

## Research Paper

### Study on micro structure and wear behavior of Zn–Ni alloy coatings

Mahshid Tafreshi<sup>1</sup>, \*Saeed Reza Allahkaram<sup>2</sup>

1- MSc School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

**Citation:** Tafreshi M, Allahkaram S.R. Study on micro structure and wear behavior of Zn–Ni alloy coatings. Metallurgical Engineering 2016; 19(3) 186-194 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.34414.1051>

**doi:** <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.34414.1051>

#### ABSTRACT

Zn–Ni alloy coatings were electrodeposited from an acidic sulfate bath, while their microstructures, corrosion properties and wear behavior were investigated. To study their structures, X-ray diffraction (XRD) was used. To evaluate the wear behavior, wear tests via pin-on-disc were performed. Hardness measurements were carried out via Vickers microhardness testing machine. Secondary and backscattered electron micrographs were taken from the worn surfaces and chemical compositions of the coatings were also investigated using Scanning Electron Microscope (SEM) equipped with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) analyzer. X-ray diffraction (XRD) technique was also used to determine the phase structures of the coatings. The results indicated that the amount of nickel in the coating had a strong impact on their properties so that by increasing the amount of nickel an increase in the coating hardness was obtained. Finally, Zn-14% Ni coating which contained a single phase  $\gamma$ -Ni<sub>5</sub>Zn<sub>21</sub> face centered cubic had the lowest coefficient of friction as well as wear rate among all other coatings with different chemical compositions.

**Keywords:** Zn–Ni alloy, Electrodeposition, Hardness, Microstructure, Wear.

■ ..... ■

\* *Corresponding Author:*

Saeed Reza Allahkaram, PhD

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Tel: +98(21) 88016940

E-mail: akaram@ut.ac.ir

## مطالعه سختی، ریز ساختار و رفتار سایشی پوشش‌های آلیاژی روی-نیکل

مهشید تفرشی<sup>۱</sup>، سعیدرضا اله کرم<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

### چکیده

در این پژوهش پوشش‌های آلیاژی Zn-Ni از طریق حمام سولفاتی اسیدی رسوب گذاری الکتریکی شده و سختی، ساختار فازی و رفتار سایشی آنها مورد مطالعه قرار گرفت. به جهت بررسی ساختار فازی از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. به منظور بررسی رفتار سایشی، آزمون سایش به روش پین روی دیسک روی نمونه‌ها انجام گرفت. همچنین سختی سنجی نمونه‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری میکروسختی ویکرز از سطح نمونه‌ها انجام شد. تصاویر برگشتی و ثانویه از مسیر سایش در پوشش‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و ترکیب شیمیایی آنها توسط آنالیزور (EDX) بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که مقدار نیکل تأثیر زیادی بر سختی پوشش‌های آلیاژی Zn-Ni دارد به طوری که با افزایش مقدار نیکل سختی پوشش‌ها افزایش می‌یابد. همچنین پوشش Zn-14%Ni دارای تک فاز  $\gamma$ -Ni<sub>5</sub>Zn<sub>21</sub> مکعبی مرکز دار بوده است که این پوشش کمترین ضریب اصطکاک و نرخ سایش را در بین تمامی پوشش‌ها با ترکیب شیمیایی دیگر دارا است.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ Zn-Ni، آبرکاری الکتریکی، سختی، ریزساختار، سایش

### ۱. مقدمه

اصلی سایش در تماس با پین آلومینایی از نوع برشی بوده در تماس با پین فولادی، لایه‌ای شدن سطح عامل اصلی کاهش وزن است. قازیف<sup>۳</sup> و همکارانش [۸] دریافتند با افزایش مقدار نیکل در پوشش و تغییر ساختار از فاز h غنی از روی به فاز  $\gamma$  (Ni<sub>5</sub>Zn<sub>21</sub>)، ضریب اصطکاک کاهش یافته و مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. علت این امر را به سختی بالاتر و مورفولوژی سطحی صاف تر در پوشش‌های حاوی مقادیر بالاتر نیکل نسبت دادند. بررسی‌های انجام شده بر رفتار سایشی پوشش‌های آلیاژی Zn-Ni توسط لی<sup>۴</sup> و همکارانش [۹] نشان می‌دهد که مورفولوژی و زبری پوشش‌های مختلف بدست آمده از حمام‌های متفاوت تأثیر بسیاری بر مقاومت به سایش و ضریب اصطکاک دارد. سیرمن<sup>۵</sup> و همکارانش [۱۰] در تحقیقاتی که بر پوشش Zn خالص و آلیاژی Zn-Ni دریافتند که پوشش‌های آلیاژی میکروسختی بالاتر و نرخ سایش کمتر نسبت به Zn خالص دارد. علی‌رغم مطالعات صورت گرفته در رابطه با پوشش‌های Zn-Ni، تحقیق جامعی در رابطه با تأثیر ترکیب شیمیایی بر رفتار تریبولوژیکی این پوشش‌ها

پوشش‌های Zn خالص بدلیل خواص متعددی از جمله مقاومت به خوردگی به دو روش ممانعتی و روش گالوانیک سالها در صنعت مورد استفاده قرار گرفته است [۱-۳]. با وجود مزایای بسیار به جهت بهبود برخی از خواص در این پوشش‌ها در سالهای اخیر به آلیاژی کردن این پوشش‌ها توسط خانواده گروه آهن پرداخته‌اند [۴]. در میان جایگزین‌های مختلف برای پوشش‌های Zn خالص، پوشش‌های آلیاژی Zn-Ni به دلیل مقاومت به خوردگی بالا و انعطاف پذیری زیاد و تردی هیدروژنی کم، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [۵]. همچنین پوشش‌های آلیاژی Zn-Ni به دلیل خواص سایشی مناسب در کاربردهایی مانند اتصال دهنده‌های فولاد با مقاومت بالا<sup>۱</sup> مورد استفاده در صنایع خودروسازی و هوافضا کاربرد دارند [۶]. از خواص دیگر این پوشش‌ها می‌توان به شکل‌پذیری مناسب این پوشش‌ها در عین سختی خوبی که دارند، اشاره کرد. پاناگوپولوس<sup>۲</sup> و همکارانش [۷] رفتار سایشی پوشش‌های آلیاژی Zn-Ni را در تماس با پین‌های آلومینایی و فولادی مقایسه کردند. بر اساس نتایج بدست آمده، مکانیزم

3. Ghaziof

4. Lee

5. Sriraman

1. High Strength Steel Fasteners

2. Panagopoulos

\* نویسنده مسئول:

دکتر سعیدرضا اله کرم

نشانی: تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

تلفن: +۹۸ ۸۸۰۱۶۹۴۰ (۲۱)

پست الکترونیکی: akaram@ut.ac.ir

**جدول ۱.** ترکیبات شیمیایی و شرایط حمام آبکاری Zn خالص و آلیاژی Zn-Ni

پوشش آلیاژی Zn-Ni	پوشش Zn خالص	ترکیب شیمیایی
۹۰-۱۷۰ g/L	۹۰ g/L	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
۱۷۰ g/L	-	NiSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
-	۲۰ g/L	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>
۸۰ g/L	۸۰ g/L	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
۰/۱ g/L	۰/۱ g/L	SDS
شرایط آبکاری		
۲	۲	pH
۵۰ mA/cm <sup>2</sup>	۵۰ mA/cm <sup>2</sup>	دانسیته جریان
۶۰ °C	۶۰ °C	دما

حباب‌های هیدروژن از سطح کاتد شده و در نتیجه احتمال وجود حفره در سطح پوشش کاهش می‌دهد.

به منظور بررسی ساختار کریستالی و نوع فازهای موجود در پوشش از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل Philips X Pert Pro استفاده شد. آزمایش پراش اشعه ایکس با استفاده از پرتو Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1/542 \text{ \AA}$ ) در بازه ۱۰-۱۱۰ درجه انجام شد. گام پخش ۰/۰۲ درجه و زمان هر گام ۰/۴ ثانیه انتخاب شد. نمودارهای به دست آمده با استفاده از نرم افزار X-Pert High Score نسخه 1.0d تحلیل شد. همچنین سختی سنجی نمونه‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری میکروسختی ویکرز AMSLER D-6700 از سطح نمونه‌ها انجام شد. نیروی وارده معادل ۱۰ g و بمدت ۱۵ s اعمال گردید.

رفتار سایشی پوشش‌ها با استفاده از آزمون پین روی دیسک مورد بررسی قرار گرفت. پین مورد نظر از جنس فولاد بلبرینگ AISI ۵۲۱۰۰ با سختی HRC ۶۷-۶۰ و قطر ۵ mm انتخاب شد. آزمون سایش با سرعت لغزش ۰/۱ متر بر ثانیه، بار اعمالی ۲ نیوتن، مسافت لغزش ۲۰۰ متر و در دمای محیط انجام شد. اختلاف وزن نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون به عنوان معیاری از سایش اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور بررسی مکانیزم سایش، سطوح سایش به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیزور EDS مورد مطالعه قرار گرفتند.

### ۳. نتایج و بحث

#### بررسی سختی

شکل ۱ نتایج حاصل از تأثیر مقدار نیکل در پوشش را بر سختی پوشش نشان می‌دهد. از آنجایی که مقدار سختی Ni خالص بسیار بالاتر از مقدار سختی Zn خالص دارد، با افزودن Ni به Zn و آلیاژی کردن آن مقدار سختی افزایش یافته و به طبع آن با افزایش مقدار نیکل در پوشش آلیاژی Zn-Ni سختی پوشش نیز افزایش می‌یابد.

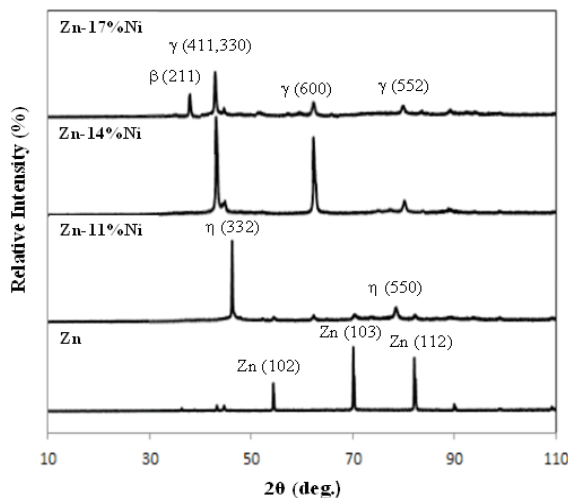
صورت نگرفته است. از این رو در این پژوهش به مطالعه و بررسی ساختار فازی، سختی و رفتار سایشی پوشش‌های روی خالص و آلیاژی Zn-Ni با ترکیب شیمیایی مختلف پرداخته و در نهایت مقاوم‌ترین پوشش در مقابل سایش معرفی گردد.

### ۲. روش تحقیق

در این تحقیق از ورق فولادی ۳۷ St با ابعاد ۲۵×۲۵×۲ mm به عنوان زیرلایه استفاده شد. فرایند آماده سازی سطح نمونه شامل پرداخت نمونه با سنگ مغناطیسی، پولیش با سمباده از شماره ۱۲۰ تا ۲۰۰۰، استون شویی با دستگاه آلتراسونیک ۶۰ Hz در دمای محیط به مدت ۵ دقیقه، چربی زدایی با چربی گیر صنعتی در دمای ۷۰ °C به مدت ۱۵ دقیقه، اسیدشویی در محلول ۲۰٪ وزنی اسید کلریدریک در دمای محیط به مدت یک دقیقه، شستشو با آب مقطر و خشک کردن انجام شد. برای انجام آبکاری مساحت ۱/۵×۱/۵ cm از سطح انتخاب و مابقی با استفاده از وارنیش پوشانده شد تا توزیع جریان در تمام قسمت‌های نمونه یکسان و نسبت آند به کاتد یک به یک شود. آند مورد استفاده غیر مصرفی بوده و از جنس فولاد زنگ نزن L۳۱۶ انتخاب شد. به منظور جلوگیری از اکسیداسیون سطح و افزایش چسبندگی، نمونه‌ها بلافاصله پس از آماده سازی وارد حمام آبکاری شدند. برای پوشش‌دهی از یک دستگاه مولد جریان DC استفاده شد. رسوب دهی الکتریکی از طریق حمام سولفات‌ی و با استفاده از مواد شیمیایی با خلوص آزمایشگاهی انجام شد. جدول ۱ ترکیبات حمام و شرایط آبکاری پوشش‌های Zn خالص و آلیاژی Zn-Ni را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است جهت تولید پوششهایی با ترکیبات مختلف از سولفات روی با مقادیر مختلف استفاده شد.

سرفکتانت SDS<sup>۶</sup> که به مقدار ۰/۱ g/L به حمام آبکاری اضافه شد، با کاهش انرژی سطحی موجب جدا شدن

6. Sodium Dodecyl Sulphate

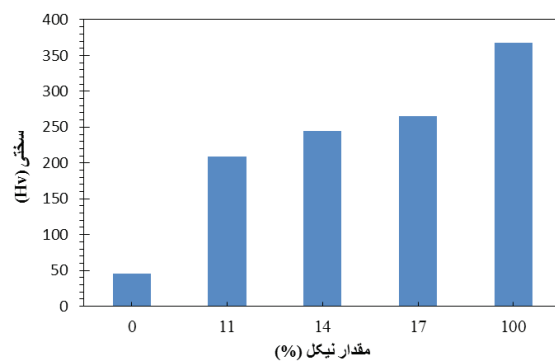


شکل ۲. الگوی XRD پوشش‌های Zn خالص و Zn-Ni با ترکیب‌های شیمیایی مختلف.

پوشش‌های آلیاژی Zn-Ni خواص تریبولوژیکی بهتری نسبت به نمونه‌های پوشش داده شده با Zn خالص دارند. مقدار تلفات سایس در پوشش Zn خالص تقریباً بین ۱۸ تا ۲۸ مرتبه بیشتر از پوشش‌های آلیاژی است. طبق قانون آرچارد مقدار سایس با سختی نمونه‌ها نسبت عکس دارد [۱۷]. همانطور که در بخش ۳-۱ اشاره شد در اثر آلیاژی کردن پوشش‌های Zn خالص و افزودن Ni، سختی پوشش‌ها افزایش یافته و در نتیجه نرخ سایس کاهش می‌یابد. ضریب اصطکاک پایین‌تر در پوشش‌های آلیاژی در مقایسه با پوشش Zn خالص را نیز می‌توان به کاهش سطح واقعی تماس بین پین و نمونه در اثر افزایش سختی در نمونه‌های آلیاژی نسبت داد [۱۹، ۱۸]. در پوشش‌های آلیاژی با افزایش مقدار Ni تا ۱۴ درصد وزنی، میانگین ضریب اصطکاک و تلفات سایسی کاهش یافته است، اما با رسیدن مقدار Ni به ۱۷ درصد وزنی با وجود افزایش سختی، ضریب اصطکاک مجدداً افزایش یافته و حجم بیشتری از پوشش ساییده می‌شود. علت این امر را می‌توان به وجود میکروترک در پوشش حاوی ۱۷ درصد وزنی نیکل نسبت داد [۲۰، ۱۸]. این عامل سبب می‌شود این پوشش علی‌رغم سختی بیشتر، دارای مقاومت به سایس کمتری نسبت به دیگر نمونه‌های آلیاژی باشد.

به‌منظور مقایسه مناسب‌تر رفتار سایسی، تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای نمونه‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی نمودارها در ابتدای مسیر لغزش ضریب اصطکاک به صورت صعودی افزایش می‌یابد که علت آن را می‌توان افزایش سطح واقعی تماس بین پین و نمونه دانست.

در نمودار ۳-الف با توجه به سختی بسیار پائین روی خالص و در نتیجه مقاومت کم این پوشش نسبت به سایس و رسیدن پین به زیر لایه در ادامه سایس، ضریب اصطکاک



شکل ۱. نمودار تغییرات سختی پوشش بر حسب مقدار نیکل.

### بررسی ریزساختار

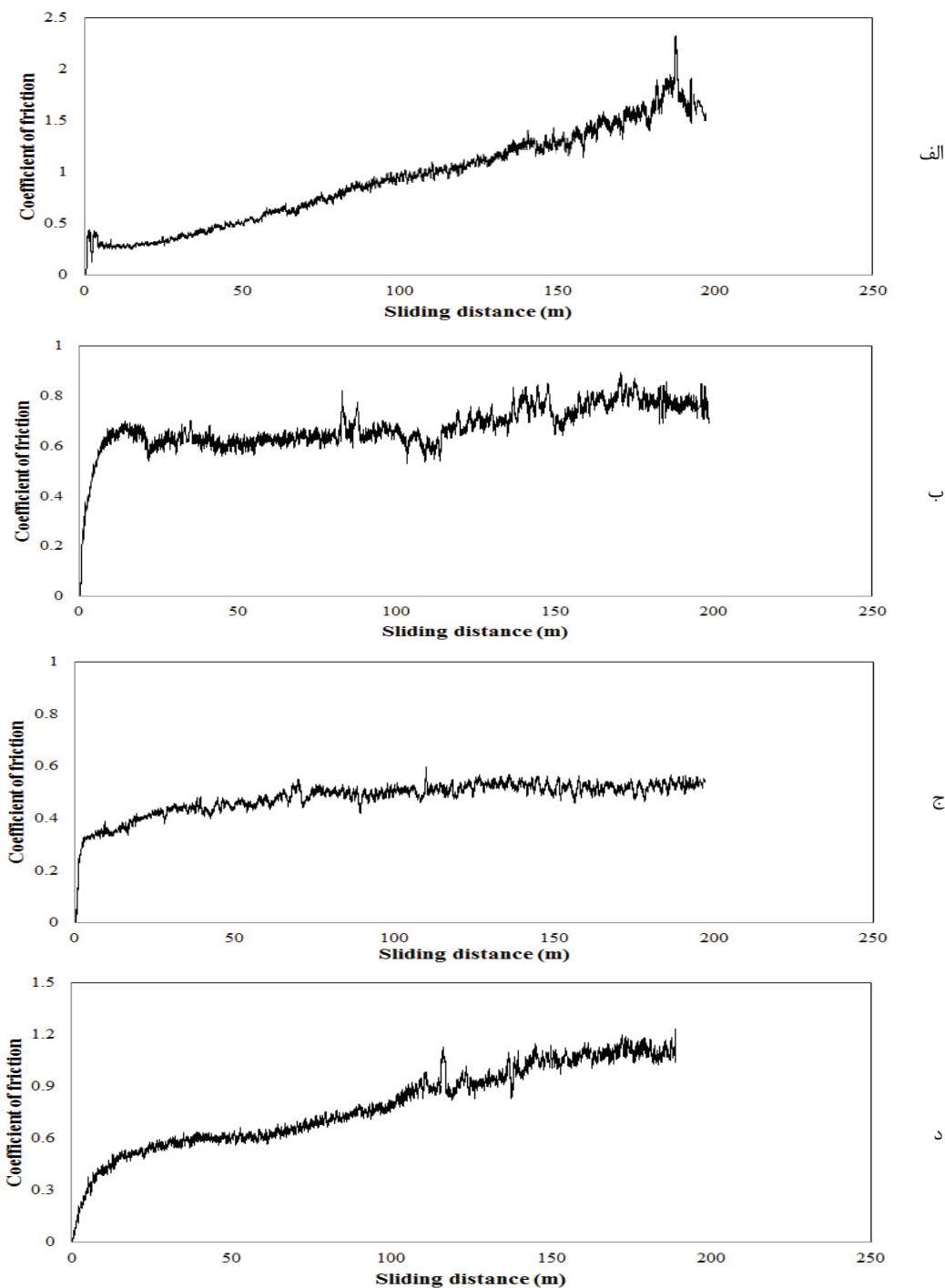
شکل ۲ الگوهای پراش اشعه X (XRD) پوشش‌های Zn خالص و Zn-Ni با ترکیب‌های شیمیایی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل پوشش Zn خالص دارای سه پیک اصلی در زوایای ۵۵، ۷۰ و ۸۳ درجه است. این پیک‌ها به ترتیب مربوط به صفحات (۱۰۲)، (۱۰۳) و (۱۱۲) می‌باشد. با آلیاژی کردن Zn با Ni از شدت پیک‌های اصلی Zn کاسته شده و پیک‌های دیگری که مربوط به ترکیبات میانی Zn و Ni هستند به الگوهای XRD اضافه می‌شوند. پوشش‌هایی با مقدار نیکل ۱۱٪، دارای دو پیک اصلی در زوایای حدود ۴۶ و ۷۸ درجه هستند. این پیک‌ها مربوط به صفحات (۳۳۲) و (۵۵۰) فاز میانی  $h-Ni_3Zn_{22}$  هستند. ساختار فاز  $h$  هگزاگونال فشرده است. این فاز غنی از روی بوده و به همین دلیل نرم و انعطاف پذیر است [۱۱]. با افزایش مقدار نیکل تا ۱۴٪ فاز  $h$  محو شده و پیک‌های جدیدی در زوایای ۴۵، ۶۴ و ۸۲ درجه ظاهر می‌شوند. این پیک‌ها مربوط به صفحات (۴۱۱،۳۰۰)، (۶۰۰) و (۵۵۲) فاز  $g-Ni_5Zn_{21}$  هستند. ساختار فاز  $\gamma$  مکعبی مرکز دار بوده و انعطاف‌پذیری آن کمتر از فاز  $\eta$  است [۱۱، ۸]. با رسیدن مقدار نیکل در پوشش به ۱۷٪، از شدت پیک‌های مربوط به فاز  $g$  کاسته شده و پیک جدیدی در زاویه ۳۹ ظاهر می‌شود. این پیک مربوط به صفحه (۲۱۱) فاز میانی  $b-Zn-Ni$  با ساختار مکعبی ساده است [۱۶].

### بررسی رفتار سایسی

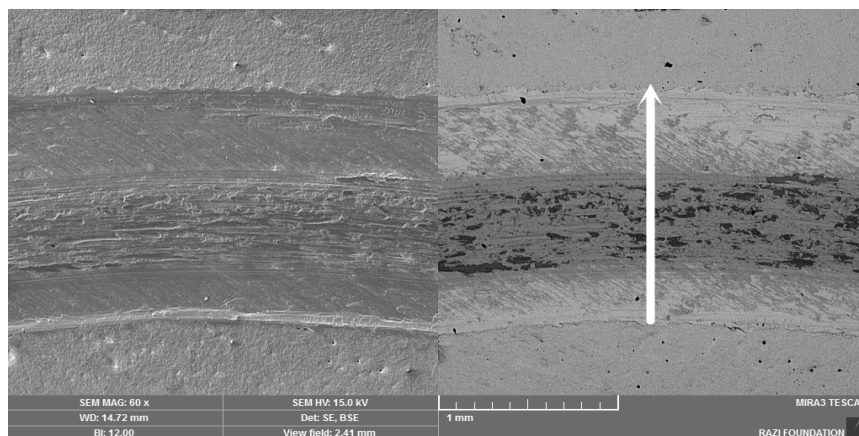
تماس تریبولوژیکی اجسام جامد به دو پدیده عمده اصطکاک و سایس منتج می‌شود. اندازه‌گیری‌های سایس و اصطکاک روی پوشش‌های Zn-Ni با استفاده از تجهیزات تست سایس بین روی دیسک انجام شد. مقادیر کاهش حجم و میانگین ضریب اصطکاک حاصل از انجام آزمون سایس بر پوشش‌های Zn خالص و Zn-Ni با ترکیب شیمیایی مختلف در دمای محیط در جدول ۲ گزارش شده است. با توجه به نتایج کاهش حجم و میانگین ضرایب اصطکاک، مشاهده می‌شود که تمامی

جدول ۲. نتایج بدست آمده از آزمون سایش در دمای محیط بر پوشش‌های Zn خالص و Zn-Ni با ترکیب شیمیایی مختلف

پوشش	پارامتر	کاهش حجم (mm <sup>3</sup> )	میانگین ضریب اصطکاک
Zn		۲/۲۸۰	۰/۹۸
Zn-11wt.% Ni		۰/۱۱۵	۰/۶۵
Zn-14wt.% Ni		۰/۰۸۱	۰/۵۳
Zn-17wt.% Ni		۰/۱۲۸	۰/۸۶



شکل ۳. تغییرات ضریب اصطکاک با مسافت لغزش برای پوشش‌های الف) Zn خالص، ب) Zn-11wt.%Ni، ج) Zn-14wt.%Ni و د) Zn-17wt.%Ni.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مسیر سایش پوشش Zn خالص (راست تصویر الکترون‌های برگشتی و چپ تصویر الکترون‌های ثانویه).

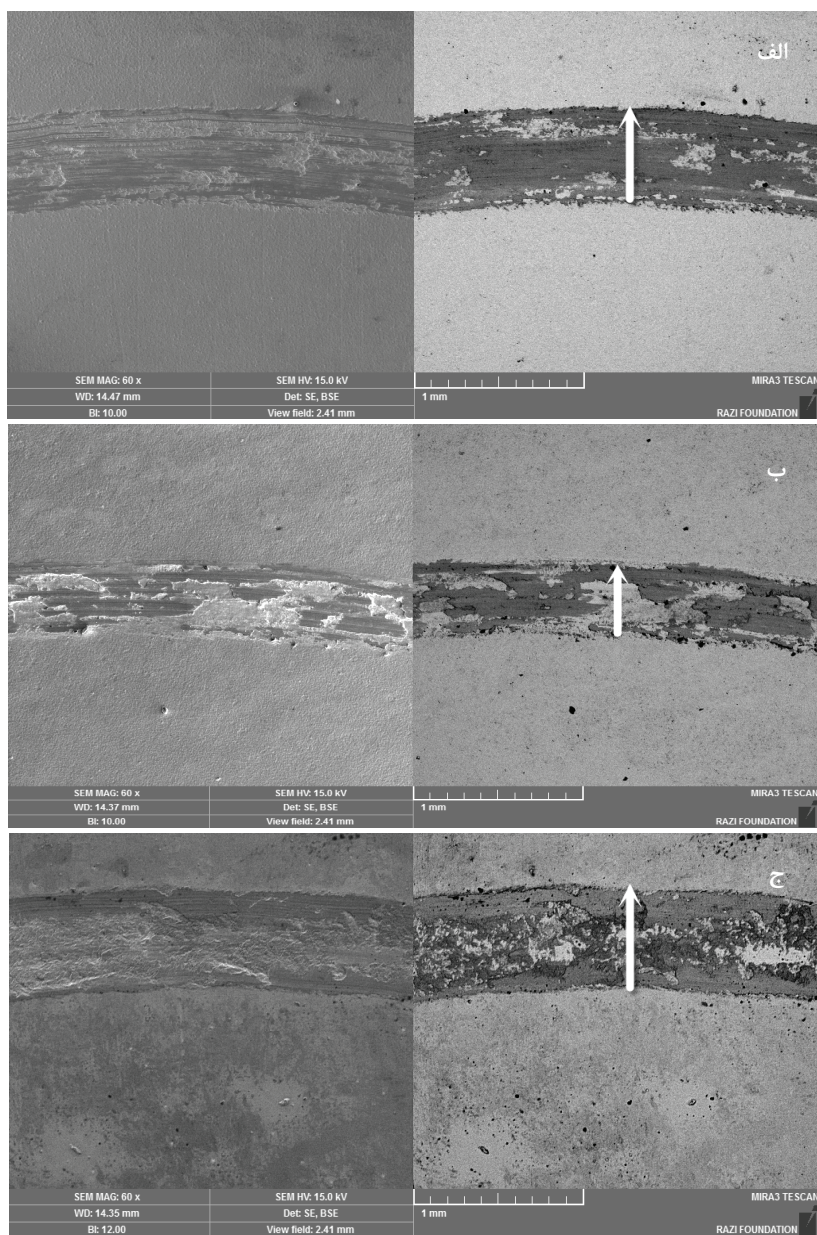
حجم زیادی از نمونه در اثر تماس بین فولادی از سطح جدا می‌شود.

شکل (۷-الف) مسیر سایش مربوط به Zn-11wt.%Ni را نشان می‌دهد. آنالیز EDS از مناطق تیره در تصویر الکترون‌های برگشتی نشان دهنده حضور مقادیر قابل توجهی اکسیژن در این نواحی است. بر اساس این نتایج می‌توان بیان کرد لایه اکسیدی نازکی سطح مسیر سایش را فراگرفته است. لایه اکسیدی تشکیل شده در صورت چسبندگی مناسب می‌تواند بعنوان روانکار عمل کرده و باعث کاهش ضریب اصطکاک و تلفات سایشی شود [۲۱]. لایه اکسیدی تشکیل شده در پوشش آلایژی حاوی ۱۱٪ نیکل در مقایسه با نمونه Zn-14wt.%Ni پیوسته‌تر بوده و سطح بیشتری را پوشانده است (شکل ۷-ب)). با این وجود ضریب اصطکاک و تلفات سایشی در نمونه حاوی ۱۱٪ نیکل بیشتر از نمونه حاوی ۱۴٪ نیکل است. باید به این نکته توجه شود که علاوه بر تشکیل لایه اکسیدی، سختی و سطح واقعی تماس بین پین و نمونه نیز در مقدار ضریب اصطکاک و تلفات سایشی اثرگذار هستند. با افزایش سختی، سطح واقعی تماس بین پین و نمونه کاهش یافته و در نتیجه ضریب اصطکاک نیز کم می‌شود. همچنین با کاهش سطح واقعی تماس، افزایش دما در مناطق محدودتری رخ داده و تشکیل اکسید نیز در مناطق محدودتری روی می‌دهد. تعادل میان کاهش سطح واقعی تماس با تشکیل و دوام لایه اکسید سطحی تعیین کننده مقدار ضریب اصطکاک خواهد بود. به نظر می‌رسد در مورد نمونه‌های Zn-11wt.%Ni و Zn-14wt.%Ni تاثیر سختی و پایین بودن سطح واقعی تماس بین پین و نمونه بر تاثیر تشکیل لایه پیوسته اکسیدی غلبه کرده است. مکانیزم سایش در هر دوی این نمونه‌ها سایش خراشان (با توجه به خراش‌های موجود در مسیر سایش) و اکسید شدن سطح است. در پوشش‌های Zn-17wt.%Ni (شکل ۷-ج)، انتظار می‌رود به دلیل افزایش نیکل و در نتیجه افزایش بیشتر سختی نسبت به پوشش‌های Zn-14wt.%Ni نرخ سایش کاهش یابد. اما نتایج بیانگر عکس این موضوع می‌باشد.

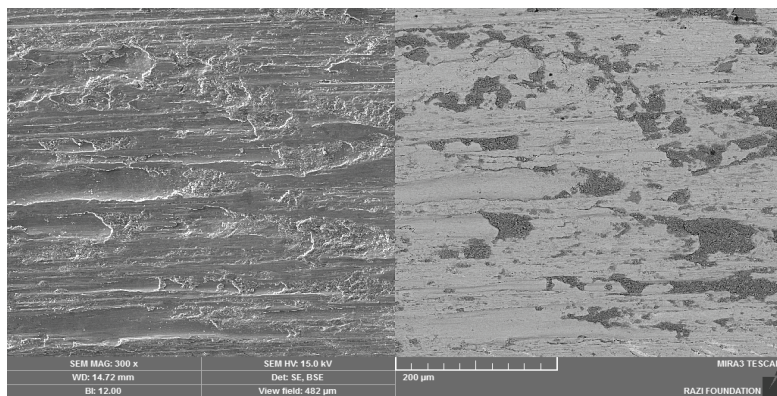
و مقدار نوسان در طول مسیر لغزش افزایش می‌یابد. در مورد پوشش‌های Zn-14wt.%Ni و Zn-11wt.%Ni ضریب اصطکاک در ابتدا افزایش یافته و بعد از رسیدن به حالت پایدار تقریباً تا انتهای آزمون ثابت باقی می‌ماند. افزایش دو مرحله‌ای ضریب اصطکاک در پوشش Zn-17wt.%Ni می‌تواند به دلیل جدا شدن قسمتهایی از پوشش در حین سایش به دلیل ترک‌دار بودن این پوشش باشد.

شکل ۴ و ۵ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌ها به دو صورت برگشتی (تصویر راست) و ثانویه (تصویر چپ) را نشان می‌دهد. فلش‌های رسم شده در تصاویر که بیان‌کننده پهنای مسیر سایش می‌باشند، به منظور مقایسه کیفی مقاومت به سایش پوشش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به این شکل‌ها مشخص است که مسیر سایش در پوشش Zn خالص بسیار عریض‌تر از مسیر سایش در پوشش‌های آلایژی است و این موضوع تایید کننده بهبود مقاومت به سایش با افزودن Ni به پوشش Zn خالص است. همچنین با مقایسه تصاویر ۸ (الف)، (ب) و (ج) می‌توان به بالاتر بودن مقاومت به سایش پوشش Zn-14wt.%Ni نسبت به دیگر پوشش‌ها پی برد.

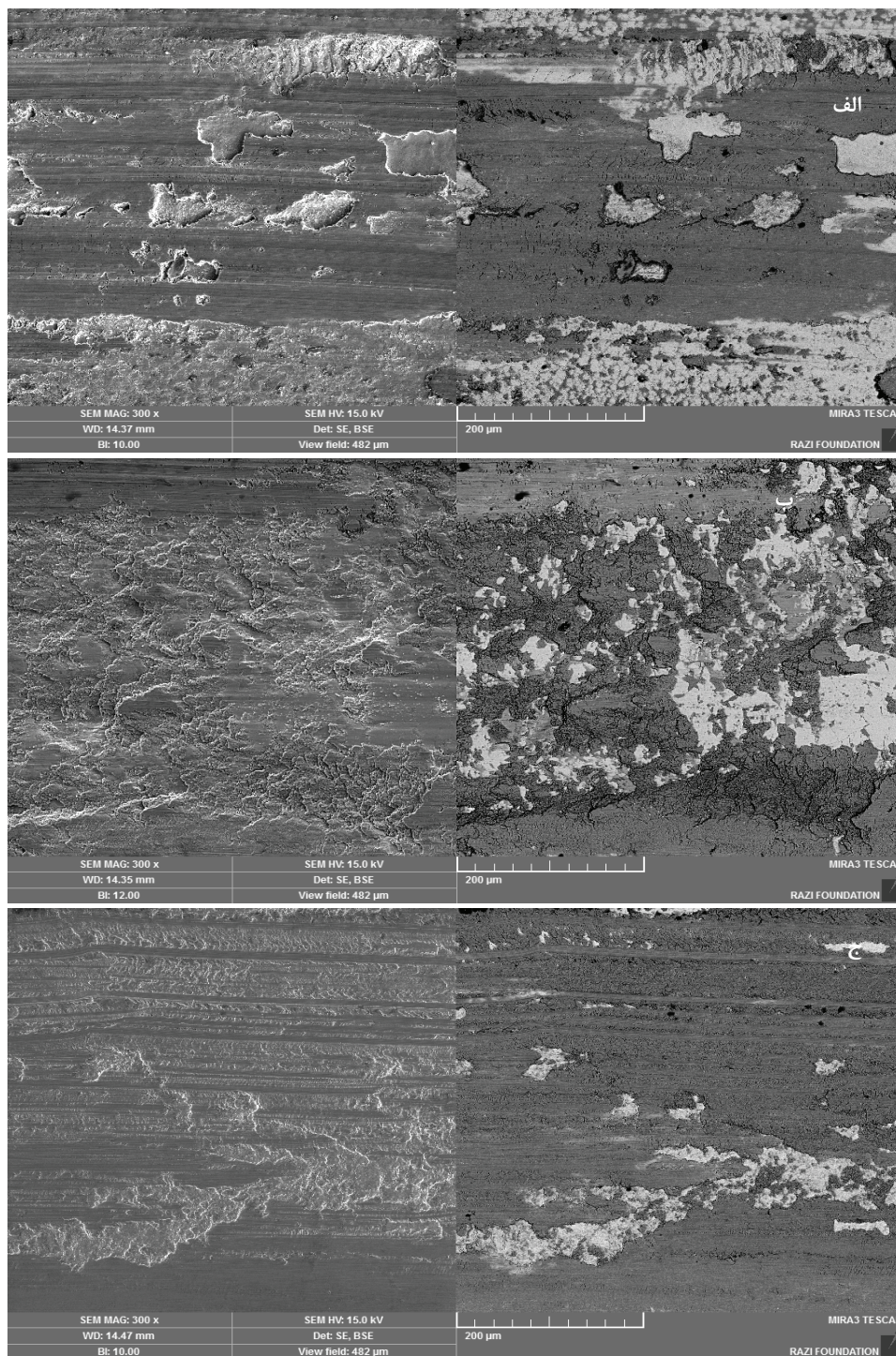
در شکل ۶ و ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به مسیر سایش پوشش‌های Zn خالص و Zn-Ni با بزرگنمایی بالاتر به دو صورت برگشتی (تصویر راست) و ثانویه (تصویر چپ) آورده شده است. خراش‌های عمیق و خطوط موجی شکلی در مسیر سایش پوشش روی خالص قابل مشاهده هستند. آنالیز EDS از قسمت‌های مرکزی مسیر سایش حاکی از حضور ۹۳ درصد وزنی آهن در مسیر سایش است. با توجه به سختی پایین پوشش روی خالص احتمال اینکه حین سایش قسمتهایی از پین جدا شده و به مسیر سایش منتقل شوند وجود ندارد. بنابراین می‌توان گفت آهن مشاهده شده در آنالیز EDS مربوط به زیرلایه فولادی است. در واقع با توجه به سختی و استحکام پایین پوشش روی خالص، این نمونه تحمل تنش‌های وارده حین سایش را نداشته و



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مسیر سایش پوشش‌های آلیاژی (الف) Zn-11wt.%Ni، (ب) Zn-14wt.%Ni، (ج) Zn-17wt.%Ni (راست تصویر الکترون‌های برگشتی و چپ تصویر الکترون‌های ثانویه).



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مسیر سایش پوشش Zn خالص (راست تصویر الکترون‌های برگشتی و چپ تصویر الکترون‌های ثانویه).



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از مسیر سایش پوشش‌های آلیاژی الف (Zn-11wt.%Ni، ب) Zn-14wt.%Ni، ج) Zn-17wt.%Ni (راست تصویر الکترون‌های برگشتی و چپ تصویر الکترون‌های ثانویه).

موجب سایش بیشتر در مسیر سایش می‌گردند [۱۹]. بنابراین مکانیزم سایش سه جسمه در این پوشش‌ها حاکم است که تخریب زیادی را در سطح به‌مراه دارد و این موضوع سبب گردیده پوشش‌های Zn-17wt.% Ni علی‌رغم سختی بالا، بیشترین مقدار ضریب اصطکاک و نرخ سایش را در بین دیگر پوشش‌های آلیاژی داشته باشد.

علت این امر را می‌توان به وجود میکروتُرک‌ها در پوشش نسبت داد. وجود میکرو ترک موجب کاهش استحکام در این پوشش‌ها گردیده در نتیجه در طول فرآیند سایش قسمتی از پوشش کنده می‌شود. از آنجایی که ذرات جدا شده از سطح سختی بالایی داشته و در حین سایش نیز در اثر کارسختی مستحکم‌تر می‌شوند، خود به عنوان جسم سوم عمل کرده و



## References

- [1] A. Marder, "The metallurgy of zinc-coated steel", Progress in materials science, Vol. 45, Issue. 3, 2000, pp. 191-271.
- [2] N. Boshkov, "Influence of the alloying component on the protective ability of some zinc galvanic coatings", Electrochimica acta, Vol. 51, Issue. 1, 2005, pp. 77-84.
- [3] D. Crotty, "Zinc alloy plating for the automotive industry", Metal finishing, Vol. 94, Issue. 9, 1996, pp. 54-58.
- [4] H. A. Sorkhabi, A. Hahrah, N. Parvinin-Ahmadi, J. Manzoori, "Zinc-nickel alloy coatings electrodeposited from a chloride bath using direct and pulse current", Surface and Coatings Technology, Vol. 140, Issue. 3, 2001, pp. 278-283.
- [5] C. Chang Hu, C. Kou Wang, " Effects of composition and re-flowing on the corrosion behavior of Sn-Zn deposits in brine media", Electrochimica Acta , Vol. 51, Issue. 20, 2006, pp. 1489-1497.
- [6] K.R. Sriraman, H.W. Strauss, S. Brahimi, R.R. Chromik, J.A. Szpunar, J.H. Osborne, "Tribological behavior of electrodeposited Zn, Zn-Ni, Cd and Cd-Ti coatings on low carbon steel substrates", Tribology International, Vol. 56, 2012, pp. 107-120.
- [7] C.N. Panagopoulos, K.G. Georarakis, P.E. Agathocleous, " Sliding wear behavior of zinc-nickel alloy electrodeposits", Tribol. Int, Vol. 36, Issue. 8, 2003, pp. 619-623.
- [8] S. Ghaziof, W. Gao, " Electrodeposition of single gamma phased Zn-Ni alloy coatings from additive-free acidic bath", Applied Surface Science, Vol. 311, 2014, PP.635-642.
- [9] L. Lee, É. Régis, S. D. Richard, R. Chromik, " Fretting wear behavior of Zn-Ni alloy coatings" Wear, Vol. 330-331, 2015, pp. 112-121.
- [10] K.R. Sriraman, H.W. Strauss, S. Brahimi, R.R. Chromik, J.A. Szpunar, J.H. Osborne, "Tribological behavior of electrodeposited Zn, Zn-Ni, Cd and Cd-Ti coatings on low carbon steel substrates", Tribology International, Vol. 56, 2012, pp. 107-120.
- [15] X. Qiao, H. Li, W. Zhao, D. Li, " Effects of deposition temperature on electrodeposition of zinc-nickel alloy coatings", Electrochimica Acta, Vol. 89, 2013, PP. 771- 777.
- [16] M. Gavrilă, J.P. Millet, H. Mazille, D. Marchandise, J.M. Cuntz, "Corrosion behavior of zinc-nickel coatings, electrodeposited on steel", Surface and Coating Technology, Vol. 123, Issues. 2-3, 2000, pp. 164-172.
- [17] J. F Archard, Contact and Rubbing of Flat Surfaces, Journal of Applied Physics, Vol. 24, Issue. 8, 1953, p.981-988
- [18] S. Mahdavi , F. Akhlaghi , Effect of the SiC particle size on the dry sliding wear behavior of SiC and SiC-Gr-reinforced Al6061 composites, Journal of Materials Science, Vol. 46, Issue. 24, 2011, pp 7883-7894.
- [19] S. Mahdavi, S.R. Allahkaram, Composition, characteristics and tribological behavior of Cr, Co-Cr and Co-Cr/TiO<sub>2</sub> nano-composite coatings electrodeposited from trivalent chromium based baths, alloys and compounds, Volume 635, 25 June 2015, Pages 150-157.
- [20] S. S. Abdelrehim, E. E. Fouad, S. M. Abdelwahab, " Electroplating of zinc-nickel binary alloys from acetate baths", Electrochimica Acta, Vol. 41, Issue. 9, 1996, pp. 1413-1418.
- [21] G. Bolelli , L. Lusvarghi , Heat treatment effects on the tribological performance of HVOF sprayed Co-Mo-Cr-Si coatings, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 15, Issue 4, 2006, pp 802-810.

## ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش از آبکاری الکتریکی برای تولید پوشش های Zn خالص و Zn-Ni استفاده شده و سختی، ریز ساختار و رفتار سایشی پوشش ها مورد بررسی قرار گرفت. مهم ترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

۱. با افزایش مقدار Ni در پوشش آلیاژی Zn-Ni مقدار سختی حدود ۵ تا ۶ مرتبه بهبود می یابد.
۲. پوشش های آلیاژی Zn-Ni با ۱۱٪ وزنی دارای فاز میانی  $Ni_3Zn_{22-n}$  می باشد، با افزایش مقدار نیکل به ۱۴٪ وزنی ساختار به تک فاز  $\gamma-Ni_5Zn_{21}$  تغییر می یابد و با رسیدن مقدار Ni در پوشش به ۱۷٪ وزنی فاز میانی  $\beta$  Zn-Ni نیز ظهور می یابد که موجب تغییر از تک فاز به دو فاز می گردد.
۳. پوشش Zn خالص تحمل تنش های وارده حین سایش را نداشته و حجم زیادی از نمونه در اثر تماس پین فولادی از سطح جدا شده و به زیر لایه رسیده است.
۴. مکانیزم سایش در پوشش Zn-11wt.%Ni و Zn-14wt.%Ni سایش خراشان و اکسید شدن سطح است.
۵. مکانیزم سایش در پوشش Zn-17wt.%Ni سایش سه جسمه می باشد.
۶. نتایج آزمون سایش و همچنین نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش نشان می دهد که با افزودن نیکل به پوشش Zn خالص، ضریب اصطکاک حدود دو مرتبه کاهش و در نتیجه مقاومت به سایش افزایش یافته است.
۷. در نهایت بررسی مقادیر کاهش حجم و ضریب اصطکاک در پوشش های آلیاژی و روی خالص بیانگر بالاترین مقاومت به سایش در پوشش آلیاژی به Zn-14wt.%Ni اختصاص دارد.