ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2023;23(05):283-292

Study On the Ultra-Precision Dimond Turning to Fabricate Super-Polished Aluminium Mirrors

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Hojjat Jafari H,[1],
Elhami Joosheghan S,[2*]
Farahnakian M[1]

How to cite this article
Hojjat Jafari H, Elhami Joosheghan S, Farahnakian M. Study On the Ultra-Precision Dimond Turning to Fabricate Super-Polished Aluminium Mirrors. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(05):283-292.

ABSTRACT

Metal and especially aluminum mirrors have wide applications in the optical industry due to their desirable properties, hence requiring very high polished surfaces. One of the methods of preparing aluminum mirrors is single-point diamond turning. In this research, the manufacturing process of 6061-grade aluminum mirrors has been studied using diamond turning and consequent polishing process in order to reach surfaces with acceptable optical properties. In the first part, the effective range of turning parameters was determined. The results showed that the feed values less than 5 µm/rev, the cutting edge radius between 0.2 and 0.8 mm, and the rotational speed of 2250 rpm have a greater effect on the surface roughness. In the second part of the research, initially, the turning process was performed with effective parameters and then the polishing process was applied as the final finishing process. Surface finish is evaluated by surface roughness and surface interferometry parameters. The results showed that the smaller surface roughness after the diamond tool turning process led to higher optical properties after the final polishing process. The lowest PV value equal to 0.293 µm was obtained by diamond turning with 3 µm/rev and a cutting edge radius of 0.8 mm.

Keywords Aluminium Mirror, Diamond Turning, Polishing, Surface Roughness, Interferometry.

[1] Islamic Azad University Najafabad Iran
[2] Ferdowsi University of Mashhad Iran

Correspondence
Address: Ferdowsi Univerity, Azadi Square, Mashhad, Razavi, Iran

sadeghelhami@um.ac.ir

Article History
Received: February 09, 2023
Accepted: April 17, 2023
ePublished: May 20, 2023

CITATION LINKS

1- Ultraprecision diamond turning of aluminium single crystals. 2- Characterisation of nanosurface generation in single-point diamond turning.3- Micro-machining of optical glasses. 4- Roughness characteristic length scales of micro-machined surfaces. 5- Multi-scale modelling of surface topography in single-point diamond turning. 6- Surface finishes from turning and facing with round nosed tools. 7- Diamond turning and polishing tests on new RSP aluminium alloys. 8- Surface roughness modeling in precision turning of... 9- Customized design and efficient fabrication of two freeform aluminum mirrors by... 10- Optical design and fabrication of an all-aluminum unobscured... 11- Review of single-point diamond turning process in terms of... 12- Spiral tool path generation method in a NURBS parameter space for. 13- Measurement and compensation of tool contour error using... 14- An experimental study on single-point diamond turning of... 15- A review of tool wear mechanism and suppression method in diamond turning of ferrous materials. 16- Basic wavefront aberration theory for optical metrology. 17- Matrix in optics.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعه پارامترهای فرآیند تراشکاری به کمک ابزار الماس در راستای ساخت آیینه‌های آلومینیومی

حجت جعفری[۱]، صادق الهامی جوشقان[۲*]، مسعود فرحناکیان[۱]
[۱] دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد
[۲] دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

چکیده
آیینه‌های فلزی و به‌ویژه آلومینیومی، به دلیل خواص مطلوب از جایگاه ویژه‌ای در صنایع اپتیک برخوردار می‌باشند که این موضوع مستلزم برخورداری از سطوحی با پرداخت بسیار بالا است. یکی از روش‌های آماده‌سازی آیینه‌های آلومینیومی، تراشکاری با ابزار الماس می‌باشد. در تحقیق حاضر، فرآیند ساخت آیینه‌های آلومینیومی گرید ۶۰۶۱ با استفاده از ابزار الماس و فرآیند تکمیلی پولیش به‌منظور رسیدن به سطوحی با خواص اپتیکی مطلوب و بازه زمانی ساخت کوتاه‌تر مورد مطالعه قرار گرفته است. در قسمت اول، بازه مؤثر پارامترهای ماشین‌کاری مشخص شد. نتایج نشان داد که بازه پیشروی کمتر از ۵ میکرومتر بر دور، شعاع لبه برش بین ۰/۲ تا ۰/۸ میلی‌متر و سرعت دورانی ۲۲۵۰ دور بر دقیقه، تأثیر بیشتری بر پرداخت سطح دارند. در قسمت دوم آزمایش‌ها، ابتدا فرآیند تراشکاری با پارامترهای مؤثر، انجام گردیده و در ادامه فرآیند پولیشینگ به عنوان پرداخت نهایی اعمال شد. پرداخت سطح با دو پارامتر زبری سطح و معیار تداخل‌سنجی سطح ارزیابی می‌گردد. نتایج میانگین زبری سطح نشان داده شد که بهترین شرایط تراشکاری برای رسیدن به حداقل زبری سطح، پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دقیقه و شعاع لبه ۰/۸ میلی‌متر می‌باشد.
کلیدواژه‌ها: آینه آلومینیومی، تراش‌کاری با ابزار الماس، پولیش، زبری سطح، تداخل‌سنجی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸
*نویسنده مسئول: sadeghelhami@um.ac.ir

۱- مقدمه
آیینه‌ها از جمله قطعاتی هستند که ویژگی اصلی آنها دارا بودن سطحی با پرداخت بسیار بالا است. سطوح با پرداخت بالا می‌توانند از طریق لایه‌نشانی بر روی فلز پایه و یا پرداخت‌کاری مستقیم فلز بدون اعمال لایه سطحی ثانویه (آیینه‌های فلزی) حاصل شوند. نوع اول آیینه‌ها از طریق لایه نشانی فلز نقره یا نیکل حاصل می‌شود. نوع دوم از طریق اعمال مجموعه عملیات ماشین‌کاری (مانند تراشکاری با ابزار الماس) و پرداخت (مانند لپینگ) ساخته می‌شوند. آیینه‌های فلزی کاربرد روزافزونی در صنایع مختلف ازجمله هوافضا، پزشکی، اپتیک و عکس‌برداری پیدا کرده‌اند و در همین راستا، با توجه به پیچیده بودن فرآیند ساخت، تحقیقات و پژوهش‌هایی در راستای توسعه و بهینه‌سازی مجموعه فرآیند ساخت آنها صورت گرفته است.

از جمله آیینه‌های فلزی، آیینه‌های آلومینیومی است که وزن کمی داشته و در مقایسه با آینه پوشش داده شده با نیکل، از خواص حرارتی بهتری برخوردار می‌باشد. در ساخت آیینه‌های آلومینیومی، لپینگ و پولیشینگ به عنوان فرآیند پرداخت‌کاری نهایی برای ایجاد کیفیت مورد نیاز استفاده می‌گردند. این روش‌ها علی‌رغم داشتن هزینه بالا از مدت زمان ماشین‌کاری بالایی نیز برخوردار هستند. لذا به کارگیری فرآیندی که سطحی با پرداخت نزدیک به سطح حاصل از دو فرآیند مذکور را نتیجه داده و همچنین سرعت بالایی داشته باشد، زمان مورد نیاز برای فرآیند زمان‌بر نهایی را کاهش داده و رویه ساخت بهینه‌تری حاصل خواهد شد. یکی از متداول‌ترین روش‌های تولید برای نزدیک کردن سطح آلومینیوم به سطح آیینه‌ای، تراشکاری با ابزار الماس می‌باشد. در این روش الماس به دلیل داشتن مدول الاستیسیته بالا و مقاومت شیمیایی و سختی بالا جهت رسیدن به سطح با صافی بالا و دقیق مناسب است.

در تحقیق حاضر، برای تراشکاری آلومینیوم از روش تراشکاری با ابزار الماس استفاده شده تا بتوان با یک مرحله ماشین‌کاری سطح قطعه را به صافی سطحی رساند که آماده برای عملیات پرداخت نهایی شود. در ادامه فرآیند پولیشینگ در زمان کوتاهی بر سطح اعمال شده و آیینه آلومینیومی ساخته خواهد شد. در این صورت ماشین‌کاری اولیه و سنگ‌زنی سطح به صورت همزمان (که در روش‌های گذشته استفاده می‌شده است) توسط یک فرآیند تراشکاری با ابزار الماس جایگزین می‌شود که با توجه به زمان‌بر بودن فرآیند سنگ‌زنی، زمان کلی ماشین‌کاری را کاهش خواهد داد. در این صورت هرچه پرداخت سطح تراشکاری بالاتر باشد، فرآیند پولیشینگ در زمان کوتاه‌تر بر سطح اعمال شده و نتیجه مطلوب‌تر و اقتصادی‌تری حاصل می‌شود.

۱-۱- مروری بر پیشینه پژوهش
بی‌لی و چان [1] در سال ۱۹۹۷ به تراشکاری با ابزار الماس آلومینیوم تک کریستال با محور کریستالوگرافی ۱۰۰ و ۱۱۰ و ۱۱۱ پرداخته اند. در این مقاله تأثیر نوع کریستالوگرافی در ماشین‌کاری آلومینیوم مورد توجه قرار گرفت. یافته‌ها در بهبود زبری آلومینیوم حاصل از تراشکاری با ابزار الماس بحث شده است. در تراشکاری با ابزار الماس آلومینیوم بهترین سطح با کریستالوگرافی ۱۰۰ می‌باشد. سطح حاصل از تراشکاری با ابزار آلومینیوم با محور کریستالوگرافی ۱۱۰ نیز بالاترین عدد زبری سطح را دارد. نتایج تحقیق بدست آمده در طراحی محصول، نرخ انتقال حرارت و فرایند ماشین‌کاری استفاده می‌شود. پارامترهای استفاده شده در این آزمایش‌ها از دستگاه تراش با دور متغیر از ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. عمق برش مورد استفاده در این تست‌ها از ۰ تا ۱۲ میکرون می‌باشد. در این تحقیق نسبت عمق برشی به نیروی برشی در عدد پیشروی‌های گوناگون نشان داده شده است. به این صورت که با زیاد شدن عدد پیشروی و عمق برشی متعاقباً نیروی برشی در ماشین‌کاری زیاد می‌شود. در بررسی دیگر، تأثیر عمق برشی بر نیروی برشی با در نظر گرفتن انواع کریستالوگرافی آلومینیوم مطالعه شده است.

چنگ و همکاران [2] در سال ۲۰۰۰ به تجزیه و تحلیل سطح ماشین‌کاری شده به وسیله تراشکاری با ابزار الماس و با استفاده از دستگاه طیف‌سنج پرداختند. آزمایش‌های تجربی بر روی آلیاژ آلومینیوم با گرید ۶۰۶۱ در حالت پیشانی تراشی انجام شده است. نتایج نشان داد که در مرحله اول، با افزایش پیشروی ابزار، زبری سطح از یک الگوی ریاضی ثابت پیروی کرده و افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش سرعت دورانی تا حدود ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، زبری سطح کاهش یافته است. همچنین، تغییرات عمق در بازه ۵ تا ۲۰ میکرون تغییری در نتایج زبری سطح ایجاد نکرد. محدوده انتخابی شعاع ابزار (۰/۵ تا ۲ میلی‌متر) به گونه‌ای در نظر گرفته شد که از چتر جلوگیری شود و لذا با افزایش عمق برش، در محدوده مذکور، زبری سطح کاهش یافت.

فنگ و همکاران [3] در سال۲۰۰۳ مسئله تغییر حالت جنس را ازحالت ترد و شکننده به حالت مقاوم بوسیله تراشکاری با ابزار الماس را مورد توجه قرار دادند. در این مطالعه، با روش‌های تجربی تغییر حالت مذکور مورد بررسی قرار گرفته و راجع به مکانیزم تولید سطح دقیق بحث شده است. نتایج نشان می‌دهد که پوشش ابزار یک مسئله مهم در تراشکاری با ابزار الماس می‌باشد. در این مقاله انواع فرایندهای ساخت سطوح دقیق بررسی شده است که بالاترین نرخ ماشین‌کاری همزمان با حصول صافی سطح بالا مربوط به فرایند تراشکاری با ابزار الماس تک‌لبه می‌باشد. تراشکاری با ابزار الماس در مقایسه با سایر روش‌ها مانند سنگ‌زنی و پولیش دارای مزایایی می‌باشد. دقت ماشین‌کاری با ابزار الماس در مقایسه با سنگ‌زنی حدود ۵ برابر می‌باشد. دو فرایند ماشین‌کاری مذکور بوسیله پارامترهای دقت، هزینه و زمان مقایسه شده‌اند. فرایند تراشکاری با ابزار الماس فرایندی است که در عین دارا بودن نرخ بالای براده برداری از کیفیت و دقت سطح خوبی نیز برخوردار است.

مکنس و همکاران [4] در سال ۲۰۰۶ به خصوصیات زبری سطح حاصل از تراشکاری با ابزار الماس در ابعاد میکرون پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که دامنه زبری سطح تابعی از طول اسکن و دامنه آن می‌باشد. لذا در ساختارهای میکرو یا ریزسازه ها یکی از مشخصات مهم دارا بودن سطح با کیفیت و دقت بالا است. بنابراین رابطه و وابستگی میان تجهیزات مکانیکی در مقیاس میکرو و زبری سطح وجود دارد. این موضوع نیز در گرو ارزیابی روش‌های ساخت ساختارها است. این تحقیق استوار بر روی روش آنالیز مقیاسی می‌باشد. به این ترتیب نمونه‌ها پس از آماده‌سازی در بازه‌های میکرونی مورد آزمایش قرار می‌گیرند. از موارد دیگری که در این عدد زبری سطح مؤثر است می‌توان به شعاع نوک دستگاه اندازه‌گیری، لرزش دستگاه و نوع مواد قطعه کار اشاره کرد.

لی و همکاران [5] در سال ۲۰۰۷ ماشین‌کاری با ابزار الماس تک‌لبه برروی سطح آلومینیوم با کریستالوگرافی‌های مختلف را بررسی کردند. در این مطالعه مدل خاصی توسعه داده شد که شامل متغیرهای لرزش دستگاه، نیروی برشی، جهت دانه‌بندی بوده است. نتایج تجربی نشان داد که نوع کریستالوگرافی و جهت دانه‌بندی بر نیروهای برشی و زبری سطح تأثیرگذار بوده و مدل توسعه داده شده می‌تواند این ارتباط را تحلیل نماید. پس از بررسی سطوح آلومینیوم در کریستالوگرافی‌های مختلف (۱۱۰-۱۱۱-۱۰۰) مشخص شد که بهترین سطح مربوط به نوع ۱۰۰ بوده است.

چایلدز و همکاران [6] در سال ۲۰۰۸ تأثیرات پارامترهای ماشین‌کاری بر روی سطح قطعه آلومینیومی را مورد بررسی قرار دادند. کلیه آزمایش‌ها بر روی فلز آلومینیوم انجام شد و ابزارهای مختلفی از جنس تنگستن کاربید و الماس استفاده گردید. نتایج نشان داد که با ثابت بودن پارامترهای ماشین‌کاری، با افزایش شعاع ابزار، کیفیت سطح رو به بهبود رفته است. همچنین، در بازه پیشروی در نظر گرفته شده، به علت لرزش‌های دستگاه، ارتباط دقیقی بین پیشروی و پرداخت سطح حاصل نشد.

هورست و همکارانش [7] در سال ۲۰۱۲ بوسیله فرایند تراشکاری با ابزار الماس و پولیش تعدادی از آلیاژهای آلومینیوم، خواص آن‌ها را در استفاده آیینه آلومینیومی بررسی کردند. یکی از آلیاژ های مناسب برای ساخت آیینه‌های نجومی، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ است که در بازه گسترده دمایی محیط، عملکرد قابل قبولی را ارائه می‌دهد و برای ساخت آیینه‌ها با کاربرد نجومی مناسب است. فرایند انجماد سریع آلومینیوم نیز مد نظر قرار گرفته است. آلومینیوم تولید شده با این روش در مقایسه با آلومینیوم معمولی دارای استحکام بیشتری می‌باشد. در این مقاله نتایج حاصل فرآیند ساخت آلیاژ مورد نظر و پارامترهای مربوط به تراشکاری با ابزار الماس مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال، در این مطالعه به مقایسه سه نوع آلیاژ آلومینیوم پرداخته شده است که فرآیند تراشکاری با ابزار الماس بر آن اعمال شده و کیفیت سطح و زمان انجام کار تحلیل گردیده است. نتایج نشان داد که آلومینیوم انجماد سریع به دلیل دارا بودن کریستالوگرافی منظم‌تر و ریزتر دارای خواص بهتری نسبت به سایر آلیاژهای آلومینیوم و آلومینیوم‌های پوشش‌دار می‌باشد. آلومینیوم سریع انجماد پس از ماشین‌کاری با ابزار الماس زبری سطح کیفیت سطح بالایی را در دسترس قرار داد. این کیفیت سطح باعث شده که مراحل انجام کار کمتر شده و هزینه‌ها کمتر گردد. همچنین با این روش می‌توان به ساخت ابزار و تجهیزات اپتیکی ناهمگون منحنی وار اقدام کرد.

شاه و گئورگ [8] در سال ۲۰۱۲ به توسعه یک مدل آماری برای پیش‌بینی زبری سطح آلومینیوم تراشکاری شده با ابزار الماس پرداختند. مدل مذکور بر مبنای پارامترهای سرعت دورانی، عمق برشی و نرخ پیشروی توسعه داده شد و قابلیت مطلوبی برای پیش‌بینی زبری سطح از خود نشان داد.

شن و همکاران[9] در سال ۲۰۱۹ و ژی و همکاران[10] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه ساخت آیینه‌های آلومینیومی با سطح آزاد با استفاده از روش تراشکاری به کمک ابزار الماس پرداختند. آیینه‌های مذکور در ساخت تلسکوپ مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج حاصل نشان

داد که روش تراشکاری به کمک ابزار الماس دقت سطحی و ابعادی قابل توجهی را ایجاد کرده است و همزمان از لحاظ اقتصادی نیز روشی به صرفه است.

هاتفی و ابوالحسین در سال ۲۰۲۰[11] به بررسی روش تراشکاری به کمک ابزار الماس به‌منظور ایجاد سطوحی با پرداخت بسیار بالا به‌منظور استفاده در صنایع اپتیک پرداختند. آنها نحوه تاثیرگذاری پارامترهای مهم همچون جنس قطعه‌کار، پارامترهای برش، ویژگی‌های ماشین ابزار و هندسه ابزار الماس را مورد بررسی قرار دادند.

هه و همکاران[12] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه تأثیر مسیر حرکت ابزار بر پرداخت سطح حاصل از تراشکاری به کمک ابزار الماس پرداختند. آنها مسیر حرکت ابزار را با استفاده از منحنی **NURBS** به گونه‌ای تغییر دادند که سطح آزاد (**Free Form**) حاصل، پروفیل یکنواخت‌تری پیدا کند. نتایج تجربی صحت عملکرد مسیر **NURBS** توسعه داده شده را تایید کرد.

ناگایاما و یان[13] در سال ۲۰۲۰ با استفاده از دستگاه اینترفرومتری به بررسی کانتورهای ایجاد شده بر روی سطح اپینه‌ای حاصل از تراشکاری به کمک ابزار الماس پرداختند. کانتورهای بررسی شده نشانگر میزان خطای ایجاد شده در پروفیل سطح بودند. با استفاده از پارامترهای بهینه بدست آمده، میزان زبری سطح و پارامتر **Rz** تا حدود ۰/۱۵ میکرون کاهش داده شد که مقداری مناسب برای ساخت آیینه‌های فلزی است.

وانگ و همکاران[14] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه استفاده از روش تراشکاری به کمک ابزار الماس بر روی نوعی از کامپوزیت سیلیکون کارباید با رفتار ترد پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از روانکار موجب بهبود زبری سطح حاصل نشده است، لذا ماشین‌کاری خشک مطلوب‌تر است. با افزایش سرعت دورانی و پیشروی، زبری سطح کاهش پیدا کرده است و به حداقل مقدار ۰/۰۵ میکرون رسیده است. عکس‌های **SEM** نشان دادند که با توجه به ساختار کامپوزیتی ماده مورد استفاده، ابزار الماس موجب برش ذرات سیلیکون کارباید شده است اما همزمان عیوبی در سطح قطعه کار ایجاد شده است.

وانگ و همکاران[15] در سال ۲۰۲۱ به مطالعه مکانیزم‌های مختلف سایش ابزار در تراشکاری به کمک ابزار الماس پرداختند. سه نوع مکانیزم فرسایش ابزار مورد بررسی قرار گرفته است. این مکانیزم‌ها شامل سایش مکانیکی، ترکیب کربن موجود در قطعه‌کار با الماس و ایجاد گرافیت نرم و تغییر درصد کربن به واسطه نفوذ سایر عناصر بودند. به طور کلی پارامترهای مؤثر شامل هندسه ابزار از جمله زوایای آزاد و براده همچنین پارامترهای ماشین‌کاری مورد بررسی قرار گرفتند.

با توجه به تحقیقات پیشین، تراشکاری با ابزار الماس می‌تواند صافی سطح بالایی را در دسترس قرار دهد اما همچنان با صافی سطح حاصل از پولیشینگ فاصله خواهد داشت. از طرف دیگر، فرآیند پولیشینگ فرآیندی زمان‌بر و پرهزینه است. لذا، می‌توان با تراشکاری به کمک ابزار الماس، پرداخت سطح را تا حد بالایی و با سرعت قابل توجه انجام داد و صرفا برای پرداخت نهایی که باربرداری و زمان کوتاهی نیاز دارد، از فرآیند پولیشینگ استفاده کرد. با ترکیب دو فرآیند، پرداخت بسیار بالا با رعایت جنبه‌های اقتصادی ساخت حاصل خواهد شد.

۱-۲- اندازه‌گیری توپوگرافی سطح

در دنیا روش‌های متعددی برای سنجش کیفیت سطح استفاده می‌گردد. هریک از این روش‌ها متناسب با نوع کیفیت کاربری سطح و تأثیر خطاهای سطح بر کاربرد تعریف شده‌اند و استفاده می‌شوند. بطور کلی برای سنجیدن کیفیت سطح دیدگاه‌های متفاوتی وجود دارد. یکی از معروف ترین این دیدگاه‌ها بیان خطای سطح بر مبنای معدل خطای نقاط مختلف است. دیدگاه دوم به بیان خطا بر مبنای خطاهای بیشینه در سطح می‌پردازد. هر یک از این دیدگاه ها روش‌های اندازه‌گیری متعددی دارند. در زمینه ساخت و تولید، هر فرآیند ماشین‌کاری که به‌منظور پرداخت‌کاری استفاده می‌شود، اثرات ویژه‌ای بر جا می‌گذارد که به مباحث توپوگرافی سطح یا بافت سطح مربوط می‌شود و می‌تواند بر روی ظاهر و عملکرد اجزاء در بسیاری از موارد اثر بگذارد. هیچ سطح مهندسی به صورت ایده‌آل مسطح و هموار نیست، حتی هنگامی که به طور عالی پولیش شوند. چنین سطوحی هنگامی که در بزرگ‌نمائی بسیار بالا مشاهده شوند، به صورت سطوح ناهموار پدیدار می‌شوند.

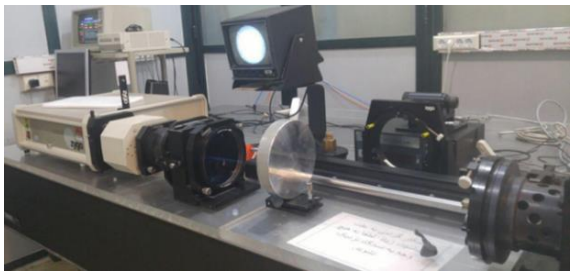
در این تحقیق، پرداخت سطح نهایی بر مبنای روش تداخل‌سنجی اندازه‌گیری شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. معیار PV بیان کننده اختلاف ارتفاع بلندترین و پایین ترین نقطه پروفیل سطح می‌باشد. از همین رو، این معیار به صورت مستقل از موقعیت صفحه مبنا بیان می‌شود [16]. مزیت معیار PV این است که اگر قسمت کوچکی از پروفیل سطح دارای انحراف زیادی باشد، این معیار می‌تواند این انحراف را نشان دهد [17]. اندازه‌گیری معیارهای مذکور با استفاده از دستگاه تداخل‌سنج یا اینترفرومتری انجام می‌شود. در صورتی که سطح مورد اندازه‌گیری نسبت به سطح ایده‌آل انحراف برجستگی (محدب) و یا فرورفتگی (مقعر) داشته باشد، شکل باریکه‌های ایجاد شده دایروی خواهد بود. اگر این انحراف فرورفتگی یا برآمدگی متقارن باشد باریکه‌های ایجاد شده به صورت دوایر متحدالمرکز می‌باشند. خطوط سیاه و سفیدی که همان باریکه‌های نور هستند در بهترین حالت باید موازی هم و در پهن‌ترین ابعاد باشند.

۲- تجهیزات

با توجه به خواص مطلوب آلومینیوم نوع ۶۰۶۱، از این آلیاژ برای ساخت آیینه‌های آلومینیومی استفاده می‌شود. ماشین تراش سی ان سی و ماشین پولیش به ترتیب از انواع Machine Station TC-

50 و Optotech hpp100cnc مورد استفاده قرار گرفتند. ابزار الماس PCD و از نوع CCGW09T3 برای فرآیند تراشکاری مورد استفاده قرار گرفت. ابزار پولیشینگ از نوع نئوتکس (شکل ۱-الف) به کار گرفته شد که بر روی قطعه‌کار در حالی که در فیکسچر خاص (شکل ۱-ب) قرار داشت، اعمال می‌گردید. در فرایند پولیش آلومینیوم از مواد ساینده شیمیایی از نوع کلوئید آلومینا استفاده شد. خواص سطح با استفاده از زبری سنج Hommel Wave T8000 و تداخل‌سنج زایگو (شکل ۱-ج) اندازه‌گیری شد.

(الف) (ب)



(ج)

شکل ۱) الف) ابزار نئوتکس ب) نحوه قرارگیری نمونه در فیکسچر مخصوص ج) دستگاه اینترفرومتری زایگو

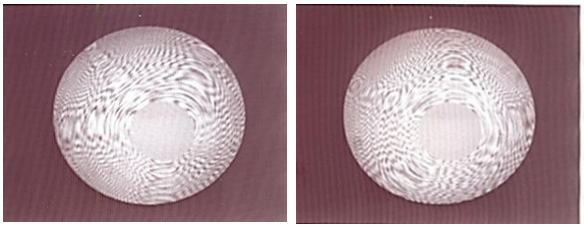
۳- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- رویه تجربی انجام آزمایش‌ها

مجموعه آزمایش‌ها شامل دو قسمت اصلی است. در قسمت اول محدوده مؤثر پارامترهای تراشکاری با ابزار الماس تعیین می‌شود. در قسمت دوم که بخش اصلی تحقیق حاضر است، فرآیند تراشکاری با ابزار الماس با به کارگیری پارامترهای مؤثر، بر قطعه آلومینیومی اعمال شده و در ادامه تحت فرآیند پولیش قرار می‌گیرد تا پروسه ساخت آیینه آلومینیومی تکمیل شود.

۳-۲- قسمت اول: تعیین محدوده مؤثر پارامترها

در قسمت اول آزمایش‌ها، سه پارامتر اصلی سرعت دورانی، پیشروی و شعاع نوک ابزار در نظر گرفته شدند. هدف این مرحله تعیین بازه مؤثر پارامترها است. پس از عملیات تراشکاری با ابزار الماس، خواص سطوح حاصل توسط دستگاه زبری سنج و دستگاه تداخل سنج اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که پیشروی‌های کمتر از ۵ میکرومتر بر دور تأثیر قابل توجه‌تری بر پرداخت سطح نهایی دارند. همچنین، با توجه به صلبیت دستگاه و لرزش‌های حاصل از شرایط ماشین‌کاری، سرعت دورانی ۲۲۵۰ دور بر دقیقه شرایط پایدار و داده‌های قابل قبولی را نتیجه داد. ابزار با شعاع لبه در محدوده ۰/۲ تا ۰/۸ میلی‌متر بر پرداخت سطح نهایی مؤثر بوده، لذا برای قسمت اصلی ازمایش‌ها (قسمت دوم) سه سطح ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌متر انتخاب شدند. نمونه‌ای از نتایج تداخل‌سنجی سطوح حاصل از این قسمت در شکل ۲ نشان داده شده است.



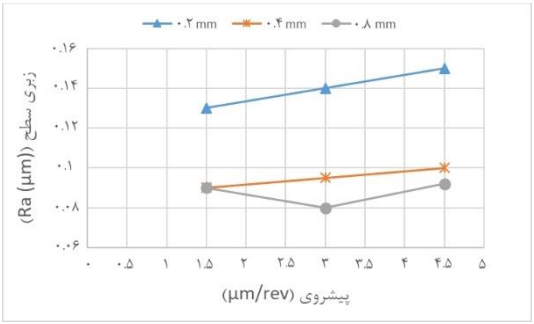
(الف) (ب)

شکل ۲) نتایج اینترفرومتری برای آزمایش‌های تعیین محدوده مؤثر پارامترهای تراشکاری با ابزار الماس در شرایط الف) پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۴ میلی‌متر ب) پیشروی ۳ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۴ میلی‌متر

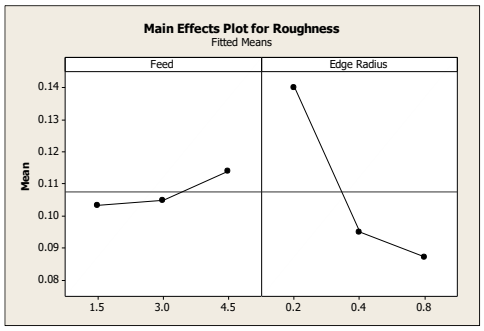
۳-۳- قسمت دوم: ساخت آیینه آلومینیومی با اعمال پارامترهای مؤثر (تراشکاری با ابزار الماس و پولیش)

در این بخش، بازه پارامترهای تعیین شده از قسمت اول برای مرحله تراشکاری با ابزار الماس به کار گرفته شده و قطعات حاصل از تراشکاری وارد مرحله پولیشینگ می‌شوند. لازم به ذکر است که در تراشکاری، پیشروی دارای سه سطح ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میکرومتر بر دور در نظر گرفته شده و قطر قطعه‌کار برابر ۶۵ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۳ اثرات دو پارامتر اصلی شعاع لبه ابزار و پیشروی را بر روی مقادیر زبری سطح Ra نشان می‌دهد.

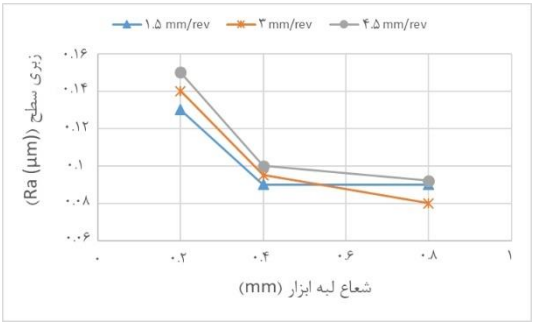
شکل ۳-الف اثر تغییرات زبری سطح برحسب شعاع لبه ابزار را در فرایند تراشکاری با ابزار الماس نشان می‌دهد. به طور کلی، در فرایند تراشکاری با ابزار الماس، با افزایش شعاع لبه ابزار الماس، کیفیت سطح بهبود می‌یابد. اما اگر شعاع لبه برش مقادیر بزرگ انتخاب شود، سطح تماس و اصطکاک در محل درگیری افزایش قابل توجهی یافته و می‌تواند منجر به لرزش و ارتعاش دستگاه گردد که مستقیما پرداخت سطح را کاهش خواهد داد. در این شرایط، اگر ماشینی با مشخصات متفاوت و با صلبیت بالاتر انتخاب شود، می‌توان بدون ایجاد ارتعاشات ناخواسته، مقادیر بزرگتر شعاع لبه برش را به کار گرفت و سطح ماشین‌کاری شده با پرداخت بالاتر ایجاد نمود. با توجه به آزمایش‌های اولیه و به‌منظور پرهیز از ارتعاشات نامطلوب، مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌متر برای شعاع لبه در نظر گرفته شدند. نتایج زبری سنجی نشان می‌دهد که شعاع لبه ۰/۸ میلی‌متر بهترین کیفیت سطح را ایجاد کرده است. با توجه به عدم وجود ارتعاشات این نتیجه از مدل مرسوم بین شعاع لبه و ارتفاع پستی و بلندی سطح پیروی می‌کند.



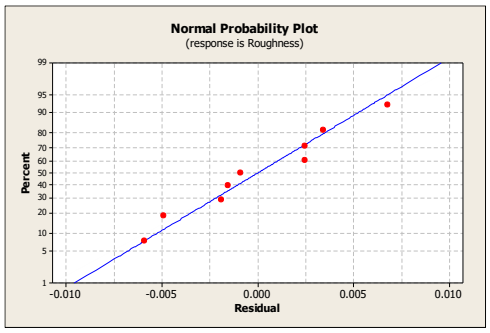
(الف)



(ج)



(ب)



(د)

شکل ۳) نمودار اثر تغییرات الف) پیشروی و ب) شعاع لبه ابزار بر زبری سطح قطعات آلومینیومی ج) مقادیر میانگین زبری سطح در سطوح مختلف پارامترهای پیشروی و شعاع لبه ابزار د) نمودار توزیع احتمالی داده‌ها

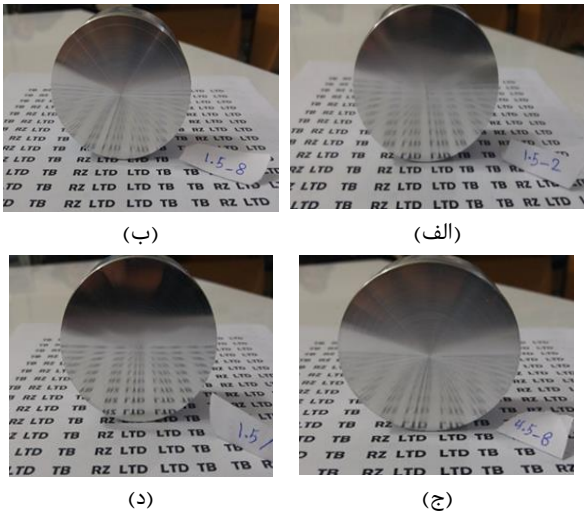
نتایج تأثیر پیشروی بر زبری سطح (شکل ۳-ب) مشابه فرآیند ماشین‌کاری سنتی بوده و با افزایش پیشروی فاصله پستی و بلندی ایجاد شده بر روی سطح افزایش یافته و اعداد حاصل از زبری سنجی افزایش می‌یابد. با بررسی نمودار تنها در نقطه با پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۸ میلی‌متر رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود. در این حالت با افزایش پیشروی به ۳ میکرومتر بر دور، زبری سطح کاهش یافته است. در این شرایط، با توجه به اینکه شعاع لبه بزرگ بوده و مقدار پیشروی کوچک است، ماده قطعه‌کار قبل از جدا شدن به صورت براده به سطح ابزار با تنش زیادی فشرده می‌شود. در این حالت ماده قطعه‌کار ممکن است به ابزار چسبیده و سختی بالایی پیدا کند. در ادامه فرآیند، این ماده چسبیده شده در صورت جدا شدن از سطح ابزار می‌تواند بر روی سطح ماشین‌کاری شده خطوطی را ایجاد کرده و زبری سطح را کاهش دهد. شکل ۳-ج مقادیر میانگین زبری سطح برای پارامترها و سطوح مشخص شده را نشان می‌دهد تا با مقایسه زبری برای هر سطح بتوان به صورت مشخص‌تری رویه اثرگذاری پارامترها را مشاهده کرد. با توجه به نتایج، پایین‌ترین زبری سطح در پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه برش ۰/۸ میلی‌متر حاصل شد. شکل ۳-د توزیع نرمال احتمالی داده‌ها را نشان می‌دهد. هر چه داده‌ها به خط مایل آبی رنگ نزدیک‌تر باشند نشان‌دهنده این است که به لحاظ احتمالی داده‌ها از توزیع نرمال پیروی کرده و قابل قبول هستند. جدول ۱ داده‌های تحلیل واریانس را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با توجه به مقدار P-Value برای شعاع لبه که کوچکتر از ۰/۰۵ است مشخص می‌شود که شعاع لبه پارامتر موثرتری در مقایسه با پیشروی است.

جدول ۱) نتایج آنالیز واریانس مقادیر زبری سطح (Ra) پس از فرآیند تراشکاری با ابزار الماس

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Feed	2	0.00019	0.00019	0.000098	2.92	0.165
Edge Radius	2	0.00485	0.00485	0.002428	71.9	0.001
Error	4	0.00013	0.00013	0.000033		
Total	8	0.00519				

شکل ۴ نمونه‌های قطعات آلومینیومی پس از فرآیند تراشکاری با ابزار الماس را نشان می‌دهند که به‌منظور تکمیل داده‌های مربوط به زبری سطح ارائه شده است. به‌منظور نمایش بهتر کیفیت سطوح، صفحه مبنا با کاراکترهای مشخص در زیر هر نمونه قرار داده شده است تا عملکرد ایینه‌ای سطوح در بازتایش از صفحه زیرین مشخص شود. همانطور که مشاهده می‌شود، سطح دارای پرداخت بالایی است اما کاملا شرایط مطلوب آیینه‌ای شدن را دارا نیست. سطوح حاصل از این مرحله وارد فرآیند پولیشینگ شده تا سطح آیینه‌ای مطلوب حاصل گردد.

در مرحله دوم آزمایش‌های اصلی، فرآیند پولیشینگ با پارامترهای ثابت بر سطح اعمال می‌شود. با توجه به تمرکز تحقیق حاضر بر ویژگی‌های فرآیند تراشکاری با ابزار الماس، در مرحله دوم، پارامترهای پولیشینگ ثابت در نظر گرفته شده است تا بتوان تأثیر متغیرهای مرحله اول را بر سطح آیینه‌ای نهایی بررسی نمود. در این راستا و در مرحله پولیشینگ، سرعت دورانی ابزار برابر با ۵۰۰



(الف) (ب) (ج) (د)

شکل ۴) کیفیت پرداخت سطح بعد از فرایند تراشکاری با ابزار الماس با شرایط الف) پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۲ میلی‌متر ب) پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۸ میلی‌متر ج) پیشروی ۴/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۲ میلی‌متر د) پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۴ میلی‌متر

دور بر دقیقه، فشار معادل ۲ بار و زمان پولیش‌کاری ۶۰۰ ثانیه در نظر گرفته شدند.

سطح حاصل از پولیشینگ پرداخت بسیاربالایی داشته لذا در کنار زبری سنجی سطح از دستگاه اینترفرومتری (تداخل‌سنج) برای بررسی پرداخت سطح استفاده می‌شود. لازم به ذکر است در این مرحله اعداد زبری سطح همواره بسیار کوچک هستند. از طرف دیگر، زبری سنجی بر روی یک یا چند پاره خط مستقیم از کل سطح انجام می‌شود، در حالیکه تداخل‌سنجی کل سطح قطعه را اسکن می‌کند. به‌منظور عملکرد مطلوب آیینه حاصل باید به نتایج تداخل‌سنجی توجه بیشتری شود. در این راستا، در جدول ۲ نتایج زبری‌سنجی و تداخل سنجی سطوح پس از فرآیند پولیشینگ ارائه گردیده است. برای هر کدام از آزمایش‌ها شرایط تراشکاری اعمال شده در مرحله قبل نیز بیان شده است.

مقادیر میانگین پارامترهای Ra و PV در سطوح مختلف پارامترهای ماشین‌کاری در شکل ۵-الف و ج نشان داده است. با مقایسه شکل ۵-الف و شکل ۳-ج مشاهده می‌شود که فرآیند پولیشینگ سطح عمومی زبری را کاهش داده است اما رویه اثرگذاری سطوح پارامترها تقریبا ثابت است. شکل ۵-ج نحوه اثرگذاری پارامترهای تراشکاری را بر پارامتر PV نشان داده است. بررسی بازه تغییرات پارامتر PV نسبت به Ra نشان می‌دهد PV تغییرات گسترده‌تری را تجربه می‌کند این موضوع بدان معنی است که می‌توان جزییات پروفیل سطح را با وضوح بالاتری به وسیله پارامتر PV تفکیک نمود.

جدول ۲) نتایج عملیات تراشکاری با ابزار الماس و پولیش

شماره آزمایش	شرایط تراشکاری با ابزار الماس	زبری سطح پس از فرآیند پولیشینگ (µm)	معیار PV	معیار Ra	شعاع لبه ابزار (mm)	پیشروی (µm/rev)	
۱			۰/۷	۰/۱	۰/۲	۱/۵	
۲			۰/۳۸۹	۰/۰۸	۰/۴	۱/۵	
۳			۰/۲۹۳	۰/۰۶	۰/۸	۱/۵	
۴			۰/۷۶۲	۰/۱	۰/۲	۳	
۵			۰/۴۴۹	۰/۰۹	۰/۴	۳	
۶			۰/۴۳۹	۰/۰۸	۰/۸	۳	
۷			۰/۹۴۱	۰/۱۴	۰/۲	۴/۵	
۸			۰/۶۲	۰/۰۹	۰/۴	۴/۵	
۹			۰/۵۴۲	۰/۰۹	۰/۸	۴/۵	

به‌منظور اطمینان از دقت توزیع احتمالی داده‌ها دو نمودار شکل ۵-ب و د ارائه گردیده است که با توجه به توزیع داده‌ها در اطراف خط مایل آبی رنگ، به لحاظ آماری داده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. با توجه به رویه تغییرات، شرایط بهینه برای رسیدن به بالاترین پرداخت سطوح مقدار پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۸ میلی‌متر است. لازم به ذکر است که در رابطه با شعاع لبه سطوح انتخاب شده با استفاده از قسمت اول آزمایش‌ها، به گونه‌ای انتخاب شدند که شرایط چتر ایجاد نشود. طبق رویه اثرگذاری شعاع لبه، هر چه شعاع بزرگتر انتخاب شود زبری سطح بهبود می‌یابد ولی باید توجه نمود که این روند همیشگی نیست و برای مقادیر خیلی بزرگ شعاع لبه پدیده چتر سطح نامطلوبی را نتیجه خواهد داد.

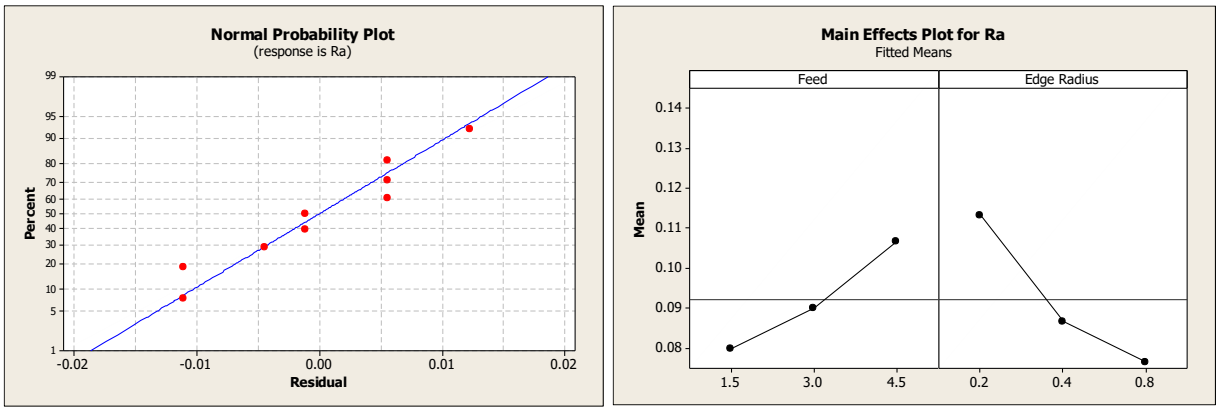
نتایج آنالیز واریانس پارامترهای Ra در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پارامتر شعاع لبه همچنان مقدار کوچکتر P-Value را که کمتر از ۰/۰۵ است، دارا می‌باشد لذا در مقایسه با پیشروی پارامتر مؤثر به شمار می‌رود.

جدول ۳) نتایج آنالیز واریانس مقادیر زبری سطح (Ra) پس از فرآیند پولیشینگ

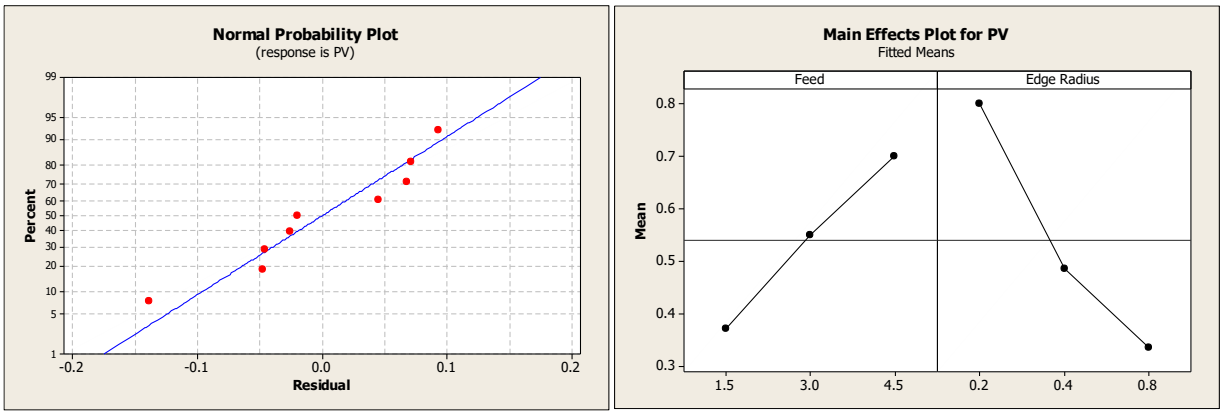
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Feed	2	0.00108	0.00108	0.000544	4.26	0.102
Edge Radius	2	0.00215	0.00215	0.001077	8.43	0.037
Error	4	0.00051	0.00051	0.000127		
Total	8	0.00375				

همچنین کیفیت نمونه‌هایی از سطوح آیینه‌ای حاصل در شکل ۶ نشان داده شده است که با مقایسه با شکل ۴، تأثیر فرآیند پولیشینگ به وضوح قابل مشاهده است و سطح قطعه‌کار همچون آیینه حروف سطح زیرین را بازتاب می‌کند.

با توجه به کیفیت نهایی سطوح مشخص می‌گردد که هرچه پرداخت سطح در فرایند تراشکاری با ابزار الماس بالاتر باشد، با در نظر گفتن شرایط ثابت فرآیند پولیشینگ، سطح آیینه‌ای نهایی دارای کیفیت بالاتر و خواص اپتیکی بهتری خواهد بود که در نهایت منجر به کارایی بالاتر آیینه آلومینیومی خواهد شد. این موضوع همچنین



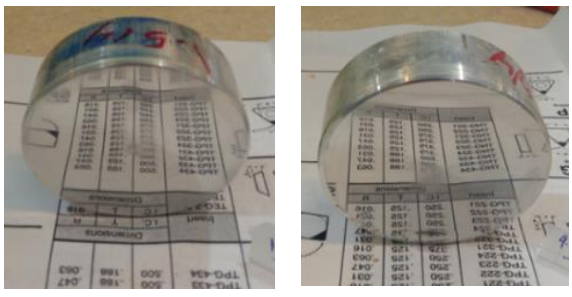
(ب) (الف)



(د) (ج)

شکل ۵) الف) مقادیر میانگین زبری سطح (Ra) در سطوح مختلف پارامترهای پیشروی و شعاع لبه ابزار د) نمودار توزیع احتمالی داده‌های Ra ج) مقادیر میانگین PV در سطوح مختلف پارامترهای پیشروی و شعاع لبه ابزار د) نمودار توزیع احتمالی داده‌های PV

نشان می‌دهد که با عملکرد بهتر فرآیند تراشکاری به کمک ابزار الماس، به اعمال کمتر فرآیند زمان‌بر پولیش نیاز است که در نهایت سرعت ساخت آیینه آلومینیومی افزایش می‌یابد و متعاقب آن هزینه کاهش خواهد یافت.



(ب) (الف)

شکل ۶) کیفیت آیینه‌ای سطوح پس از فرآیند پولیشینگ. شرایط تراشکاری الف) پیشروی ۴/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۴ میلی‌متر ب) پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۴ میلی‌متر

شکل ۷ تصاویری از نتایج تداخل‌سنجی سطوح حاصل از فرآیند پولیشینگ را نشان می‌دهد. شکل‌های سمت چپ نمایی کلی از کانتورها و مدل ساده سه بعدی از پروفیل سطح و شکل سمت راست جزئیات کانتورها را نشان می‌دهند. همانطور که در بخش قبل اشاره شد، در اینترفرومتری هر اندازه که خطوط باریکه یکنواخت‌تر و پهن‌تر باشند، سطح قطعه‌کار، پرداخت و تختی بالاتری خواهد داشت و خواص اپتیکی بالاتری را در دسترس قرار خواهد داد.

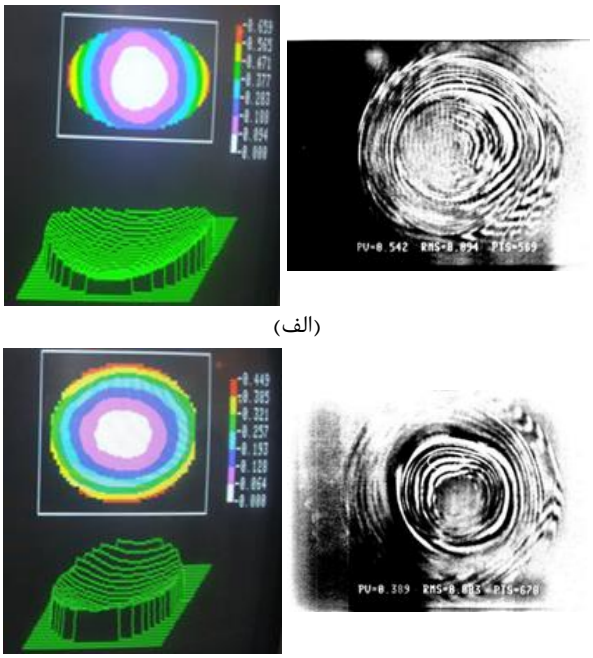
عدد PV ضریبی از طول موج (لاندا) می‌باشد. به علت اینکه لیزر مورد استفاده در این دستگاه زایگو هلیوم-نئون می‌باشد، این ضریب معادل ۶۳۲ نانومتر است. در این صورت، هر عددی که خروجی این دستگاه باشد در عدد ۶۳۰ نانومتر ضرب می‌شود و عددی بر حسب پارامترهای سطح بدست می‌آید.

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به فرآیند ساخت آیینه‌های آلومینیومی بر مبنای استفاده از تراشکاری با ابزار الماس پرداخت. در این راستا، ابتدا بازه مؤثر پارامترهای اصلی تعیین شد و در ادامه دو فرآیند تراشکاری با ابزار الماس و پولیش‌کاری بر سطوح قطعه آلومینیومی اعمال گردید و نتایج زیر حاصل شد:

۱) با توجه به قسمت اول آزمایش‌ها، بازه مؤثر پیشروی در مقادیر کوچکتر از ۵ میکرومتر بر دور تعیین گردید و در آزمایش‌های اصلی سطوح ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میکرومتر بر دور در نظر گرفته شدند. شعاع

لبه برش معادل مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌متر تعیین شد. با توجه



(الف)

(ب)

شکل ۷) نمونه‌هایی از نتایج تداخل‌سنجی سطوح پس از فرآیند پولیشینگ. شرایط تراشکاری الف) پیشروی ۴/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۸ میلی‌متر ب) پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۴ میلی‌متر

به صلبیت ماشین، سرعت دورانی ثابت و برابر ۲۲۵۰ دور بر دقیقه برای آزمایش‌های اصلی تعیین گردید.

۲) در قسمت دوم و پروسه اصلی ساخت آیینه آلومینیومی، با توجه به مقادیر میانگین زبری سطح حاصل نشان داده شد که با افزایش شعاع لبه زبری سطح کاهش می‌یابد (در طراحی آزمایش‌ها بازه تغییرات شعاع به نحوی انتخاب شد که از چتر فاصله داشته باشد). همچنین با افزایش پیشروی، زبری سطح افزایش یافت. در نتیجه بهترین شرایط تراشکاری برای رسیدن به حداقل زبری سطح، پیشروی ۱/۵ میکرومتر بر دور و شعاع لبه ۰/۸ میلی‌متر تعیین گردید. این موضوع بدین معنی است که کمترین نیاز به فرآیند زمان‌بر پولیش وجود داشته باشد تا در نهایت پروسه ساخت در بازه زمانی کوتاه و با هزینه کمتر انجام شود. نتایج نمودارهای توزیع احتمالی نرمال نشان داد که داده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. همچنین نتایج آنالیز واریانس نشان داد که پارامتر شعاع لبه در مقایسه با پیشروی اثر قابل توجه‌تری بر زبری سطح داشته است. نتایج تداخل‌سنجی و داده‌های PV رویه‌ای نزدیک به پارامتر زبری سطح Ra را نشان داد. با توجه به اینکه PV برای سطح در نظر گرفته می‌شود و Ra بر روی یک خط محاسبه می‌شود، نتایج PV صحه‌گذاری زبری سطح در گستره سطح وسیع‌تری است.

تاییدیه اخلاقی: همه جنبه‌های اخلاقی در انجام پژوهش رعایت شده است.

تعارض منافع: نویسندگان تایید می‌نمایند که تعارض منافعی وجود ندارد.

منابع مالی: منابع مالی برای این پژوهش نبوده است.

منابع

1- To S, Lee WB, Chan CY. Ultraprecision diamond turning of aluminium single crystals. Journal of materials processing technology. 1997;63(1-3):157-62.

2- Cheung CF, Lee WB. Characterisation of nanosurface generation in single-point diamond turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2001; 41(6):851-75.

3- Fang FZ, Liu XD, Lee LC. Micro-machining of optical glasses—A review of diamond-cutting glasses. Sadhana. 2003; 28:945-55.

4- Bigerelle M, Gautier A, Iost A. Roughness characteristic length scales of micro-machined surfaces: A multi-scale modelling. Sensors and Actuators B: Chemical. 2007;126(1):126-37.

5- Lee WB, Cheung CF, To S. Multi-scale modelling of surface topography in single-point diamond turning. J Achiev Mater Manuf Eng. 2007;24(1):260-6.

6- Childs TH, Sekiya K, Tezuka R, Yamane Y, Dornfeld D, Lee DE, Min S, Wright PK. Surface finishes from turning and facing with round nosed tools. CIRP annals. 2008; 57(1):89-92.

7- Horst RT, Haan MD, Gubbels GP, Senden R, van Venrooy BW, Hoogstrate AM. Diamond turning and polishing tests on new RSP aluminium alloys.

8- Shah SC, Geroge PM. Surface roughness modeling in precision turning of aluminium by polycrystalline diamond tool using response surface methodology. Int J Emerge Technol Adv Eng. 2012; 2:41-5.

9- Shen Z, Yu J, Song Z, Chen L, Yuan Q, Gao Z, Pei S, Liu B, Ye J. Customized design and efficient fabrication of two freeform aluminum mirrors by single point diamond turning technique. Applied Optics. 2019; 58(9):2269-76.

10- Xie Y, Mao X, Li J, Wang F, Wang P, Gao R, Li X, Ren S, Xu Z, Dong R. Optical design and fabrication of an all-aluminum unobscured two-mirror freeform imaging telescope. Applied Optics. 2020; 59(3):833-40.

11- Hatefi S, Abou-El-Hossein K. Review of single-point diamond turning process in terms of ultra-precision optical surface roughness. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020; 106:2167-87.

12- He S, Xuan J, Du W, Xia Q, Xiong S, Zhang L, Wang Y, Wu J, Tao H, Shi T. Spiral tool path generation method in a NURBS parameter space for the ultra-precision diamond turning of freeform surfaces. Journal of Manufacturing Processes. 2020; 60:340-55.

13- Nagayama K, Yan J. Measurement and compensation of tool contour error using white light interferometry for ultra-precision diamond turning of freeform surfaces. International Journal of Automation Technology. 2020;14(4):654-64.

14- Wang T, Wu X, Zhang G, Dai Y, Xu B, Ruan S. An experimental study on single-point diamond turning of a 55 vol% SiCp/Al composite below the ductile brittle transition depth of SiC. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020; 108:2255-68.
15- Wang J, Zhang G, Chen N, Zhou M, Chen Y. A review of tool wear mechanism and suppression method in diamond turning of ferrous materials. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021;113:3027-55.
16- Wyant JC, Creath K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology. Applied optics and optical engineering. 1992;11(part 2):28-39.
17- Dabiri S, Dehghan O, Shamekhi M. Matrix in optics. Paya Group. 2010 (In Persian)