مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 103-110

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی به کمک ارتعاشات التراسونیک بر روی سطح داخلی قطعه‌کار لوله‌ای شکل

حمزه شاهرجبیان[1*]، مسعود فرحناکیان[2]، پیام سرائیان[3]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد
2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد
3- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد
* نجف آباد، صندوق پستی 8514143131، h.shahrajabian@pmc.iaun.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 اسفند 1395
پذیرش: 14 فروردین 1396
ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:
پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی
ارتعاشات التراسونیک
شماره مش ساینده
میکروسکوپ نوری

چکیده

فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی به کمک ارتعاشات التراسونیک، استفاده از ارتعاشات التراسونیک و فرایند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی برای پرداخت‌کاری سطوح در کمترین زمان در حد نانومتر را با همدیگر ترکیب می‌کند. در این کار تجهیزات آزمایشگاهی برای پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی به کمک ارتعاشات التراسونیک برای پرداخت‌کاری قطعات لوله‌ای شکل ساخته شده است. با استفاده از این تجهیزات آزمایشگاهی، تاثیر پارامترهای آزمایشگاهی مانند ارتعاشات التراسونیک، شماره مش ذرات ساینده، نوع ذره ساینده (SiC و الماس) و زمان پرداخت‌کاری روی درصد تغییرات زبری سطح داخلی قطعه‌کار لوله‌ای شکل بررسی شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از ارتعاشات التراسونیک اثر قابل توجهی بر کاهش زبری سطح قطعه‌کار داشت. با افزایش شماره مش ذرات SiC از 90 تا 800 و همچنین افزایش زمان پرداخت‌کاری، درصد کاهش زبری سطح افزایش یافت. از بین دو ذره ساینده استفاده شده، الماس کارایی بهتری از خود نشان داد. تصاویر میکروسکوپ نوری نشانگر آن است که مکانیزم پرداخت‌کاری سایشی در حالت بدون التراسونیک، برای ذرات درشت، مکانیزم غالب دوجسمی و برای ذرات ریز، سه‌جسمی است. ولی در حالت استفاده از ارتعاشات التراسونیک برای ذرات ریز و درشت، مکانیزم سه‌جسمی پرداخت‌کاری مشاهده شد.

Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of inner surface of tube workpiece

Hamzeh Shahrajabian*, Masoud Farahnakian, Payam Saraeian

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
* P.O.B. 8514143131, Najafabad, Iran, h.shahrajabian@pmc.iaun.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 March 2017
Accepted 03 April 2017
Available Online 29 April 2017

Keywords:
Magnetic abrasive finishing
Ultrasonic vibrations
Mesh number
Optical microscopy

ABSTRACT

Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing (UAMAF) is the combination of magnetic abrasive finishing (MAF) and ultrasonic vibrations to finish the surfaces in nanometer scale. In this work, the experimental setup for UAMAF was prepared to finish inner surface of tube workpiece. By using experimental setup, the effect of experimental parameters such as ultrasonic vibrations, mesh number, the type of abrasives (SiC and diamond) and finishing time has been investigated on the changes in the surface roughness of tube workpiece. The experimental results showed that the use of ultrasonic vibrations has a significant effect on reducing the surface roughness. The changes in surface roughness increase with the mesh number from 90 to 800 and finishing time from 30s to 5 min. Among two types of abrasives, diamond showed the best performance in finishing. Optical microscopy images showed that the dominant finishing mechanism in MAF for coarse grains (with mesh size of 90 and 120) is two-body and for fine grains (with mesh size of 220, 400 and 800) is three body. In UAMAF, for both of the coarse and fine grains the dominant finishing mechanism is three body.

1- مقدمه

با توسعه تکنولوژی‌های ساخت قطعات صنعتی، تقاضا برای تولید قطعات با کیفیت سطح مناسب برای کاربردهای متنوع در صنعت رو به افزایش است. از جمله این قطعات می‌توان به قطعاتی که در ساخت نیمه‌هادی‌ها، قطعات انرژی اتمی، تجهیزات پزشکی و صنایع هوافضا کاربرد دارند اشاره کرد که دارای زبری سطح بسیار پایینی هستند. در میان آن‌ها، پرداخت‌کاری لوله‌های خلا، موج‌برها و لوله‌های بهداشتی توسط روش‌های سنتی مانند هونینگ به خاطر شکل آن‌ها مشکل است. زبری سطح این لوله‌ها کارایی کل سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهند. یکی از روش‌های مدرن پرداخت‌کاری که می‌توان برای پرداخت‌کاری سطح داخلی این لوله‌ها مورد استفاده قرار داد روش پرداخت‌کاری سایشی ذرات مغناطیسی[1] است که در آن نیروی برش توسط

[1] Magnetic Abrasive Finishing (MAF)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Shahrajabian, M. Farahnakian, P. Saraeian, Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of inner surface of tube workpiece, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 103-110, 2017 (in Persian)

میدان مغناطیسی حاصل از آهنربا تامین می‌شود. روش MAF دارای مزیت‌هایی از قبیل خودتیز شوندگی، انطباق‌پذیری و کنترل‌پذیری ذرات ساینده است. در این روش ترکیبی از ذرات ساینده مانند کاربید سیلیسیم یا اکسید آلومنیوم و ذرات فرومغناطیس مانند آهن روی سطحی که قرار است پرداخت شود، قرار گرفته و تحت تاثیر میدان مغناطیسی حاصل از آهنربا، ذرات ساینده به سطح قطعه می‌چسبند. با چرخش قطعه‌کار یا آهنرباها سطح قطعه پرداخت می‌شود.

در روش‌های سنتی پرداخت‌کاری مانند سنگ‌زنی و هونینگ به‌خاطر نیروی مکانیکی حاصل از ابزار، عیوب سطحی مانند میکروترک‌ها روی سطح قطعه ایجاد می‌شوند و بنابراین نمی‌توانند کیفیت مناسب سطح را تامین کنند. اما در فرآیند MAF به‌دلیل این‌که نیروی پرداخت‌کاری بسیار پایین است دقت ابعادی و پرداخت سطح خوب بوده و میزان عیوب سطحی حداقل است [2,1]. تاکنون از این روش برای پرداخت‌کاری سطوح تخت [4,3]، سطوح استوآن‌های [6,5]، شیارها [7]، سطوح آزاد [8]، ابزارهای برش [9] و پلیسه‌گیری سوراخ‌ها [10] استفاده شده است. نتایج این تحقیقات نشان داده که روش MAF روش موثری برای پرداخت‌کاری بوده است.

اخیراً برخی از پژوهشگران از ارتعاشات التراسونیک در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی استفاده کرده‌اند [12,11]. به این روش، پرداخت‌کاری سایشی ذرات مغناطیسی به‌کمک ارتعاشات التراسونیک[1] گویند. استفاده از ارتعاشات التراسونیک دارای مزیت‌هایی است. از جمله این مزیت‌ها می‌توان به افزایش کارایی ماشین‌کاری شامل بهبود زبری سطح و کاهش زمان پرداخت‌کاری اشاره کرد.

مولیک و پاندی [13] از فرآیند UAMAF برای پرداخت‌کاری سطح تخت قطعه فولادی AISI 52100 با ذرات ساینده SiC استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از ارتعاشات التراسونیک درفرآیند پرداخت‌کاری باعث پرداخت‌کاری خیلی بهتر سطح نسبت به حالت پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی سنتی شده است، به‌طوری‌که به کمک ارتعاشات التراسونیک زبری سطح در مدت زمان 80 ثانیه به 22 nm رسیده است. خلج و همکاران [14] از روش UAMAF برای پرداخت‌کاری سطح بیرونی لوله آلومنیومی استفاده کردند. عکس‌های میکروسکوپی و زبری سطح به‌دست آمده کارایی استفاده از ارتعاشات التراسونیک را نشان داد. جودال و همکاران [15] نیز از ارتعاشات التراسونیک برای پرداخت‌کاری سطح بیرونی قطعه استوآن‌های از جنس آلومنیوم استفاده کردند. نتایج کار آن‌ها نیز کارایی ارتعاشات التراسونیک را تایید کرد. یون و همکاران [16] از ارتعاشات التراسونیک برای پرداخت‌کاری قطعه سرامیکی استفاده کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که استفاده از ارتعاشات التراسونیک باعث بهبود کیفیت سطح و نرخ باربرداری نسبت به حالت پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی معمولی می‌شود. زبری سطح قطعه سرامیکی بعد از 50 min فرآیند به 0.03 µm رسیده است.

در تحقیقات انجام شده فوق ارتعاشات التراسونیک به آهنربا داده شده است. با توجه به این‌که دامنه ارتعاشات التراسونیک در حد چند ده میکرون است، حرکت ذرات که تابع میدان مغناطیسی می‌باشد، نمی‌تواند قابل توجه باشد و تاثیرگذاری ارتعاشات بسیار کم است. لذا برای بررسی بهتر اثر ارتعاشات التراسونیک بر پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی، ارتعاشات به قطعه‌کار داده می‌شود. هدف از انجام این کار، طراحی و ساخت یک مجموعه آزمایشی جهت بررسی استفاده از ارتعاشات التراسونیک در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی بر زبری سطح داخلی سطح لوله آلومنیومی است. در این تحقیق اثر پارامترهایی مانند شماره مش ذرات ساینده و سرعت دورانی قطعه‌کار بر زبری سطح بررسی خواهد شد.

2- مواد و آزمایش‌ها

2- 1- تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش‌ها، ارتعاشات التراسونیک به قطعه‌کار داده شد. ابتدا ارتعاشات به آهنرباها داده شد که تاثیری بر زبری سطح نداشت. دلیل آن این است که حرکت ذرات ساینده تابع میدان مغناطیسی حاصل از آهنربا است و از آنجا که این میدان پراکنده است جابجایی آهنرباها در حد چند میکرومتر توانایی جابجا کردن ذرات ساینده را ندارد. نمای شماتیک دستگاه تهیه شده به منظور انجام فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی به کمک ارتعاشات التراسونیک در "شکل 1 (الف)" نشان داده شده است. "شکل 1 (ب)" تصویر دستگاه UAMAF را نمایش می‌دهد. واحد تولیدکننده ارتعاشات التراسونیک شامل ژنراتور UP-1200 با توان 1200 w و دامنه فرکانس 20-30 kHz، ترانسدیوسر پیزوالکتریک و یک هورن است. منبع تغذیه التراسونیک تولید سیگنال‌های الکتریکی فرکانس بالا می‌کند و این سیگنال‌ها را به ترانسدیوسر منتقل می‌کند. ترانسدیوسر سیگنال‌های الکتریکی با فرکانس حدود 20 kHz را به ارتعاشات مکانیکی تبدیل می‌کند. این ارتعاشات به هورن منتقل شده و توسط هورن دامنه آن‌ها افزایش می‌یابد و درنهایت از هورن به قطعه‌کار منتقل می‌شود. قطعه‌کار در انتهای هورن جایی که ارتعاشات بیشینه است، بسته می‌شود.

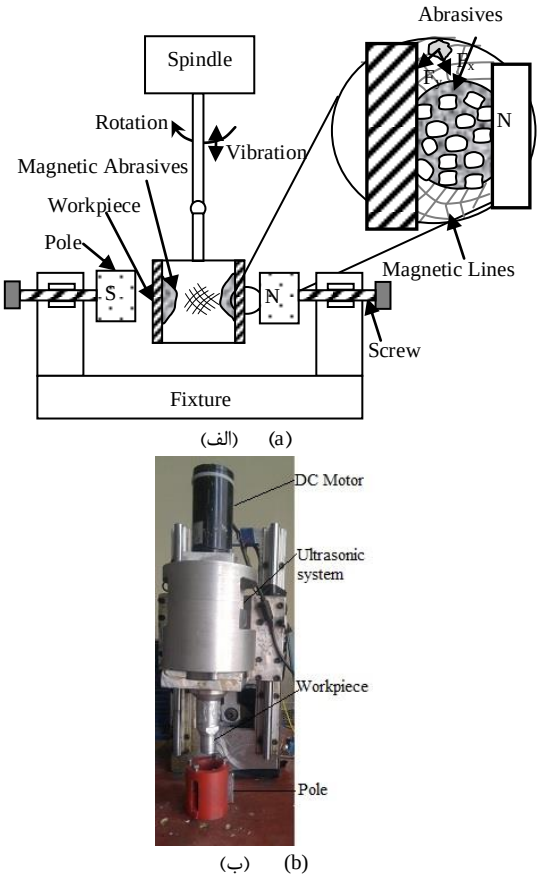


Fig. 1 a) Schematic view and b) setup of UAMAF

شکل 1 الف) نمای شماتیک و ب) تصویر واقعی دستگاه UAMAF

[1] Ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing (UAMAF)

بهتر است هورنی طراحی شود که خواص آکوستیک آن نزدیک به ترانسدیوسر باشد. جنس هورن باید از ماده‌ای باشد که میزان اتلاف انرژی را حداقل کند. برای مثال چدن شامل ذرات گرافیت بوده (که انرژی و صوت را جذب می‌کند) و انتقال صوت در آن ضعیف است. برای انتخاب جنس هورن، استحکام به خستگی یک پارامتر مهم است زیرا حدود 20000 بار در ثانیه ارتعاش می‌کند. همه مواد بستگی به جنس‌شان تا حدی اتلاف انرژی دارند. موادی مانند آلومنیوم، منیزیم و تیتانیوم میزان اتلاف انرژی کمی داشته و از این‌رو برای طراحی هورن مناسب هستند. براساس مطالب گفته شده، برای ساخت هورن از آلومنیوم 7075 استفاده شد. می‌توان از جنس‌های دیگری مانند تیتانیوم نیز استفاده کرد اما هزینه آن‌ها نسبت به آلومنیوم خیلی بالاتر است. برای تعیین ابعاد هورن از آنالیز اجزاء محدود استفاده شده که در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد.

از میان عوامل موثر بر راندمان آکوستیک فرآیند، اتصال صحیح تجهیزات شامل ترانسدیوسر، هورن و قطعه‌کار نقش اساسی را ایفا می‌کند. اتصالات در نقاط گره ارتعاشی انجام می‌شود به‌طوری‌که ارتعاشات نتوانند به سیستم اتصال منتقل شوند. هر چند از انتقال ارتعاشات التراسونیک به سیستم اتصال نمی‌توان به‌طور کامل جلوگیری کرد.

قطعه‌کار به دو طریق می‌تواند به هورن متصل شود: الف) اتصال ثابت و ب) اتصال جداشدنی. در تحقیق حاضر استفاده از اتصال ثابت امکان‌پذیر نیست زیرا باید قطعه‌کار بعد از هر دفعه آزمایش تعویض شود. استفاده از پیچ باعث افت انرژی می‌شود. از طرفی پیچ مورد استفاده باید دارای مقاومت به خستگی بالایی باشد. پیچ‌های گرید 14.9 برای این منظور بهترین نوع هستند.

2-2- آنالیز اجزاء محدود هورن

برای تعیین فرکانس‌های طبیعی شکل‌های مود باید آنالیز مودال ساختار انجام شود. آنالیز مودال با استفاده از اجزاء محدود شامل تقسیم یک شئ به اجزاء کوچکتر (بنابراین درجات آزادی کمتر می‌شود) و حل معادلات حاکم برای حل هر المان است. از نرم‌افزار آباکوس با نوع مش TETRA C3D4 برای آنالیز مودال استفاده شد.

در طول فرآیند پرداخت‌کاری به کمک ارتعاشات التراسونیک یک انتهای هورن به ترانسدیوسر متصل شده و طرف دیگر به قطعه‌کار متصل می‌شود، در حالی‌که هر دو آن‌ها با حداکثر دامنه ممکن ارتعاش می‌کنند. در این حالت هیچ شرایط مرزی برای هر دو طرف هورن وجود ندارد که آن‌ها را در مکان مشخصی ثابت در نظر بگیرد. این دلالت بر این دارد که هورن باید به صورت یک قطعه از دو طرف آزاد مدل شود. عملیات اتصال تنها در گره‌های ارتعاشی انجام می‌گیرد و از آنجایی که هیچ ارتعاشی در این نقاط وجود ندارد، این فرض نتایج اجزاء محدود را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد.

طول هورن براساس آنالیز مودال با استفاده از اجزاء محدود در مود ارتعاشی طولی در 20 kHz انجام می‌شود. سیستم به‌گونه‌ای طراحی شد که بین دو پیزوالکتریک گره ارتعاشی قرار گیرد. این‌کار باعث کاهش تنش روی پیزوالکتریک‌ها شده و عمر آن‌ها را افزایش می‌دهد. از همین نقطه برای اتصال مجموعه و اتصال آن به بلبرینگ استفاده شد. "شکل 2 (الف)" نمای مجموعه را قبل از مش‌بندی در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد. نام اجزاء مجموعه روی آن مشخص شده است. "شکل 2 (ب)" تصویر مش‌بندی شده پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. "شکل 2 (ج)" نتایج آنالیز مودال را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است بیشترین دامنه ارتعاش در نوک هورن است.

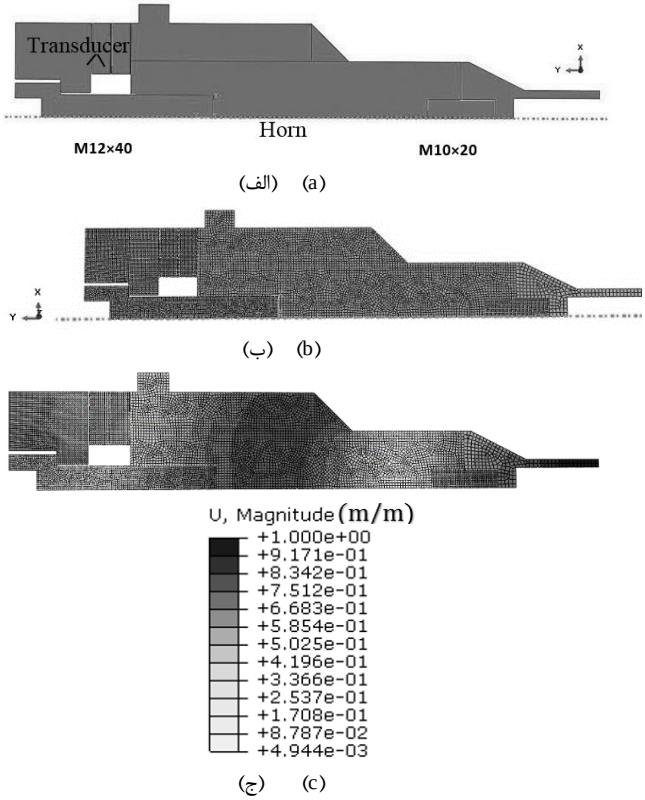


Fig.2 FEM simulation of ultrasonic system a) before meshing, b) after meshing, and c) Results of modal analysis

شکل 2 نتایج آنالیز محدود مجموعه التراسونیک الف) تصویر مجموعه قبل از مش‌بندی، ب) تصویر مش‌بندی شده و ج) نتیجه آنالیز مودال

تغذیه التراسونیک استفاده شده در آزمایش‌ها قابلیت تولید ارتعاشات در دامنه وسیعی از فرکانس‌ها را دارد. در نتیجه تعیین فرکانس طبیعی هورن در مود مطلوب با هیچ محدودیتی مواجه نیست، به جز این‌که بهتر است از دامنه شنیداری انسان که 20 kHz است بیشتر باشد.

در پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی به‌کمک ارتعاشات التراسونیک اعمال ارتعاشات طولی بیشترین سود را دارد. انتظار می‌رود که وقتی هورن ارتعاشی در مود ارتعاشی تحریک شود (خصوصاً در اولین شکل مود)، شرایط بهینه برای پرداخت‌کاری حاصل شود. از گپ سنسور PU-09 و تبدیل کننده AEC-5509 و اسیلوسکوپ برای اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات نوک ابزار استفاده شد. ولتاژ مناسب برای ایجاد دامنه ارتعاشات 10 µm (صفر تا پیک) ثبت و اندازه‌گیری شد.

2-3- مواد

از لوله آلومنیومی 6061 به عنوان قطعه‌کار استفاده شد. این لوله در صنایع مختلف مانند صنایع هوافضا و پمپ‌های پنوماتیکی کاربرد دارد. درصد اجزاء تشکیل دهنده و ترکیب شیمیایی این جنس در جدول 1 آورده شده است. سطح داخلی نمونه‌ها قبل از پرداخت‌کاری توسط سمباده به زبری 0.3 µm رسیدند. "شکل 3" تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح داخلی لوله قبل از فرآیند MAF را نشان می‌دهد. از ذرات ساینده SiC با شماره مش 120 (با قطر میانگین 115 µm)، 220 (با قطر میانگین 57.5 µm) ، 400 (با قطر میانگین 17.3 µm) و 800 (با قطر میانگین 6.5 µm) به عنوان ذرات ساینده استفاده شد و همچنین از ذرات آهن با قطر میانگین 300 میکرومتر به عنوان ذرات فرومغناطیس استفاده شد. نسبت وزنی ذرات ساینده به ذرات

فرومغناطیس 35% وزنی انتخاب شد [17]. به منظور ترکیب ذرات ساینده و ذرات فرومغناطیس و ایجاد چسبندگی مناسب بین آن‌ها لازم است از روان‌کار استفاده شود، از این‌رو از روغن SAE 40 به‌عنوان روان‌کار استفاده شد. شرایط آزمایشگاهی در جدول 2 نشان داده شده است.

2-4- اندازه گیری زبری سطح

زبری سطح داخلی لوله‌های آلومنیومی براساس زبری سطح میانگین (R_a) اندازه‌گیری و گزارش شد. به منظور اندازه‌گیری زبری سطح از دستگاه زبری سنج پرتومتر (M2) ساخت شرکت موهر آلمان استفاده شد. طول مسیر حرکت پراب و طول قطع[1] به ترتیب روی 2 و 0.25 میلی‌متر تنظیم شد. برای هر نمونه 5 بار اندازه‌گیری در جهت طول قطعه انجام شده، و مقدار میانگین اندازه‌ها به‌عنوان زبری سطح نمونه در نظر گرفته شد. درصد تغییرات زبری سطح برای هر نمونه براساس رابطه زیر تعیین شده و به‌عنوان خروجی فرآیند گزارش شد.

$$\%\Delta R_a = \frac{R_{a_o} - R_{a_f}}{R_{a_o}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن R_{a_o} زبری سطح اولیه و R_{a_f} زبری سطح نهایی هستند.

جدول 1 درصد ترکیب شیمیایی اجزاء AL6061

Table1 Chemical Composition of Al6061

Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
97	0.1	0.3	0.5	1.1	0.1	0.6	0.1	0.2

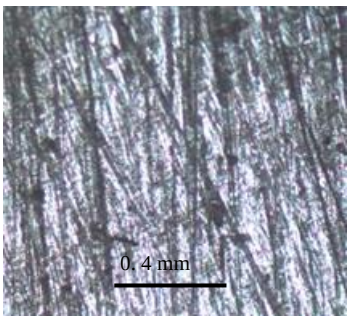


Fig. 3 Image of inner surface of tube before MAF (Mag. 200X)

شکل 3 تصویر سطح داخلی لوله قبل از MAF (بزرگنمایی: 200 برابر)

جدول 2 شرایط آزمایشگاهی

Table 2 Experimental conditions

شماره	پارامتر	مقدار پارامتر
1	قطعه‌کار	آلومنیوم6061 با قطر داخلی 30mm و ضخامت 1mm
2	سرعت دورانی قطعه‌کار	1200 rpm
3	دامنه ارتعاشات	10 µm
4	زبری سطح اولیه	0.3±0.02 µm
5	آهنربا	دو عدد آهنربای ND-Fe-B با ابعاد 10×20×60 mm و چگالی شار مغناطیسی 1.4 T
6	ترکیب ساینده	ذرات آهن با اندازه 300 µm ، ذرات ساینده کاربید سیلیس با انازه مش 90, 12, 220, 400, 800 و ذرات الماس با شماره مش 800 نسبت وزنی ذرات آهن به ساینده 35%
7	گپ آهنربا	1 mm
8	طول پرداخت‌کاری	5 mm
9	زمان پرداخت‌کاری	1, 3, 5 min

[1] Cut-off

2-5- اصول فرآیند UAMAF

در فرآیند UAMAF، در ابتدا قطعه‌کار بین دو آهنربا قرار می‌گیرد. نحوه قرارگیری آهنرباها و قطعه‌کار و همچنین خطوط میدان مغناطیسی در "شکل 4 (الف)" نشان داده شده است. ترکیب ذرات ساینده و ذرات فرومغناطیس آهن درون لوله قرار داده می‌شود. تحت تاثیر میدان مغناطیسی حاصل از آهنرباها، ذرات مغناطیسی به سمت آهنربا کشیده می‌شوند و در نتیجه ذرات ساینده را که در زیر آن‌ها قرار دارد را به سمت سطح داخلی لوله فشار داده و باعث نفوذ آن‌ها درون سطح قطعه می‌شوند (شکل 4 (ب)). با چرخش قطعه-کار ذرات ساینده از درون سطح قطعه ذرات خیلی کوچک به‌صورت میکروبراده جدا کرده، منجر به کاهش ارتفاع قله‌های سطح شده و باعث پرداخت سطح داخلی لوله می‌شود. فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی زیرمجموعه ماشین‌کاری ساینده سه جسمی[2] قرار می‌گیرد.

در فرآیند پرداخت‌کاری سه جسمی مانند لپینگ، یک لایه‌ای از ذرات ساینده روی سطح قطعه توسط نیروی پرداخت‌کاری می‌غلتند (این نیروی در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی توسط میدان مغناطیسی آهنربا تامین می‌شود).

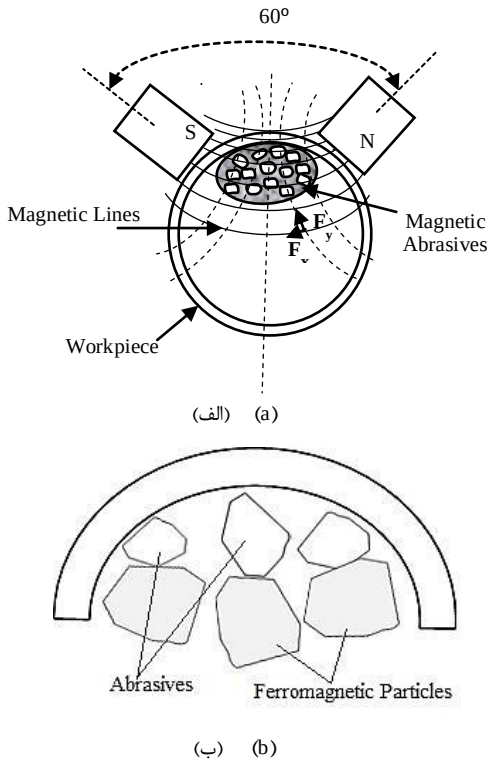


Fig. 4 a) Arrangement of poles and magnetic field lines, b) removing of chips by abrasives

شکل 4 الف) نحوه قرارگیری آهنرباهاو خطوط میدان، ب) نحوه باربرداری ذرات مغناطیسی

[2] Three body abrasive machining

همان‌طور که در "شکل 4 (ب)" نشان داده شده این نیرو روی ذرات سـاینده توزیع می‌شود، به‌طوری‌که هر ذره بین سطح قطعه و ذرات آهن می‌غلتـد. در حرکت غلتشی ذرات، ذره درون سطح نفوذ کرده می‌تواند از سطح قطعـه‌کـار براده‌برداری کند. این حرکت غلتشی برخلاف فرآینـد سـنگ‌زنـی کـه باعـث خراش روی سطح می‌شود، باعث از بین رفتن خراش‌های ایجاد شـده پـس از فرآیند سنگ‌زنی و سمباده‌زنی می‌شود. همزمـان بـا دوران قطعـه ارتعاشـات التراسونیک نیز به قطعه‌کار اعمال می‌شود. اعمال ارتعاشـات التراسـونیک در جهت طول قطعه‌کار می‌تواند باعث بهبود حرکت نسبی ذرات ساینده در برابر زبری‌های روی سطح داخلی قطعه‌کار شود. در فرآیند پرداخت‌کـاری سایشـی مغناطیسی سنتی این حرکت نسبی تنها از طریق حرکت دورانـی قطعـه‌کـار تامین می‌شود در حالی‌که در فرآیند UAMAF ارتعاشات طولی التراسـونیک نیز به آن اضافه شده و باعث برداشـته شـدن بیشـتر زبـری‌هـا از روی سـطح داخلی قطعه‌کار می‌شود. دامنه ارتعاشات التراسونیک با تغییر توان ورودی بـه منبع تغذیه تغییر می‌کند.

3- نتایج و بحث

در ادامه تاثیر ارتعاشات التراسونیک، زمان پرداخت‌کاری، شماره مش، نوع ذره ساینده بر درصد تغییرات زبری سطح ($\%\Delta R_a$) داخلی لوله‌های آلومنیـومی بررسی شد.

3-1- اثر زمان و ارتعاشات التراسونیک بر تغییرات زبری سطح

"شکل 5" تغییرات زبری سطح را نسـبت بـه زمـان هنگـام اسـتفاده از ذرات ساینده SiC در دو حالت MAF و UAMAF نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 5" نشان داده شده است با افزایش زمان پرداخت‌کاری تغییرات زبـری سطح افزایش یافته است. در حالـت MAF تغییـرات زبـری سـطح از 8% در مدت زمان 1 min به 22% در مدت زمان 5 min افزایش یافته و برای حالت UAMAF تغییرات زبری سطح از 6% در مدت زمان 30 s به 33% در مدت زمان 5 min افزایش یافته است. با افزایش زمان پرداخت‌کـاری طـول مسـیر حرکت ذرات ساینده افـزایش یافتـه، در نتیجـه تعـداد بیشـتری از پسـتی و بلندهای روی سطح از بین رفته و کیفیت سطح بهبود می‌یابد. در "شـکل 5" مشاهده می‌شود که با اعمال ارتعاشات التراسونیک درصد تغییرات زبری سطح نسبت به حالت MAF افزایش قابل توجهی یافته است. دلیل این امر افـزایش مسیر حرکت ذره در حالت UAMAF است، به‌طوری که ذرات برخلاف حالت MAF کـه دارای حرکـت خطـی هسـتند (حرکـت محیطـی)، در حالـت UAMAF دارای حرکت سینوسی می‌باشند. در حالـت UAMAF ذره دارای دو حرکت است: الف) حرکت محیطی ناشی از دوران قطعـه و ب) حرکـت در راستای محور مرکزی قطعه‌کار که ناشی از اعمال ارتعاشـات التراسـونیک بـه قطعه‌کار است. ترکیب این دو حرکت با یکدیگر تولید یـک مسـیر سینوسـی برای ذرات می‌کند. مختصات ذره در هر نقطه از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} x = R\sin\theta = R\sin\omega_L t \\ z = A\sin 2\pi f t \end{cases} \quad (2)$$

که در آن x و z مختصات ذره، R شعاع قطعـه‌کـار، θ زاویـه دوران ذره، ω_L سرعت زاویه‌ای ذره، f فرکانس ارتعاشات التراسونیک و A دامنـه نوسـان است. "شکل 6" مسیر حرکت ذره را در دو حالت MAF و UAMAF نشـان داده است.

"شکل 7" تصـویر میکروسـکوپی نـوری سـطح داخلـی قطعـه‌کـار را در زمان‌های مختلف در دو حالت MAF و UAMAF نشان می‌دهد. همان‌طـور که در تصاویر مشخص است با افزایش زمان سطح قطعه هموارتر شده است.

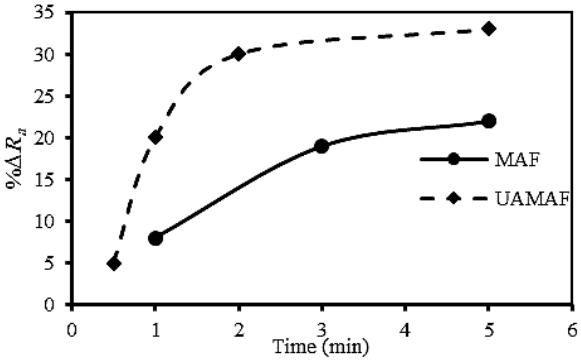


Fig. 5 $\%\Delta R_a$ versus finishing time with SiC abrasives

شکل 5 تغییرات زبری سطح نسبت به زمان پرداخت‌کاری با ذرات ساینده SiC

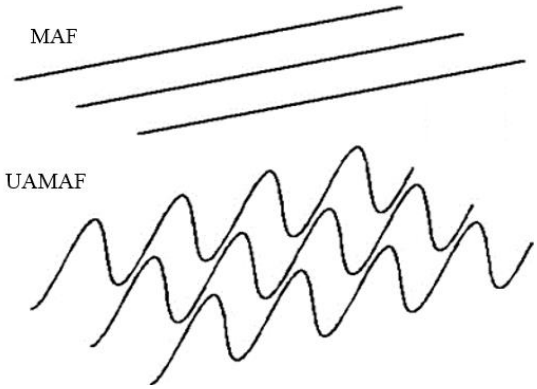
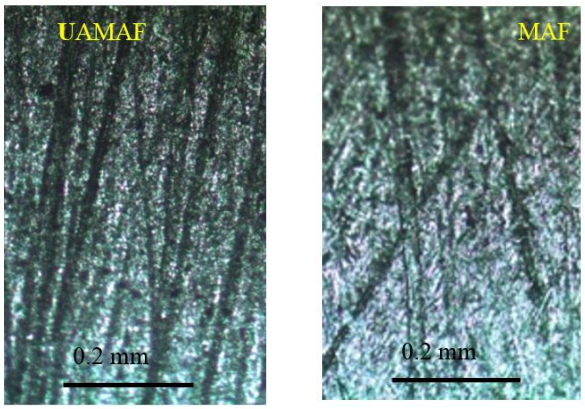
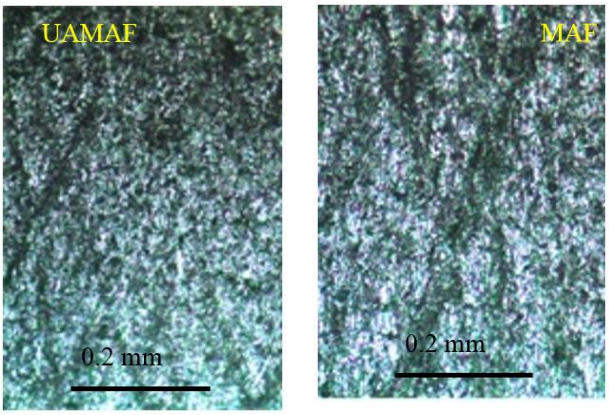


Fig. 6 Comparison of movement path of abrasives in MAF and UAMAF

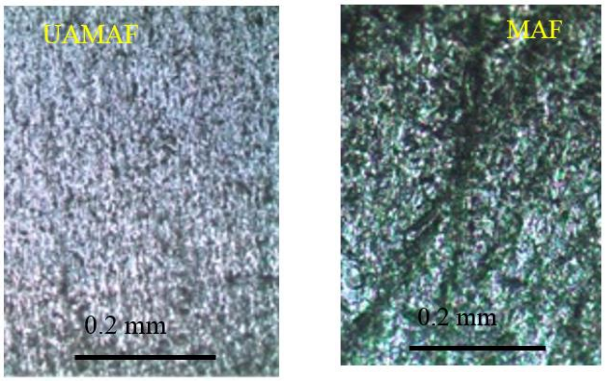
شکل 6 مقایسه مسیر حرکت درات در دو حالت MAF و UAMAF



(a)(الف)



(b)(ب)



(ج) (c)

Fig.7 Optical microscopy images of inner surface of tube in MAF and UAMAF with finishing time of a) 1min, b) 3 min, and c) 5 min (Mag. 200X)

شکل 7 تصاویر میکروسکوپی سطح داخلی قطعه‌کار در دو حالت MAF و UAMAF در زمان الف) 1 دقیقه، ب) 3 دقیقه، ج) 5 دقیقه (بزرگنمایی: 200 برابر)

3-2- اثر ارتعاشات التراسونیک، شماره مش و نوع ذره ساینده بر تغییرات زبری سطح

"شکل 8" تاثیر شماره مش ذرات SiC بر روی تغییرات زبری سطح داخلی لوله در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی به کمک ارتعاشات التراسونیک و بدون استفاده از ارتعاشات التراسونیک را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده با افزایش شماره مش ذرات ساینده درصد تغییرات زبری سطح افزایش یافته است. به‌طوری‌که در حالت بدون ارتعاشات التراسونیک تغییرات کاهش زبری ($\%\Delta R_a$) از 13% برای شماره مش 90 تا 22.5% برای مش 800 افزایش یافته است. زمان پرداخت‌کاری 5 min انتخاب شده است. در فرآیند پرداخت‌کاری مغناطیسی ذرات ساینده زیر ذرات آهن قرار گرفته‌اند و ذرات آهن تحت تاثیر میدان مغناطیسی، ذرات ساینده را بر روی سطح لوله فشار داده درون سطح نفوذ می‌کنند (شکل 4). با دوران لوله ذرات ساینده شروع به غلتش کرده و با این کار برآمدگی‌های روی سطح لوله برداشته شده و سطح پرداخت می‌شود. با افزایش شماره مش ذرات ساینده (ریز شدن ذرات) و ثابت بودن اندازه ذرات آهن، تعداد بیشتری ذرات ساینده زیر ذرات آهن قرار می‌گیرند در نتیجه فشار روی هر تک ذره کاهش می‌یابد. هرچه فشار روی هر تک ذره افزایش یابد، ذره نفوذ بیشتری درون سطح کرده و در نتیجه عمق خراش ایجاد شده روی سطح توسط هر ذره افزایش می‌یابد، از این‌رو تغییرات زبری سطح (تغییرات بهبود زبری سطح) کاهش می‌یابد. در"شکل 8" مشاهده می‌شود که با اعمال ارتعاشات التراسونیک تغییرات زبری سطح به طور قابل توجهی افزایش یافته است. برای شماره مش 90 بین MAF و UAMAF حدود 170% اختلاف و برای شماره مش 800 نیز بین MAF و UAMAF حدود 120% اختلاف وجود دارد. این نشان می‌دهد که استفاده از ارتعاشات التراسونیک به‌طور قابل توجهی زبری سطح را کاهش داده است. در واقع با کمک ارتعاشات التراسونیک ذرات علاوه بر حرکت دورانی، در راستای محور عمودی قطعه‌کار نیز شروع به نوسان می‌کنند و در نتیجه در واحد زمان مسیر خیلی بیشتری را نسبت به حالت MAF طی می‌کنند. به‌دلیل افزایش مسیر حرکت ذرات در UAMAF، ذرات می‌توانند تعداد بیشتری از زبری‌ها را از روی سطح برداشته و در نتیجه باعث بهبود بیشتر کیفیت سطح (کاهش بیشتر زبری سطح) شوند.

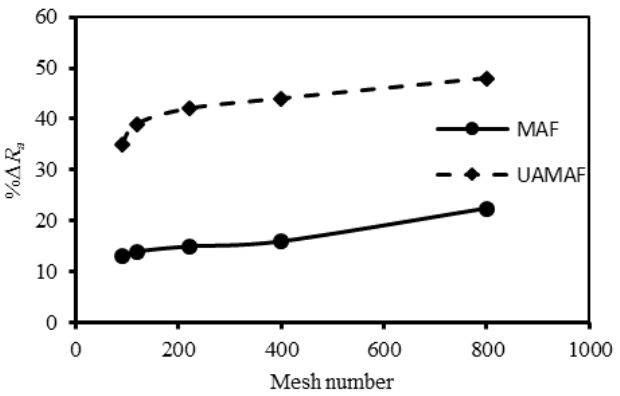


Fig. 8 $\%\Delta R_a$ versus mesh number with SiC abrasives

شکل 8 تغییرات زبری سطح براساس شماره مش ذرات ساینده SiC

در "شکل 9" تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه بعد از MAF و UAMAF برای شماره مش‌های متفاوت ذرات ساینده نشان داده شده است. همان‌طور که در تصاویر مشخص است که با ریز شدن ذرات ساینده سطح هموارتر شده و خش‌های ناشی از سمباده به طور قابل توجهی کاهش یافته است. با مشاهده تصاویر مشاهده می‌شود که استفاده از ارتعاشات التراسونیک باعث شده کیفیت سطح بهبود بیشتری یافته و سطح هموارتر شود. این تصاویر تایید می‌کنند که در فرآیند MAF و UAMAF مکانیزم پرداخت‌کاری سه جسمی حاکم بوده و ذرات حرکت غلتشی دارند (برخلاف سمباده زنی و سنگ‌زنی) و حرکت ذرات ساینده، خود باعث ایجاد خش‌های عمیق نشده است. با نگاه دقیق‌تر به تصاویر می‌توان دریافت، برای ذرات درشت در حالت MAF همان‌طور که در "شکل 9 الف و ب" نشان داده شده است خش‌های موازی دیده می‌شود که نشانگر این است که مکانیزم غالب، سایش دو جسمی است، چون ذرات ساینده درشت هستند زیر ذرات مغناطیس قرار نگرفته و نمی‌غلتند، در حالی که در ذرات ریز، همان‌طور که در "شکل 9 ج تا ه" نشان داده شده حرکت ذرات به‌صورت غلتش بوده و مکانیزم غالب، سایش سه جسمی است. در حالی‌که در حالت UAMAF هم برای ذرات ریز و هم برای ذرات درشت سایش سه جسمی مشاهده می‌شود. دلیل آن این است که بخاطر حرکت ارتعاشی قطعه کار، ذرات حرکت مستقیم نداشته و ارتعاش، ذرات را به غلتش وادار می‌کند.

در "شکل 10" تغییرات زبری سطح برای دونوع ذره ساینده SiC و الماس با شماره مش 800 در دو حالت MAF و UAMAF با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است تغییرات زبری سطح در هر دو حالت برای ذرات ساینده الماس بیشتر است (در حالت MAF، 72% و در حالت UAMAF، 10% بیشتر است). در واقع ذرات الماس سطح با کیفیت بهتر (زبری کمتر) تولید کرده است که آن به‌دلیل سختی بالاتر ذرات الماس نسبت به ذرات SiC است. الماس به‌دلیل سختی بالاتر توانسته است تعداد قله‌ها و ناهمواری‌های بیشتری را از روی سطح بردارد. "شکل 11" تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح پرداخت شده با ذرات الماس و SiC را در حالت MAF و UAMAF نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود کیفیت سطح هنگام استفاده از الماس بهتر است.

4- نتیجه‌گیری

در این کار اثر ارتعاشات التراسونیک، نوع ذره ساینده و شماره مش ساینده بر

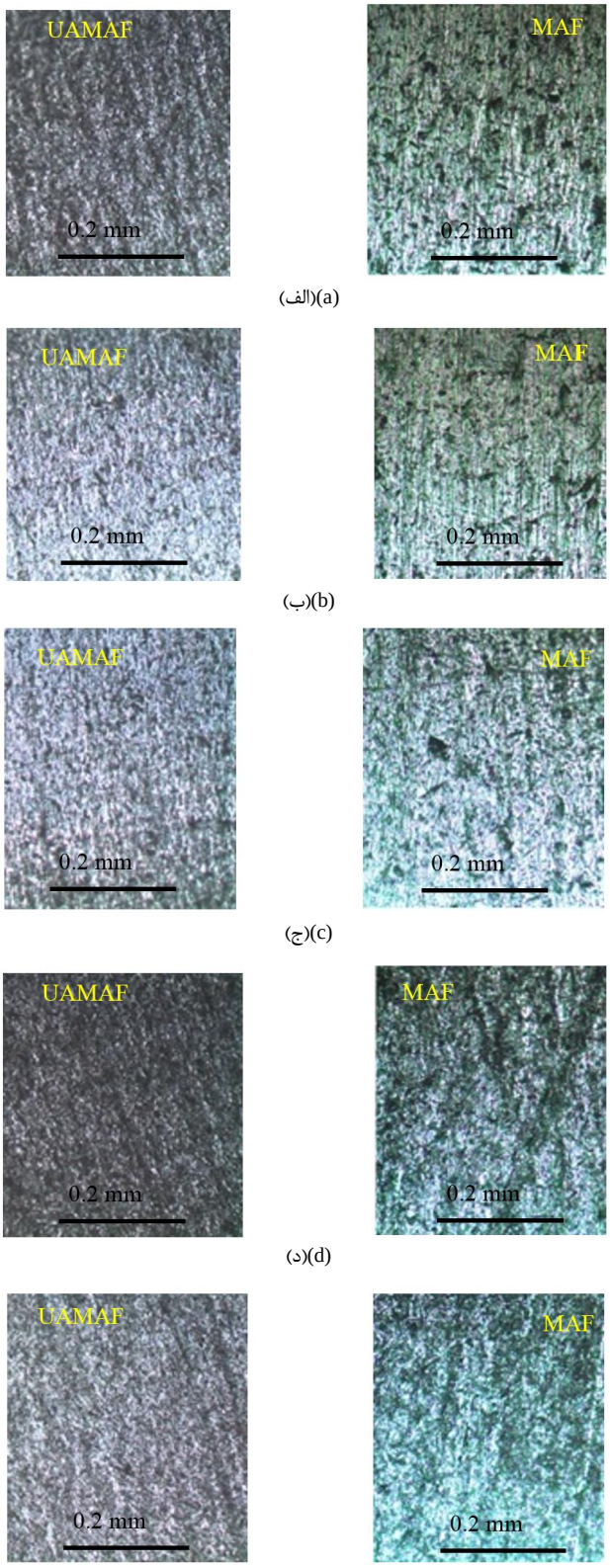


Fig. 9 Optical microscopy images of tube inner surface after MAF and UAMAF with mesh number of a)90, b)120, c)220, d)400, and e) 800 (Mag. 200X)

شکل 9 تصویر میکروسکوپ نوری سطح داخلی لوله بعد از MAF و UAMAF با شماره مش الف) 90، ب) 120، ج) 220 ، د) 400 و ه) 800 (بزرگنمایی: 200 برابر)

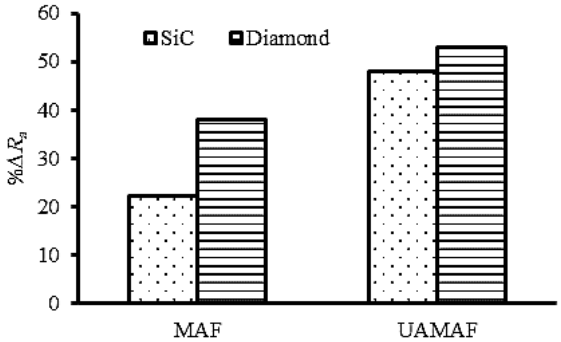


Fig. 10 $\%\Delta R_a$ for Sic and diamond abrasives with mesh number of 800

شکل 10 تغییرات زبری سطح برای دونوع ذره ساینده SiC و الماس با شماره مش 800 در دو حالت MAF و UAMAF

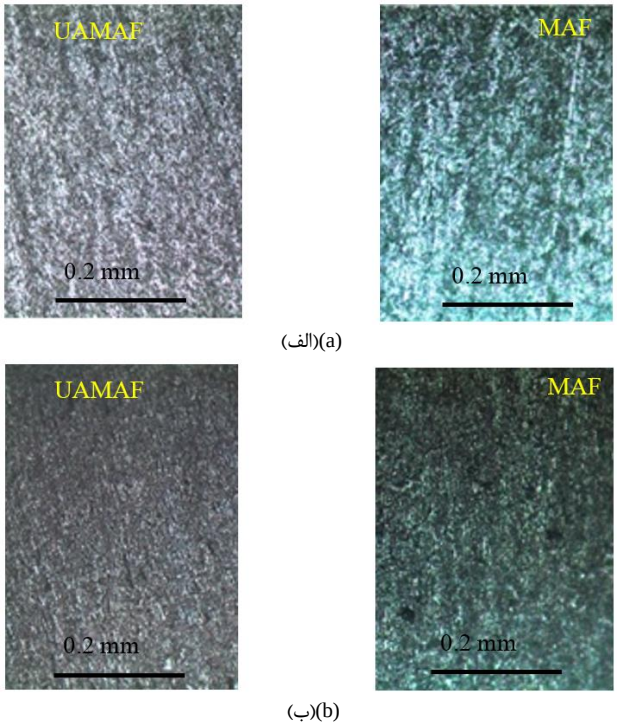


Fig. 11 Optical microscopy images of tube inner surface after MAF and UAMAF with abrasives of a) SiC, and b) diamond (Mag. 200X)

شکل 11 تصویر میکروسکوپ نوری سطح داخلی لوله بعد از MAF و UAMAF با ذرات الف) SiC و ب) الماس با شماره مش 800 (بزرگنمایی: 200 برابر)

تغییرات زبری ($\%\Delta R_a$) بر سطح داخلی قطعه‌کار لوله‌ای در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی بررسی شد. نتایج زیر به‌دست آمده است:

1- با افزایش شماره مش (ریز شدن ذرات) زبری سطح کاهش یافت. میزان کاهش زبری ($\%\Delta R_a$) در حالت MAF از13% برای مش 90 تا 22.5% برای مش 800 افزایش یافت.

2- با اعمال ارتعاشات التراسونیک تغییرات زبری سطح ($\%\Delta R_a$) افزایش قابل توجهی پیدا کرد (کیفیت سطح بهبود قابل توجهی یافت). اختلاف تغییرات زبری سطح ($\%\Delta R_a$) بین MAF و UAMAF برای شماره مش 90 حدود 170% و برای مش 800 حدود 120% مشاهده شد.

3- با افزایش زمان پرداخت‌کاری به دلیل افزایش طول مسیر حرکت ذرات ساینده، میزان تغییرات (کاهش) زبری سطح ($\%\Delta R_a$) افزایش یافت. این تغییرات (کاهش) در حالت استفاده از ارتعاشات التراسونیک بیشتر بود.

4- از بین دو نوع ذره ساینده SiC و الماس، الماس کارایی بهتری در کاهش زبری سطح از خود نشان داد.

5- تصاویر میکروسکوپ نوری، وجود مکانیزم سه جسمی پرداخت‌کاری را در حالت MAF و UAMAF نشان داد. در حالت MAF، برای ذرات درشت با شماره مش 90 و 120 مکانیزم پرداخت‌کاری دو جسمی مشاهده شد، ولی برای ذرات ریز مکانیزم پرداخت‌کاری سه جسمی غالب بود. در حالت UAMAF، هم برای ذرات درشت و هم برای ذرات ریز مکانیزم سه جسمی پرداخت‌کاری مشاهده شد.

5- فهرست علایم

A	دامنه نوسان
f	فرکانس ارتعاشات التراسونیک
R_{a_o}	زبری سطح اولیه (mμ)
R_{a_f}	زبری سطح نهایی (mμ)
$\%\Delta R_a$	درصد تغییرات زبری سطح

علایم یونانی

θ	زاویه دوران ذره
ω_L	سرعت زاویه‌ای ذره

6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها

همه نتایج و آزمایش‌های این پژوهش حاصل از طرح پژوهشی با عنوان "طراحی و ساخت دستگاه پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی به‌کمک ارتعاشات آلتراسونیک برای سطوح داخلی و بررسی پارامترهای آن بر زبری سطح قطعات فولادی زنگ نزن" در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد ثبت و اجرا شده است.

7- مراجع

[1] T. Shinmura, K. Takazawa, E. Hatano, M. Matsunaga, Study on magnetic abrasive finishing, *Annals of CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 325-328, 1990.

[2] H. Yamaguchi, T. Shinmura, Study of the surface modification resulting from an internal magnetic abrasive finishing process, *Wear*, Vol. 225, pp. 246-255, 1999.

[3] Y. Shaohui, Sh. Takeo, A comparative study: Polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 383-390, 2004.

[4] M. Roodi, H. Amirabadi, Magnetic abrasive finishing of AISI 4140 steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 9, pp. 38-46, 2013. (in Persian فارسی)

[5] P. Saraeian, H. Soleimani Mehr, B. Moradi, H. Tavakoli, Kh. Alrahmani, Study of magnetic abrasive finishing for AISI321 stainless steel, *Materials and Manufacturing Processes*, in press, doi:10.1080/10426914.2016.1140195, 2016.

[6] K. B. Judal, V. Yadava, D. Pathak, Experimental investigation of vibration assisted cylindrical magnetic abrasive finishing of aluminum workpiece, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 28, pp. 1196-1202, 2013.

[7] A. Abtahi, P. Saraeian, M. Farahnakian, Analyzing the effective mechanism on quality of the groove wall in magnetic abrasive finishing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 13, pp. 265-269, 2015. (in Persian فارسی)

[8] A. Barman, M. Das, Design and fabrication of a novel polishing tool for finishing freeform surfaces in magnetic field assisted finishing (MFAF) process, *Precision Engineering*, in press, doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.010, 2017.

[9] H. Yamaguchi, A. K. Srivastava, M. Tan, F. Hashimoto, Magnetic Abrasive Finishing of cutting tools for high-speed machining of titanium alloys, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 299–304, 2014.

[10] S. Azarrang, H. Baseri, Experimental study of the magnetic abrasive deburring of stainless steel drilled parts, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 19-26, 2014. (in Persian فارسی)

[11] K. Zhou, Y. Chen1, Z. W. Dul, F. L. Niu, Surface integrity of titanium part by ultrasonic magnetic abrasive finishing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, No. 5, pp. 997–1005, 2015.

[12] R. S. Mulik, P. M. Pandey, Mechanism of surface finishing in ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing process, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, No. 12, pp. 1418–1427, 2010.

[13] R. S. Mulik, P. M. Pandy, Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel using unbonded SiC abrasives, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 29, No. 5, pp. 68-77, 2011.

[14] S. Khalaj Amineh, A. Fadaei Tehrani, P. Mosaddegh, A. Mohammadic, A comprehensive experimental study on finishing aluminum tube by proposed UAMAF process, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 30, No. 1, pp. 93-98, 2015.

[15] K. B. Judal, V. Yadava, D. Pathak, Experimental investigation of vibration assisted cylindrical–magnetic abrasive finishing of aluminum workpiece, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 28, No. 11, pp. 1196-1202 , 2013.

[16] H. Yun, B. Han, Y. Cheng, M. Liao, Internal finishing process of alumina ceramic tubes by ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, No. 1, pp. 727–734, 2016.

[17] Y. Wang, D. Hu, Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, No. 2, pp. 43-49, 2005.