



## ارائه روش ترکیبی آنودایزکاری و لپینگ جهت پرداخت کاری سطوح آببندهای مکانیکی تنگستن کارباید مورد استفاده در کمپرسورهای واحد احیاء مستقیم صنایع فولاد

هادی اله وکیل<sup>۱</sup>، حمید زارع پور فیروزآبادی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: h-zare@iaun.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

### مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۷ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۷ خرداد ۱۴۰۳

### کلیدواژگان:

فرایند لپینگ

آببندهای مکانیکی

پارامترهای فرایند

آنودایزینگ تنگستن کارباید

مشخصه‌های سطح

آببندهای مکانیکی یکی از پرمصرف‌ترین و کاربردی‌ترین اجزای پمپ‌ها و کمپرسورها می‌باشند. این قطعات از دو قسمت ثابت و متحرک تشکیل شده‌اند و باید دارای سختی و کیفیت سطح مناسب باشند؛ زیرا درحالی‌که سطح متحرک بر سطح ثابت می‌چرخد باید آببندی نیز انجام دهد. براین اساس، جنس و کیفیت سطح آببند مکانیکی حائز اهمیت خواهد بود. فرایند لپینگ یکی از روش‌های پرداخت کاری جهت حصول صافی و تختی سطح آببندهای مکانیکی است. با این وجود، تحقیقات انجام‌شده بر روی بهینه‌سازی پارامترهای لپینگ آببندهای مکانیکی به‌ویژه از جنس تنگستن کارباید کافی به نظر نمی‌رسد. هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی پارامترهای زمان و فشار لپینگ برای جنس تنگستن کارباید جهت بهبود تختی و زبری سطح آببندهای مکانیکی است. برای دستیابی به این هدف، از روش جدیدی شامل ترکیب فرایندهای آنودایزینگ و لپینگ استفاده گردیده و نتایج زمان و فشار عملیات لپینگ برای نمونه‌های آنودایز شده و آنودایز نشده به دست آمده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که ترکیب فرایندهای آنودایزینگ و لپینگ باعث کاهش سختی سطحی نمونه‌ها به میزان بیش از ۵۰٪ شده و با انجام عملیات آنودایز، حداکثر زمان لپینگ نمونه‌ها از حدود ۱۷ ساعت به زیر ۴ ساعت کاهش یافته است. بر اساس نتایج بررسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی، لایه اکسیدی سطح نمونه‌ها پس از عملیات لپینگ به‌طور کامل برداشته شده و در نتیجه در عملکرد آببند مکانیکی خللی وارد نخواهد شد. همچنین، نتایج بررسی توپوگرافی دوبعدی و سه‌بعدی سطح نشان داد که تختی و زبری سطح نمونه‌های آنودایز شده نسبت به نمونه‌های آنودایز نشده بهبود پیدا کردند.

## A hybrid lapping/anodizing technique for surface modification of the tungsten carbide mechanical seals used in direct reduction plant compressors of steel production industries

Hadi Allahvakil<sup>1</sup>, Hamid Zarepour Firouzabadi<sup>2\*</sup>

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

\* Corresponding Author's Email: h-zare@iaun.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 16 February 2024

Accepted: 6 June 2024

### Keywords:

Lapping Process

Mechanical Seals

Process Parameters

WC Anodizing

Surface Characteristics

### Abstract

Mechanical seals are among the most widely used components of pumps and compressor. These parts consist of stationary and rotary sections with proper hardness and surface quality. The rotary surface is moving on the stationary surface while sealing should be performed between them. Hence, surface quality of the mechanical seals is critical for their performance. Lapping is a suitable finishing process used to improve the flatness and smoothness of mechanical seal surfaces. However, there is a lack of sufficient and extensive researches in the field of optimizing the lapping parameters of mechanical seals made of tungsten carbide. This study aimed to optimize the lapping time and pressure for tungsten carbide material to improve the flatness and roughness of the mechanical seals. To achieve this aim, a novel approach was used that combines anodizing and lapping. Experiments were conducted on both anodized and non-anodized samples. The results showed that anodizing reduces the surface hardness of tungsten carbide by 50%, which can reduce the maximum lapping time from 17 hours to less than 4 hours. The oxide layer on the surface of the samples was also completely removed after lapping, as confirmed by scanning electron microscopy. Moreover, the results of 2D and 3D topography showed that the surface roughness and flatness of the anodized samples were both improved compared to the non-anodized samples.

### Please cite this article using:

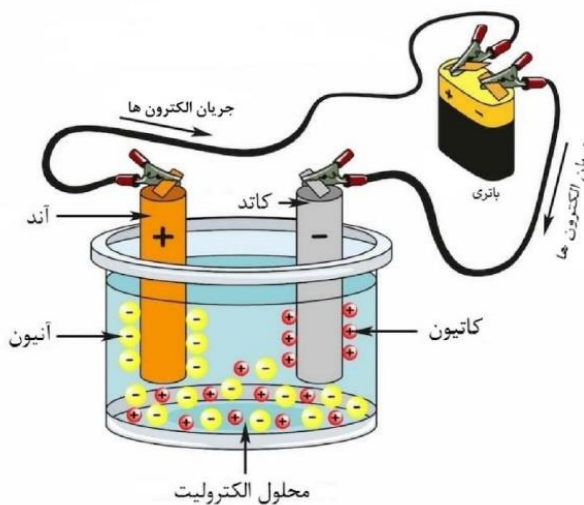
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Allahvakil H, Zarepour Firouzabadi H. A hybrid lapping/anodizing technique for surface modification of the tungsten carbide mechanical seals used in direct reduction plant compressors of steel production industries. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 May 21;11(3):26-37. doi: 10.22034/IJME.2024.433486.1909 [In Persian]

## ۱- مقدمه

آببندهای مکانیکی جزء حساس‌ترین قطعاتی هستند که در انواع پمپ‌ها و کمپرسورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ماده تنگستن کارباید (WC)<sup>۱</sup> به دلیل سختی زیاد معمولاً در ساخت انواع آببندهای مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سختی بالای تنگستن کارباید باعث می‌شود تا آببند مکانیکی در مقابل اصطکاک شدید بین حلقه‌های ثابت و متحرک آببند، مقاومت داشته باشد. الزام به کیفیت بالا در سطح تماس حلقه ثابت و متحرک آببند مکانیکی نیاز به استفاده از فرایندهای پرداخت سایشی با بازدهی بالا جهت حصول کیفیت سطح را افزایش می‌دهد. یکی از فرایندهای پرکاربرد در بهبود کیفیت سطوح، فرایند سایشی لپینگ است که برای اغلب مواد کاربرد دارد. نکته قابل تأمل و با اهمیت در تولید و بازسازی آببندهای مکانیکی، زمان زیاد پرداخت کاری آن‌ها است؛ بنابراین توسعه تکنیک‌ها و روش‌های پرداخت کاری آببندهای مکانیکی باهدف کاهش زمان فرایند لپینگ آن‌ها در صنایع مختلف ضروری به نظر می‌رسد. ازجمله این روش‌ها و تکنیک‌ها، ترکیب فرایندهای الکتروشیمیایی و سایشی به‌منظور کاهش زمان و افزایش راندمان فرایند پرداخت کاری و همچنین دستیابی به مشخصات عملکردی در آببندهای مکانیکی است.

آنودایزکاری از جمله فرایندهای الکتروشیمیایی<sup>۲</sup> است که برای افزایش ضخامت لایه‌ی اکسیدی تشکیل‌شده روی سطح فلزات، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرایند در یک سلول الکتروشیمیایی انجام می‌شود که متشکل از سه بخش اصلی کاتد، آند و محلول الکترولیت است. لایه‌ی اکسید فلز آنودایز شده، به‌وسیله‌ی عبور جریان مستقیم از محلول الکترولیت، رشد کرده و ضخامت آن بر روی سطح قطعه فلز مورد آزمایش (آند) افزایش می‌یابد. به این ترتیب، جریان الکتریکی هیدروژن را در کاتد (الکتروود منفی) و اکسیژن را در سطح آند (الکتروود مثبت) آزاد نموده و منجر به رشد لایه‌ی اکسیدی می‌گردد. البته در برخی موارد در فرایند آنودایز، جریان متناوب و پالسی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱ اساس فرایند آنودایز و اجزاء آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱ اساس فرایند آنودایزینگ و اجزاء آن

پرداخت کاری یکی از روش‌های برداشت ماده به‌صورت سایشی جهت حصول صافی و تختی سطح بالاست. در این روش مواد در مقیاس نانو و با استفاده از دانه‌های ساینده برداشته می‌شوند. در همین راستا صمدی و همکاران [۱] در مورد پرداخت کاری سایشی با استفاده از میدان مغناطیسی در مقیاس نانو (NMAF) تحقیق کرده و دریافته‌اند که سرعت و میزان مواد ساینده بیشترین تأثیر را بر پرداخت سطح دارند. همچنین در تحقیقی مشابه، رسولی و همکاران [۲] دریافته‌اند که ویژگی‌های پودر ساینده بر صافی سطح نهایی قطعه مؤثر است. در ادامه مطالب یادشده باید به بهبود خواص تریبولوژیکی و اهمیت آن در آببندهای مکانیکی اشاره کرد؛ چراکه باعث کاهش اصطکاک، بهبود شرایط روان کاری و کاهش آسیب سطح آببند مکانیکی در اثر سایش شده و درنتیجه کاهش استهلاک زودهنگام تجهیزات را به دنبال خواهد داشت. بر همین اساس هاو و همکاران [۳] در مورد بررسی اثر ضخامت فیلم روغن، زبری و

<sup>1</sup> Tungsten carbide

<sup>2</sup> Electrochemical processes

موج‌دار بودن سطح بر عملکرد هیدرودینامیکی آب‌بند مکانیکی تحقیق کرده و نتایج بهینه زبری و موج‌دار بودن سطح و همچنین میزان زاویه‌دار بودن سطح آب‌بند در جهت شعاعی با استفاده از حل گوسی معادله رینولدز، جهت بهبود شرایط هیدرودینامیکی آب‌بند مکانیکی ارائه نمودند. همچنین در ادامه بهبود خواص تریبولوژیکی، موج‌دار بودن سطح یک نوع آب‌بند خاص بررسی شده و با استفاده از مقادیر به‌دست‌آمده از طریق معادلات و شبیه‌سازی، ابعاد و زوایای بهینه آب‌بند ارائه گردیده و در نتیجه میزان سایش آب‌بند مکانیکی کاهش یافته است [۴]. علاوه بر خواص تریبولوژیکی، بررسی توزیع تنش در سطح آببندهای مکانیکی می‌تواند به‌عنوان ابزاری جهت بررسی میزان نشستی در محل آب‌بندی استفاده شود. از این‌رو، شیچیک و همکاران [۵] در مورد توزیع تنش و تأثیر آن بر نشستی آب‌بند مکانیکی تحقیق کرده‌اند. در این پژوهش از طریق تحلیل عددی میزان نشستی بر اساس تنش در سطح تماس، اثبات شده است که شکل سطوح تماس آب‌بند به میزان زیادی بر روی نشستی آب‌بند مکانیکی تأثیر دارد.

انتخاب جنس مناسب برای آب‌بند مکانیکی بسیار حائز اهمیت است؛ چراکه بسیاری از خواص آن‌ها تحت تأثیر جنس آب‌بند است. در همین رابطه، ویلیام دیتزل و جک وسکو [۶] به بررسی کارایی جنس‌های مختلف به‌خصوص تنگستن کارباید برای ساخت آببندهای مکانیکی پرداخته‌اند. در این پژوهش جنس، هدایت حرارتی و مدول الاستیک آب‌بند مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته و انتخاب جنس مناسب برای آب‌بند وابسته به کاهش نشستی، افزایش کارایی و قابلیت اطمینان گزارش شده است. همچنین جنس تنگستن کارباید به‌عنوان یکی از جنس‌های پرکاربرد و قدیمی در ساخت آب‌بند مکانیکی معرفی شده است. در پژوهش دیگر، آبینای و همکاران [۷] تحقیقی در زمینه مشخصات جنس آببندهای مکانیکی انجام داده‌اند و در نتیجه آن تنگستن کارباید، سیلیکون کارباید و سرامیک را مناسب‌ترین جنس‌ها برای استفاده در آب‌بند مکانیکی معرفی کردند که کارایی لازم برای پاسخ به نیازهای عملکردی و شرایط کارکرد سنگین این نوع آببندها را دارند. ژان و همکاران [۸] تحقیقی جهت تحلیل عددی خصوصیات جریان فیلم روغن و خصوصیات انتقال حرارت آن، اثر اصطکاک، نیروی مکانیکی و حرارت در سطح آب‌بند مکانیکی انجام داده‌اند. در پژوهش دیگری، شانکار و همکاران [۹] یک بررسی مقایسه‌ای بر رفتار اصطکاکی تنگستن کارباید و آب‌بند کربنی انجام دادند. در زمینه‌ی بررسی رفتار تریبولوژیکی آببندهای مکانیکی، جانز [۱۰] سطح آببندهای مکانیکی را از نظر خواص تریبولوژیکی و تحت روان کاری کربن‌گرافیت مورد بررسی قرار داده و یک مدل تماسی با اصطکاک پایین را به‌عنوان یک نوآوری ارائه کرده است.

در مورد آزمون کارایی آببندهای مکانیکی نیز تحقیقاتی انجام شده است، از جمله، جیانگ جون و همکاران [۱۱] دستگاه جدیدی جهت آزمون کارایی (از نظر گشتاور قابل تحمل) آببندهای مکانیکی ساخته‌اند. دستگاه ساخته شده برای انجام آزمون عملکرد کارایی آببندهای بزرگ کمپرسورهای بزرگ، پمپ‌های گریز از مرکز و هم‌زن‌های با فشار بالا، مناسب شناخته شده است. یکی از راه‌های بهبود خواص سطوح، انجام عملیات مهندسی سطح از طریق ایجاد پوشش‌های سطحی سخت می‌باشد. بر همین اساس، شبانی و همکاران [۱۲] در زمینه‌ی ایجاد یک پوشش چندلایه روی سطح آب‌بند از جنس الماس با روش رسوب بخار شیمیایی داغ<sup>۱</sup> جهت آب‌بندی تحقیق کردند. در این تحقیق بررسی شرایط سطح با استفاده از روش رسوب بخار شیمیایی داغ و بهبود خواص تریبولوژیکی انجام شده و پوشش‌های نانو و میکرو بلوره‌ای الماس بر سطح نمونه‌ها ایجاد شده است. در همین راستا ژانگ و همکاران [۱۳] رفتار تریبولوژیکی نوعی پوشش آلیاژ فلزی ضخیم ایجاد شده روی سطح شفت یک پمپ با سرعت دورانی بالا را با روش رسوب بخار فیزیکی<sup>۲</sup> و با هدف کاهش اصطکاک و سایش مطالعه کرده‌اند. پس از بررسی شرایط سطح از نظر تریبولوژیکی، اثبات شده است که سرعت، اثرگذارترین عامل بر سایش و اصطکاک بوده و پوشش SN-S-CU رفتار سایشی خوبی داشته است.

در ادامه مطالب، تحقیقاتی که در زمینه ترکیب فرایندهای الکتروشیمیایی و فرایندهای سایشی انجام شده، آورده شده است. فرایندهای الکتروشیمیایی اغلب جهت بهبود کیفیت یا زبری سطوح استفاده می‌شود. امروزه این فرایندها با فرایندهای سایشی تلفیق است که علاوه بر کمک به کاهش زمان باربرداری، در بهبود کیفیت سطح نیز بسیار مؤثر است. رانگ لین و همکاران [۱۴] با استفاده از الکتروپولیشینگ<sup>۳</sup> و قرار دادن یک قطعه بزرگ در یک دوغاب ساینده، در مورد امکان آنودایزکاری جنس WC+CO تحقیق کرده و پارامترهای فرایند شامل: نرخ برداشت ماده، زبری سطح، سایش قطعه کار، زمان لپینگ و اندازه ذرات ساینده را مورد مطالعه قرار دادند. هان و همکاران [۱۵] با هدف بررسی جنبه‌های اساسی و تحولات اخیر فرایند الکتروپولیشینگ و همچنین بررسی نظریه‌های اساسی

<sup>1</sup> Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCV)

<sup>2</sup> Physical Vapor Deposition (PVD)

<sup>3</sup> Electro Polishing (EP)

در مکانیسم حذف مواد، بر روی فرایند الکتروپولیشینگ تحقیق کرده‌اند. در پژوهش دیگر، هان و همکاران [۱۶] تأثیر پارامترهای فشار تماس، اندازه ذرات ساینده و سرعت پرداخت کاری را بر نرخ باربرداری در فرایند پولیش کاری مکانیکی شیمیایی (CMP)<sup>۱</sup> مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهش دیگر ژو و همکاران [۱۷] دریافتند که عملیات آنودایز باعث کاهش سختی سطح تنگستن کارباید بدون چسب به دلیل تشکیل لایه اکسید تنگستن کارباید شده و زیر لایه‌هایی که قبل از آنودایز پولیش شده‌اند، نسبت به زیر لایه‌های پولیش نشده یا نیمه پولیش شده، آنودایز همگن و کنترل شده‌تری دارند.

همچنین در پژوهش انجام شده توسط دنگ و همکاران [۱۸]، با هدف بهبود شرایط سطح و افزایش قابلیت لپینگ تنگستن کارباید، یک روش آنودایزینگ الکتروشیمیایی با استفاده از پولیش کاری الکتروشیمیایی مکانیکی<sup>۲</sup> مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش، پوششی بر روی سطح تنگستن کارباید ایجاد شد که به مراتب سختی بسیار کمتری نسبت به تنگستن کارباید داشته و پس از فرایند پولیشینگ با دوغاب ساینده و برداشت پوشش، صافی سطح در حدود  $Sa=55nm$  به دست آمد.

بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده بر روی شرایط و خواص عملکردی مورد نیاز برای سطوح آببندهای مکانیکی از جنس تنگستن کارباید، ترکیب فرایندهای سایشی و الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن‌ها نشان داده است که فرایند آنودایز می‌تواند از طریق تشکیل لایه اکسیدی از جنس اکسید تنگستن کارباید باعث کاهش سختی سطحی فلز پایه (تنگستن کارباید) شده و زمان عملیات پرداخت کاری را کاهش دهد. موردی که می‌تواند به‌عنوان خلأ تحقیقاتی مطرح شود، زمان زیاد فرایند لپینگ می‌باشد که باعث گردید تحقیق حاضر بر فرایندهایی که باعث کاهش سختی سطح می‌شوند، متمرکز گردد. یکی از این فرایندها، آنودایز می‌باشد. بر همین اساس، در این پژوهش ترکیب فرایندهای آنودایز و لپینگ به‌عنوان یک نوآوری برای آببندهای مکانیکی تنگستن کارباید نیکل دار (WC+NI) مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، کاتد مورد استفاده در فرایند آنودایز از جنس تیتانیوم انتخاب شده که جنبه نوآوری دیگری در تحقیق حاضر محسوب می‌گردد. با توجه به موارد فوق، هدف از انجام پژوهش حاضر، ارائه روشی جدید و مؤثر با استفاده از ترکیب فرایندهای آنودایزکاری و لپینگ جهت افزایش سختی و کیفیت سطح و همچنین کاهش زمان عملیات لپینگ آببندهای مکانیکی تنگستن کارباید مورد استفاده در کمپرسورهای واحد احیاء مستقیم صنایع فولادسازی می‌باشد که در افزایش بهره‌وری تولید از طریق کاهش هزینه‌های تعمیر تجهیزات اهمیت به‌سزایی دارد.

## ۲- مواد و روش‌ها

از جمله پارامترهای مهم فرایند لپینگ عبارت‌اند از: مقدار مجاز باربرداری، فشار لپینگ، سرعت لپینگ، اندازه ذرات ساینده، مدت زمان لپینگ، نوع دوغاب ساینده، نحوه قرارگیری قطعات و غلظت ذرات ساینده. با توجه به تعداد زیاد پارامترهای لپینگ، در این پژوهش پارامترهای زمان و فشار لپینگ که از اصلی‌ترین پارامترهای کنترلی این فرایند هستند، مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرند. یکی از چالش‌های موجود در عملیات لپینگ آببند مکانیکی، طولانی بودن نسبی زمان فرایند است. این موضوع در مواردی که میزان آسیب و خرابی سطح آببند زیاد باشد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در همین راستا در پژوهش حاضر، به‌عنوان یک نوآوری از روش الکتروشیمیایی آنودایز جهت ایجاد لایه اکسید تنگستن کارباید روی سطح آببندی نمونه‌های آببند مکانیکی استفاده شد تا با توجه به سختی کمتر اکسید تنگستن کارباید نسبت به فلز تنگستن کارباید، زمان عملیات لپینگ کاهش یابد. همچنین به‌عنوان نوآوری دیگر، فرایند آنودایز با به‌کارگیری کاتد از جنس تیتانیوم انجام شده است. آزمایش‌های آنودایز بر روی ۸ عدد از نمونه‌های آببندهای مکانیکی با قطر ۳۱۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۷۸ میلی‌متر بر اساس روش فول فاکتوریل<sup>۳</sup> انجام شده و ضخامت لایه اکسید پس از حدود ۴۰ دقیقه بررسی شد. در ادامه، نمونه‌های آنودایز شده و آنودایز نشده تحت عملیات لپینگ قرار گرفته‌اند و نتایج به‌دست‌آمده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. پس از عملیات آنودایز، ضخامت لایه اکسیدی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)<sup>۴</sup> و همچنین میزان سختی لایه اکسید شده با استفاده از آزمون سایش رفت و برگشتی تعیین شده و نتایج مربوطه بین نمونه‌های آنودایز شده و آنودایز نشده مقایسه گردید. شرایط و پارامترهای عملیات آنودایز بر اساس پیشنهادهای ارائه‌شده در مرجع [۱۸] در جدول ۱ قابل مشاهده است.

<sup>۱</sup> Chemical Mechanical Polishing (CMP)

<sup>۲</sup> Electro Chemical Mechanical Polishing (ECMP)

<sup>۳</sup> Full Factorial

<sup>۴</sup> Scanning Electron Microscope

جدول ۱ شرایط و پارامترهای آنودایزکاری [۱۸]

جنس آنود	جنس کاتد	جنس نگهدارنده آنود	نوع الکترولیت	میزان الکترولیت	شدت جریان	جنس وان	مدت آنودایز	نوع جریان
تنگستن کارباید	تیتانیوم	مس	هیدروکسید سدیم	۱٪ وزنی	۰.۵ آمپر	پلاستیک سخت	۴۰ دقیقه	مستقیم

پس از انجام عملیات آنودایزینگ، آببندهای مکانیکی تنگستن کارباید (۸ عدد آنودایز شده و ۸ عدد آنودایز نشده) بر اساس شرایط ارائه شده در جدول ۲ تحت عملیات لپینگ قرار گرفته و نتایج ثبت گردیده است. طبق این شرایط، حداکثر زبری برابر  $Ra=0.018 \mu m$  و حداکثر تختی برابر ۲ باند نوری (با توجه به نقشه آببند مکانیکی) در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ پارامترهای فرایند لپینگ نمونه‌های آببندهای مکانیکی

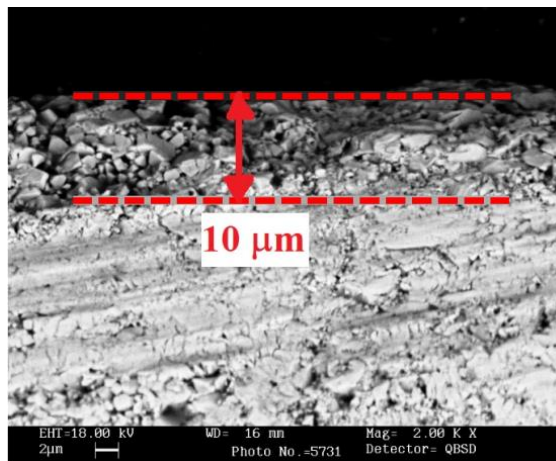
عملیات	نوع صفحه ساینده	جنس ذرات ساینده	اندازه ذرات ساینده	سرعت دوران صفحه
خشن کاری	خشن (آبی)	الماس	۶۰ میکرون	۳۵ دور بر دقیقه
پرداخت کاری	سبز (نیمه پرداخت)	الماس	۲۰ میکرون	۴۰ دور بر دقیقه

جهت انجام آزمون‌های لپینگ، نیاز است فشار لپینگ برحسب پاسکال محاسبه شود. فشار لپینگ از طریق اعمال وزنه‌ها بر سطح نمونه کنترل می‌شود. فشار لپینگ بر اساس قطر خارجی آببند برابر ۳۱۰ میلی‌متر و قطر داخلی آن برابر ۲۷۸ میلی‌متر قابل محاسبه است که بدین ترتیب، مقادیر حداکثر و حداقل فشار لپینگ برای نمونه آببندهای مکانیکی، به ترتیب برابر ۱۳۵۳۴ پاسکال و ۲۰۳۰۰ پاسکال به دست می‌آید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی تشکیل لایه اکسیدی روی سطوح نمونه‌های آنودایز شده

پس از انجام عملیات آنودایز، وضعیت تشکیل یا عدم تشکیل لایه اکسیدی روی سطوح نمونه‌ها با استفاده از تصاویر SEM بررسی شد. شکل ۲ یک نمونه تصویر SEM مربوط به سطوح آنودایز شده را نشان می‌دهد که در آن تشکیل لایه اکسیدی با ضخامت حدود  $10 \mu m$  بر روی سطح نمونه پس از ۴۰ دقیقه عملیات آنودایزکاری قابل مشاهده است. در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون EDAX برای نمونه‌های آنودایز شده و آنودایز نشده ارائه شده است. همان‌طور که در ستون درصد وزنی قابل مشاهده است، برآثر فرایند الکتروشیمیایی آنودایز، درصد عناصر نمونه‌های آنودایز شده نسبت به نمونه اولیه (آنودایز نشده) دچار تغییر شده است.



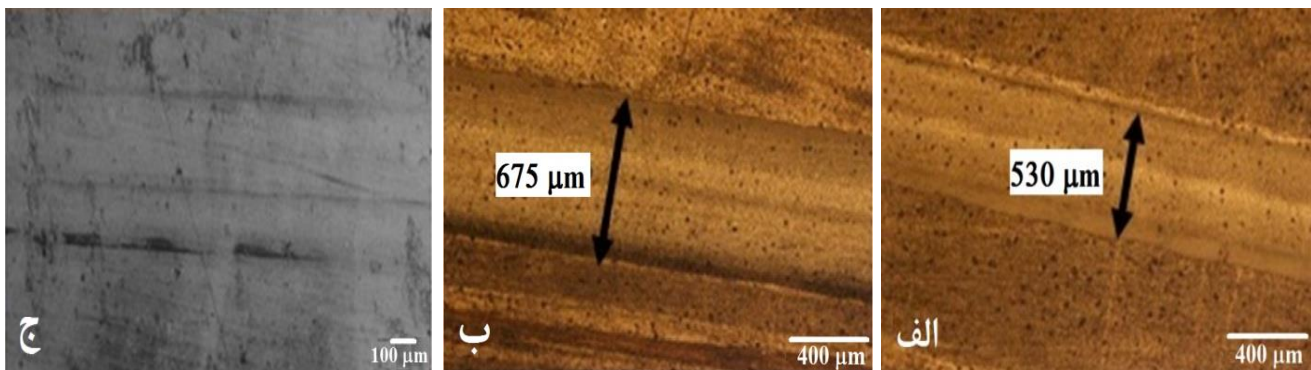
شکل ۲ سطح نمونه آنودایز شده پس از ۴۰ دقیقه عملیات آنودایز

جدول ۳ نتیجه EDAX از نمونه آببندهای مکانیکی آنودایز شده و آنودایز نشده

نمونه آنودایز نشده				نمونه آنودایز شده			
میزان خلوص	درصد اتمی	درصد وزنی	عنصر	میزان خلوص	درصد اتمی	درصد وزنی	عنصر
۲,۳۴	۴۰,۵۷	۵,۲۹	Ck	۱۲,۳۱	۶۲,۰۹	۱۵,۵۳	Ck
۱,۵۷	۱۳,۱۵	۲,۲۹	Ok	۶,۱۷	۱۷,۳۶	۵,۷۸	Ok
۴۹,۳۶	۴۶,۲۸	۹۲,۴۲	wl	۶۶,۷۱	۲۰,۵۵	۷۸,۶۸	wl

### ۳-۲- نتایج آزمون سایش نمونه‌های آنودایز شده

در آزمون سایش رفت و برگشتی اثر عمق فرورفتگی سطح نمونه بسیار ناچیز است، بنابراین اثر عرض فرورفتگی سطح نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. این مورد می‌تواند به علت محدود بودن ضخامت لایه اکسیدی باشد یعنی ساچمه دستگاه آزمون سایش رفت و برگشتی با نیروی نسبتاً کمی بر لایه اکسیدی تشکیل شده روی سطح عبور کرده و به ماده پایه می‌رسد و به علت سختی ماده پایه (تنگستن کارباید) امکان نفوذ بیشتر را نخواهد داشت. بر اساس توضیحات ارائه شده، آزمون سایش روی نمونه آببند مکانیکی انجام شده است و نتایج آن در شکل ۳ نشان می‌دهد که عرض فرورفتگی سطح نمونه برای نمونه آنودایز شده بیشتر از نمونه آنودایز نشده است. این نتیجه عملکرد صحیح کاتد تیتانیوم را به‌عنوان یک ایده نوآورانه علاوه بر کاهش سختی سطحی آببند مکانیکی، تأیید می‌کند.



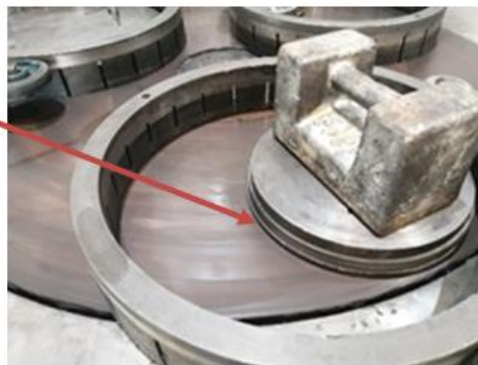
شکل ۳ نتایج آزمون سایش با میکروسکوپ نوری- الف) عرض سایش برابر ۵۳۰ میکرومتر با اعمال نیروی ۵ نیوتون روی نمونه آنودایز شده، ب) عرض سایش برابر ۶۷۵ میکرومتر با اعمال نیروی ۲۰ نیوتون روی نمونه آنودایز شده و ج) نمونه آنودایز نشده که به دلیل سختی آن، هیچ اثری از عرض سایش با اعمال نیروی ۲۰ نیوتون مشاهده نشد

### ۳-۳- نتایج عملیات لپینگ برای آببندهای مکانیکی

در شکل ۴ نمونه‌های آببند مکانیکی تحت عملیات لپینگ نشان داده شده است. جهت رسیدن به نتایج جامع‌تر، نمونه‌ها از رینگ‌های آببند با خرابی متفاوت انتخاب شده‌اند. بر اساس تنوع خرابی‌ها امکان بررسی زمان به‌صورت کمی وجود ندارد، بنابراین زمان به‌صورت یک پارامتر کیفی با محدوده کمینه (بین ۱ تا ۴ ساعت در حالت خشن‌کاری) و محدوده بیشینه (بین ۴ تا ۱۰ ساعت در حالت خشن‌کاری) تعریف شده است. زمان خشن‌کاری معمولاً بیشترین زمان فرایند را به خود اختصاص می‌دهد؛ بنابراین به‌عنوان زمان معیار در تعیین محدود زمانی کمینه و بیشینه در نظر گرفته شده است.

نمونه‌های آببند مکانیکی بر اساس شرایط ارائه شده در جدول ۲ تحت عملیات لپینگ قرار گرفته‌اند. طبق این شرایط حداکثر زبری برابر  $Ra=0.018 \mu m$  و حداکثر تختی برابر ۲ باند نوری (با توجه به نقشه آببند مکانیکی) در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از عملیات لپینگ برای نمونه‌های آنودایز نشده و آنودایز شده به ترتیب در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

آببند مکانیکی در حال  
عملیات لپینگ



شکل ۴ نمونه آببند مکانیکی تحت عملیات لپینگ

جدول ۴ نتایج لپینگ برای نمونه‌های آنودایز نشده (فشار و زمان به‌عنوان متغیرهای فرایند در نظر گرفته شده است)

شماره نمونه	زمان (۴ ساعت کمینه و از ۴ تا ۱۰ ساعت بیشینه)	فشار (پاسکال)	زبری (حداکثر $0.018 \mu\text{m}$ )	تختی (حداکثر ۲ باند نوری)	زمان واقعی به‌دست‌آمده در عملیات لپینگ
					خشن کاری / پرداخت کاری / زمان کل
۱	کمینه	۲۰۳۰۰	+	+	۳.۵ / ۱ / ۲.۵
۲	بیشینه	۲۰۳۰۰	+	+	۴.۵ / ۰.۵ / ۴
۳	بیشینه	۲۰۳۰۰	+	+	۳.۵ / ۰.۵ / ۳
۴	کمینه	۱۳۳۳۴	-	-	۸ / ۱ / ۷
۵	بیشینه	۱۳۳۳۴	-	-	۱۶ / ۱ / ۱۵
۶	کمینه	۱۳۳۳۴	-	-	۱۷ / ۱ / ۱۶
۷	کمینه	۲۰۳۰۰	+	+	۴ / ۱ / ۳
۸	بیشینه	۱۳۳۳۴	+	+	۸ / ۱ / ۷

جدول ۵ نتایج لپینگ نمونه‌های آنودایز شده (فشار و زمان به‌عنوان متغیرهای فرایند در نظر گرفته شده است)

شماره نمونه	زمان (۴ ساعت کمینه و از ۴ تا ۱۰ ساعت بیشینه)	فشار (پاسکال)	زبری (حداکثر $0.018 \mu\text{m}$ )	تختی (حداکثر ۲ باند نوری)	زمان واقعی به‌دست‌آمده در عملیات لپینگ
					خشن کاری / پرداخت کاری / زمان کل
۱	کمینه	۲۰۳۰۰	+	+	۱.۳۳ / ۰.۵ / ۰.۸۳
۲	بیشینه	۲۰۳۰۰	+	+	۲.۵ / ۰.۵ / ۲
۳	بیشینه	۲۰۳۰۰	+	+	۳ / ۰.۶ / ۲.۴۲
۴	کمینه	۱۳۳۳۴	+	+	۱.۳۳ / ۰.۵ / ۰.۸۳
۵	بیشینه	۱۳۳۳۴	+	+	۱.۳۳ / ۰.۵ / ۰.۸۳
۶	کمینه	۱۳۳۳۴	+	+	۳.۲۳ / ۰.۶ / ۲.۷۵
۷	کمینه	۲۰۳۰۰	+	+	۲.۶ / ۰.۶ / ۲
۸	بیشینه	۱۳۳۳۴	+	+	۳.۲۳ / ۰.۶ / ۲.۷۵

با توجه به یکسان نبودن میزان زبری سطح آببندهای مستعمل، ممکن است زمان عملیات لپینگ برای بعضی از نمونه‌ها افزایش یابد. براین اساس همان‌طور که از نتایج جدول ۴ مشاهده شد، در عملیات لپینگ نمونه‌ها ۵ و ۶، زبری و تختی مطلوب در زمان و فشار طراحی آزمایش‌های به دست نیامده است و نیز با توجه به زمان صرف شده (حدود ۱۶ ساعت)، کاملاً مشهود است که حتی با افزایش فشار عملیات لپینگ نیز زبری و تختی مطلوب حاصل نخواهد شد؛ ولی با بررسی نتایج به‌دست آمده در جدول ۵، مشاهده شد که با استفاده از فرایند آنودایز و تشکیل لایه اکسیدی و در نتیجه کاهش سختی سطح نمونه‌ها، حداکثر زمان عملیات لپینگ به کمتر از

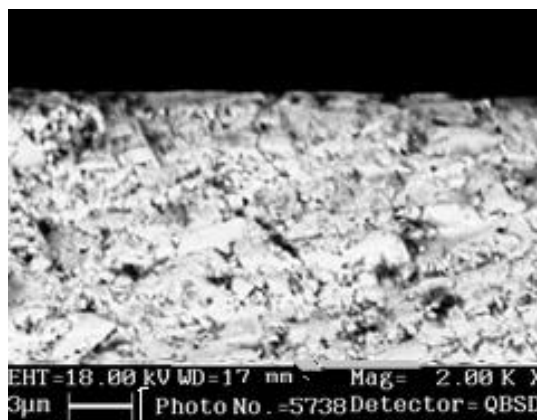
حدود ۴ ساعت کاهش یافته است. همین طور طبق جدول ۴، با افزایش فشار لپینگ مقادیر خروجی بهبود می‌یابند چرا که نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۷ با افزایش فشار لپینگ به تختی و زبری مناسب رسیده‌اند. بنابراین، از مقایسه جداول ۴ و ۵ می‌توان ملاحظه نمود که زمان لپینگ نمونه‌های آنودایز شده حدود ۵۰٪ کمتر از زمان لپینگ برای نمونه‌های آنودایز نشده است. در شکل ۵ مقایسه کامل‌تری بین نمونه‌های آزمایشی با شرایط مختلف و با توجه به محدوده خرابی آببندهای مکانیکی ارائه شده است.



شکل ۵: زمان صرف شده در عملیات لپینگ برای نمونه‌های آنودایز نشده جهت مقایسه با نمونه‌های آنودایز شده

بر اساس شکل ۵ نمونه‌های آنودایز نشده شماره ۱، ۳ و ۷ دارای خرابی سطحی کمتری بوده و تختی و زبری مناسب سطح آببند حاصل شده است. همچنین برای نمونه‌های شماره ۲، ۴ و ۸ در زمان بین ۴ تا ۸ ساعت زبری و تختی مناسب حاصل شده و بنابراین خرابی سطحی این نمونه‌ها در محدوده متوسط قرار گرفته است. همین‌طور، نمونه‌های شماره ۵ و ۶ در محدوده با خرابی زیاد قرار گرفته‌اند و با وجود زمان زیادی که برای عملیات لپینگ صرف شده است، احتمال بسیار کمی وجود دارد که این نمونه‌ها با افزایش فشار لپینگ در محدوده خرابی متوسط قرار گرفته و لپ شوند.

نکته مهم، حذف کامل لایه اکسیدی حاصل از آنودایزکاری، پس از عملیات لپینگ می‌باشد؛ زیرا به دلیل ماهیت عملکردی آببندهای مکانیکی باید سطح آببندی دارای سختی مناسبی بوده و بتواند در تماس اصطکاکی فلز روی فلز و در فشار و سرعت بالا وظیفه آببندی را به درستی انجام دهد. براین اساس، نمونه‌های آنودایز شده پس از عملیات لپینگ با استفاده از SEM مورد بررسی قرار گرفت که یکی از نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده شد که پس از عملیات لپینگ، لایه اکسیدی حاصل از فرایند آنودایز به‌طور کلی برداشته شده و سطح آببندی از جنس فلز پایه (WC+NI) است که جهت عملکرد آببند مکانیکی مطلوب می‌باشد.

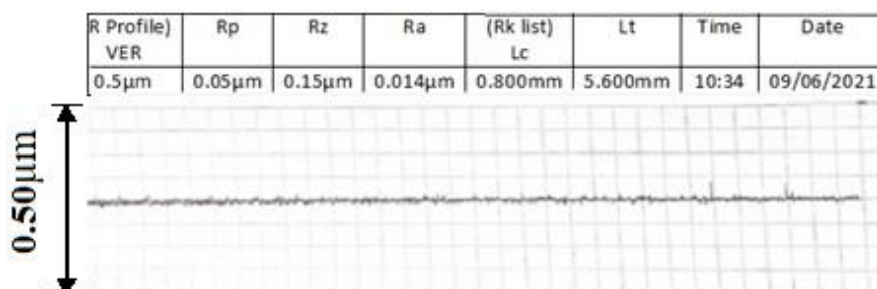


شکل ۶: تصویر SEM سطح نمونه آنودایز شده تحت عملیات لپینگ

### ۳-۴- نتایج مربوط به کیفیت و مشخصات سطح

#### ۳-۴-۱- زبری سطح

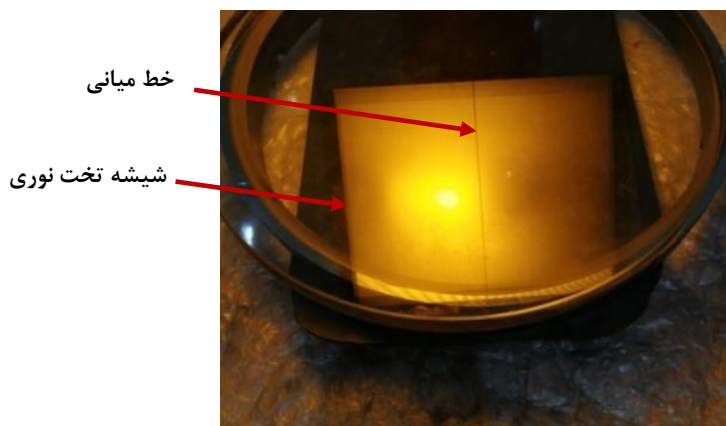
پس از عملیات لپینگ، لازم است جهت بررسی کارایی سطح اصلاح شده، نمونه‌ها از نظر مقدار زبری سطح بررسی شوند. اندازه‌گیری زبری سطح با دستگاه پرتابل Mitotoyo و همچنین دستگاه Perthometer-M2 ساخت شرکت Mahr انجام شد. حداکثر میزان زبری نمونه‌ها پس از زبری سنجی از نقاط مختلف سطح آببندی لپینگ شده، برابر  $Ra=0.016\mu m$  به دست آمده است. میزان زبری حاصل شده برای نمونه‌های آنودایز شده مانند نمونه‌های آنودایز نشده، در وضعیت قابل قبولی می‌باشد؛ چرا که این میزان زبری بر اساس نقشه آببند مکانیکی حداکثر برابر  $Ra=0.40\mu m$  می‌باشد. در شکل ۷ گراف زبری سنجی دوبعدی خروجی از دستگاه Perthometer-M2 نشان داده شده که شامل پارامترهای مختلف بوده و مقدار زبری سطح  $Ra=0.014\mu m$  به دست آمده است.



شکل ۷ نتیجه زبری سنجی سطح رینگ‌های تنگستن کارباید لپ شده

#### ۳-۴-۲- تختی سنجی

جهت تختی سنجی نمونه‌ها از نور تک‌رنگ زرد و شیشه تخت نوری با قطر ۳۰۰ میلی‌متر استفاده شد. با توجه به نوع کارکرد نمونه‌ها به‌عنوان آببند مکانیکی، نیاز است میزان تختی سطح آن‌ها حداکثر ۲ باند نوری باشد؛ چرا که در غیر این صورت سطح آببند تختی مناسب را نداشته و در حین عملکرد دچار نشتی خواهد شد. تختی سطح در واقع از طریق بررسی میزان اختلاف ارتفاع نقاط در زیر شیشه تخت نوری انجام می‌شود. حداکثر میزان اختلاف ارتفاع نقاط بر اساس مدارک فنی کمپرسور واحد احیا مستقیم شرکت فولاد برابر با ۰/۹ میکرومتر می‌باشد که همان عدم تختی مجاز می‌باشد. در شکل ۸ تختی سنجی نمونه آببند مکانیکی با استفاده از شیشه تخت نوری نشان داده شده است.

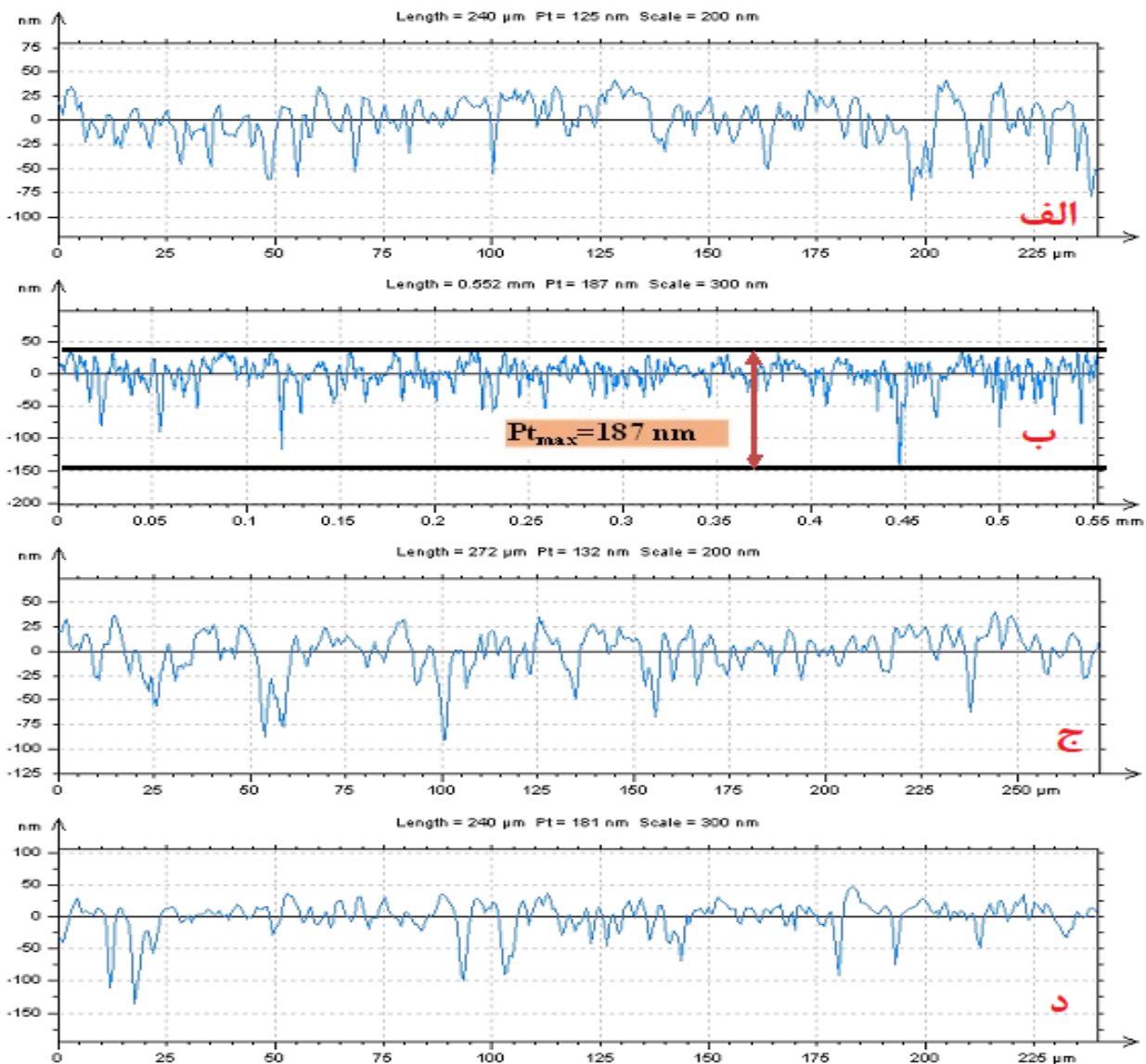


شکل ۸ تختی سنجی با شیشه تخت نوری ۳۰۰ میلی‌متری و نور تک‌رنگ زرد

به‌منظور تختی سنجی قطعات لپ شده طبق دستورالعمل شرکت سازنده تجهیزات لپینگ، خطوطی که توسط خط میانی در شکل ۸ قطع می‌شوند برابر میزان عدم تختی بر اساس باند نوری خواهد بود؛ به‌طوری‌که حداکثر تعداد دو خط تداخلی می‌تواند به خط میانی برخورد کند. در این صورت، عدم تختی نمونه از مقدار قید شده در نقشه آببند مکانیکی تجاوز نکرده و اختلاف ارتفاع نقاط در زیر شیشه تخت نوری کمتر از ۰/۹ میکرومتر خواهند بود.

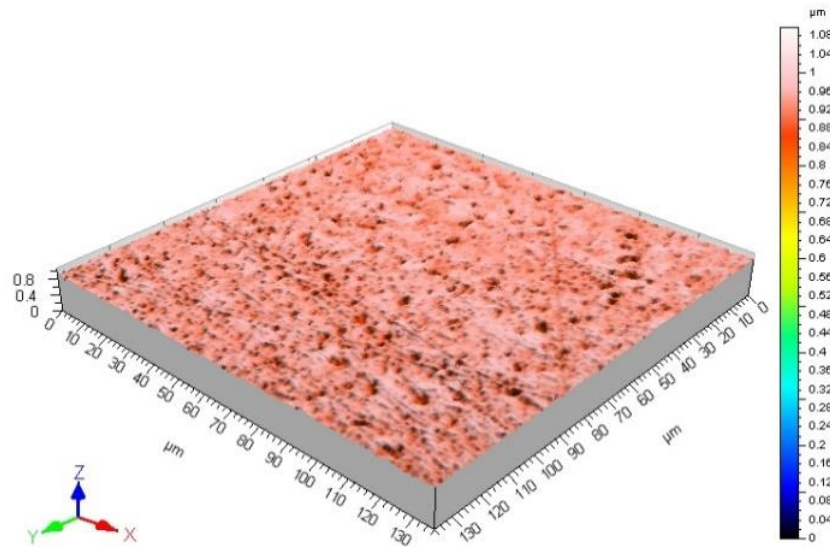
### ۳-۴-۳- توپوگرافی سطح

همان گونه که در شکل ۹ مشاهده شد، نتیجه بررسی توپوگرافی دوبعدی نمونه آببند مکانیکی در چهار جهت طولی، عرضی، شعاعی و مورب نشان می‌دهد که مقدار  $Pt_{max}$  (طبق شکل ۹-ب) برابر ۱۸۷ نانومتر و در جهت شعاعی به دست آمده است. پارامتر  $Pt_{max}$  نمایانگر اختلاف ارتفاع بالاترین نقطه تا پایین‌ترین نقطه در پروفیل سطح می‌باشد. نکته‌ی مهم در نتیجه حاصل از بررسی توپوگرافی دوبعدی این است که حداکثر زبری در جهت شعاعی یعنی جهت چرخش صفحه ساینده ماشین لپینگ به دست آمده و بر این اساس می‌توان گفت که صحت نتایج توپوگرافی دوبعدی مورد تأیید است.



شکل ۹ نتایج بررسی توپوگرافی سطح نمونه آنودایز شده؛ الف) در عرض سطح نمونه ب) به صورت دایره‌ای ج) به صورت مورب و د) در طول سطح نمونه

در شکل ۱۰ توپوگرافی سه‌بعدی سطح یک نمونه آببند مکانیکی که تحت فرایندهای آنودایز و سپس لپینگ قرار گرفته، نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، سطح نهایی آببند پس از عملیات لپینگ نسبتاً یکنواخت و همگن می‌باشد. نقاط تیره‌رنگ بر روی سطح، محل اثر نفوذ ذرات ساینده بزرگ‌تر می‌باشد که تحت فشار عملیات لپینگ، چاله‌های میکرونی را بر روی سطح آببند مکانیکی و در نقاط مختلف آن ایجاد نموده است.



شکل ۱۰ توپوگرافی سه بعدی از سطح نمونه‌ای که آنودایز و سپس لپینگ شده

#### ۴- نتیجه گیری

از بررسی داده‌های خروجی پژوهش حاضر، می‌توان موارد زیر را جمع‌بندی و ارائه نمود:

- انجام عملیات آنودایز بر روی آببندهای مکانیکی مؤثر بوده و باعث کاهش قابل توجه سختی سطح آببند مکانیکی از جنس تنگستن کارباید نیکل‌دار شده است. این نتیجه به صورت مشابه در مراجع [۱۷، ۱۸] و بر روی تنگستن کارباید بدون چسب (حداکثر تا ۰/۵ درصد کبالت) و تنگستن کارباید کبالت‌دار نیز به اثبات رسیده است.
- با ترکیب فرایند الکتروشیمیایی آنودایز و فرایند لپینگ، زمان عملیات لپینگ از حدود ۱۰ تا ۱۶ ساعت به کمتر از ۳/۵ ساعت برای نمونه‌های آببند مکانیکی کاهش یافته و همچنین حداکثر زبری سطح برابر  $Ra=0.016\mu m$  به دست آمده که بر اساس نیاز عملکردی آببند مکانیکی مورد تأیید است.
- نتایج بررسی SEM نشان می‌دهد که پس از عملیات لپینگ، لایه اکسید تنگستن کارباید با ضخامت ۱۰ میکرومتر به طور کامل برداشته شده است و آببند مکانیکی از نظر کارکرد مشکلی نخواهد داشت.
- همچنین، نتایج بررسی توپوگرافی دوبعدی نمونه آببند مکانیکی نشان می‌دهد که مقدار  $Pt_{max}$  برابر ۱۸۷ نانومتر و در جهت شعاعی به دست آمده است. همچنین بررسی توپوگرافی سه بعدی سطح نمونه آببند مکانیکی که تحت فرایندهای آنودایز و سپس لپینگ قرار گرفته است، نشان داد که سطح نهایی آببند پس از عملیات لپینگ نسبتاً یکنواخت و همگن می‌باشد.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله حاضر، لازم می‌دانند از همکاری و مساعدت شرکت‌های پوشش‌نگین سپاهان و سنجش گستر کاوه جهت انجام عملیات آنودایزینگ و آزمون‌های لپینگ تشکر و قدردانی نمایند.

#### References

- [1] Samadi MR, Khoshanjam A, Khoshanjam K. The Effects of Angular Velocity and Combination of AlO<sub>2</sub> and SiC Abrasive Particle by Use of NMAF Method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 Aug 23;8(6):26-33. [In Persian]
- [2] Rasouli S, Vahdati M, Jaber AE. The effect of machining parameters of magnetic abrasive finishing on free surface of aluminum alloy. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022 Feb 19;8(11):63-75. [In Persian]

- [3] Hao MM, Wang YL, Li ZT, Sun XH. Effects of surface topography on hydrodynamic performance of liquid film seals considering cavitation. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2018 Aug 17;70(6):984-92. doi: [10.1108/ILT-12-2016-0321](https://doi.org/10.1108/ILT-12-2016-0321)
- [4] Su WT, Li Y, Wang YH, Zhang YN, Li XB, Ma Y. Influence of structural parameters on wavy-tilt-dam hydrodynamic mechanical seal performance in reactor coolant pump. *Renewable Energy*. 2020 Apr 1;166:210-21. doi: [10.1016/j.renene.2020.11.123](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.123)
- [5] Asheichik AA, Bahrami MR. Prediction of leakage in the fixed mechanical seal. In *MATEC Web of Conferences 2017* (Vol. 129, p. 06002). EDP Sciences. doi: [10.1051/mateconf/201712906002](https://doi.org/10.1051/mateconf/201712906002)
- [6] Dietzel W, Vasko J. The evolution and application of mechanical seal face materials. In *Proceedings of the 31st International Pump Users Symposium 2015*. Turbomachinery Laboratories, Texas A&M Engineering Experiment Station.
- [7] Abhinay A, Herakal SB. Review On Characteristics of Mechanical Seal Face Materials Used In Abrasive and Corrosive Applications. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*. 2023;5(3). doi: [10.35629/5252-0503371373](https://doi.org/10.35629/5252-0503371373)
- [8] Zhang Y, Zhang Y. Characteristics analysis of mechanical seal face based on thermo-hydrodynamic effect. *International Journal of Heat and Technology*. 2018 Sep 1;36(3):1025-30. doi: [10.18280/ijht.360332](https://doi.org/10.18280/ijht.360332)
- [9] Shankar S, Praveenkumar G. Experimental study on frictional characteristics of tungsten carbide versus carbon as mechanical seals under dry and eco-friendly lubrications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2016 Jan 1;54:39-45. doi: [10.1016/j.jrmhm.2015.07.016](https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2015.07.016)
- [10] Jones GA. On the tribological behaviour of mechanical seal face materials in dry line contact: Part I. Mechanical carbon. *Wear*. 2004 Feb 1;256(3-4):415-32. doi: [10.1016/S0043-1648\(03\)00539-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00539-8)
- [11] Sun J, Tu Q, Hu Q, Ma C, Yu Q, Zhou M, inventors; Nanjing Forestry University, assignee. Device for testing mechanical seal performance. United States patent US 9,631,990. 2017 Apr 25.
- [12] Shabani M, Carrapichano JM, Oliveira FJ, Silva RF. Multilayered diamond mechanical seal rings under biodiesel lubrication and the full sealing conditions of pressurized water. *Wear*. 2017 Aug 15;384:178-84. doi: [10.1016/j.wear.2017.01.058](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.058)
- [13] Zhang GY, Dang JQ, Zhao WG, Yan XT. Tribological behaviors of the thick metal coating for the contact mechanical seal under the water-lubricated conditions. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019 Mar 5;71(2):173-80. doi: [10.1108/ILT-01-2018-0047](https://doi.org/10.1108/ILT-01-2018-0047)
- [14] Lin TR, Su CR. Experimental study of lapping and electropolishing of tungsten carbides. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008 Mar;36:715-23. doi: [10.1007/s00170-006-0895-6](https://doi.org/10.1007/s00170-006-0895-6)
- [15] Han W, Fang F. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019 Apr 1;139:1-23. doi: [10.1016/j.ijmachtools.2019.01.001](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.01.001)
- [16] Han L, Zhao H, Zhang Q, Jin M, Zhang L, Zhang P. Research on influences of contact force in chemical mechanical polishing (CMP) process. *Aip Advances*. 2015 Apr 1;5(4). doi: [10.1063/1.4903700](https://doi.org/10.1063/1.4903700)
- [17] Zhou T, Farooq O, Guo W, Liu P, Zhao B, Wang X. Surface roughness effects on electrochemical anodization behavior of binderless tungsten carbide and oxide boundary generation. *Surface and Coatings Technology*. 2023 Nov 25;473:130013. doi: [10.1016/j.surfcoat.2023.130013](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130013)
- [18] Deng H, Zhang X, Liu K, Yamamura K, Sato H. Polishing of tungsten carbide by combination of anodizing and silica slurry polishing. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017 Sep 15;164(12):E352. doi: [10.1149/2.1931712jes](https://doi.org/10.1149/2.1931712jes)