

مطالعه رفتار سایشی پوشش‌های اعمال شده بر روی تیتانیوم به روش‌های آبرکاری الکتریکی و نیتروژن دهی پلاسمایی

آروین تقی‌زاده تبریزی^{۱*}، حسین آقاجانی^۲، حسن ثقفیان^۳، فرهاد فرهنگ لاله^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مواد و متالورژی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۴- کارشناس ارشد، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران

* iarvint@tabrizu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
خواص سطحی قطعات صنعتی و مخصوصاً رفتار سایشی آن‌ها در کاربردهای مشخص نقش تعیین‌کننده‌ای در طول عمر سرویس دهی دارد. آبرکاری کروم و نیتروژن دهی پلاسمایی از جمله دو روش رایج جهت اعمال پوشش‌های سخت هستند که قابلیت اعمال بر روی زیرلایه‌های مختلف دارند. در تحقیق حاضر، این دو پوشش بر روی زیرلایه تیتانیومی اعمال شده و رفتار سایشی پوشش‌های اعمال شده با یکدیگر مقایسه شده است. برای بررسی رفتار سایشی از آزمایش پین بر روی دیسک استفاده شده است. برای تعیین مکانیزم سایش غالب در نمونه‌ها، از بررسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی جهت بررسی سطح اثر قسمت سایش یافته استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد علیرغم ریزسختی به‌دست آمده بیشتر در نمونه‌های آبرکاری کروم شده در حدود ۵۹۷ و یکرز در چگالی جریان ۵۰ آمپر بر دسی متر مربع و ۶۰ دقیقه و ۵۲۸ ویکرز در نمونه نیتروژن دهی شده در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد که تقریباً ۳ برابر ریزسختی نمونه تیتانیومی است، این نمونه‌ها دارای کاهش وزن بیش‌تری بوده و رفتار سایشی ضعیف‌تری نسبت به نمونه‌های نیتروژن دهی شده از خود نشان می‌دهند. نتایج نشان‌دهنده فعال بودن مکانیزم سایش چسبان در هر دو نمونه‌های پوشش کروم‌دار و نمونه‌های نیتروژن دهی شده است. هم‌چنین کم‌ترین ضریب اصطکاک به‌دست آمده در نمونه نیتریده شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۰/۵۱۹ است.	دریافت: ۲۷ دی ۱۳۹۸ پذیرش: ۱۰ خرداد ۱۳۹۹ کلید واژگان: آبرکاری کروم نیتروژن دهی پلاسمایی تیتانیوم رفتار سایشی مکانیزم سایش

Studying the Wear Behavior of applied coats on Titanium by Chromium Electroplating and Plasma Nitriding Processes

Arvin Taghizadeh Tabrizi^{1*}, Hossein Aghajani², Hasan Saghafian³, Farhad Farhang Laleh⁴

1- PhD Candidate, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Materials Engineering, Iran Science and Technology University, Tehran, Iran

4- Space Thrusters Research Institute, Tabriz, Iran

* iarvint@tabrizu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

10.30495/apme.2021.681635

Keywords:

Chromium Electroplating

Plasma Nitriding

Titanium

Wear Behavior

Wear Mechanism

Abstract

The surface properties of industrial parts and especially wear behavior of them plays an important role in life service of them. Chromium coat and plasma nitriding are two common ways of applying hard coat on diverse substrates. In this paper, both of these coats applied on titanium substrate as an advanced engineering materials and the wear behavior of them were compared. For this aim, Pin on disk test was carried out and the weight loss was measured. For determining the wear mechanism of the sample, field emission scanning electron microscopy study was carried out on wear traces. Results show that although the achieved surface micro hardness value of chromium coats is higher than nitride samples, 594 HV at current density of 50 A/dm² and 60 min versus 528 HV at 600 °C for nitride sample, but they show the weaker wear resistance. Adhesive wear mechanism is determined mechanism at both samples. Also, the lowest coefficient of friction is obtained at sample nitride at 600 °C.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Arvin Taghizadeh Tabrizi, Hossein Aghajani, Hasan Saghafian, Farhad Farhang Laleh, Studying the Wear Behavior of applied coats on Titanium by Chromium Electroplating and Plasma Nitriding Processes, New Process in Material Engineering, 2021, 15(1), 47-64.

۱- مقدمه

تریبولوژی تکنولوژی و علمی است که در خصوص سطوح در حال حرکت و کنش و واکنش‌های آن بحث می‌کند. سایش، اصطکاک و روانکاری به صورت مستقیم با تریبولوژی در ارتباط بوده [۱] و بحث سایش و اصطکاک تقریباً در همه جا قابل‌رؤیت هستند [۲]. کارایی اغلب قطعات فلزی به کیفیت سطح و فرایند تغییر شکل آن‌ها بستگی دارد [۳]. تخریب سطح بسیار مهم بوده و غالباً عامل اصلی کاهش عمر و عملکرد اجزای ماشین است. سایش را می‌توان به صورت تخریب ناخواسته سطح ناشی از محیط یا کاربرد تعریف کرد. اساساً می‌توان سایش را پدیده‌ای سطحی در نظر گرفت که یکی از مخرب‌ترین آثاری است که فلزها در معرض آن قرار دارند. مواد و فرایندهای بسیاری برای حفاظت در مقابل سایش وجود دارند. برای انتخاب ماده و فرایندی ویژه، به تحلیل کاملی از شرایط واقعی کار، کاربرد و محدودیت‌های آن ماده و فرایند و نیز داده‌های هزینه‌ای نیاز است. خصوصیات تیتانیوم به عنوان یک ماده مهندسی مدرن که شرایط کار در شرایط بحرانی را دارد، بسیار مناسب است [۴]. با این وجود ضعف در برابر محیط‌های سایشی و محیط‌های دما بالای اکسیدکننده باعث شده است پژوهشگران و مهندسان درصدد بهبود و تقویت این نقاط ضعف باشند. به این منظور پوشش‌دهی به عنوان یکی از بهترین روش‌های تقویت خواص سایشی و تریبولوژیکی مورد توجه قرار گرفته است [۵-۶].

امروزه مهندسان و طراحان از روش‌های مختلف اصلاح سطح برای بهبود خواص سطحی قطعات و مواد صنعتی و جلوگیری از اکسیداسیون آن‌ها بهره می‌برند که مهم‌ترین آن اعمال پوشش محافظ است [۷-۸] در این بین پوشش‌های سخت به دلیل جلوگیری از اعوجاج و تغییر شکل و هم‌چنین مقاومت در برابر سایش بسیار پرکاربرد هستند، ولی باید توجه داشت که به سبب شکننده بودن این پوشش‌ها، تمایل به ترک برداشتن آن‌ها نیز بیشتر می‌شود. به همین منظور دارا بودن هم‌زمان سختی و چقرمگی بالا در کنار هم بسیار مهم بوده و تلاش‌های بسیاری در جهت بهینه کردن

پوشش‌های اعمالی صورت گرفته است. نیتريد‌های فلزات واسطه به عنوان یکی از پوشش‌های حفاظتی سخت مطرح هستند که در صنایع گوناگونی مانند برش‌کاری و شکل‌دهی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پوشش‌ها ویژگی‌های بی‌نظیری مانند سختی بالا، خنثی بودن از نظر شیمیایی و پایداری حرارتی تحت شرایط سخت مانند اکسایش و تشعشع را از خود نشان می‌دهند. پوشش‌های متنوعی با روش‌های گوناگونی بر روی تیتانیوم و آلیاژهای آن اعمال شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در این بین پوشش‌های عناصر فلزات واسطه (TMN) بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پوشش‌ها شامل نیتريد مولیبدن، نیتريد تیتانیوم [۹-۱۱]. نیتريد نیوبیوم و نیتريد کروم هستند که تا به حال بررسی‌های زیادی در مورد آن‌ها صورت گرفته است. نیتريد تیتانیوم به عنوان مطرح‌ترین پوشش از این خانواده مطرح بوده و از اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال این پوشش دارای محدودیت‌های مخصوص به خود در کاربردهای جدید است. از جمله این موارد پایداری حرارتی ضعیف و مقاومت پایین به اکسایش در دمای بالا است که باعث ایجاد تنش در سطح شده و موجب تخریب پوشش می‌شود.

چانگک و همکارانش^۱ به بررسی رفتار سایشی پوشش نیتريد تیتانیوم سنتز شده در شرایط مختلف پرداخته که به طور عمومی باعث بهبود رفتار سایشی زیرلایه شده است [۱۲]. این موضوع توسط ژانگک و همکارانش نیز در پوشش‌دهی زیرلایه آلومینیوم ۲۰۲۴ نیز به خوبی نشان داده شده است [۱۳]. هم‌چنین اعمال پوشش کروم به عنوان رایج‌ترین پوشش مورد استفاده در صنعت بر روی انواع زیرلایه‌ها مانند فولاد [۱۴]، آلومینیوم [۱۵-۱۶]، کربن‌ها [۱۷] و پلاستیک‌ها باعث افزایش سختی سطح و بهبود رفتار سایشی می‌شود. با وجود سمی بودن مواد مورد استفاده در روش آبکاری کروم [۱۸-۱۹]، به دلیل ارزان قیمت بودن این روش نسبت به سایر روش‌های موجود در صنعت به

گرفت. عملیات پیرسازی به منظور ایجاد تعادل در غلظت بین یون‌های سه ظرفیتی و شش ظرفیتی کروم انجام شد. برای ایجاد یکنواختی در ترکیب و دمای محلول از گرم - کن - هم‌زن الکتریکی استفاده شد. آبکاری به وسیله منبع تغذیه‌ای با قابلیت ایجاد جریان‌های مستقیم انجام گرفت. برای دستیابی به پوشش مناسب در آبکاری الکتریکی کروم و به منظور یکسان بودن چگالی جریان آندی و کاتدی، سطح آند و کاتد برابر، آند از جنس سرب (فلز غیر حل‌شونده) و به شکل صفحه‌ای به ضخامت ۱ میلی‌متر و مساحت سه در سه سانتی‌متر مربع انتخاب شدند. بعد از آماده‌سازی سطح آند و کاتد، ابتدا آن‌ها ۱۵ دقیقه درون محلول آبکاری قرار گرفته تا با محلول در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد هم‌دمای شده و سپس آبکاری روی آن‌ها آغاز شد. نمونه‌ها در ۴ چگالی جریان متفاوت ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ آمپر بر دسی‌متر مربع و دو زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه آماده شدند که طبق جدول (۱) کدگذاری شدند.

۲-۲- نیتروژن دهی پلاسمایی

بعد از آماده‌سازی، نمونه‌ها به منظور جلوگیری از اکسیداسیون طی فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی در درون شابلون تهیه شده تیتانیومی قرار گرفته و به درون محفظه منتقل شدند. قبل از انجام فرایند، محفظه تخت خلأ ۰/۰۶ میلی - بار قرار گرفته و جهت اکسیدزدایی نهایی و حذف هرگونه آلودگی احتمالی سطح تیتانیوم، فرایند کند و پاش به مدت ۳۰ دقیقه و تا رسیدن به دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در ولتاژ ۳۷۵ ولت و جریان ۰/۷-۰/۴ آمپر انجام گرفت. به منظور انجام نیتروژن دهی پلاسمایی، سه دمای ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. ترکیب گاز نیتروژن دهی در کلیه نمونه‌ها ثابت و برابر با ۷۵ درصد نیتروژن و ۲۵ درصد هیدروژن در نظر گرفته شد. زمان نیتروژن دهی ثابت ۴ ساعت و از لحظه به دما رسیدن نمونه - ها محاسبه شد. نرخ افزایش دما به گونه‌ای انتخاب شد که تقریباً طی ۲ ساعت، نمونه‌ها به دمای مورد نظر برسند. نمونه‌های کدگذاری شده در جدول (۱) آورده شده‌اند.

خصوص نیتروژن دهی پلاسمایی، این روش بیشتر مورد توجه صنعتگران قرار می‌گیرد.

مطالعاتی در زمینه مقایسه این دو روش و خواص به‌دست آمده بر روی زیرلایه‌های متفاوتی انجام گرفته است، ولی تا به حال مطالعه زیادی در مورد تیتانیوم صورت نگرفته است؛ بنابراین در تحقیق پیش‌رو، سعی بر این شده است رفتار سایشی نمونه‌های تیتانیومی پوشش داده شده به هر دو روش آبکاری کروم و نیتروژن دهی پلاسمایی مورد بررسی و مطالعه قرار بگیرد و مقایسه‌ی رفتار سایشی بین دو نوع پوشش نفوذی و رسوبی انجام نشده است. هم‌چنین با استفاده از روش پین روی دیسک، رفتار سایشی نمونه‌های آماده شده، تغییر وزن و هم‌چنین تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده مورد بررسی قرار بگیرد. هم‌چنین مکانیزم سایشی غالب در هر دو روش مشخص شود.

۲- مواد و روش

صفحات تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت یک میلی‌متر و به ابعاد سه در سه سانتی‌متر مربع به عنوان زیر لایه جهت انجام فرایند پوشش‌دهی برش داده شد. عملیات آماده‌سازی قبل از پوشش‌دهی نمونه‌ها توسط ورقه‌های سنباده از جنس کاربید سیلیسیم از شماره ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ سنباده‌زنی شدند و عملیات چربی‌گیری در محلول استون تحت امواج اولتراسونیک به مدت ۱۰ دقیقه در دمای محیط صورت گرفت. بعد از عملیات چربی‌گیری نمونه‌ها با آب دیونیزه شست و شو و بلافاصله خشک شده و در محلول اسید کلریدریک فعال شده و بعد از شست و شو مجدد با آب دیونیزه آماده پوشش‌دهی و انتقال به حمام آبکاری کروم و محفظه انجام نیتروژن دهی پلاسمایی شدند.

۲-۱- آبکاری الکتریکی کروم

برای ایجاد پوشش کروم از محلول استاندارد آبکاری الکتریکی کروم استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن حاوی ۲۵۰ گرم بر لیتر اسید کرومیک و ۲/۵ گرم بر لیتر اسید سولفوریک به عنوان کاتالیزور است. برای آماده‌سازی محلول آبکاری، روی محلول عملیات پیرسازی انجام

جدول (۱): کدگذاری نمونه‌های پوشش داده شده

نمونه‌های آبکاری کروم		کد نمونه
زمان (دقیقه)	چگالی جریان (آمپر بر دسی‌متر مربع)	
۳۰	۳۰	TiCr-3030
	۴۰	TiCr-4030
	۵۰	TiCr-5030
	۶۰	TiCr-6030
	۳۰	TiCr-3060
	۴۰	TiCr-4060
۶۰	۵۰	TiCr-5060
	۶۰	TiCr-6060
نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی به مدت ۴ ساعت در ترکیب گاز ۷۵:۲۵ N ₂ /H ₂		
دمای نیتروژن دهی پلاسمایی (درجه سانتی‌گراد)	کد نمونه	
۵۰۰	PN500	
۵۵۰	PN550	
۶۰۰	PN600	

سایش غالب و به منظور ارزیابی ترکیب پوشش ایجاد شده و زیرلایه از میکروسکوپ الکترونی روبشی، FE-SEM، Mira3 Vega TESCAN مجهز به آنالیز EDS استفاده شد. از سطح پوشش نمونه‌ها و از اثر سایش تصویربرداری شد.

۳- نتایج و بحث

مشاهدات ماکروسکوپی پوشش‌های کروم اعمال شده بر روی تیتانیوم، نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن این روش بوده و تمامی نمونه‌ها به طور مؤثری پوشش براق داده شده‌اند. هم‌چنین مشاهدات ماکروسکوپی نشان‌دهنده افزایش میزان تورق در پوشش اعمال شده با افزایش زمان است، به طوری که نمونه TiCr-6060 به طور کامل متورق بوده و پوشش با کمترین ضربه از زیرلایه جدا می‌شود. این پدیده زمانی که چگالی جریان زیاد می‌شود، نیز به طور نامحسوس قابل مشاهده است. نتایج اندازه‌گیری شده تغییر وزن و تغییر ضخامت محاسبه شده در جدول (۲) آورده شده است. همان‌طور که مشخص است به دلیل تغییر وزن رخ داده در نمونه‌ها، پوشش روی نمونه‌ها اعمال شده است. می‌توان بیان کرد که در زمان ثابت با افزایش میزان چگالی جریان، سرعت یون‌های کروم موجود در محلول آبکاری افزایش یافته و کروم بیشتری بر روی زیرلایه تیتانیومی قرار گرفته است. ضخامت پوشش کروم اعمال شده با استفاده از محاسبه تغییر وزن نمونه‌ها و سطح مقطع آبکاری، محاسبه و

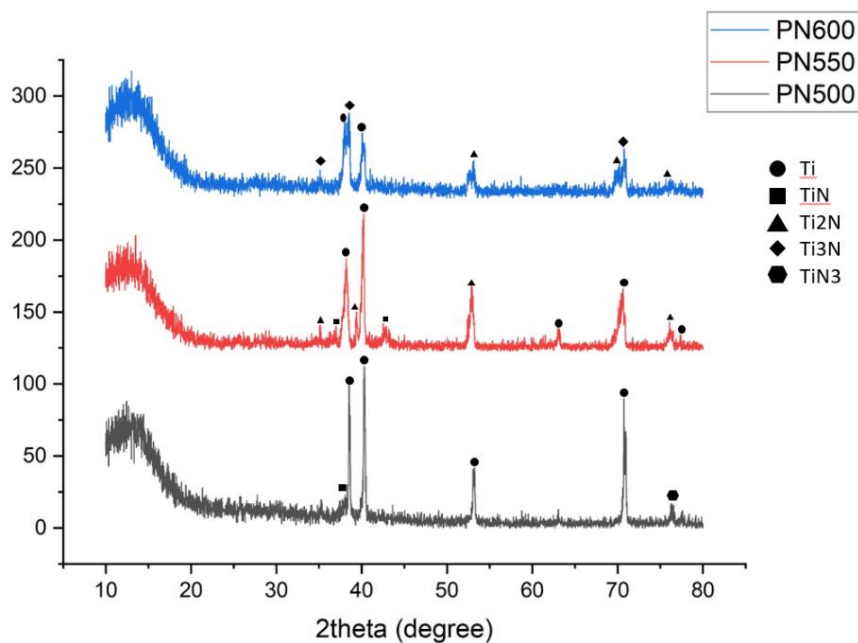
۲-۳- مشخصه‌یابی

آزمایش میکروسختی سنجی ویکرز تحت نیروی ۰/۴۹ نیوتن (۵۰ گرم نیرو) با زمان ۱۵ ثانیه از سطح نمونه‌ها انجام شد. هر نمونه سه بار تحت آزمون سختی سنجی قرار گرفت و میانگین حاصل از سه آزمون گزارش شده است. به منظور بررسی رفتار سایشی نمونه‌ها، از آزمون پین روی دیسک بر اساس استاندارد ASTM G99 استفاده شد. نمونه‌ها تحت نیروی ۳ نیوتن و مسافت ۸۰ متر با سرعت دوران ۱۲۰ دور بر دقیقه تحت آزمایش قرار گرفتند. در این آزمایش از پین تیتانیومی گرید یک با نوک تخت به قطر ۵ میلی‌متر و سختی ۲۰۰ ویکرز استفاده شد. نیروی ۳ نیوتنی با استفاده از رسم نمودار نیرو بر حسب وزن از دست رفته اندازه‌گیری شده برای نمونه تیتانیومی بدون پوشش و بر حسب تغییر شیب در نمودار به دست آمده است. قبل از انجام آزمون وزن اولیه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری وزن توسط ترازویی با دقت ± 0.001 گرم انجام شد. دستگاه سایش در هر ثانیه ۱۰ داده به نرم‌افزار انتقال و ثبت کرده و به صورت هم‌زمان در حین انجام آزمون، نمودار ضریب اصطکاک ترسیم شد. بعد از آزمون سایش، با استفاده از پروفیل‌متری، زبری سطح و تغییرات آن در محل سایش و پوشش مورد بررسی قرار گرفت. برای تشخیص تشکیل فازهای نیتریدی، آزمون پراش اشعه ایکس بر روی نمونه‌ها انجام شد. همچنین برای بررسی مورفولوژی پوشش، بررسی مکانیزم

کاملاً مشخص است که اعمال پوشش کروم به روش آبکاری الکتریکی، باعث افزایش میزان ریزسختی حداقل تا دو برابر نمونه شاهد شده است. همچنین با توجه به این نمودار، مشخص است که با اعمال پوشش نیتride بر روی زیرلایه در دماهای ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار ریزسختی افزایش می‌یابد که این افزایش با افزایش دمای فرایند محسوس‌تر شده به طوری که بیشینه مقدار میکروسختی برای نمونه نیتride شده در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. می‌توان تشکیل فازهای نیتrideی بیش‌تری در این دما را عامل افزایش سختی دانست؛ زیرا در دمای بالاتر نفوذ اتم‌های نیتروژن به سطح زیرلایه با سرعت بیش‌تری انجام می‌گیرد. نکته قابل‌توجه در این نمودار، مقایسه میزان ریزسختی به‌دست آمده در دو فرایند آبکاری کروم و نیتروژن دهی پلاسمایی است.

با استفاده از اندازه‌گیری میزان تغییر وزن نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون سایش، نمودار شکل (۳) به‌دست آمده است. نتایج کاهش وزن نشان می‌دهد که نمونه‌های آبکاری شده در ۶۰ دقیقه، کاهش وزن کمتری را نسبت به نمونه‌های آبکاری شده در ۳۰ دقیقه از خود نشان می‌دهند. همچنین با توجه به ریزسختی به‌دست آمده انتظار می‌رود که نمونه‌های TiCr-3060 و TiCr-5060 کاهش وزن کمتری را از خود نشان دهند. با توجه به اعداد محاسبه شده، مشخص است که نمونه TiCr-3060 کمترین میزان کاهش وزن را از خود نشان داده است و با افزایش چگالی جریان در زمان ثابت ۶۰ دقیقه، میزان کاهش وزن نمونه‌ها در اثر آزمون سایش، افزایش می‌یابد. متورق بودن بخش‌هایی از پوشش نمونه TiCr-5060 دلیل افزایش میزان کاهش وزن این نمونه نسبت به TiCr-3060، علیرغم ریزسختی به‌دست آمده آن‌ها است.

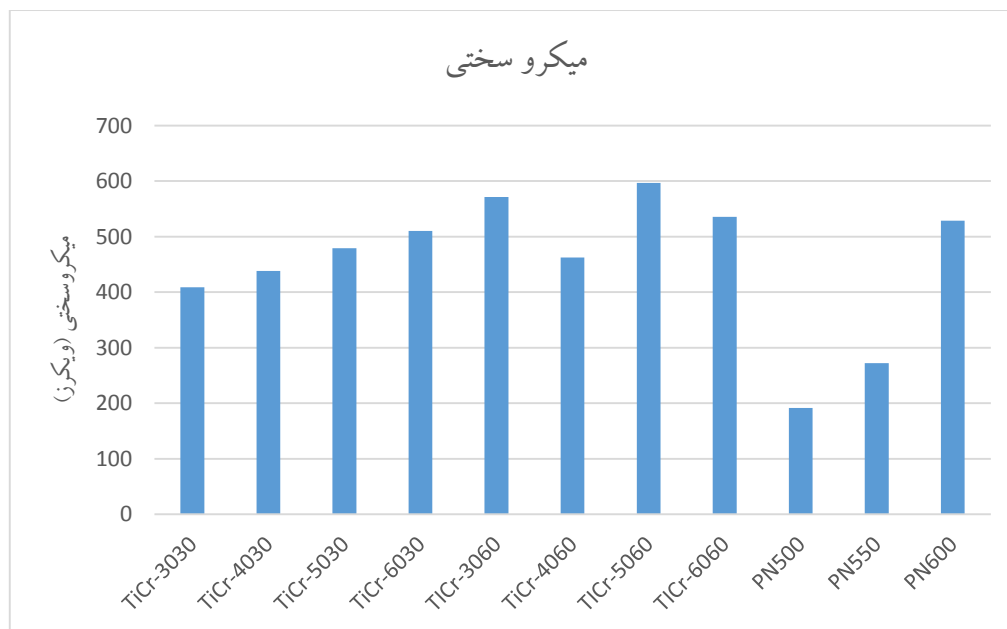
نشان داده شده است. براساس این نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش مدت زمان و چگالی جریان اعمالی در آبکاری الکتریکی، ضخامت پوشش اعمال شده افزایش یافته است. بیشترین تغییر وزن و ضخامت در نمونه TiCr-6060 مشاهده شده است که به دلیل متورق بودن پوشش کروم به‌دست آمده، مطلوب ادامه روند پژوهش نبوده و کمترین تغییر وزن و تغییر ضخامت در نمونه TiCr-3030 مشاهده می‌شود. همچنین سطح نمونه‌های نیتride شده به رنگ متمایل به زرد بوده که نشان‌دهنده موفقیت آمیز بودن فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی است و می‌توان ادعا کرد که سطح نمونه‌ها به طور تقریباً یکنواخت نیتride شده‌اند [۲۰]. یکنواختی حاصل و عدم مشاهده اکسیداسیون در نمونه‌های مورد آزمایش در نتیجه استفاده از شابلون اشاره شده از جنس خود تیتانیوم است. نمودارهای پراش اشعه ایکس در شکل (۱) نشان‌دهنده تشکیل فازهای نیتrideی در نمونه‌های نیتروژن دهی شده هستند؛ که با افزایش دمای نیتروژن دهی، مقدار فازهای نیتride افزایش می‌یابد. نمودار ارائه شده در شکل (۲) نشان‌دهنده ریزسختی نمونه‌های پوشش داده شده است. براساس این نمودار می‌توان مشاهده کرد که در مدت زمان ثابت ۳۰ دقیقه آبکاری الکتریکی، با افزایش چگالی جریان میزان ریزسختی به‌دست آمده نیز افزایش می‌یابد. همچنین تقریباً با افزایش مدت زمان آبکاری الکتریکی در چگالی جریان ثابت نیز، میزان ریزسختی به‌دست آمده افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش ضخامت پوشش است. نکته قابل‌توجه در نمودار میکروسختی، کاهش مقدار به دست آمده برای نمونه TiCr-6060 است که این نیز به دلیل متورق بودن پوشش و عدم چسبندگی مناسب پوشش این نمونه به زیر لایه است. لازم به ذکر است که مقدار ریزسختی برای نمونه شاهد تیتانیومی برابر ۲۰۰ ویکرز به دست آمده است که در مقایسه با اعداد نمودار شکل (۳)،



شکل (۱): نمودار پراش اشعه ایکس نمونه‌های نیتروژن دهی شده

جدول (۲): تغییر وزن و ضخامت محاسبه شده برای نمونه‌های کروم کاری شده

TiCr-6060	TiCr-5060	TiCr-4060	TiCr-3060	TiCr-6030	TiCr-5030	TiCr-4030	TiCr-3030	نمونه‌ها
۰/۰۷۳	۰/۰۳۹	۰/۰۳۷	۰/۰۵۴	۰/۰۵۸	۰/۰۴۹	۰/۰۳۷	۰/۰۳۳	تغییر وزن (گرم)
۱۱/۲۸	۶/۰۲	۵/۷۱	۸/۳۴	۸/۹۶	۷/۵۷	۵/۷۱	۵/۰۹	تغییر ضخامت (میکرومتر)



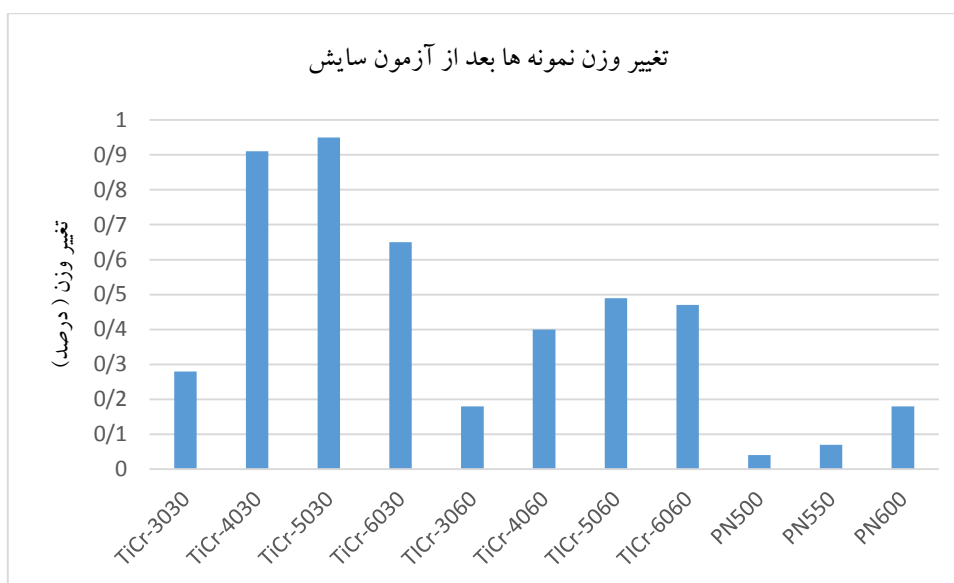
شکل (۲): ریزسختی نمونه‌های پوشش داده شده

سطح مورد تماس با سطح ساینده، پوشش بوده و ساییده شدن با سرعت بیش‌تری اتفاق می‌افتد ولی لایه نفوذی تشکیل شده در نیتروژن دهی پلاسمایی به عنوان سدی در برابر نفوذ و سایش سطح ساینده قرار می‌گیرد و رفتار سایشی بهتری را از خود نشان می‌دهد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده در شکل (۵) نشان داده شده است که نشان‌دهنده نفوذی بودن پوشش نیتریدی ۵-الف و رسوبی بودن پوشش کرومی ۵-ب است. نکته قابل‌تأمل در این مورد، عدم تناسب ریزسختی به‌دست آمده از سطح نمونه‌ها با میزان کاهش وزن است. نمونه‌های آبکاری شده ریزسختی بیشتری نسبت به نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی دارا هستند ولی کاهش وزن بیشتری را نیز از خود نشان می‌دهند. نتایج آزمون پروفیل‌متری و محاسبه زبری سطح محل سایش نمونه‌ها در شکل (۶) آورده شده است. در این شکل، تغییرات زبری سطح بر روی نمودار کاملاً مشخص است و می‌توان محل سایش را بر روی نمونه‌ها به راحتی تشخیص داد. همان‌طور که از نتایج درج شده بر روی نمودارهای شکل (۶) مشخص است، زبری سطح محل سایش نمونه‌های نیتریده شده، در اثر سایش افزایش یافته است که این می‌تواند به دلیل باقی ماندن ذرات سایش در محل باشد. زبری سطح محل اثر سایش، با افزایش دمای نیتروژن دهی، کاهش یافته است. هم‌چنین، در نمودار نشان داده شده در شکل (۶) که مربوط به نمونه‌های نیتریده شده است، به دلیل ماهیت نفوذی لایه تشکیل شده، تغییرات زبری سطح محل اثر سایش و لایه نیترید سالم، تفاوت چندانی با هم ندارند. تفاوت محسوسی در نمونه نیتریده شده در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که بدترین رفتار سایشی را در بین نمونه‌های نیتریده شده از خود نشان داده است؛ به عبارت دیگر می‌توان ادعا کرد که با بهبود رفتار سایشی نمونه‌های نیتریده شده، در زبری سطح اثر سایش، تغییرات به مراتب کمتری مشاهده می‌شود. افزایش زبری سطح اثر سایش نسبت به لایه پوششی سالم در نمونه‌های آبکاری شده با کروم نیز مشاهده می‌شود. نتایج پروفیل‌متری

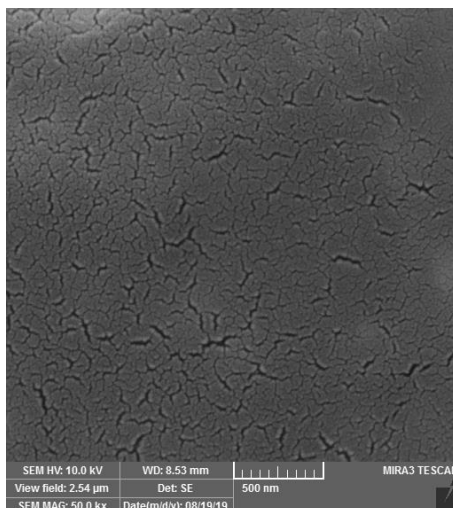
با مقایسه کاهش وزن نمونه‌های نیتریده شده نیز بر خلاف انتظار مشخص می‌شود که نمونه نیتریده شده در ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رفتار سایش بهتری را از خود نشان داده و میزان کاهش وزن بسیار کمتری دارد. کاهش وزن نمونه‌های نیتریده شده با افزایش دمای فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی افزایش می‌یابد و رفتار سایشی بدتری را از خود نشان می‌دهند. دو مورد را می‌توان به عنوان دلیل این امر بیان کرد. اول میزان کمتر نیتریدهای تشکیل شده در دمای پایین است که باعث می‌شود حین فرایند سایش، مقداری اکسید بر روی سطح تماس ایجاد شده و باعث افزایش مقاومت سایشی نمونه PN500 شود. لازم به ذکر است که تشکیل لایه اکسیدی بر روی یک سطح، با توجه به شکل‌پذیری کم آن، از به وقوع پیوستن کارسختی جلوگیری کرده و باعث بهبود رفتار سایشی می‌شود. دوم را می‌توان مربوط به ترک‌های ایجاد شده در سطح نمونه‌های نیترید شده در دمای بالا ارتباط داد، چنانچه بعد از بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به‌دست آمده از سطح نمونه‌ها، وجود ترک‌ها کاملاً مشخص است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه‌های نیترید شده در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در شکل (۴) آورده شده است. با توجه به این نمودار به وضوح می‌توان دریافت که کاهش وزن نمونه‌های نیتروژن دهی شده بسیار پایین‌تر از نمونه‌های پوشش کروم داده شده است و رفتار بدترین نمونه نیتریده شده نیز در حد بهترین رفتار سایشی نمونه آبکاری شده است. دو مورد را می‌توان دلیل این پدیده بیان کرد. اول این که لایه نیتریدی به‌دست آمده در فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی در دمای بالا تشکیل شده و پیوند متالورژیکی با زیرلایه تشکیل داده است. در حالی که پیوند ایجاد شده در آبکاری الکتریکی مکانیکی بوده و دلیل آن دمای بسیار پایین‌تر انجام این فرایند نسبت به فرایند نیتروژن دهی پلاسمایی است. دومین دلیل نوع پوشش به‌دست آمده در دو فرایند است. لایه نیتریدی به‌دست آمده، لایه نفوذی بوده و لایه کرومی، رسوبی است؛ به عبارت دیگر، به علت ضخامت ایجاد شده در آبکاری کروم بر روی زیرلایه،

پوشش و هم‌چنین، تغییر زبری سطح در این نمونه‌ها نسبت به سطح سایش نیافته و سالم بیشتر از نمونه‌های نیتروژن دهی شده است که دلیل این امر، همان‌گونه که پیشتر اشاره شده است، ماهیت افزایش وزن پوشش کروم است.

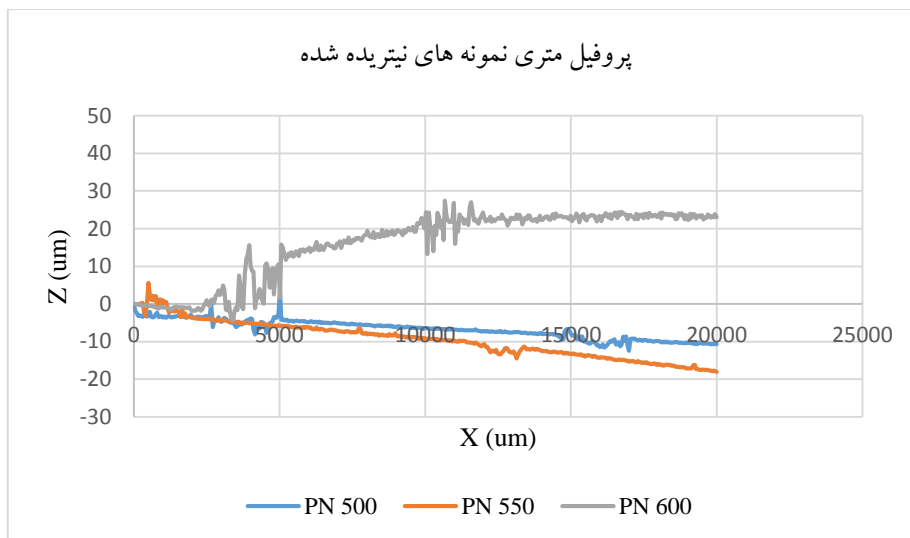
نمونه‌های آبکاری شده با کروم در شکل (۷) نیز آورده شده است. تغییرات زبری سطح محل اثر سایش در این نمونه‌ها هیچ روند و الگوی مشخصی را نشان نمی‌دهند. با این وجود با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل (۷)، مشخص می‌شود که بعد از سایش، مقدار تغییر در ارتفاع



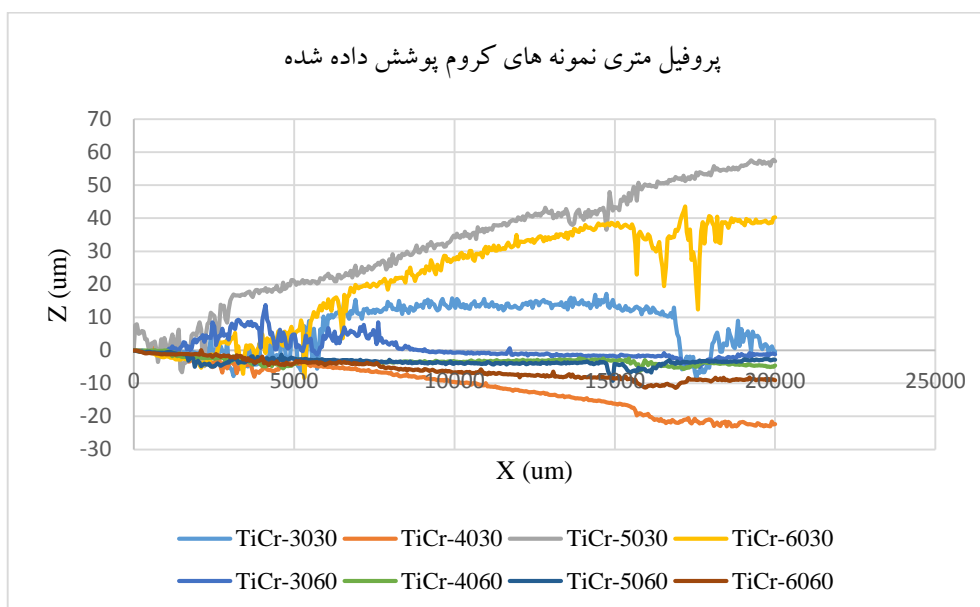
شکل (۳): تغییر وزن نمونه‌ها بعد از آزمون سایش



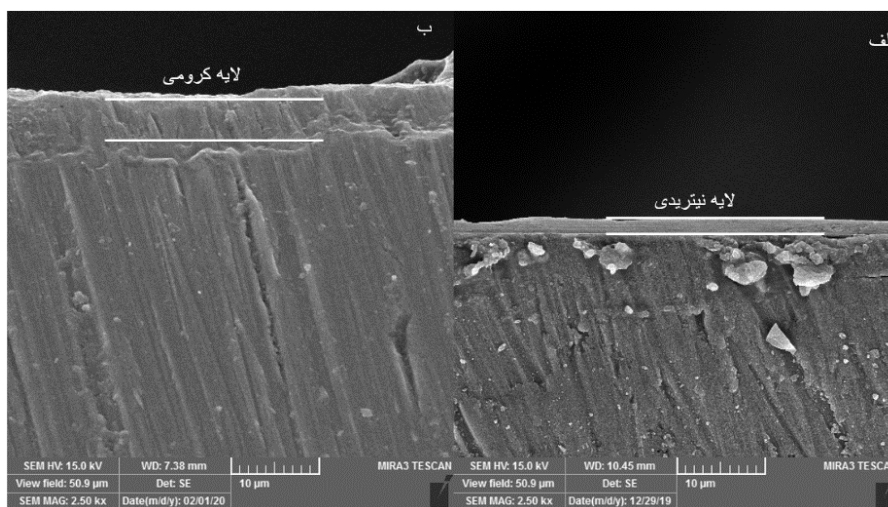
شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ترک‌های ایجاد شده در نمونه PN600



شکل (۵): پروفیل متری نمونه‌های نیتریده شده



شکل (۶): پروفیل متری نمونه‌های کروم پوشش داده شده



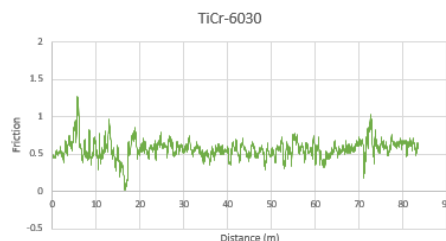
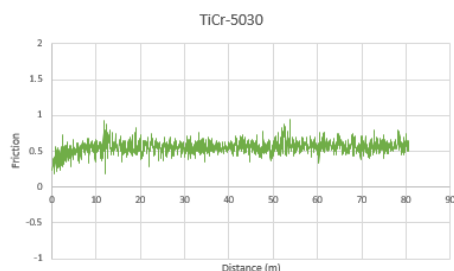
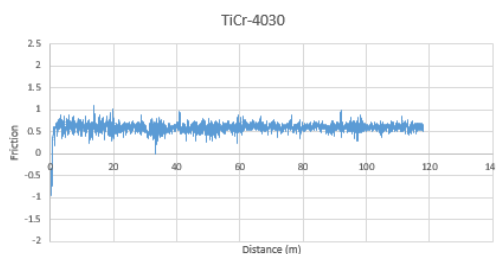
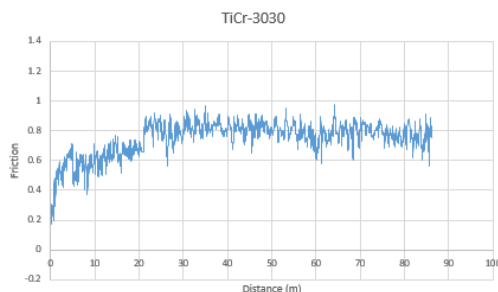
شکل (۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش الف- نیتریدی (نمونه PN600) و ب- کرومی (TiCr-3060)

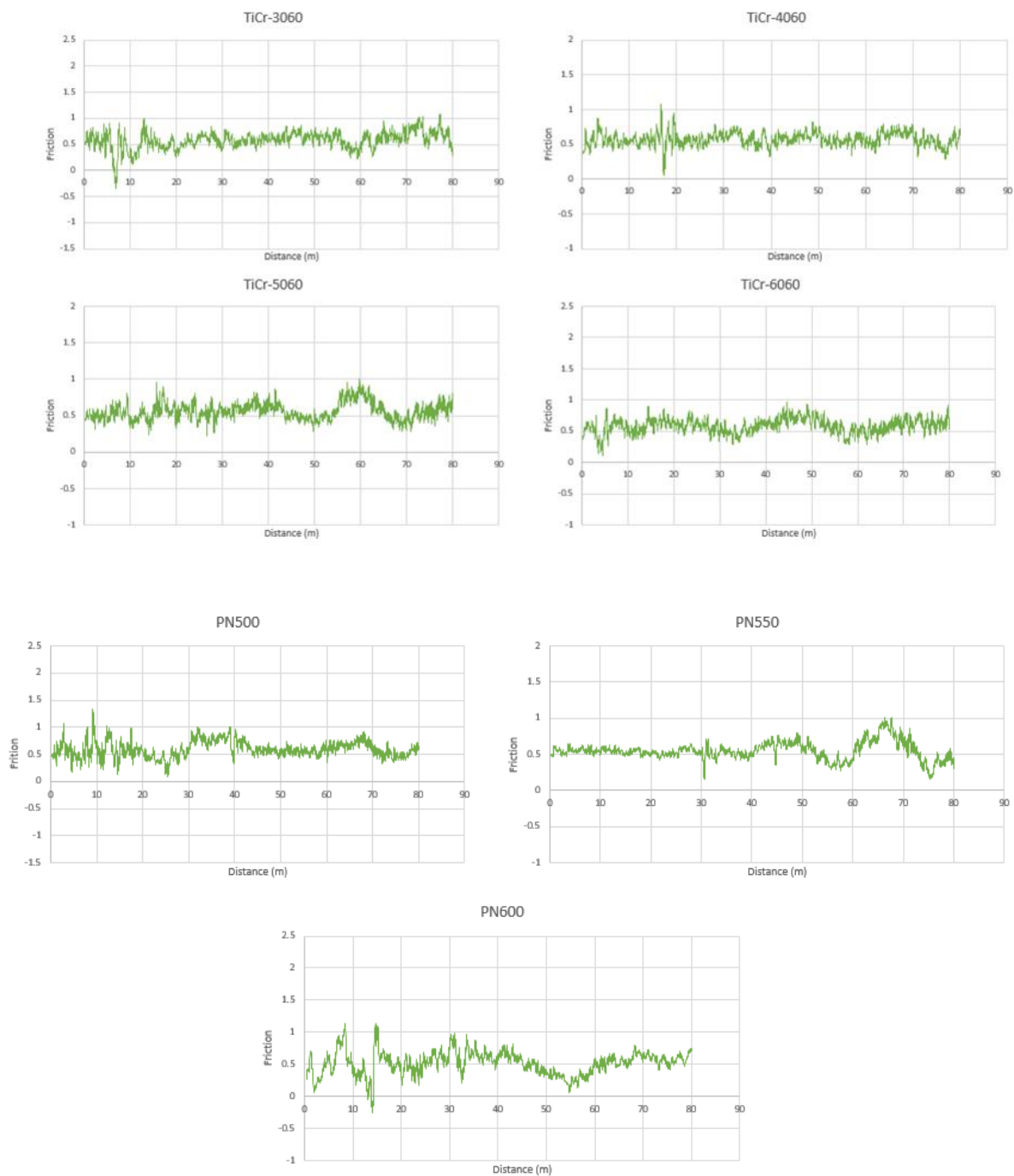
نتایج به‌دست آمده از آزمون سایش تحت عنوان نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده در شکل (۸) آورده شده است. در نمودارهای تغییر اصطکاک بر حسب مسافت طی شده، تغییرات محسوس در ضریب اصطکاک بسیار با اهمیت بوده و نشان‌دهنده تغییر لایه، تغییر فاز و یا هر عامل تغییردهنده در رفتار سایشی است؛ به عبارت دیگر می‌توان بیان کرد که با افزایش میزان ضریب اصطکاک، هر گونه مانع بین دو سطح فلزی از بین رفته و سطح دو فلز با یکدیگر در تماس هستند. در این صورت مقدار ضریب اصطکاک می‌تواند به مقادیر بالاتر از یک هم برسد. در نمودارهای نشان داده شده در شکل (۸)، در بعضی از نمودارها نوسانات ضریب اصطکاک به بالاتر از یک هم رسیده و سپس دوباره کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش هم تشکیل ذرات اکسیدی در حین سایش در سطح پین و نمونه و انتقال آن‌ها است. با بررسی بیش‌تر نمودارهای ارائه شده در شکل (۸)، مشخص می‌شود که رفتار سایشی تمامی نمونه‌های آبکاری شده با کروم تقریباً مشابه یکدیگر هستند. در دو نمونه TiCr-4030 و TiCr-5030 که بیش‌ترین کاهش وزن را در طی آزمون سایش از خود نشان دادند، کمترین تغییرات ضریب اصطکاک را از خود نشان داده و تغییرات حول یک مقدار میانگین به ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۵۵ هستند. در حالی که در دو نمونه TiCr3030 و TiCr3060 که دارای کمترین وزن از دست رفته در طی آزمون سایش هستند و بهترین رفتار سایشی را به لحاظ کاهش وزن از خود نشان داده‌اند، تغییرات ضریب اصطکاک بیش‌تر بوده و روند افزایش در نمودارها دیده می‌شود. ضریب اصطکاک میانگین به‌دست‌آمده برای این دو نمونه به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۰/۵۸۲ است. بر خلاف نمودارهای تغییرات اصطکاک نمونه‌های آبکاری شده، نمونه‌های نیتریده شده، نمودارهای متفاوت‌تری را از خود نشان می‌دهند. میانگین ضریب اصطکاک به‌دست‌آمده به ترتیب برای نمونه‌های PN500، PN550 و PN600 برابر با ۰/۵۹، ۰/۵۴۹ و ۰/۵۱۹ است. این کاهش نسبی در میزان میانگین ضریب اصطکاک به دلیل سطح سخت‌تر نمونه

PN600 نسبت به بقیه نمونه‌های نیتریده است. علیرغم رفتار سایشی بهتر به لحاظ کاهش وزن نمونه PN500، این نمونه میانگین ضریب اصطکاک بیشتری را از خود نشان داده است. در مقایسه رفتار سایشی نمونه‌های پوشش داده شده به دو روش، می‌توان ادعا کرد که به دلیل ضخامت پایین پوشش‌های به‌دست‌آمده، انتقال از پوشش به زیرلایه در مسافت‌های پایین رخ داده است و در نمونه PN500 که کمترین کاهش وزن را از خود نشان داده است، این اتفاق (عبور از لایه پوشش به زیرلایه) در مسافت تقریبی ۳۰ متر اتفاق افتاده است. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده در جدول (۳)، تصاویر سطحی قبل و بعد از آزمون سایش آورده شده است. در تصاویر ارائه شده در جدول (۳)، ستون اول مربوط به تصویر سطح پوشش داده شده قبل از سایش، ستون دوم، سطح نمونه‌ها بعد از سایش و نمودار ستون سوم، ذرات باقی مانده بر روی سطح سایش نشان داده شده است. چنانچه پیش‌تر به آن اشاره شد، تقریباً تمامی نمونه‌ها به صورت براق پوشش داده شده‌اند. همان‌طور که از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده مشخص است، پوشش‌های کروم براق دارای سطحی صاف هستند. هر چه این براق بودن کاهش یابد، یکنواختی پوشش کم شده و دانه‌های گنبدی شکل روی سطح تشکیل می‌شوند. با توجه به مورفولوژی سطح نشان داده شده در این تصاویر، مشخص می‌شود که هیچ‌گونه ساختار اسفنجی و متخلخل در سطح زیرلایه تشکیل نشده و تمامی ساختارهای مشاهده شده صاف و یا گنبدی شکل هستند. ترک‌های میکروسکوپی تشکیل شده در نمونه‌های پوشش داده شده به وضوح در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده در جدول (۳) قابل مشاهده است. دلیل تشکیل این ترک‌ها به دلیل ماهیت روش آبکاری الکتریکی کروم است. معمولاً پوشش‌های کروم دارای تعداد زیادی ترک هستند. در این شرایط پوشش کروم به صورت هگزاگونال با ترکیبات ناپایدار بوده و تجزیه هیدریدهای هگزاگونال به ساختار طبیعی فلز کروم یعنی BCC همراه با کاهش حجم است. با نشست لایه‌های

مکانیزم‌های دیگر سایش اعم از خراشان و اکسند در این پوشش فعال نشده‌اند که همانند نتایج به‌دست‌آمده توسط بالامورگان و همکارانش^۲ در بررسی تأثیر پوشش کروم بر روی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و امجد الموش بر روی فولاد ۱۰۱۰ است [۲۱-۲۲]. با توجه به براده‌های نشان داده شده در ستون سوم جدول (۳) و اندازه ذرات باقی مانده بر روی سطح اثر سایش، می‌توان ادعا کرد که نمونه‌ای که دارای کاهش وزن کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها است، دارای ذرات سایشی کوچک‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها است. با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های نیتزیده شده نیز، می‌توان دریافت که مکانیزم فعال در این نوع سایش نیز مکانیزم چسبنده است که توسط سوسمیت داتا و همکارانش^۳ نیز تأیید شده است [۱-۲۳]. بررسی سطح اثر سایش، نشان‌دهنده ذرات بسیار کمتر جدا شده از سطح پین و جا مانده در محل سایش را نشان می‌دهد.

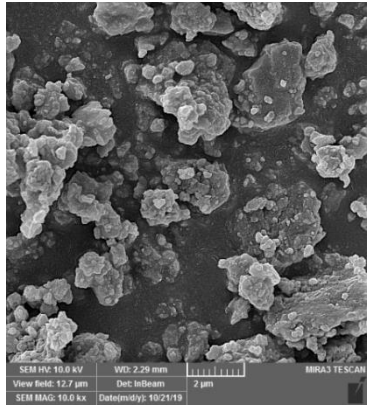
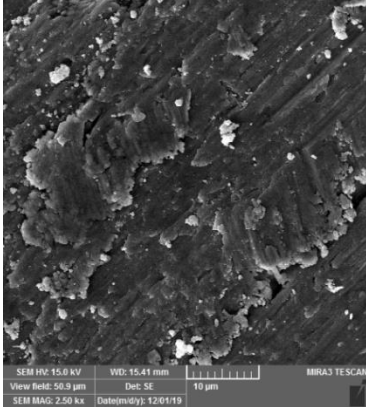
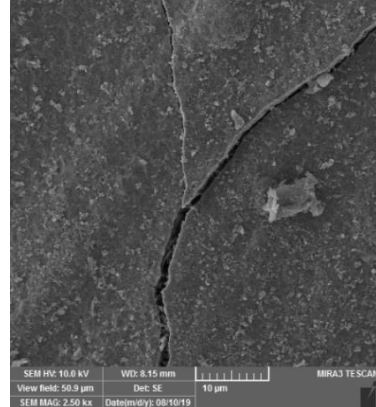
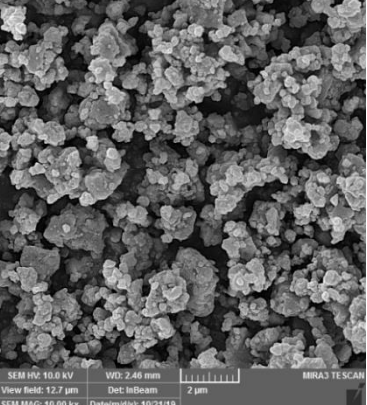
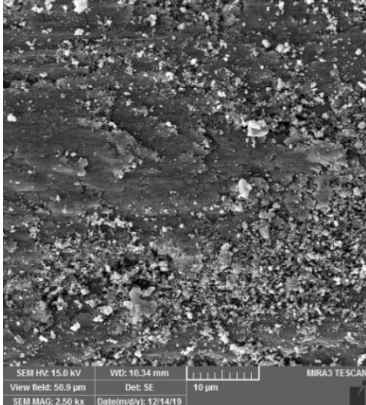
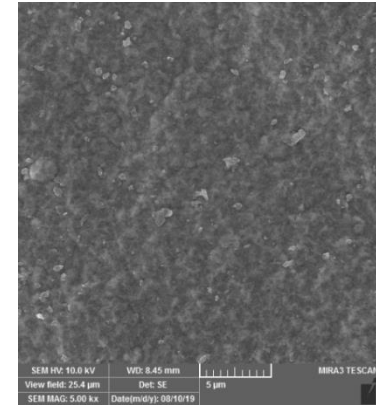
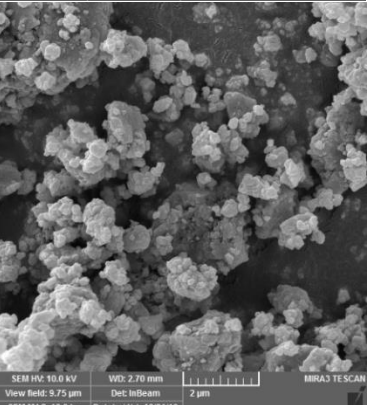
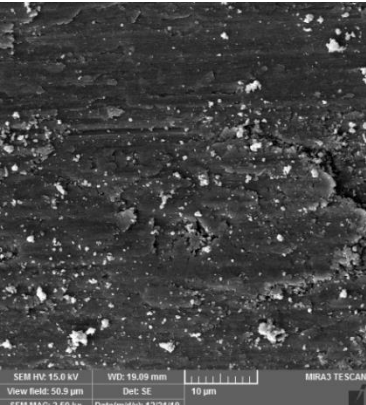
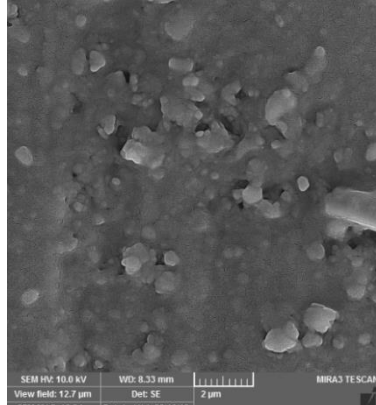
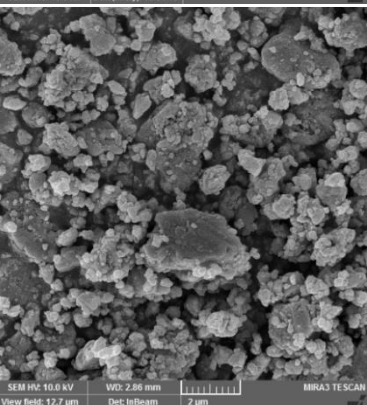
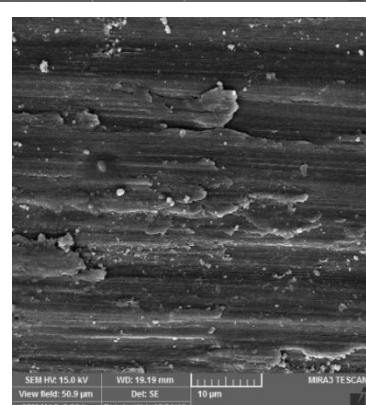
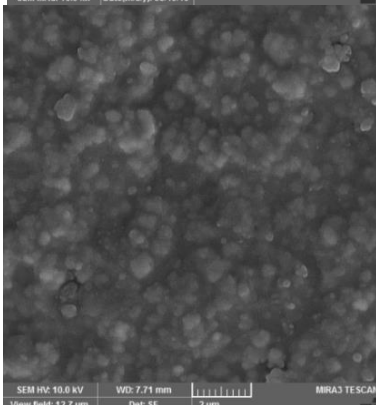
بعدی، تنش کششی در پوشش گسترش می‌یابد و در ضخامت معینی مقدار این تنش از حد کشسانی فلز تجاوز یافته و موجب ترک خوردگی پوشش می‌شود. همان‌طور که در تصاویر ستون اول برای نمونه‌های نیتزیده شده مشاهده می‌شود، ذرات سفیدی بر روی سطح نمونه‌ها تشکیل شده که بیانگر تشکیل ذرات نیتزیدی است. با بررسی این تصاویر می‌توان دلیل کاهش وزن بیش‌تر نمونه‌های نیتزید شده در دماهای بالاتر را ترک‌های ایجاد شده در سطح نمونه‌ها دانست که در تصاویر مشخص هستند. در این تصاویر مشخص است که کندگی زیادی در نمونه‌های پوشش داده شده با کروم دیده نمی‌شود. مکانیزم سایشی غالب در سایش نمونه‌های دارای پوشش کروم، سایش چسبنده بوده که از خطوط روی سطح اثر سایش کاملاً مشخص است. هم‌چنین ذرات بسیار زیادی در محل سایش نمونه‌ها دیده نمی‌شود. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان ادعا کرد که تنها مکانیزم سایشی فعال در سطح نمونه‌های دارای پوشش کروم، مکانیزم سایش چسبنده است و هیچ‌کدام از





شکل (۷): نمودارهای تغییر ضریب اصطکاک بر حسب مسافت پیموده شده

جدول (۳): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه‌های پوشش داده شده، سطح اثر سایش و ذرات سایش

ذرات باقی مانده بر روی سطح اثر سایش	تصاویر مربوط به نمونه بعد از سایش	تصاویر مربوط به سطح نمونه قبل از سایش	نمونه
			TiCr-3030
			TiCr-3060
			PN 500
			PN 550

biomedical applications," *Ceram. Int*, vol. 41, 2015.

[۷] ن. حسینی و ح. آقاجانی، "بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر سینتیک رسوب‌دهی پوشش SiC اعمال شده به روش CVD بر روی کامپوزیت کربن-کربن"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۰، شماره ۱، ۱۳۹۵.

[۸] ع. گلشنی و ح. آقاجانی، "رسوب‌دهی الکتروفوریتیک (EPD) نانوذرات کاربرد سیلیسیم (SiC)"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۰، شماره ۳، ۱۳۹۵.

[9] H. Aghajani, M. Torshizi & M. Soltanieh, "Short communication A new model for growth mechanism of nitride layers in plasma nitriding of AISI H11 hot work tool steel", *Vaccum*, vol. 141, pp. 97–102, 2017.

[10] M. Soltanieh, H. Aghajani, F. Mahboubi & K. A. Nekouee, "Surface characterization of multiple coated H11 hot work tool steel by plasma nitriding and hard chromium electroplating processes", *VAC*, vol. 86, no. 10, pp. 1470–1476, 2012.

[11] A. Yazdani, M. Soltanieh, H. Aghajani & S. Rastegari, "A new method for deposition of nano sized titanium nitride on steels", *Vaccum*, vol. 86, no. 2, pp. 131–139, 2011.

[12] C. L. Chang, C. T. Ho, P. H. Chen, W. C. Chen, D. Y. Wang & W. Y. Wu, "Synergetic effect for improved deposition of titanium nitride films", *Surface & Coatings Technology*, 2018.

[13] F. Zhang, M. Yan, J. He & F. Yin, "Microstructure evolution and wear resistance of nitride/aluminide coatings on the surface of the Ti-coated 2024 Al alloy during plasma nitriding", *Ceramic International*, 2017.

[14] M. P. Nascimento, R. C. Souza, I. M. Miguel, L. Walter, and H. J. C. Voorwald, "Effects of tungsten carbide thermal spray coating by HP r HVOF and hard chromium electroplating on AISI 4340 high strength steel," 2001.

[15] E. Uhlmann & R. Jaczkowski, "Surface & Coatings Technology Mechanical pretreatment

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمون سایش به دست آمده، مشخص می‌شود که نمونه‌های تیتانیومی که نیتروژن دهی شده‌اند علیرغم مقدار ریزسختی کمتر به دست آمده نسبت به نمونه‌های آبکاری شده، دارای رفتار سایشی بهتری بوده و کاهش وزن کم‌تری را از خود به نسبت نمونه‌های کروم کاری شده نشان می‌دهند. دلیل این رفتار، ماهیت نفوذی لایه‌های نیتروژن دهی شده و هم‌چنین دمای بالای تشکیل نیتrideها نسبت به لایه کرومی است. نتایج بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح اثر محل سایش نمونه‌ها نشان‌دهنده فعال بودن مکانیزم سایش چسبان در هر دو نمونه‌های پوشش کروم‌دار و نمونه‌های نیتride شده است.

۵- منابع و مراجع

- [1] T. Sahraoui, S. Guessasma & N. E. Fenineche, "Friction moment prediction of HVOF coatings and Electroplated Hard Chromium", vol. 62, pp. 473–477, 2008.
- [2] T. Sahraoui, S. Guessasma, N. E. Fenineche, G. Montavon & C. Coddet, "Friction and wear behaviour prediction of HVOF coatings and electroplated hard chromium using neural computation", vol. 58, pp. 654–660, 2004.
- [3] H. Maleki-ghaleh, M. Rekabeslami, M. S. Shakeri & M. H. Siadati, "Applied Surface Science Nano-structured yttria-stabilized zirconia coating by electrophoretic deposition", *Appl. Surf. Sci*, vol. 280, pp. 666–672, 2013.
- [4] R. Ahmadzadeh, N. Abdian, S. A. Naziri & A. T. Tabrizi, "Evaluating Corrosion Behavior of Ni Electroplating on Titanium Substrate", pp. 1–11.
- [5] C. Velotti, A. Astarita, C. Leone, S. Genna, F. M. C. Minutolo & A. Squillace, "Laser Marking of Titanium Coating for Aerospace Applications", *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 975–980, 2016.
- [6] E. Mohseni, E. Zalnezhad, A. R. Bushroa, Abdel Magid Hamouda, B. T. Goh & G. H. Yoon, "Ti/TiN/HA coating on Ti-6Al-4V for

۶- پی‌نوشت

- [1] Chang et al
- [2] Balamurugan et al
- [3] Susmit Datta et al
- [4] Fourier Transform Infra-Red (FTIR)
- [5] Continue Cooling Transformation
- before electroplating of aluminium alloy AlSi12", Surf. Coat. Technol, vol. 352, no. August, pp. 483-488, 2018.
- [16] W. Deqing, S. Ziyuan & K. Tangshan, "Composite plating of hard chromium on aluminum substrate", vol. 191, pp. 324-329, 2005.
- [17] O. Abdel, M. H. A. Tabl, Z. A. Hamid & S. F. Mostafa, "Electroplating of chromium and Cr-carbide coating for carbon fiber", vol. 201, pp. 1357-1362, 2006.
- [18] L. I. Baosong, A. Lin & G. A. N. Fuxing, "Improvement of stability of trivalent chromium electroplating of Ti", vol. 2, pp. 645-649, 2006.
- [19] C. Liu, N. Fiol, J. Poch & I. Villaescusa, "Journal of Water Process Engineering A new technology for the treatment of chromium electroplating wastewater based on biosorption", J. Water Process Eng., vol. 11, pp. 143-151, 2016.
- [20] Sh. Hossein Saraf, M. Soltanieh & H. Aghajani, "Repairing the cracks network of hard chromium electroplated layers using plasma nitriding technique", Vaccum, vol. 127, pp. 1-9, 2016.
- [21] G. M. Balamurugan, M. Duraiselvam & V. Anandkrishnan, "Comparison of high temperature wear behavior of plasma sprayed WC-Co coated and hard chromium plated AISI 304 austenitic Stainless steel", Materials and Design, vol. 35, pp. 640-646, 2012.
- [22] A. S. Almoush, A. A. Rob, H. Edwan, K. Atrash & M. Igab, "Tribological properties of hard chromium coated 1010 mild steel under different sliding distances", Solid State Sciences, vol. 13, pp. 529-533, 2011.
- [23] S. Datta, M. Das, V. K. Balla, S. Bodhak & V. K. Murugsean, "Mechanical, wear, corrosion and biological properties of arc deposited titanium nitride coatings", Surface & Coatings Technology, 2018.