



#### Article Info

Received: 2021-4-26  
Accepted: 2021-8-5

#### Keywords

Titanium, Space structure,  
Cold weld, Chromium layer,  
Nitride chromium, Plasma  
nitriding

#### How to Cite this article

Arvin Taghizadeh Tabrizi, Hossein Aghajani and Farhad Farhang Laleh, "Effect of Plasma Nitriding Treatment on the Chromium Layer Applied on Space Structure to Avoid Cold Weld", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 1 (1), p.: 25-35, 2021.

## Effect of Plasma Nitriding Treatment on the Chromium Layer Applied on Space Structure to Avoid Cold Weld

Arvin Taghizadeh Tabrizi<sup>\*1</sup>, Hossein Aghajani<sup>2</sup> and Farhad Farhang Laleh<sup>3</sup>

1. PhD of Materials Engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, iarvintt@gmail.com
2. Associate Professor, School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran, haghajani@iust.ac.ir
3. PhD. Student of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, f.farhang@isrc.ac.ir

\*Corresponding author

### Abstract

Although regarding low density and high ratio of strength to weight of titanium, the application of this metal is restricted in space industry due to its low surface properties including low wear resistance which could lead to the cold weld. For improving this property of titanium, applying protective coatings is effective. The physical parameters of wear resistance, adhesion and surface microhardness are impressive and could avoid occurrence of cold weld. Therefore, in the present study, by applying plasma nitriding on chromium layer on titanium used in space structures, its tribological behavior (wear resistance, adhesion and surface microhardness) has been investigated. The results confirmed the formation of nitride chromium thin layer on titanium substrate due to the applying plasma nitriding on the chromium layer, which increasing the surface microhardness up to 1109 HV and improving the wear resistance and adhesion subsequently. The coefficient of friction is also decreased to 0.16, which can well prevent the occurrence of cold weld



دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال اول، شماره ۱، صفحه ۲۵-۳۵  
بهار و تابستان ۱۴۰۰

Available in:  
[Journal.isrc.ac.ir/article\\_137477.html](http://Journal.isrc.ac.ir/article_137477.html)

DOI:  
10.22034/JSSTA.2021.283100.1021

## تاثیر عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی بر روی پوشش کروم اعمال شده بر روی سازه فضایی به منظور جلوگیری از جوش سرد

آروین تقی زاده تبریزی<sup>۱\*</sup>، حسین آقاجانی<sup>۲</sup>، فرهاد فرهنگ لاله<sup>۳</sup>

۱. \* دکتري مهندسي مواد، گروه مهندسي مواد، دانشگاه تبريز، تبريز، ايران، [iarvintt@gmail.com](mailto:iarvintt@gmail.com)

(نویسنده مسئول)

۲. دانشيار مهندسي مواد، دانشکده مهندسي مواد، دانشگاه علم و صنعت ايران، تهران، ايران،

[haghajani@iust.ac.ir](mailto:haghajani@iust.ac.ir)

۳. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ايران،

[f.farhang@isrc.ac.ir](mailto:f.farhang@isrc.ac.ir)

### چکیده

با وجود چگالی پایین و نسبت استحکام به وزن بالای تیتانیوم، این فلز به دلیل داشتن خواص سطحی ضعیف مانند مقاومت به سایش پایین، مستعد وقوع جوش سرد در کاربردهای فضایی و تحت سایش این فلز است. برای بهبود این خاصیت تیتانیوم، اعمال پوشش‌های محافظ موثر است. پارامترهای فیزیکی مقاومت به سایش، چسبندگی پوشش به سطح و ریزسختی سطح پوشش به دست آمده، می‌توانند بر جوش سرد تاثیرگذار بوده و تقویت این پارامترها باعث جلوگیری از این پدیده می‌شود. بنابراین، در پژوهش پیش‌رو، با اعمال نیتروژن دهی پلاسمایی بر روی پوشش کروم اعمال شده بر روی تیتانیوم مورد استفاده در سازه‌های فضایی، به بررسی رفتار تریبولوژیکی آن (مقاومت به سایش، چسبندگی و ریزسختی سطح) پرداخته شده است. نتایج نشان‌دهنده تشکیل پوشش نیتريد کروم بر روی زیرلایه تیتانیومی در اثر اعمال نیتروژن دهی پلاسمایی بر روی پوشش کروم بوده که به تبع آن، افزایش ریزسختی سطح تا مقدار ۱۱۰۹ ویکرز و بهبود مقاومت به سایش و چسبندگی پوشش را به همراه دارد. مقدار ضریب اصطکاک نیز تا مقدار ۰/۱۶ کاهش یافته و می‌تواند به خوبی از وقوع جوش سرد جلوگیری کند.

### تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

### واژه‌های کلیدی

تیتانیوم، شرایط فضایی، جوش سرد، پوشش کروم، نیتريد کروم، نیتروژن دهی پلاسمایی

### نحوه استناد به این مقاله

آروین تقی زاده تبریزی، حسین آقاجانی، فرهاد فرهنگ لاله، " تاثیر عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی بر روی پوشش کروم اعمال شده بر روی سازه فضایی به منظور جلوگیری از جوش سرد"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد اول، شماره اول، صفحات ۲۵-۳۵، ۱۴۰۰.

## ۱- مقدمه

در چگالی پایین مواد مورد استفاده در سازه‌های فضایی، یک ویژگی عمومی مورد نیاز محسوب می‌شود. سایر ویژگی‌ها بسته به کاربرد مورد نظر مشخص می‌شود که می‌توان شرایط دمایی کاربری مورد نظر (بازه دمایی بسیار وسیع از منفی تا مثبت)، شرایط خلا قابل تحمل توسط مواد، شرایط سطحی قطعات از قبیل مقاومت در برابر سایش و خوردگی، مقاومت در برابر تابش پرتو ماورا بنفش را به صورت عمومی برای مواد مهندسی مورد استفاده در شرایط فضایی در نظر گرفت [۱، ۲، ۳]. ویژگی‌هایی هم چون چگالی پایین، نسبت استحکام به وزن بالا، استحکام ویژه خوب، ضریب انبساط کم، مقاومت به خوردگی خوب و سازگاری بسیار بالا با مواد پلیمری، باعث افزایش کاربرد تیتانیوم و آلیاژهای آن در صنایع فضایی شده است. با این وجود، خواص سطحی ضعیف این دسته از مواد، به ویژه مقاومت سایشی پایین آن‌ها باعث محدودیت در کاربرد آن‌ها شده است [۴]. بنابراین می‌توان بیان کرد که ویژگی‌های تریبولوژیکی سازه‌های مورد استفاده در صنعت هوا و فضا به همراه چگالی این مواد، مهم بوده و در طراحی‌ها باید در نظر گرفته شود. همچنین کاملاً مشخص است که بهبود و تقویت این خواص، کمک شایانی به افزایش کارایی تجهیزات در مراحل مختلف ساخت یک سازه فضایی می‌کند.

در اکثر وسایل و سازه‌های هوا و فضایی، مکانیزم‌هایی به کار برده می‌شوند که به علت محدودیت حجم در پرتابگر، هنگام پرتاب باید به صورت جمع شده بوده و بعد از پرتاب و قرارگیری در مدار مربوط، با فرمان زمینی از حالت جمع‌شدگی خارج و به وضعیت مطلوب خود منتقل می‌شوند. مکانیزم بدین صورت طراحی شده است که باید مازول‌ها یا قطعاتی (مثلاً پنل‌های خورشیدی) که در زمان پرتاب بنابه دلایلی از جمله کوچکی محفظه نگهداری و ماموریت محوله بسته و جمع هستند و بعد از پرتاب در زمان مشخص و در محل (مدار) معینی با دقت و صلبیت بالا باز شوند. از این رو، باید توانمندی با قابلیت اطمینان بالا وجود داشته باشد که پنل‌ها پس از پرتاب ماهواره و قرارگیری در مدار بتوانند در موقعیت صحیح خود نسبت به سازه ماهواره به منظور انجام ماموریت خود قرار گیرند. کارکرد مکانیزم‌ها به این صورت است که هر پنل توسط دو لولا (لولای فعال و غیرفعال) مهار می‌شود. در ابتدا و پس از آزاد شدن قفل اولیه مکانیزم، یک موتور که روی یکی از دو لولا قرار دارد (لولای فعال)

محور لولای اتصال به پنل‌ها را به حرکت در می‌آورد. این امر باعث چرخش پنل‌ها حول محور لولا می‌شود تا زمانی که مجموعه به موقعیت مطلوب برسد. با توجه به مکانیزم عملکردی لولا در سازه‌های فضایی مورد استفاده، باید از عملکرد مناسب آن اطمینان پیدا کرد تا به هنگام نیاز و دریافت فرمان از مرکز زمینی، آزادسازی قفل اولیه با موفقیت صورت گیرد. یکی از عواملی که می‌تواند این عملکرد را تحت تاثیر قرار دهد و با اختلال همراه سازد، پدیده قفل‌شدگی یا همان جوش سرد است.

به طور کلی، سطح مواد در اثر تماس با محیط اطراف می‌تواند دچار تغییرات مختلفی شود. بنابراین، حفظ شرایط سطحی مدنظر در طول سرویس دهی، یکی از عوامل مهم در بالابردن عمر قطعات مورد استفاده است [۵]. به این دلیل است که شاخه مهندسی سطح توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. جوش سرد یکی از مشکلاتی است که احتمال وقوع آن در سازه‌های فضایی به ویژه در مکانیزم‌های لولا بسیار زیاد بوده و از عملکرد صحیح آن‌ها جلوگیری می‌کند. همان‌طور که در تعاریف استاندارد آمده است، زمانی که دو سطح در تماس با یکدیگر قرار بگیرند و نسبت به یکدیگر در حال حرکت باشند، سایش اتفاق می‌افتد. این پدیده می‌تواند به شکل‌های متفاوتی رخ بدهد که یکی از انواع مدل شدید آن، جوش سرد است. در مدل جوش سرد، مکانیزم سایش چسبان فعال بوده و ذرات جدا شده در بین دو سطح قرار گرفته و با پیوند سطحی ذرات به سطح در تماس باعث قفل شدن دو سطح می‌شود. با توجه به نیروی اعمالی برای ادامه حرکت دو سطح نسبت به هم، نیروی بیشتری بر روی فصل مشترک اعمال شده و باعث کنده شدن قسمتی از سطح در اثر سایش می‌شود. این قسمت‌های جدا شده، دوباره در بین دو سطح به عنوان جز سوم در سایش شرکت کرده و باعث تشدید جوش سرد و قفل شدن دو سطح به هم می‌شود که نیروی بیشتری برای حرکت دادن آن مورد نیاز است. برای جلوگیری از وقوع جوش سرد باید اصطکاک و ضریب اصطکاک بین دو سطح را با استفاده از روش‌هایی مانند اعمال پوشش کاهش داد. لازم به ذکر است که مقدار ضریب اصطکاک برای دو ماده مهندسی در تماس با هم بین ۰/۱ تا ۱ تغییر می‌کند و هر چقدر این عدد به یک نزدیک‌تر باشد مقدار اصطکاک بین دو سطح بیشتر است. در مواردی که دو سطح فلزی خالص با یکدیگر در تماس هستند، مقدار این ضریب اصطکاک می‌تواند به مقادیر بالاتر از یک و در شرایط خلا به مقدار ده هم برسد.

بر روی فولاد گرم‌کار H13 به روش ترکیبی آبکاری کروم سخت و نیتروژن‌دهی پلاسمایی شده و خواص سایشی این فولاد ابزار را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دادند. وانگ و همکارانش [۱۵] به بررسی تغییرات پوشش کروم بعد از انجام نیتروژن‌دهی پلاسمایی پرداختند. آجی‌کومار و همکارانش [۱۶] با استفاده از دو روش آبکاری کروم و نیتروژن‌دهی گازی موفق به سنتز لایه نیتريد کرومی بر روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ شدند. با توجه به تمایل شدید کروم به واکنش با اکسیژن و تشکیل لایه فشرده نازک اکسیدی که به عنوان مانعی در برابر نفوذ نیتروژن در طی فرایند نیتروژن‌دهی عمل می‌کند، نیاز به استفاده از اتمسفر احیایی برای از بین بردن این لایه اکسیدی در روش نیتروژن‌دهی گازی است. منته و همکارانش [۱۷] با اعمال نیتروژن‌دهی پلاسمایی و نیتروکربن‌دهی پلاسمایی بر روی پوشش کروم به بررسی خواص خوردگی آن‌ها پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با تشکیل فازهای نیتريد کرومی در روش نیتروژن‌دهی پلاسمایی و تشکیل فازهای کروم کاربیدی در روش نیتروکربن‌دهی پلاسمایی، ریزترک‌های تشکیل شده در حین آبکاری کروم بسته شده و باعث بهبود مقاومت به خوردگی نمونه‌ها در محلول نیم مولار اسید سولفوریک می‌شود. از این روش برای اعمال پوشش بر روی زیرلایه‌های متعددی مانند فولاد و آلومینیوم استفاده می‌شود ولی با این وجود، اعمال پوشش نیتريد کروم بر روی تیتانیوم تجاری به روش ترکیبی تا به حال در منابع گزارش نشده است. به همین منظور و در پژوهش پیش‌رو، تاثیر نفوذ نیتروژن بر روی پوشش کروم اعمال شده بر روی تیتانیوم خالص تجاری به روش نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر مورفولوژی و رفتار سایشی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش پژوهش

### ۲-۱- مواد مورد استفاده و عملیات سطحی

در این پژوهش از تیتانیوم خالص تجاری به عنوان زیرلایه استفاده شده و نمونه‌هایی در ابعاد سه در سه سانتی‌متر مربع آماده شد. آماده‌سازی سطحی با انجام عملیات سنباده‌زنی تا مش ۱۵۰۰، چربی‌زدایی در استون و به صورت اولتراسونیک انجام شد. سپس نمونه‌ها توسط آب دیونیزه شست و شو شده و سطح آن قبل از پوشش‌دهی و انتقال به حمام آبکاری و محفظه نیتروژن‌دهی، توسط اسید کلریدریک فعال‌سازی شد.

جوش سرد یکی از انواع سایش است که به دلیل میزان تخریب و آسیب وارد شده به سطح به دو دسته تقسیم می‌شود. دسته اول مربوط به تخریب شدید موضعی سطح است که در کشور انگلستان با اصطلاح برهم‌خراشی و در ایالات متحده امریکا با لفظ سایش اصطکاکی شناخته شده است. در دسته دوم نیز تخریب شدیدی اتفاق می‌افتد که در عین موضعی بودن، بسیار یکنواخت‌تر بوده و آسیبی شدیدی را به سطح تماس وارد می‌کند. این نوع از سایش کچلی نامیده می‌شود. این نوع سایش -ها را می‌توان در سطوح خشک و سرعت‌های پایین سایش مشاهده کرد. هم‌چنین محصولات به دست آمده از سایش دو سطح به هم، خراش سطحی و محصولات خوردگی به دست آمده، باعث تشدید جوش سرد می‌شود [۶].

اعمال پوشش محافظ بر روی تیتانیوم و آلیاژهای آن یکی از بهترین روش‌های تقویت خواص سایشی و تریبولوژیکی است که مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در منابع، پوشش‌های متنوعی با روش‌های گوناگونی بر روی تیتانیوم و آلیاژهای آن اعمال شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۷]. آبکاری الکتریکی کروم به عنوان رایج‌ترین روش آبکاری در صنعت است و بر روی زیرلایه‌های مختلفی از جمله فولاد [۸]، آلومینیوم [۹]، کربن‌ها، مس [۱۱] و پلاستیک‌ها با هدف افزایش سختی سطح و بهبود رفتار سایشی اعمال می‌شود. با این وجود، مطالعات بسیار اندکی بر روی خواص به دست آمده از پوشش کروم اعمالی بر روی تیتانیوم گزارش شده است. در پژوهشی که توسط الساکا و همکارانش [۱۲] انجام شده است، از پوشش کروم به عنوان لایه واسطه به منظور افزایش استحکام برشی بین تیتانیوم نوع دو و پرسلان استفاده شده و هیچ بررسی تریبولوژیکی روی آن انجام نشده است. یکی از خصوصیات مهمی که همواره در پوشش‌های کروم مشاهده می‌شود، وجود شبکه ترک در سطح نمونه است که دلیل تشکیل آن‌ها، واکنش کروم با هیدروژن و تشکیل کروم هیدرید با ساختار هگزاگونال ناپایدار است که با گذشت زمان ساختار هیدریدی پایدار BCC تشکیل شده که کاهش حجمی ۱۵ درصدی را به همراه دارد و باعث به وجود آمدن ریزترک در سطح نمونه پوشش داده شده می‌شود. این ترک‌های به وجود آمده باعث کاهش مقاومت به سایش شده و احتمال وقوع جوش سرد افزایش پیدا می‌کند [۱۳]. در منابع، اشاره شده است که با اعمال نیتروژن‌دهی و نفوذ دادن اتم نیتروژن باعث بسته شدن شبکه ریزترک‌ها شده و باعث بالا رفتن مقاومت به سایشی می‌شود. صراف و همکارانش [۱۴] موفق به سنتز لایه نیتريد کروم

## ۲-۲- اعمال پوشش محافظ

ابتدا پوشش کروم بر روی زیرلایه‌های آماده شده اعمال شد. به همین منظور و 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. 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 گرم‌کن- هم‌زن الکتریکی استفاده شد. آبکاری به وسیله منبع تغذیه‌ای با قابلیت ایجاد جریان‌های مستقیم انجام شد. 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 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 چگالی جریان ۳۰ آمپر بر دسی‌متر مربع و زمان-های ۱۵ و ۳۰ دقیقه آماده شدند. بعد از آبکاری و شست و شو پوشش توسط آب دیونیزه و خشک کردن آن، نمونه تحت عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا با نفوذ اتم‌های نیتروژن ترک‌های سطحی اصلاح شوند. برای دستیابی به نمونه سالم و بدون ترک ماکروسکوپی، نمونه آبکاری شده ابتدا در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت نگهداری شد تا هیدروژن انباشته شده در پوشش کروم آزاد شود و سپس دما به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرد و نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر روی نمونه انجام شد.

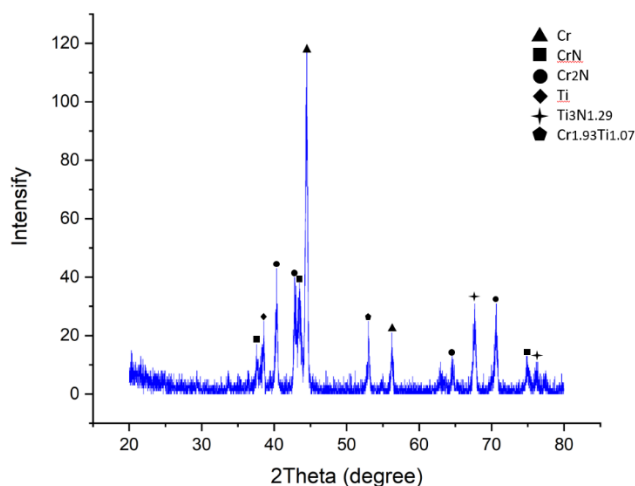
## ۲-۳- مشخصه‌یابی

برای تشخیص تشکیل فازهای نیتریدی، آزمون پراش اشعه ایکس بر روی نمونه‌ها انجام شد و نتایج به‌دست آمده توسط نرم‌افزار X'pert HighScore Plus مورد بررسی قرار گرفت. هم-چنین برای بررسی مورفولوژی پوشش، بررسی مکانیزم خوردگی

و به منظور ارزیابی ترکیب پوشش ایجاد شده و زیرلایه، از میکروسکوپ الکترونی روبشی FE-SEM, Mira3 Vega مجهز به آنالیز EDS استفاده شد. آزمایش میکروسختی‌سنجی ویکرز تحت نیروی ۰/۴۹ نیوتن (۵۰ گرم نیرو) با زمان ۱۵ ثانیه از سطح نمونه‌ها انجام شد. هر نمونه سه بار تحت آزمون سختی‌سنجی 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 ۷۰ متر با سرعت دوران ۱۲۰ دور بر دقیقه آزمایش شدند. در این آزمایش از پین تیتانیومی گرید یک با نوک تخت به قطر ۵ میلی‌متر و سختی ۲۰۰ ویکرز استفاده شد. هم‌چنین در مورد جوش سرد که ترکیبی از مکانیزم سایش چسبان و هندسه سه جزیی سایش است؛ برای اندازه‌گیری و آزمایش آن از آزمون سایش استفاده می‌شود و برای این منظور می‌توان با آزمون تعیین بار، ناحیه فعال سایش چسبان (عامل اصلی شروع جوش سرد) را شناسایی کرده و با استفاده از کنترل میزان بار اعمال شده، از وقوع جوش سرد جلوگیری کرد. به همین منظور، بار ۳ نیوتن برای آزمون سایش انتخاب شد. نیروی ۳ نیوتنی با استفاده از رسم نمودار نیرو بر حسب و وزن از دست رفته اندازه‌گیری شده برای نمونه تیتانیومی بدون پوشش و بر حسب تغییر شیب در نمودار به‌دست آمد [۱۸، ۱۷]. قبل از انجام آزمون، وزن اولیه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری وزن توسط ترازویی با دقت  $\pm 0.001$  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 پروفیل-متری، زبری سطح و تغییرات آن در محل سایش و پوشش مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، آزمون چسبندگی (مقاومت در برابر خراش) نیز توسط آزمون کیفی کراس‌کات طبق استاندارد ASTM D 3359 انجام شد.

## ۳- نتایج و بحث

الگوی پراش اشعه ایکس نمونه نیتروژن‌دهی شده در مدت ۸ ساعت، در شکل ۱ آورده شده است. با توجه به این شکل، مشخص است که دو فاز نیتريد کروم  $\text{CrN}$  و  $\text{Cr}_2\text{N}$  تشکیل شده‌اند. همان‌طور که از این الگو مشخص است، شدیدترین پیک به‌دست آمده در این نمودار متعلق به پوشش کروم است که در زاویه  $44/55$  درجه پدیدار شده است. فاز  $\text{CrN}$  در دو زاویه  $43/52$  و  $76/15$  درجه با ساختمان کریستالی مکعبی شناسایی شده است. هم‌چنین فاز  $\text{Cr}_2\text{N}$  با ساختمان کریستالی هگزاگونال در درجه‌های  $40/4$ ،  $42/85$ ،  $56/28$ ،  $67/73$  و  $74/91$  درجه شناسایی شده که در تطابق کامل با نتایج گزارش شده توسط لونارسکا و همکارانش است [۲۰]. هم‌چنین تشکیل فاز تیتانیوم نیتريد  $\text{Ti}_3\text{N}_{1.29}$  با ساختار رومبوهدرال نیز به مقدار ناچیز در  $70/68$  درجه است.

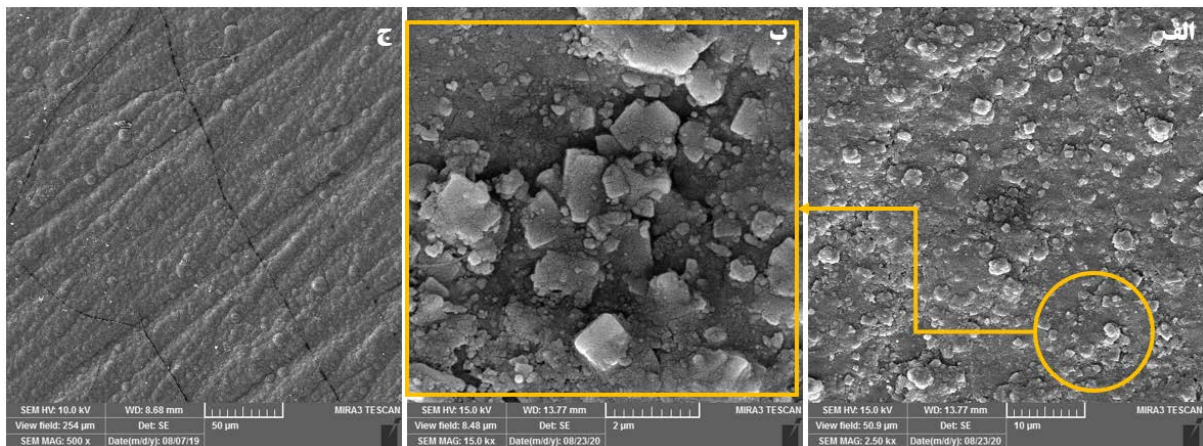


شکل ۱. الگوی پراش اشعه ایکس پوشش کروم بعد از عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی

مورفولوژی نمونه نیتريد کرومی در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده، در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در تصویر الف شکل ۲ مشخص است، سطح به دست آمده تقریباً صاف بوده و ذرات ریز سفید رنگی در سرتاسر سطح پخش شده‌اند. تصویر نشان داده شده با بزرگنمایی بالاتر در تصویر ب شکل ۲، این ذرات سفید رنگ را از نزدیک نشان می‌دهد که دارای ترک‌های ریز در سطح خود هستند که تحت تاثیر انرژی بالای پلاسمای تشکیل شده‌اند. این ذرات سفید رنگ نشان‌دهنده ذرات نیتريد کروم تشکیل شده در طی فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی هستند.

برای دستیابی به فاز نیتريد کروم بر روی زیرلایه تیتانیومی، ابتدا پوشش کروم بر روی زیرلایه علاوه بر شرایط بهینه به‌دست آمده، زیر جریان ۳۰ آمپر بر دسی‌متر مربع به مدت ۱۵ دقیقه و ۳۰ دقیقه قرار گرفت و سپس نمونه‌ها، برای آزادسازی تنش، به مدت یک ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. سپس در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت، در فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی قرار گرفت. تنها پوشش بدون تورق به‌دست آمده به لحاظ ظاهری در نمونه  $\text{TiCr-3015-PN600-4}$  است. در نمونه‌های دیگر، تورق به گونه‌ای اتفاق افتاده که با کوچکترین ضربه به نمونه، پوشش از زیرلایه جدا می‌شود. بنابراین تمامی نمونه‌ها با پوشش کروم در شرایط بهینه ۳۰ آمپر بر دسی‌متر مربع به مدت ۱۵ دقیقه برای انجام نیتروژن‌دهی پلاسمایی به منظور تشکیل فاز نیتريدی کروم آماده شدند.

ریزسختی سطح نمونه  $\text{TiCr-3015-PN600-4}$  تغییر چندانی نسبت به حالت پوشش کروم خالص (۳۲۸ ویکرز) نکرده و مقدار به‌دست آمده برابر با  $\text{HV}_{0.05}$  ۴۸۱ است. این موضوع نشان‌دهنده این واقعیت است که میزان نفوذ نیتروژن در پوشش کروم در طول مدت ۴ ساعت بسیار اندک بوده به گونه‌ای که الگوی پراش اشعه ایکس از سطح این نمونه، هیچ فاز نیتريدی را در آن شناسایی نکرده است. با توجه به نمودار فازی کروم-نیتروژن مشخص است که میزان حلالیت نیتروژن در درون زیرلایه کرومی پایین است. برای بالا بردن حلالیت نیتروژن در زیرلایه کرومی، می‌توان با بالا بردن دما و زمان فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی، شرایط نفوذ بیشتر هیدروژن در درون زیر لایه کرومی را فراهم آورد. به این منظور و برای دستیابی به فاز نیتريد کروم، زمان نیتروژن‌دهی تحت همان شرایط از ۴ ساعت به ۸ ساعت افزایش یافت. ریزسختی به‌دست آمده در سطح این نمونه  $\text{TiCr-3015-PN600-8}$  برابر با  $\text{HV}_{0.05}$  ۸۵۹ است. این موضوع نشان‌دهنده این واقعیت است که در مدت زمان ۸ ساعت، میزان فاز نیتريد کروم بیشتری نسبت به ۴ ساعت نیتروژن‌دهی پلاسمایی تشکیل شد. مقدار ریزسختی سطح تحت نیروی  $0/25$  نیوتن نیز برابر با ۱۱۰۹ ویکرز به‌دست آمد. این موضوع در الگوی پراش اشعه ایکس گرفته شده از سطح این نمونه نیز نشان‌دهنده تشکیل فازهای نیتريدی در سطح نمونه  $\text{TiCr-3015-PN600-8}$  است. هم‌چنین مقدار اندازه‌گیری شده در تطابق خوبی با مقدار گزارش شده توسط هدایتی و همکارانش [۱۹] که برابر با ۷۵۰ ویکرز است، دارد.



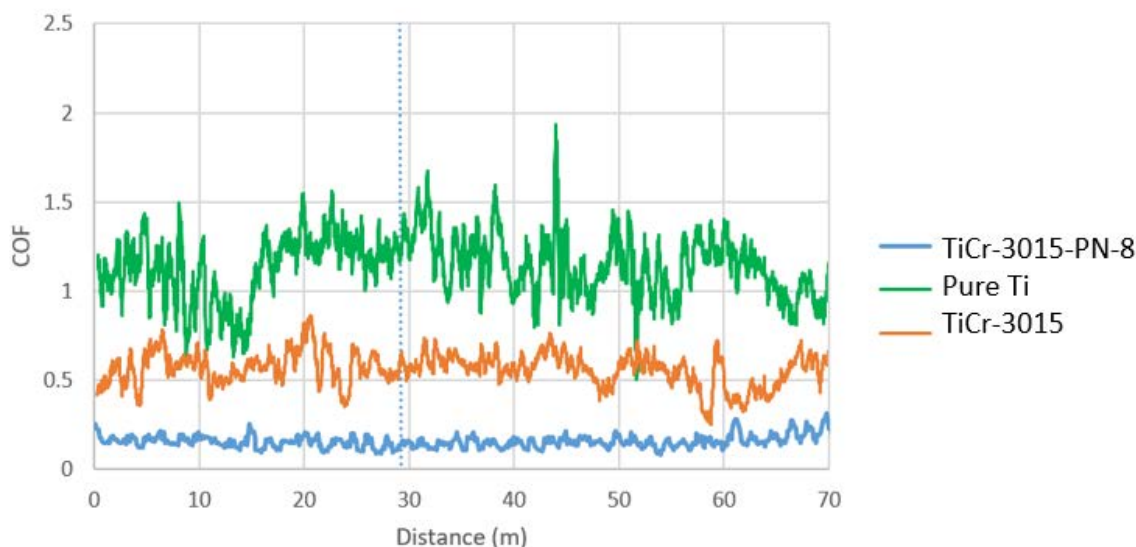
شکل ۲. الف تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورفولوژی پوشش نیتريد کروم، ب- تصویر همان نمونه در بزرگنمایی بالاتر، ج- تصویر شبکه ریز ترک از روی نمونه دارای پوشش کروم، قبل از نیتروژن دهی پلاسمایی

پوشش داده شده با کروم و دارای لایه نیتريد تیتانیوم است. مقدار به دست آمده در مقایسه با اعداد گزارش شده برای نیتريد کروم اعمال شده بر روی فولاد به روش PVD بسیار کمتر است که برابر با ۰/۴۷ است [۲۱]. نمودار تغییرات ضریب اصطکاک در شکل ۳ ارائه شده است. نمودار مشاهده شده تقریباً نوسانات کمی دارد و حول میانگین بیان شده در حال نوسان است. این موضوع نشان دهنده عملکرد مطلوب پوشش دوگانه نیتريد کروم اعمال شده بر روی تیتانیوم خالص و همچنین تیتانیوم دارای پوشش کروم است.

جدول ۱. وزن از دست رفته نمونه های پوشش داده شده

نمونه	وزن از دست رفته (گرم)
TiCr-3015	۰/۲۱
TiCr-3030	۰/۲۸
TiCr-3015-PN600-8	۰/۰۰۱

رفتار سایشی نمونه های دارای لایه دوگانه نیتريد کروم توسط آزمون پین روی دیسک مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی این نمونه ها نیز از پین تیتانیومی با صفحه تخت و نیروی ۳ نیوتن استفاده شد و سایش در ۷۰ متر و ۱۲۰ دور بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت و نمودار ضریب اصطکاک آن بر حسب مسافت طی شده رسم شد. همچنین وزن نمونه ها قبل و بعد از انجام آزمون سایش توسط ترازویی با دقت  $\pm 0/001$  گرم اندازه گیری شد. وزن کاهش یافته برای نمونه TiCr-3015-PN600-8 برابر با  $\pm 0/001$  به دست آمد که بسیار کمتر از کاهش وزن نمونه های پوشش داده شده با کروم و نمونه های دارای لایه تیتانیوم نیتريد است. وزن مواد سایش یافته از سطح نمونه ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین متوسط ضریب اصطکاک اندازه گیری شده برای این نمونه برابر با  $0/16 \pm 0/01$  است که این مقدار به صورت قابل توجهی کمتر از مقدار اندازه گیری شده برای نمونه تیتانیوم خالص با متوسط ضریب اصطکاک  $1/12 \pm 0/01$  و نمونه های



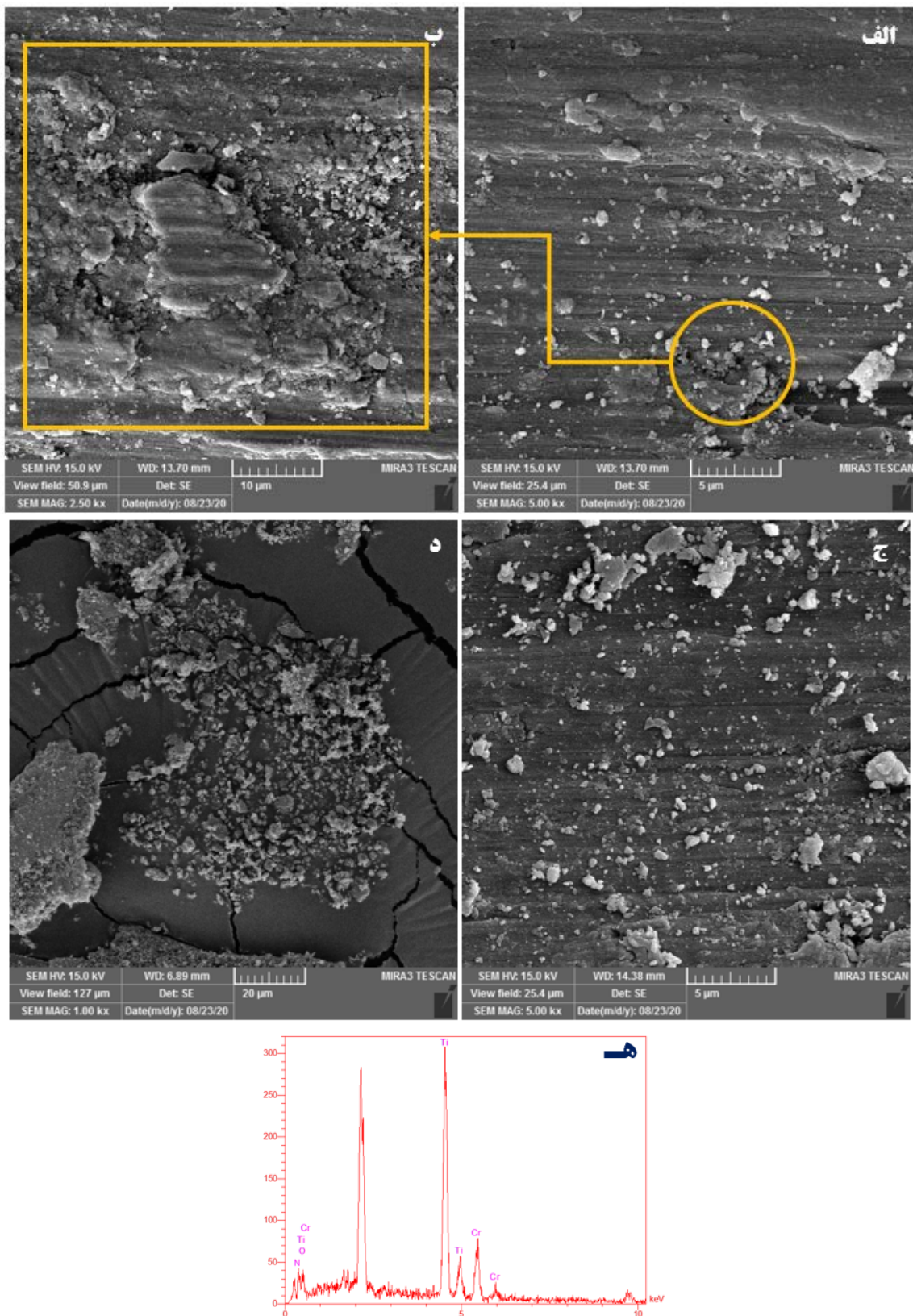
شکل ۳. نمودار تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌های پوشش کروم، نیتريد کروم و تیتانیوم خالص

بر هم شش‌تایی بر روی هم توسط تیغه مخصوص کشیده شد و سپس با استفاده از چسب مخصوص، سعی بر کنده شدن این پوشش‌ها شد و به صورت کیفی چسبندگی پوشش بر سطح بررسی شد. تصویر سطح نمونه پوشش نیتريد کرومی و نمونه TiCr-3015 در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، سطح پوشش نمونه TiCr-3015 به طور محسوسی بر اثر چسب مورد استفاده کنده شده و سطح کیفی چسبندگی آن طبق استاندارد ASTM D 3359 سطح C برآورد می‌شود، در حالی‌که با نفوذ نیتروژن در پوشش کروم و تشکیل لایه نازک نیتريد کروم، نه تنها هیچ اثری از کندگی پوشش نیتريد کرومی وجود ندارد، بلکه سختی تیغه‌های استاندارد مورد استفاده در روش برش مقطع به‌گونه‌ای است که نتوانسته به صورت یکنواخت بر روی پوشش نیتريد کروم خراش بیندازد و در نتیجه استفاده از چسب، هیچ اثری از کندگی مشاهده نشد. بدین ترتیب طبق استاندارد مذکور، سطح چسبندگی پوشش A برای پوشش لایه نازک نیتريد کروم برآورد می‌شود. به عبارتی دیگر، با نفوذ نیتروژن در پوشش کروم و تشکیل لایه نیتريد کرومی، سختی سطح به اندازه‌ای بالا رفته که از سختی تیغه فولادی مورد استفاده در روش برش مقطع بیشتر شده است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح اثر سایش در تصاویر شکل ۴، الف تا ج ارائه شده‌اند. همان‌طور که در این تصاویر مشخص است، محل سایش کاملاً مشخص است. این نواحی نشان‌دهنده مکانیزم سایش چسبان در این نمونه است. تصویر بزرگنمایی شده در تصویر شکل ۴-ج، نشان‌دهنده ذرات اکسیدی در سطح اثر سایش باقی مانده و ترک‌های ریزی در آن ناحیه تشکیل شده است. تشکیل این ذرات اکسیدی و ترک‌های ریز نشان‌دهنده فعال شدن مکانیزم سایش خراشان است. هم‌چنین وجود این ذرات اکسیدی باعث پدید آمدن سایش با سه جز می‌شود که سهم مکانیزم سایش چسبان را کاهش می‌دهد. این موضوع، یکی از دلایل عمده کاهش محسوس میانگین ضریب اصطکاک در نمونه TiCr-3015-PN600-8 است. در تصویر شکل ۴-د، ذرات سایش یافته نشان داده شده‌اند. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، مقدار کاهش وزن نمونه نیتروژن‌دهی بسیار کم بوده و در نتیجه ذرات نشان داده شده در تصویر شکل ۴-د، مجموع ذرات جمع شده از چندین نمونه سایش یافته است. منحنی EDS نشان داده شده در تصویر هـ شکل ۴، نشان‌دهنده این موضوع است که این ذرات می‌توانند از نیتريد کروم؛ کروم و اکسید کروم؛ تیتانیوم و اکسید تیتانیوم (ناشی از پین مورد استفاده) باشند.

چسبندگی پوشش ترکیبی نیتريد کروم به‌دست آمده و پوشش کروم نمونه TiCr-3015 توسط روش کیفی برش مقطع مورد بررسی قرار گرفت. در روش برش مقطع، دو سری خراش عمود





شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح اثر سایش نمونه پوشش کروم نیتروژن دهی پلاسمایی

## مراجع

- [1] Y. Chen *et al.*, "Manufacturing of graded titanium scaffolds using a novel space holder technique," *Bioact. Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 248–252, 2017, doi: 10.1016/j.bioactmat.2017.07.001.
- [2] Z. su Wang, Q. feng Guo, F. Jiang, B. Chen, Q. wen Wu, and G. qiang Wang, "Stiffness design of cantilevered structure with space optics load," *Optik (Stuttg.)*, vol. 184, no. March, pp. 330–338, 2019, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.03.076.
- [3] N. Yanar *et al.*, "Investigation of the performance behavior of a forward osmosis membrane system using various feed spacer materials fabricated by 3D printing technique," *Chemosphere*, vol. 202, pp. 708–715, 2018, doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.147.
- [4] S. A. Naziri Mehrabani, R. Ahmadzadeh, N. Abdian, A. Taghizadeh Tabrizi, and H. Aghajani, "Synthesis of Ni-GO nanocomposite coatings: Corrosion evaluation," *Surfaces and Interfaces*, vol. 20, no. May, p. 100546, 2020, doi: 10.1016/j.surf.2020.100546.
- [5] T. Sahraoui, S. Guessasma, N. E. Fenineche, G. Montavon, and C. Coddet, "Friction and wear behaviour prediction of HVOF coatings and electroplated hard chromium using neural computation," *Mater. Lett.*, vol. 58, no. 5, pp. 654–660, 2004, doi: 10.1016/j.matlet.2003.06.010.
- [6] C. L. Chang, C. T. Ho, P. H. Chen, W. C. Chen, D. Y. Wang, and W. Y. Wu, "Synergetic effect for improved deposition of titanium nitride films," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 350, no. January, pp. 1098–1104, 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.019.
- [7] A. T. Tabrizi, H. Aghajani, H. Saghafian, and F. F. Laleh, "Correction of Archard equation for wear behavior of modified pure titanium," *Tribol. Int.*, no. November, p. 106772, 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106772.
- [8] D. Del Pianta, J. Frayret, C. Gleyzes, C. Cugnet, J. C. Dupin, and I. Le Hecho, "Determination of the chromium(III) reduction mechanism during chromium electroplating," *Electrochim. Acta*, vol. 284, pp. 234–241, 2018, doi: 10.1016/j.electacta.2018.07.114.
- [9] W. Deqing, S. Ziyuan, and K. Tangshan, "Composite plating of hard chromium on aluminum substrate," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 191, no. 2–3, pp. 324–329, 2005, doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.03.049.
- [10] A. L. M. Carvalho and H. J. C. Voorwald, "Influence of shot peening and hard chromium electroplating on the fatigue strength of 7050-T7451 aluminum alloy," *Int. J. Fatigue*, vol. 29, no.



شکل ۵. سطح اثر کراس کات الف- نمونه دارای پوشش کروم، ب- پوشش کروم نیتروژن‌دهی پلاسمایی شده

## ۴- نتیجه‌گیری

با اعمال نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر روی پوشش کروم، شبکه ریز ترک‌های پوشش کروم با نفوذ اتم‌های نیتروژن اصلاح شده و باعث افزایش مقدار ریزسختی سطح از ۳۲۸ ویکرز پوشش کروم به ۱۱۰۹ ویکرز به دلیل تشکیل فاز نیتريد کروم شده است. همچنین، چسبندگی پوشش کروم بعد از اعمال نیتروژن‌دهی پلاسمایی به مقدار محسوسی افزایش یافته است. در نهایت، مقاومت به سایش نمونه نیتروژن‌دهی شده بهبود یافته است. مقدار ضریب اصطکاک از مقدار ۱/۱۲ در تماس دو سطح تیتانیومی بدون پوشش به مقدار ۰/۱۶ در حضور پوشش نیتريد کروم رسیده است. بنابراین می‌توان ادعا کرد که هر سه پارامتر فیزیکی موثر در جلوگیری از وقوع جوش سرد تقویت شده و از وقوع جوش سرد می‌توان در شرایط فضایی جلوگیری کرد.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## تشکر و قدردانی

اد

- [17] E. Menthe and K. T. Rie, "Plasma nitriding and plasma nitrocarburizing of electroplated hard chromium to increase the wear and the corrosion properties," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 112, no. 1-3, pp. 217-220, 1999, doi: 10.1016/S0257-8972(98)00793-2.
- [18] A. T. Tabrizi, H. Aghajani, and F. F. Laleh, "Tribological characterization of hybrid chromium nitride thin layer synthesized on titanium," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 419, no. May, p. 127317, 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127317.
- [19] M. Keshavarz Hedayati, F. Mahboubi, and T. Nickchi, "Comparison of conventional and active screen plasma nitriding of hard chromium electroplated steel," *Vacuum*, vol. 83, no. 8, pp. 1123-1128, 2009, doi: 10.1016/j.vacuum.2009.02.005.
- [20] E. Lunarska, K. Nikiforow, T. Wierzchon, and I. Ulbin-Pokorska, "Effect of plasma nitriding on hydrogen behavior in electroplated chromium coating," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 145, no. 1-3, pp. 139-145, 2001, doi: 10.1016/S0257-8972(01)01287-7.
- [21] S. Han *et al.*, "Corrosion and tribological studies of chromium nitride coated on steel with an interlayer of electroplated chromium," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 133-134, pp. 460-465, 2000, doi: 10.1016/S0257-8972(00)00979-8.
- 7, pp. 1282-1291, 2007, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.10.003.
- [11] V. S. Protsenko, F. I. Danilov, V. O. Gordiienko, S. C. Kwon, M. Kim, and J. Y. Lee, "Electrodeposition of hard nanocrystalline chrome from aqueous sulfate trivalent chromium bath," *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 1, pp. 380-383, 2011, doi: 10.1016/j.tsf.2011.07.036.
- [12] S. E. Elsaka, I. M. Hamouda, Y. A. Elewady, O. B. Abouelatta, and M. V. Swain, "Effect of chromium interlayer on the shear bond strength between porcelain and pure titanium," *Dent. Mater.*, vol. 26, no. 8, pp. 793-798, 2010, doi: 10.1016/j.dental.2010.04.004.
- [13] M. R. Saghi Beyragh, A. Sh. Khameneh, and S. Norouzi, "A comparative research on corrosion behavior of a standard, crack-free and duplex hard chromium coatings," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 205, no. 7, pp. 2605-2610, 2010, doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.009.
- [14] S. H. Sarraf, M. Soltanieh, and H. Aghajani, "Repairing the cracks network of hard chromium electroplated layers using plasma nitriding technique," *Vacuum*, vol. 127, pp. 1-9, 2016, doi: 10.1016/j.vacuum.2016.02.001.
- [15] L. Wang, K. S. Nam, and S. C. Kwon, "Transmission electron microscopy study of plasma nitriding of electroplated chromium coating," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 207, no. 1-4, pp. 372-377, 2003, doi: 10.1016/S0169-4332(03)00007-2.
- [16] P. K. Ajikumar *et al.*, "Morphology and growth aspects of Cr(N) phases on gas nitridation of electroplated chromium on AISI 316 LN stainless steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 201, no. 1-2, pp. 102-107, 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.10.043.



#### COPYRIGHTS

© 2021 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)