش این پارامتر باعث کاهش سختی می‌شود. علت این پدیده را به این صورت می‌توان بیان کرد که افزایش چگالی جریان و نیز کاهش درصد زمان روشن اولاً باعث افزایش سرعت رسوب گذاری و احیاء هیدروژن بیشتری می‌شود. ثانیاً همان گونه که گفته شد افزایش درصد زمان روشن و کاهش چگالی جریان هر دو موجب افزایش درصد نیکل می‌شوند. به این ترتیب افزایش درصد نیکل می‌تواند افزایش سختی پوشش را به دنبال داشته باشد.

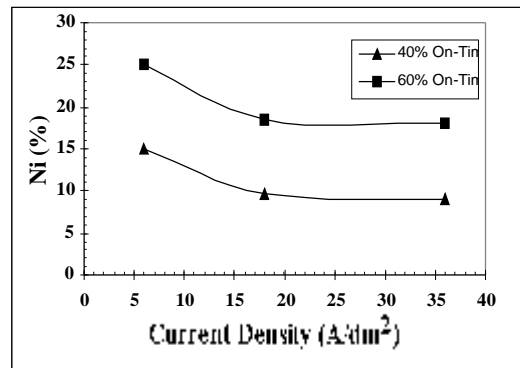
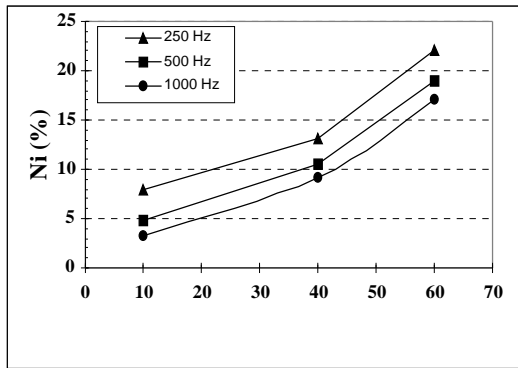
۳-۵- خوردگی آلیاژهای روی - نیکل

یکی از اهداف این تحقیق بررسی رفتار خوردگی پوششهای آلیاژی روی - نیکل حاصل از روش مستقیم و منقطع نسبت به یکدیگر است.

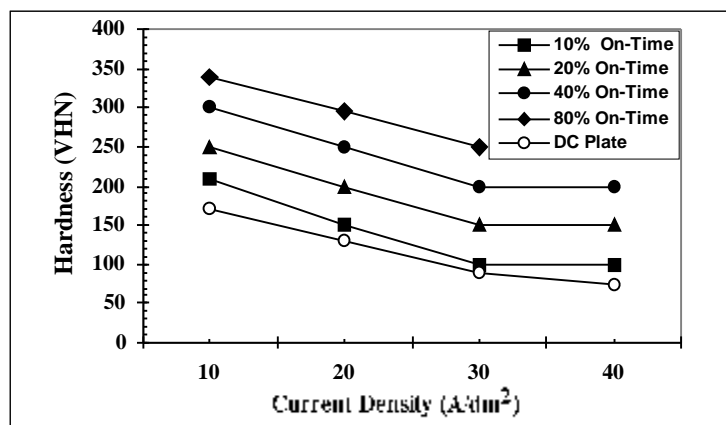
شکل (۷) رفتار خوردگی تعدادی از پوششهای حاصل از آبکاری مستقیم و منقطع را نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که علاوه بر درصد نیکل نوع فرایند آبکاری نیز در سرعت خوردگی موثر است. به این صورت که پوششهایی که به روش منقطع تهیه شده اند و نیز درصد نیکل بیشتری دارند، سرعت خوردگی کمتری نسبت به سایر پوششها خواهند داشت. جدول (۳) نتایج تحلیل عنصری مناطق خورده شده را نشان می‌دهد. در این جدول ملاحظه می‌شود که درصد نیکل در سطح پوشش بعد از فرایند خوردگی برای هر دو نمونه مستقیم و منقطع افزایش یافته است. به این ترتیب با توجه به پتانسیل



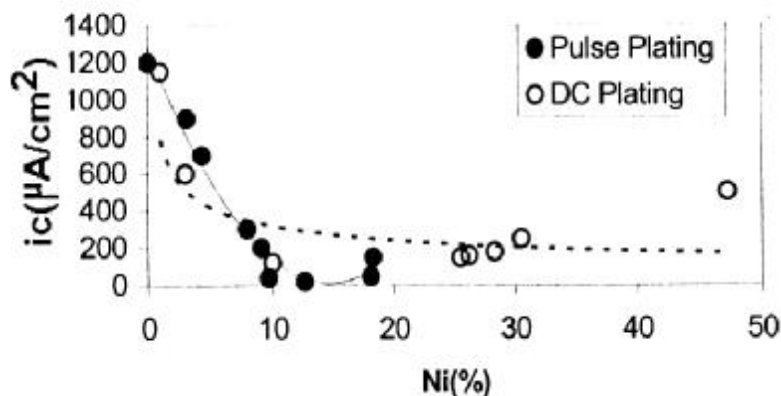
شکل ۴- تصویر SEM از سطح پوشش حاصل از روش منقطع با شرایط: راست) $I_{peak} = 40 \text{ A/dm}^2$; On-Time = ۱۰٪ ; $f = 500 \text{ Hz}$; $t_{on} = 0.5 \text{ m sec}$; On-Time = ۱۰٪ ; $I_{peak} = 40 \text{ A/dm}^2$ (چپ) $f = 500 \text{ Hz}$; $t_{on} = 1 \text{ m sec}$



شکل ۵- تغییرات درصد عناصر آلیاژی در پوششهای منقطع بر حسب: راست) چگالی جریان (فرکانس ۵۰۰HZ) (چپ) درصد زمان روشن (بیک چگالی جریان 60 A/dm^2)



شکل ۶- تاثیر چگالی جریان و درصد زمان روشن در سختی پوشش (فرکانس ۵۰۰ Hz)



شکل ۷- تاثیر درصد نیکل در چگالی جریان خوردگی پوششهای آلیاژی روی- نیکل حاصل از آبکاری الکتریکی مستقیم و منقطع
الکتروود مرجع: جیوه‌ای (کالومل) محلول: (۳٪) NaCl $T = 25^{\circ}C$ $v = 1mV/sec$

جدول ۳- درصد نیکل در پوشش قبل و بعد از آزمایش خوردگی

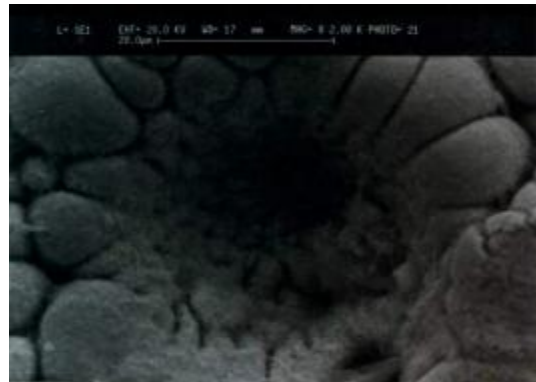
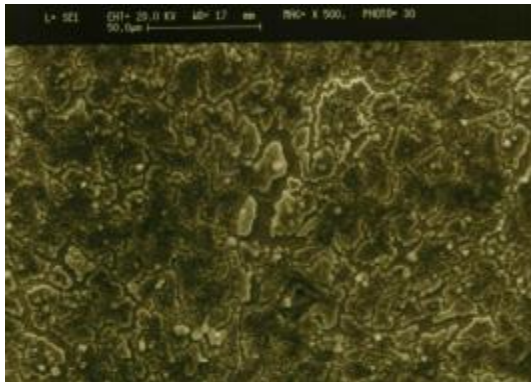
نمونه	قبل از آزمایش خوردگی	بعد از آزمایش خوردگی (نزدیک ناحیه خورده شده)	بعد از آزمایش خوردگی (داخل ناحیه خورده شده)
D4	۳۰	۳۳	۴۷/۵
P6	۱۸/۳	۴۷/۷	۷۵

مستقیم و منقطع را پس از آزمایش خوردگی نشان می‌دهد. قبلاً اشاره شد که نحوه رشد پوششهای مستقیم به صورت گلوله‌ای است. با توجه به اینکه دانه‌های گلوله‌ای کمترین سطح تماس را با یکدیگر دارند، در نتیجه دارای بیشترین سطح واکنش خواهند بود و به این ترتیب واکنشهای شیمیایی در پوششهای مستقیم زیادتر خواهد بود و سرعت خوردگی بیشتری دارند. این در حالی است که پوششهای منقطع دارای ساختار لایه لایه و هرمهای مثلثی شکل فشرده‌اند.

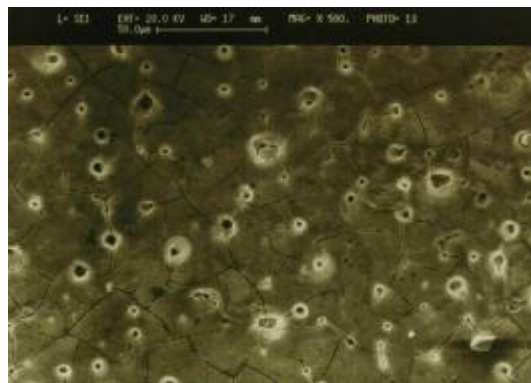
در آبکاری به روش منقطع در لحظه زمان خاموش هیدروژنهای احیاء شده به راحتی از سطح پوشش جدا و از محیط خارج می‌شوند. در نتیجه هر چه زمان پوشش دهی در روش مستقیم و یا زمان روشن در روش منقطع زیادتر باشد، هیدروژن حبس شده در پوشش نیز زیادتر خواهد بود. به این ترتیب این گونه پوششها بواسطه وجود هیدروژن زیاد دارای تنش و تردی زیادتری نیز هستند و پس از آبکاری به راحتی ترک

استاندارد سه فلز روی (۷۶V/-۰)، فولاد (۴۴V/-۰) و نیکل (۲۵V/-۰) می‌توان نتیجه گرفت که حفاظت از خوردگی در پوششهای روی- نیکل با مکانیزم فداشوندگی^{۲۲} فلز روی نسبت به نیکل در داخل پوشش رخ می‌دهد. لذا افزایش درصد نیکل باعث کاهش خوردگی روی شده و مقاومت پوشش زیادتر خواهد شد. ولی بعضی از پوششها نیز وجود دارند که علی‌رغم داشتن درصد نیکل کمتر رفتار مناسبتری از خود نشان می‌دهند. به عنوان مثال پوششی که حدود ۱۳ درصد نیکل دارد، بهترین رفتار را از خود نشان می‌دهد و حال آنکه پوششهای با درصد زیادتر نیکل دارای رفتار ضعیفتری‌اند. علت این پدیده را می‌توان به ساختار فازی آلیاژ فوق ارتباط داد. این فاز که گاما (γ) نامیده می‌شود دارای ساختار هگزاگونال است و بیشترین مقاومت به خوردگی را در بین آلیاژهای روی- نیکل دارد [۱۸، ۱۳ و ۱۹].

شکل (۸) تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح دو نمونه



شکل ۸- سطح پوشش بعد از انجام آزمایش خوردگی راست) نمونه مستقیم با ترکیب آلیاژی $Zn=0.52/8$ و $Ni=0.47/2$ (چپ) نمونه منقطع با ترکیب آلیاژی $Zn=0.81/9$ و $Ni=0.18/1$



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح یک پوشش ترک دار حاصل از روش مستقیم بعد از آزمایش خوردگی دارای ترکیب آلیاژی $Zn=0.70$ و $Ni=0.30$

می‌توان پوشش‌هایی با کیفیت و ساختار مناسب و نیز دارای درصد آلیاژی دلخواه به وجود آورد.

۴- نتیجه‌گیری

- الف- تاثیر افزایش شدت جریان در اختلاف ضخامت پوشش‌های حاصل از روش مستقیم زیادتر از روش منقطع است. و یا به عبارت دیگر تاثیر شدت جریان بر میزان اثر استخوان سگی در پوشش‌های مستقیم زیادتر از پوشش‌های منقطع است.
- ب- افزایش زمان روشن و کاهش چگالی جریان باعث افزایش درصد نیکل و سختی پوشش می‌شود.
- ج- با کاهش فرکانس و زمان روشن می‌توان پوشش‌هایی با ساختار ریزتر به وجود آورد.

می‌خورند. در نتیجه علی‌رغم دارا بودن درصد زیادتر نیکل، رفتار خوردگی ضعیفتری خواهند داشت. این تاثیر را می‌توان در شکل (۹) مشاهده کرد. این عکس که توسط میکروسکوپ الکترونی از یکی از پوشش‌های ترک دار گرفته شده است، نشان می‌دهد که خوردگی عموماً به صورت موضعی و از نقاط ترک دار به وجود آمده است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر درصد نیکل پارامترهای دیگری نیز در رفتار خوردگی آلیاژهای روی- نیکل موثرند که از جمله آنها می‌توان به کیفیت پوشش، وجود ترک، حفره، تنش داخلی و فازهای تشکیل دهنده و نیز عواملی که بر این پارامترها موثرند، اشاره کرد. از مهمترین این عوامل می‌توان درصد زمان روشن و فرکانس مورد نظر را نام برد. همان‌گونه که ذکر شد، با کنترل این عوامل

و- مناسب ترین رفتار خوردگی مربوط به آلیاژهایی است که حدود ۱۳ درصد نیکل داشته و با روش منقطع تهیه شده باشند.
 ز- در روش منقطع، کاهش درصد زمان روشن باعث بهبود رفتار خوردگی پوشش می شود.

د- رفتار خوردگی پوششهای آلیاژی روی- نیکل با افزایش درصد نیکل بهبود می یابد.

ه- رفتار خوردگی این آلیاژها شدیداً تابع ساختار و کیفیت پوشش است.

واژه نامه

- | | | |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1. electroplating | 8. scanning electron microscopy | 15. on time |
| 2. direct current | 9. electrochemical Polarization | 16. fine grain structure |
| 3. pulse current | 10. dog bone effect | 17. current density |
| 4. pulse plating | 11. off time | 18. frequency |
| 5. direct plating | 12. nodular structure | 19. noble |
| 6. corrosion resistance | 13. hole laminar structure | 20. polarization |
| 7. wear resistance | 14. triangular pyramidal shape | 21. anomalous |
| | | 22. sacrificial |

مراجع

- G.Devaraj, G.N.K.Ramesh Bapu, J.Ayyapaju, B. *Electrochem.June* 1989, 5(6), PP. 448-451.
- B. N. Popov, M. Ramasubramanian, S. N. Popova, R. E. White and K. Mi. Yin; *Trans. Faraday Society*, 92, 4021-4028 (1996).
- Lawrence J.Durney; *Electroplating Engineering Handbook*; 4th Ed.; 1984.
- V.A.Zabludovski, A.V.Krapivnoi, V.I.Kaptanorski, N.A.Kostin, *Soviet Electrochem.* 1989, 25(9), PP. 1119-1120.
- K.Kondo, M.Yokoyama, K.Shinohara, *J. Electrochem. Soc.* July 1995, Vol. 142(7), PP.2256-2260.
- A.M.Alfantazi, A.M.El.Shevik, U.Erb, *Scripta Met. Mat.* 1994, Vol. 30(10), PP. 1245-1250
- A. Krishniyer, M. Ramasubramanian, B. N. Popov and R. E. White, *Plating and Surface Finishing*, 86, 99-103 (1999).
- D.T.Chin, N.R.K.Vilambi, *Plat, Surf. Finish*, 75(1), Jan 1988, PP.67-73.
- Fountoulakis, SG; Steinbicker, RN; *International Conference on Zinc & Zinc Alloy coated steel sheet*; Galvatech., 89, Tokyo, Japan, 5-7 Sep. 1989.
- Metals Handbook; ASM International, 9th Ed. Vol. 13, P.1012.
- M.Iwai, H.Sakai, S.Nomura, *Transaction ISIJ*, 1986, Vol.26, PP. B-367.
- K.R.Baldwin, C.J.E.Smith, M.J.Robinson, *Corrosion Eng.* 1995, Vol.51(12), PP. 932-940.
- A.Shibuya, T.Kurimoto, & Y.Hoboh; *Transaction ISIJ*, Vol.23, 1983, PP.923-928.
- A. Durairajan, A. Krishniyer, B. S. Haran and B. N. Popov, *Corrosion*, 56, 283 (2000).
- علیرضا نصر اصفهانی، پروژه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۷۵.
- Fundamentals of Metal Deposition; E.Raub & K.Muller; 1967.
- David L. Grimmett, Morton Schwartz & Ken Nobe; *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 140, No. 4, PP. 973-981, April 1993.
- K.R.Baldwin, M.J.Robinson & C.J.E.Smith; *Corrosion Science*, Vol. 36, No. 7, PP.1115-1131, 1994.
- محمد رضا سلطانی، "پوششهای گالوانیزه آلیاژی روی- نیکل" ماهنامه علمی- تخصصی مهام، گروه صنایع مهمات سازی و متالورژی، سال چهارم، مرداد ماه ۱۳۸۰، شماره ۳۶.