

Synergistic Effect of Rotating Magnetic Field and Ultrasonic Vibrations in Magnetorheological Abrasive Flow Finishing

Yahya Choopani^{1*}, Mohsen Khajezadeh², Mohammad Reza Razfar²

¹Department of Mechanical Engineering, Meybod University, Meybod, Iran.

²Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT

This study employed rotating magnetic fields and ultrasonic vibrations as an effective solution to overcome the limitations associated with the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process. To this end, first, an industrial prototype of the MRAFF setup was designed and fabricated. After preparing the magnetorheological polishing (MRP) fluid, a rotating magnetic field was applied, and subsequently, ultrasonic vibrations were applied to the workpiece in a direction perpendicular to the fluid flow. In order to evaluate the efficiency of the proposed technique, the effect of processing time on three indices, i.e., surface roughness rate, finishing rate, and material removal rate, in aluminum alloy 2024 tubes was investigated. The results indicated that during the first 10 minutes of processing, besides a decrease observed in the surface roughness ratio, the finishing rate and material removal rate also increased; however, due to the destructive effects of abrasive particles, the continuation of the process caused a re-increase in the surface roughness. Microscopic images not only confirmed these findings but also indicated that under optimal conditions, in addition to creating a uniform surface, the proposed technique reduced the roughness of the inner surface of the tubes by 98%. As a result, this method offers a promising prospect as an efficient solution for finishing and deburring inner surfaces, especially in longer tubes.

KEYWORDS

Rotating magnetic field, ultrasonic vibrations, surface roughness ratio, finishing rate, material removal rate.

*Corresponding Author: Email: Choopani@meybod.ac.ir

1. Introduction

Abrasive flow machining (AFM) was developed in the 1960s by Extrude Hon for the deburring of phantom jet parts [1]. The AFM process is an advanced process based on flowing abrasive viscoelastic media over a workpiece under pressure for chipping and surface finishing [2] and [3]. Today, this technology is widely used in the medical industry (knee prostheses) [4], aerospace (engine blades) [5], automotive industry (injector nozzles) [6], and surface modification of 3D printed parts [7]. Many advantages of AFM have been reported [8]. Nonetheless, the low material removal rate and lack of control over particle movement are its main limitations, which have led to the development of hybrid techniques, such as combining it with ultrasonic vibrations and using a magnetic field.

A review of the literature shows that there are scattered studies at the national level on the separate application of magnetic fields [9], and the simultaneous combination of rotating magnetic fields and ultrasonic vibrations in the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process has so far been neglected in the research at the national level. Even in international studies, this issue has been addressed in a limited and unsystematic manner [10]. The present research systematically studies the interaction between these two factors and their synergistic effect on the finishing efficiency of aluminum alloy 2024 tubes.

2. Materials and method

The MRAFF process, using magnetic fields and ultrasonic vibrations, consists of five main parts, including the abrasive flow finishing (AFF) device, permanent magnet rotation mechanism, ultrasonic vibration system, workpiece fixture, and the magnetorheological polishing (MRP) fluid, a schematic of which is presented in Fig. 1.

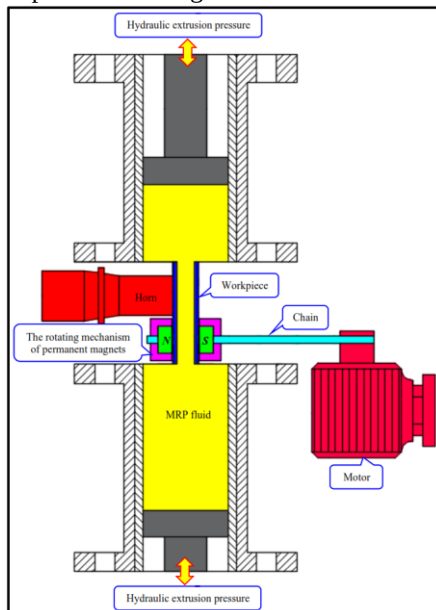


Fig. 1. Principles of the MRAFF process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations.

To make the MRP fluid in this study, iron particles with an average grain size of 100 microns (26.6% by volume), 180-grit Silicon Carbide (SiC) abrasive (13.4% by volume), and a paraffin oil-containing viscoplastic carrier (48% by volume) and the RENOLIT MP grease (12% by volume) were used.

In this study, aluminum alloy 2024 tubes with an inner diameter of 12 mm, an outer diameter of 18 mm, and a length of 180 mm were used as workpieces. The material removal rate was calculated by measuring the difference in mass of the samples using a digital scale with an accuracy of 0.01 mg. The surface roughness was also measured at five different points perpendicular to the machining flow direction using a MarSurf PS 10 roughness tester.

3. Results and discussion

3.1. The effect of processing time on output parameters

Fig. 2 (a-b) shows the effect of the processing time of the suggested process on the surface roughness ratio and the finishing rate. The figure clearly shows that initially, due to the large number of abrasive particles colliding with the surface roughness peaks, the processing is remarkably effective, leading to a rapid reduction in the surface roughness ratio (to 0.054 in the first 5 minutes) and an increase in the finishing rate (to 0.06). This process reaches its peak between 5 and 10 minutes, resulting in the maximum reduction in roughness (up to 0.09) and the highest increase in finishing rate (up to 0.083). However, after 10 minutes, with the surface roughness removed, the process efficiency decreases and the trend reverses; so that by 15 minutes, the surface roughness increases up to 0.044 and the finish rate decreases down to 0.054, indicating a decline in surface quality.

As shown in Fig. 2-c, as the processing time of the suggested process increases, the material removal rate increases significantly. This increase is attributable to the combined motion of the abrasive particles, which undergo a helical motion (caused by the reciprocating flow of the MRP fluid and the rotation of the magnets) and a sinusoidal motion (due to the vibration of the workpiece). This motion combination causes the particles to collide with surface irregularities at a certain angle. As time increases, the number of these collisions increases, and the vibration of the workpiece also increases the depth of penetration of the particles by applying a radial force. After 5 minutes, the removal rate reaches its maximum at that stage (2.33 mg/min), because the maximum surface roughness is provided. As the surface becomes more uniform at 10 minutes, the rate reaches 3.4 mg/min, but by 15 minutes, this value increases to 6.26, indicating a positive effect of increasing time on the penetration depth of particles and an increase in the total shear force due to extrusion pressure, rotation of magnets, and ultrasonic vibrations.

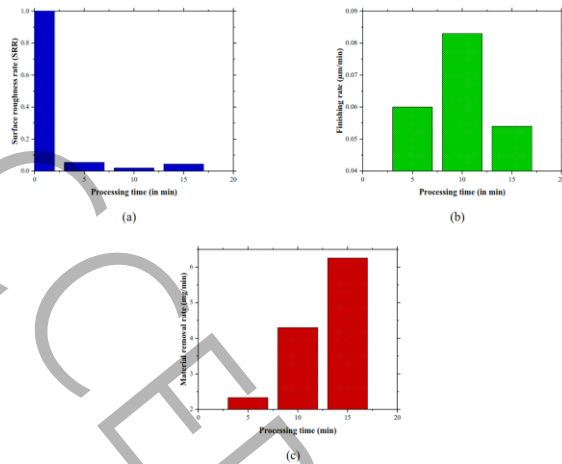


Fig. 2. Effect of processing time of the proposed process on (a) surface roughness ratio, (b) finishing rate ($\mu\text{m}/\text{min}$), and (c) material removal rate (mg/min).

3.2. Comparison of surface morphology before and after finishing

Comparing actual images (Figs. 3-b and 3-c) shows that the initial surface features significant roughness after manual reaming and drilling to the extent that the surrounding environment has a blurred reflection; however, after polishing through the proposed process, a smooth and uniform surface is obtained that provides a clear reflection of the surrounding environment. The scanning electron microscopy (SEM) images (Figs. 3-d and 3-e) also confirm that the initial operation caused defects, such as grooves and scratches, and increased the surface roughness to $1.2783 \mu\text{m}$; however, the suggested process completely eliminated these defects and reduced the roughness to $0.0255 \mu\text{m}$.

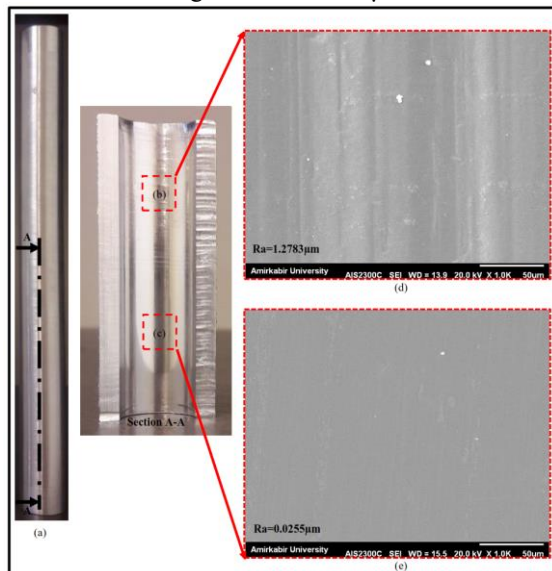


Fig. 3. Actual images and SEM images of the surface morphology of the samples: (a) a 2024 aluminum alloy sample, (b and d) after initial machining, and (c and e) after the proposed process.

4. Conclusion

The findings show that the highest improvement in surface quality occurs within the first 10 minutes of processing, reducing the surface roughness ratio down to 0.09 and increasing the finishing rate up to 0.083. The material removal rate improves to $6.26 \text{ mg}/\text{min}$ at 15 minutes. Microscopic images confirm a 98% reduction in roughness and the creation of a uniform surface.

References

- [1] A. Fletcher, J. Hull, J. Mackie, S. Trengove, Computer modelling of the abrasive flow machining process, in: Proceedings of International Conference on Surface Engineering: Toronto, Canada, (1990) 592-601.
- [2] P. Davies, A. Fletcher, The assessment of the rheological characteristics of various polyborosiloxane/grit mixtures as utilized in the abrasive flow machining process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 209(6) (1995) 409-418.
- [3] R. Williams, K. Rajurkar, Stochastic modeling and analysis of abrasive flow machining, Trans the American Society of Mechanical Engineers (ASME), Journal of Engineering for Industry, 114 (1) (1992) 74-81.
- [4] M. Sarkar, V. Jain, Nanofinishing of freeform surfaces using abrasive flow finishing process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(9) (2017) 1501-1515.
- [5] Y. Fu, X. Wang, H. Gao, H. Wei, S. Li, Blade surface uniformity of blisk finished by abrasive flow machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(5) (2016) 1725-1735.
- [6] D. Jung, W. Wang, S. Hu, Microscopic geometry changes of a direct-injection diesel injector nozzle due to abrasive flow machining and a numerical investigation of its effects on engine performance and emissions, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 222(2) (2008) 241-252.
- [7] J. Guo, C. Song, Y. Fu, K.H. Au, C.W. Kum, M.H. Goh, T. Ren, R. Huang, C.-N. Sun, Internal surface quality enhancement of selective laser melted inconel 718 by abrasive flow machining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 142(10) (2020) 101003.
- [8] N. Dixit, V. Sharma, P. Kumar, Research trends in abrasive flow machining: A systematic review, Journal of manufacturing Processes, 64 (2021) 1434-1461.
- [9] M.R. Shabgard, F. Arabzadeh Tabriz, A. Gholipoor, Experimental study of the effects of abrasive particle size and work piece hardness in Magnetic abrasive flow Machining, Modares Mechanical Engineering, 16(8) (2016) 131-138, (in Persian).
- [10] Y. Choopani, M.R. Razfar, M. Khajehzadeh, M. Khosrojerdi, Design and development of ultrasonic assisted-rotational magnetorheological abrasive flow finishing (UA-RMRAFF) process, Applied Acoustics, 197 (2022) 108950.

اثر هم‌افزایی میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت در پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال

یحیی چوپانی^{۱*}، محسن خواجه‌زاده^۲، محمدرضا رازفر^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه میبد، میبد، ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

چکیده

در این مطالعه، از میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت به‌عنوان راه‌حلی مؤثر برای رفع چالش‌های فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. برای تحقق این هدف، ابتدا یک نمونه صنعتی از فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال طراحی و ساخته شد. پس از آماده‌سازی سیال پولیشکاری مگنتورئولوژیکال، میدان مغناطیسی دوار اعمال شد و در نهایت، ارتعاشات فراصوت در جهت عمود بر جریان سیال به قطعه‌کار اضافه گردید. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، تأثیر زمان پردازش بر سه شاخص نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده در لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ بررسی شد. نتایج نشان داد که در ۱۰ دقیقه نخست پردازش، علاوه بر کاهش نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده نیز افزایش یافت؛ اما تداوم فرآیند، به‌دلیل اثرات مخرب ذرات ساینده، منجر به افزایش مجدد زبری سطح شد. تصاویر میکروسکوپی نه‌تنها این یافته‌ها را تأیید کردند، بلکه آشکار ساختند که روش پیشنهادی در شرایط بهینه، علاوه بر ایجاد سطحی یکنواخت، زبری سطح داخلی لوله‌ها را تا ۹۸٪ کاهش داده است. در نتیجه، این روش به‌عنوان راهکاری کارآمد برای پرداخت و پلیسه‌گیری سطوح داخلی، به‌ویژه در لوله‌های بلند، چشم‌اندازی امیدبخش ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی

میدان مغناطیسی دوار، ارتعاشات فراصوت، نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری، نرخ برداشت ماده.

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات Email: Choopani@meybod.ac.ir

ماشین کاری جریان ساینده^۱ یکی از روش های پیشرفته ماشین کاری است که در دهه ۱۹۶۰ توسط شرکت اکستروژن هون^۲ برای پلیسه گیری بلوک های کنترل هیدرولیک در جت های فانتوم^۳ توسعه یافته است [۱]. این فرآیند شامل یک دستگاه برای تأمین فشار اکستروژن بر واسطه^۴ ساینده، یک فیکسچر برای نگهداری قطعه کار و یک واسطه ساینده متشکل از ذرات ساینده معلق در یک حامل ویسکوالاستیک است [۲]. واسطه ساینده تحت فشار اکستروژن به صورت رفت و برگشتی از داخل قطعه کار عبور کرده و با سایش ناهمواری های سطح، براده برداری را انجام می دهد [۳]. امروزه از ماشین کاری جریان ساینده در صنایع مختلفی مانند پزشکی (پروتزهای زانو) [۴]، هوافضا (پره های موتور هواپیما) [۵]، خودروسازی (نازل های انژکتور دیزل) [۶] و اصلاح سطح قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی [۷] استفاده می شود. از مزایای این روش می توان به پرداخت همزمان سطوح داخلی و خارجی با هندسه های پیچیده، ایجاد سطح یکنواخت، عدم ایجاد تنش های پسماند کششی و امکان پرداخت چندین سطح به طور همزمان اشاره نمود [۸]. با این حال، پایین بودن سرعت براده برداری و عدم کنترل حرکت ذرات ساینده از چالش های اصلی این فرآیند محسوب می شوند. برای رفع این محدودیت ها، روش های هیبریدی مانند ترکیب ماشین کاری جریان ساینده با ارتعاشات فراصوت برای افزایش نرخ براده برداری و استفاده از میدان مغناطیسی برای کنترل بهتر ذرات ساینده توسعه یافته اند.

برای افزایش نرخ برداشت ماده در فرآیند ماشین کاری جریان ساینده، می توان به مطالعه ونکاتاش و همکاران [۹] اشاره کرد. در این پژوهش، عملکرد فرآیند هیبریدی ماشین کاری جریان ساینده به کمک فراصوت^۵ برای پرداخت کاری سطح داخلی قطعات استوانه ای از جنس آلیاژ آلومینیوم ۲۰۱۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. پژوهشگران حالت های مختلف اعمال ارتعاشات فراصوت به قطعه کار، واسطه ساینده و ترکیبی از هر دو را بررسی کردند و دریافتند که حالت محوری در ماشین کاری جریان ساینده به کمک فراصوت نه تنها بازدهی فرآیند را افزایش داده، بلکه ناهمواری های سطح را به طور چشمگیری کاهش می دهد. نتایج نشان داد که پرداخت سطح نمونه ها تا ۸۵/۱۲ درصد بهبود یافته و حداکثر مقدار برداشت ماده به ۲۱/۹۳ میلی گرم رسیده است. در مطالعه ای دیگر، وانگ و همکاران [۱۰] فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده به کمک فراصوت چرخشی^۶ را برای بهبود عملکرد فرآیند توسعه دادند. آزمایش های آن ها بر روی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نشان داد که فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده به کمک فراصوت چرخشی در دامنه ارتعاشات فراصوت بالاتر، علاوه بر بهبود کیفیت سطح، بالاترین نرخ برداشت ماده را نیز به دست می آورد.

برای کنترل بهتر حرکت ذرات ساینده در فرآیند ماشین کاری جریان ساینده، می توان به مطالعه سینگ و شان [۱۱] اشاره نمود که با توسعه فرآیند ماشین کاری جریان ساینده مغناطیسی^۷، دقت پرداخت کاری را از طریق کنترل ذرات ساینده مغناطیسی بهبود بخشیدند. آن ها با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، رفتار ذرات ساینده حاوی ذرات فرومغناطیس را بهینه کرده و دریافتند که این روش نه تنها کنترل حرکت ذرات ساینده مغناطیسی را افزایش می دهد، بلکه راندمان پرداخت کاری را نیز بهبود می بخشد. در تحقیقی دیگر، داس و همکاران [۱۲] فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال^۸ را برای نانوپرداخت کاری سطوح پیچیده معرفی کردند. این فرآیند ترکیبی از ماشین کاری جریان ساینده و پرداخت کاری مگنتورئولوژیکال^۹ است که در آن از سیالی حاوی ذرات ساینده و ذرات آهن کربونیل^{۱۰} استفاده می شود. با اعمال میدان مغناطیسی، ویسکوزیته سیال تغییر کرده و کنترل دقیق تری روی پرداخت کاری ایجاد می شود. نتایج نشان داد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی و تعداد سیکل های پرداخت کاری، کاهش زبری سطح به صورت معناداری بهبود می یابد. در مطالعه دیگری، چوپانی و همکاران [۱۳] فرآیند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده

¹ Abrasive flow machining (AFM)

² Extrude Hone

³ Phantom jets

⁴ Media

⁵ Ultrasonic assisted abrasive flow machining (UAAFM)

⁶ Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing (RUA-AFF)

⁷ Magneto abrasive flow machining (MAFM)

⁸ Magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF)

⁹ Magnetorheological finishing (MRF)

¹⁰ Carbonyl iron particles (CIPs)

مگنتورئولوژیکال^۱ را برای نانو پرداخت کاری لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ ارائه کردند. در این روش، با ایجاد یک میدان مغناطیسی چرخشی ناشی از دوران آهنرباهای دائم در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال، سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال^۲ حاوی ساینده‌ها، ذرات آهن و روغن پارافین، علاوه بر حرکت رفت و برگشتی، حرکت دورانی نیز بر روی ناهمواری‌های سطح قطعه کار انجام می‌دهد. این امر باعث افزایش طول تماس دانه‌های ساینده فعال با زبری‌های سطح می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده مگنتورئولوژیکال روشی کاربردی و مؤثر برای پرداخت کاری است که زبری سطح را تا ۲۶/۳ نانومتر کاهش و میزان برداشت ماده را تا ۴۱ میلی‌گرم در ۱۵ دقیقه افزایش می‌دهد. همچنین، این فرآیند بافت سطحی مناسبی ایجاد می‌کند که ظرفیت نگهداری روغن را بهبود بخشیده و خواص تریبولوژیکی سطح را ارتقا می‌بخشد. در تلاشی دیگر، چوپانی و همکاران [۱۴] فرآیند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک ارتعاشات فراصوت^۳ را توسعه دادند تا زمان پرداخت کاری را کاهش دهند. نتایج نشان داد که این روش نه تنها نرخ برداشت ماده را افزایش می‌دهد، بلکه سطحی یکنواخت با زبری ۲۵/۵ نانومتر (در حد آینه) و بدون عیوب سطحی ایجاد می‌کند. همچنین، فرآیند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک ارتعاشات فراصوت در مقایسه با فرآیند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده مگنتورئولوژیکال (بدون ارتعاشات فراصوت)، اصلاح سطح را با سرعت بیشتری انجام می‌دهد. در پژوهش اخیر، دیکسیت و همکاران [۱۵] فرآیند ماشین کاری جریان ساینده مغناطیسی به کمک فراصوت^۴ را توسعه دادند تا عملکرد پرداخت کاری را بهبود بخشند. نتایج نشان داد که ارتعاشات فراصوت با فرکانس بالا، حرکت ذرات ساینده را تقویت می‌کند و در نتیجه، برداشت ماده بهتر و کیفیت سطح بالاتری حاصل می‌شود. تحت شرایط بهینه پارامترهای فرآیند، پرداخت سطح نمونه‌ها تا ۵۴/۴۲ درصد بهبود یافت و حداکثر میزان برداشت ماده نیز به ۲۶/۶۲ میلی‌گرم رسید.

در مطالعات داخلی، پژوهش‌های محدودی در زمینه بهبود عملکرد فرآیند ماشین کاری جریان ساینده انجام شده است. به عنوان مثال، شبگرد و همکاران [۱۶] تأثیر سرعت دورانی قطعه کار، اندازه ذرات ساینده و سختی قطعه کار را بر ماشین کاری دورانی جریان ساینده^۵ روی فولاد ابزار گرم‌کار بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش سرعت دورانی، نرخ برداشت ماده را بالا برده و زبری سطح را کاهش می‌دهد. همچنین، ذرات ریزتر ساینده موجب کاهش نرخ براده برداری و بهبود صافی سطح شدند، درحالی‌که افزایش سختی قطعه کار نرخ برداشت ماده را کاهش داد اما کیفیت سطح را بهبود بخشید. در مطالعه‌ای مشابه [۱۷]، تأثیر شدت میدان مغناطیسی، اندازه ذرات و سختی قطعه کار بر ماشین کاری جریان ساینده مغناطیسی^۶ بررسی شد. افزایش شدت میدان مغناطیسی منجر به بهبود همزمان نرخ برداشت ماده و صافی سطح شد. همچنین، ذرات ریزتر ساینده نتایج مشابهی داشتند و افزایش سختی قطعه کار نیز تأثیراتی مشابه پژوهش قبلی نشان داد. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب پارامترهای بهینه در فرآیندهای ماشین کاری جریان ساینده تأکید دارند.

بررسی جامع پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات داخلی در زمینه کاربرد جداگانه میدان مغناطیسی پراکنده هستند [۱۷] اما ترکیب همزمان میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال تاکنون در تحقیقات داخلی مورد توجه قرار نگرفته است. حتی در سطح بین‌المللی نیز، مطالعات محدودی مانند پژوهش چوپانی و همکاران [۱۴] به بررسی اولیه این موضوع پرداخته‌اند، اما اثر ترکیبی این دو روش به صورت نظام‌مند و جامع تحلیل نشده است. این پژوهش به مطالعه سیستماتیک برهم‌کنش میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت و تأثیر هم‌افزایی آن‌ها بر راندمان پرداخت کاری در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال می‌پردازد. برای دستیابی به این هدف، یک نمونه صنعتی از فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال طراحی و ساخته شد و پس از آماده‌سازی سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال، میدان مغناطیسی دوار اعمال گردید و همزمان ارتعاشات فراصوت در جهت عمود بر جریان سیال به قطعه کار افزوده شد. نتایج اولیه حاکی از کاهش چشم‌گیر زمان

¹ Rotational-magnetorheological abrasive flow finishing (R-MRAFF)

² Magnetorheological polishing (MRP)

³ Ultrasonic assisted-rotational magnetorheological abrasive flow finishing (UA-RMRAFF)

⁴ Ultrasonic-assisted magnetic abrasive flow machining (UAMAFM)

⁵ Rotational abrasive flow machining (RAFM)

⁶ Magnetic abrasive flow machining (MAFM)

پرداختکاری و بهبود قابل توجه پرداخت سطح است، به طوری که ترکیب این دو روش منجر به کاهش ۹۸٪ در زبری سطح نسبت به روش‌های متداول شده است. عملکرد این روش با بررسی تأثیر زمان پردازش بر نسبت زبری سطح، نرخ پرداختکاری و نرخ برداشت ماده در لوله‌های آلایژ آلومینیوم ۲۰۲۴ ارزیابی شد. همچنین، ویژگی‌های سطح نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری^۱ و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ مورد تحلیل دقیق قرار گرفت. این تحقیق با پر کردن شکاف موجود در ادبیات موضوع، دستاوردهای نوینی در بهینه‌سازی فناوری پرداخت سطح ارائه می‌دهد.

۲- اصول فرآیند پرداختکاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت

شکل ۱ مکانیزم پرداختکاری سطح در فرآیند پرداختکاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این فرآیند، ابتدا یک میدان مغناطیسی دوار توسط آهنرباهای دائم در اطراف سطح خارجی قطعه کار لوله‌ای ایجاد می‌شود که بر رفتار سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال (متشکل از ذرات آهن، ساینده کاربید سیلیسیوم^۳ و حامل ویسکوپلاستیک) اثر می‌گذارد. همزمان، ارتعاشات فراصوت از طریق یک هورن^۴ که عمود بر جریان سیال قرار دارد به قطعه کار اعمال می‌شود. در این سیستم، هر دانه ساینده تحت تأثیر سه مؤلفه نیرو و سرعت عمل می‌کند: نیروی محوری^۵ و سرعت محوری^۶ ناشی از فشار اکستروژن هیدرولیک، نیروی برشی مماسی^۷ و سرعت مماسی^۸ حاصل از چرخش آهنرباها، و نیروی شعاعی^۹ و سرعت قطعه کار^{۱۰} ناشی از ارتعاشات فراصوت. ترکیب این عوامل باعث می‌شود دانه‌های ساینده با سرعت برآیند^{۱۱} و تحت نیروی برآیند^{۱۲} به صورت مکرر و با زاویه^{۱۳} آلفا (زاویه برخورد) به سطح برخورد کنند. بنابراین، سرعت برآیند، نیروی برآیند، و زاویه برخورد روی ذره ساینده (شکل ۱-د) را می‌توان به ترتیب از روابط (۱)، (۲) و (۳) محاسبه نمود:

$$V_R = \sqrt{V_a^2 + V_w^2} \quad (1)$$

$$F_R = \sqrt{F_a^2 + F_r^2} \quad (2)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(V_a/V_w) \quad (3)$$

نیروی فرورفتگی^{۱۴} که از ترکیب نیروی مغناطیسی، فشار اکستروژن هیدرولیکی و ارتعاشی حاصل می‌شود، عمق نفوذ ساینده‌ها را افزایش می‌دهد، درحالی‌که نیروی محوری مسئول تشکیل میکرو براده‌ها و نیروی برشی مماسی نقش اصلی در حذف ناهمواری‌ها را ایفا می‌کند. این مکانیزم دوگانه از یک سو با حرکت سینوسی دانه‌ها در مسیر مارپیچی، تعامل آن‌ها با سطح را افزایش داده و نرخ برداشت ماده را بهبود می‌بخشد، و از سوی دیگر با ایجاد الگوی هاشور متقاطع روی سطح، ظرفیت نگهداری روغن و خواص تریبولوژیکی را ارتقا می‌دهد. نیروی برشی کل^{۱۵} در این سیستم از جمع برداری سه مؤلفه نیروی محوری، نیروی برشی مماسی و نیروی برآیند حاصل می‌شود (معادله (۴)).

$$\vec{F}_c = \vec{F}_a + \vec{F}_t + \vec{F}_r \quad (4)$$

¹ Optical microscope

² Scanning electron microscopy (SEM)

³ Silicon carbide (SiC)

⁴ Horn

⁵ Axial force (F_a)

⁶ Axial velocity (V_a)

⁷ Tangential cutting force (F_t)

⁸ Tangential cutting velocity (V_t)

⁹ Radial force (F_r)

¹⁰ Workpiece velocity (V_w)

¹¹ Resultant velocity (V_R)

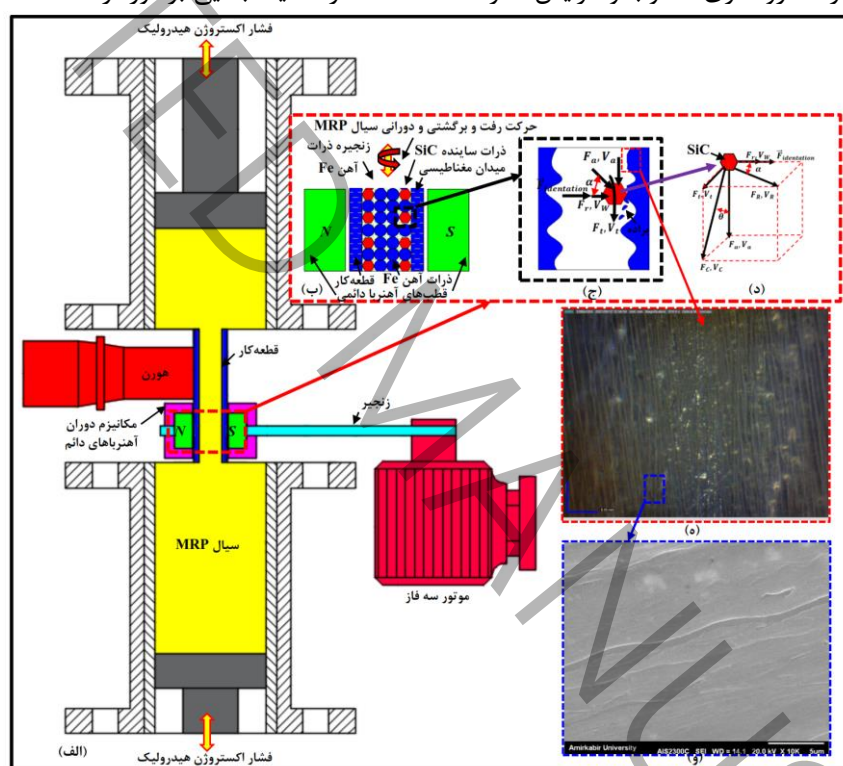
¹² Resultant force (F_R)

¹³ Angle of α

¹⁴ Indentation force ($F_{\text{indentation}}$)

¹⁵ Total cutting force (F_C)

برای تایید مفاهیم مطرح شده و درک عمیق تر عملکرد پرداختکاری فرآیند پرداختکاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت، بافت سطح قطعه کار پس از پرداختکاری با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل های ۱-ه و ۱-و بررسی شد. نتایج نشان می دهد که ذرات ساینده در این فرآیند تحت تاثیر دو مکانیسم حرکتی همزمان عمل می کنند: (۱) حرکت مارپیچی ناشی از حرکت رفت و برگشتی (بر اثر فشار اکستروژن هیدرولیک) و حرکت دورانی (بر اثر میدان مغناطیسی دوار) سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال، و (۲) حرکت نوسانی با الگوی سینوسی که در اثر ارتعاشات اعمال شده به قطعه کار ایجاد می شود. بر اساس مشاهدات انجام شده (شکل های ۱-ه، ۱-و و ۱-د)، ذرات ساینده ضمن حرکت در این مسیر ترکیبی (مارپیچی-سینوسی)، به صورت متناوب با ناهمواری های سطحی در زاویه مشخصی برخورد می نمایند. این مکانیسم منجر به ایجاد الگوی متقاطع مورب بر روی بافت سطح می شود که مشابه فرآیند هونینگ، اما با دقت و پرداخت سطحی بالاتر است. شیارهای متقاطع تشکیل شده قادر به حفظ روغن و ایجاد لایه ای روان کار دائمی هستند که بهبود روانکاری، کاهش اصطکاک و ارتقای خواص تریبولوژیکی سطح را در پی دارد. این ویژگی منحصر به فرد به ویژه در کاربردهای حساسی مانند سیلندرهای موتور، بوش ها و سطوحی که نیازمند روانکاری مطلوب و افزایش عمر قطعه هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است.



شکل ۱. اصول فرآیند پرداختکاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت: الف) شماتیک کلی فرآیند، ب) شماتیک ناحیه پرداختکاری، ج) نیروها و مولفه های سرعت اعمال شده بر ذره ساینده در ناحیه پرداختکاری، د) نمودار جسم آزاد نیروها و سرعت های وارد بر ذره ساینده، ه) تصویر میکروسکوپ نوری از بافت سطح پرداخت شده و و) تصویر میکروسکوپی از بافت سطح پرداخت شده.

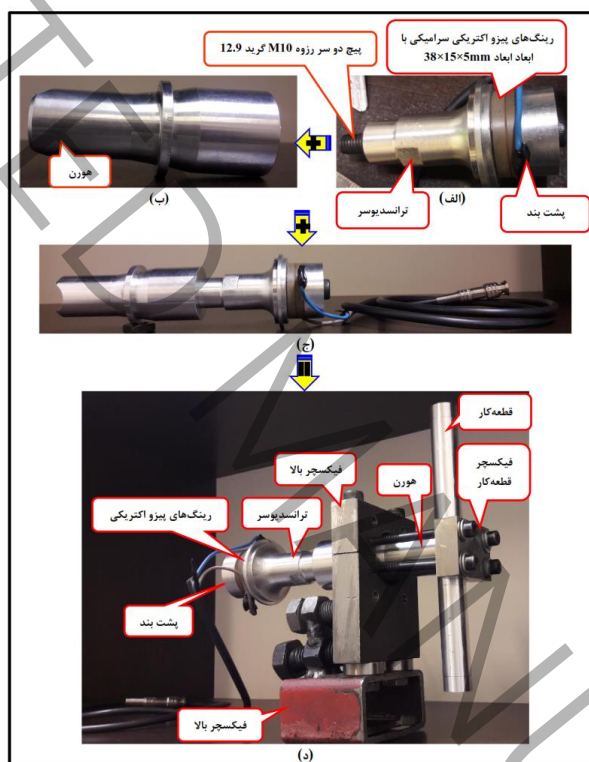
Fig. 1. Principles of the magnetorheological abrasive finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations: a) overall schematic of the process, b) schematic of the finishing zone, c) forces and velocity components applied to the abrasive particle in the finishing zone, d) free-body diagram of the forces and velocities acting on the abrasive particle, e) optical microscope of the finished surface texture, and f) microscopic image of the finished surface texture.

۳- مواد و روش های آزمایشگاهی به همراه جزئیات اجرا

۳-۱- سیستم ارتعاشات فراصوت در فرآیند پرداختکاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال

در این پژوهش، ارتعاشات فراصوت عمود بر جهت جریان سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال در چهار مرحله به قطعه کار اعمال شد که جزئیات آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در مرحله اول، از یک ترانسیدوسر فراصوت ساخته شده از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات

حرارتی شده استفاده شد که شامل پیزوالکتریک‌های سرامیکی (دو عدد با ابعاد ۳۸ در ۱۵ در ۵ میلی‌متر)، پشت‌بند، بوستر، الکترودهای مسی و پیچ‌های ام ۱۰^۱ با درجه استحکام ۱۲/۹ بود و در فرکانس تشدید ۲۷۷۷۷ هرتز عمل می‌کرد (شکل ۲-الف). مرحله دوم شامل طراحی و ساخت دقیق یک هورن فراصوت از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده با ماشین‌کاری سی‌ان‌سی^۲ بود که به گونه‌ای طراحی شد تا اتصال به قطعه‌کار با حداکثر دامنه ارتعاش در سر هورن (محل اتصال به قطعه) و قرارگیری فلانچ وسط آن در گره ارتعاشی انجام شود (شکل ۲-ب). در مرحله سوم، ترانسدیوسر و هورن با پیچ مغزی ام ده به هم متصل شدند (شکل ۲-ج) و هورن با فیکسچرهای مخصوص در محل گره ارتعاشی ثابت شد (شکل ۲-د). همچنین، برای نگهداری قطعه‌کار در شرایط دینامیک و انتقال ارتعاش بهینه، فیکسچری متناسب با هندسه قطعه‌کار و هورن طراحی شد که با چهار پیچ ام ۳۶ به فیکسچر هورن بسته شد. در مرحله چهارم، دامنه ارتعاش در ناحیه پرداخت‌کاری با استفاده از تجهیزاتی شامل گپ سنسور^۴ مدل پی‌یو-۰۵ در ۱ پی‌سی^۵، تبدیل‌کننده مدل ای‌ای‌سی-۵۵۵۰۵، اسیلوسکوپ^۷ مدل ۴۲۲-۱۱، منبع تغذیه مدل ام‌پی‌اس-۳۰۰-۸۳ و واحد کنترل کامپیوتری اندازه‌گیری شد که نتیجه آن ثبت دامنه‌ای معادل ۱۰ میکرومتر در فرکانس تشدید ۲۷۷۷۷ هرتز بود (شکل ۳).



شکل ۲. چیدمان سیستم ارتعاشات فراصوت در فرآیند پرداخت‌کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال: الف) مونتاژ اجزای ترانسدیوسر شامل رینگ‌های پیزو الکتریک سرامیکی و پشت‌بند، ب) هورن فراصوت ساخته شده، ج) مونتاژ هورن فراصوت و ترانسدیوسر و د) مونتاژ سیستم فراصوت برای اعمال ارتعاشات به قطعه‌کار.

Fig. 2. Arrangement of the ultrasonic vibrations system in the magnetorheological abrasive flow finishing process: a) assembly of transducer components including piezoelectric ceramic rings and backing, b) fabricated ultrasonic horn, c) assembly of ultrasonic horn and transducer, and d) assembly of the ultrasonic system to apply vibrations to the workpiece.

¹ M10

² Computer numerical control (CNC)

³ M6

⁴ Gap sensor

⁵ PU-05x1pc

⁶ AEC-5505

⁷ Oscilloscope

⁸ MPS-3005L-3



شکل ۳: تجهیزات اندازه‌گیری دامنه ارتعاش در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت.

Fig. 3. Vibration amplitude measurement equipment in the magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations.

۳-۲- دستگاه و روش پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت

دستگاه و روش پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوت شامل پنج بخش اصلی از جمله دستگاه پرداخت کاری جریان ساینده^۱، مکانیزم چرخش آهنرباهای دائمی، سیستم ارتعاشات فراصوت، فیکسچر قطعه کار و سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال است که جزئیات آن در شکل ۴ نشان داده شده است. دستگاه پرداخت کاری جریان ساینده شامل یک سازه فولادی برای نصب اجزاء، یک پاور یونیت هیدرولیک (شامل موتور سه فاز، شیرهای برقی و پمپ) برای تأمین فشار اکستروژن، جک های هیدرولیکی بالا و پایین جهت اعمال فشار اکستروژن بر سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال، سیلندرهایی محفظه سیال، میکرو سوئیچها برای تنظیم کورس جکها، مکانیزم بازوی متحرک و پنل کنترل است. مکانیزم چرخش آهنرباهای دائم متشکل از یک موتور سه فاز (۰/۳۷ کیلووات، ۱۴۰۰ دور بر دقیقه)، یک درایو فرکانس متغیر^۲، چهار آهنربای دائمی نوع نئودیمیم-آهن-بور^۳ گرید ان ۴۵۲ با ابعاد ۲۰ در ۲۰ در ۱۰ میلی‌متر، فیکسچر آلومینیومی نگه‌دارنده آهنرباها، بلبرینگ کف‌گرد و سیستم چرخ زنجیر با نسبت انتقال ۱:۲ است. سیستم ارتعاشات فراصوت نیز شامل یک منبع تغذیه فراصوت مدل کی‌آراف ۱۵۰۰^۴، ترانسدیوسر پیزوالکتریک، هورن ساخته شده از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده برای تقویت ارتعاشات، فیکسچرهای هورن و قطعه کار و همچنین یک واحد کنترل کامپیوتری برای پایش دامنه ارتعاشات است. فیکسچر قطعه کار از جنس پلی‌آمید ضدسایش ساخته شده تا در شرایط دینامیک، موقعیت دهی و تزریق بهینه سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال را ممکن سازد. سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال نیز ترکیبی از ذرات آهن، ذرات ساینده کاربید سیلیسیوم و حامل ویسکوپلاستیک (مخلوطی از روغن پارافین و گریس) است.

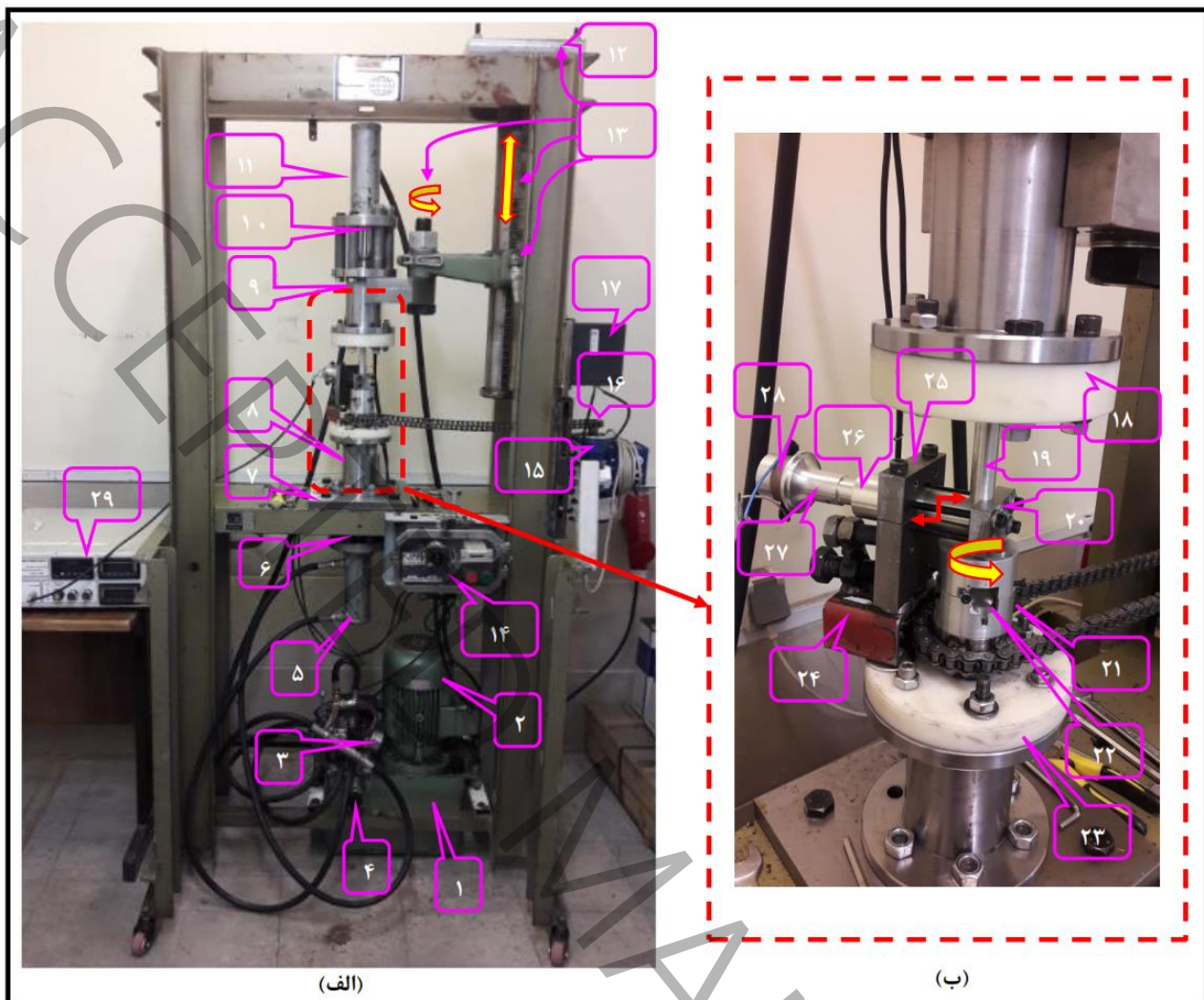
¹ Abrasive flow finishing (AFF)

² Variable frequency drive (VFD)

³ Neodymium-Iron-Boron (Nd-Fe-B)

⁴ N52

⁵ KRF1500

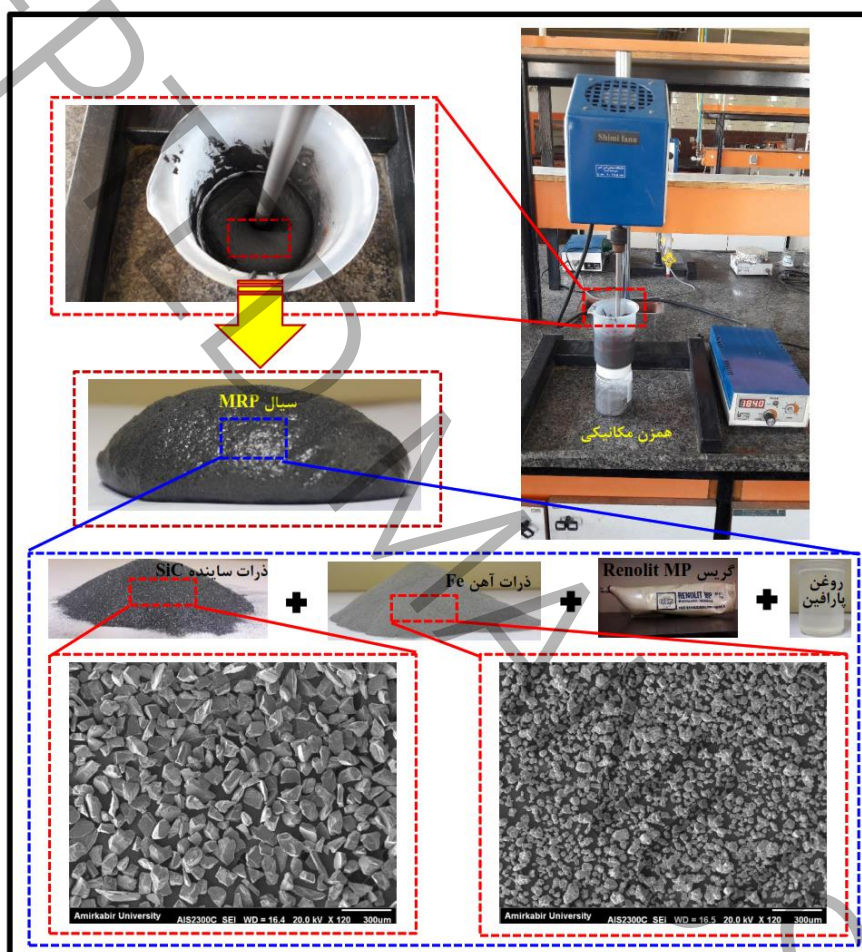


شکل ۴. (الف و ب) نمای واقعی از دستگاه و روش پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت (۱) پاور یونیت هیدرولیک، (۲) موتور سه فاز به همراه پمپ هیدرولیک، (۳) گیج فشار اکستروژن، (۴) پیچ تنظیم فشار اکستروژن، (۵) سیلندر هیدرولیک پایین، (۶) میکرو سویچ پایین، (۷) صفحه نگهدارنده پایین، (۸) سیلندر سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال پایین، (۹) سیلندر سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال بالا، (۱۰) میکرو سویچ بالا، (۱۱) سیلندر هیدرولیک بالا، (۱۲) صفحه نگهدارنده بالا، (۱۳) مکانیزم بازوی متحرک، (۱۴) کنترل پنل دستگاه، (۱۵) موتور سه فاز، (۱۶) چرخ و زنجیر، (۱۷) درایو فرکانس متغیر، (۱۸) فیکسچر قطعه کار بالا، (۱۹) قطعه کار، (۲۰) نگهدارنده قطعه کار، (۲۱) مکانیزم دوران آهنربا، (۲۲) آهنربا، (۲۳) فیکسچر قطعه کار پایین، (۲۴) فیکسچر پایین، (۲۵) فیکسچر بالا، (۲۶) هورن، (۲۷) ترانسدیوسر، (۲۸) پیزو سرامیک رینگ و (۲۹) منبع تغذیه فراصوت.

Fig. 4. (a and b) Actual view of the magnetorheological abrasive flow finishing apparatus and method assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations ((1) Hydraulic power unit, (2) Three-phase motor with hydraulic pump, (3) Extrusion pressure gauge, (4) Extrusion pressure adjustment screw, (5) Lower hydraulic cylinder, (6) Lower microswitch, (7) Lower holding plate, (8) Lower magnetorheological polishing fluid cylinder, (9) Upper magnetorheological polishing fluid cylinder, (10) Upper microswitch, (11) Upper hydraulic cylinder, (12) Upper holding plate, (13) Moving arm mechanism, (14) Device control panel, (15) Three-phase motor, (16) Wheel and chain, (17) Variable frequency drive, (18) Upper workpiece fixture, (19) Workpiece, (20) Workpiece holder, (21) Magnet rotation mechanism, (22) Magnet, (23) Lower workpiece fixture, (24) Lower fixture, (25) Upper fixture, (26) Horn, (27) Transducer, (28) Piezoceramic ring, and (29) Ultrasonic power supply.)

۳-۳- ساخت سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت

در این پژوهش، با بهره‌گیری از یافته‌های تجربی [۱۴]، برای ساخت سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال از ذرات آهن با متوسط اندازه دانه ۱۰۰ میکرون (۲۶/۶ درصد حجمی)، ساینده کاربید سیلیسیوم با شماره مش ۱۸۰ (۱۳/۴ درصد حجمی) و حامل ویسکوپلاستیک متشکل از روغن پارافین (۴۸ درصد حجمی) و گریس رنولیت ام‌پی^۱ (۱۲ درصد حجمی) استفاده شد. ابتدا ذرات آهن و ساینده کاربید سیلیسیوم مخلوط شدند، سپس گریس و روغن پارافین به تدریج در حین همزدن مکانیکی اضافه گردید. پس از یک ساعت اختلاط، یک سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال همگن و یکنواخت برای انجام آزمایش‌های فرآیند پرداخت کاری جریان سیال ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت آماده شده است. روش ساخت این سیال در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵. روش ساخت سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت.

Fig. 5. Magnetorheological polishing fluid fabrication method in the magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations.

۳-۴- روش انجام آزمایش‌های تجربی

در این پژوهش، از میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال برای افزایش نرخ برداشت ماده و کاهش زمان پرداخت کاری استفاده شده است. عملکرد این روش با بررسی تأثیر زمان پردازش بر نسبت زبری

^۱ RENOLIT MP

سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده در لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ ارزیابی گردیده است. پارامترهای بهینه دستگاه، شامل فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال، سرعت دورانی آهنرباها ۱۰۰ دور بر دقیقه و ارتعاشات فراصوت ۱۰ میکرومتر، در آزمایش‌های مقدماتی تعیین و در طول فرآیند ثابت نگه‌داشته شدند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلومینیوم ۲۰۲۴ در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. نمونه‌ها ابتدا تحت شرایط یکسان ماشین‌کاری شدند، سپس با عملیات سوراخ‌کاری و برق‌دستی آماده گردیدند. لوله‌های آلومینیومی با ابعاد قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر، قطر بیرونی ۱۸ میلی‌متر و طول ۱۸۰ میلی‌متر برای آزمایش‌ها استفاده شدند (شکل ۶). قبل و بعد از آزمایش‌ها، نمونه‌ها به مدت ۳ دقیقه در حمام فراصوت و با استون تمیز شدند. نرخ برداشت ماده با اندازه‌گیری تفاوت جرم نمونه‌ها توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌گرم محاسبه گردید. زبری سطح در ۵ نقطه مختلف و عمود بر جهت جریان ماشین‌کاری با دستگاه زبری‌سنج مدل مارسرف پی‌اس ۱۱۰ (ساخت شرکت ماهر^۲ آلمان) با طول ارزیابی ۴ میلی‌متر و طول نمونه‌برداری ۰/۲۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و میانگین نتایج گزارش گردید. در نهایت، نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده به ترتیب با روابط (۵)، (۶) و (۷) محاسبه شدند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ [۱۸].

Table 1. Chemical composition of 2024 aluminum alloy [18].

عنصر شیمیایی	درصد وزنی (%)
آلومینیوم	فلز پایه
مس	۳/۸-۴/۹
منیزیم	۱/۲-۱/۸
منگنز	۰/۳-۰/۹
سیلیکون	۰/۵
آهن	۰/۵
تیتانیوم	۰/۱۵
روی	۰/۲۵
کروم	۰/۱

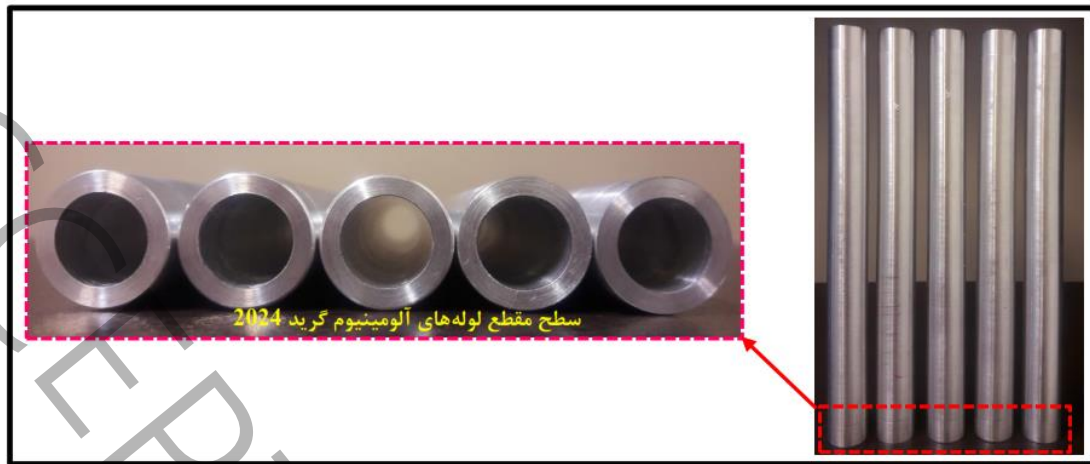
جدول ۲. خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ [۱۸].

Table 2. Mechanical properties of 2024 aluminum alloy [18].

پارامتر	مقدار
مدول یانگ (MPa)	۷۳/۱
مقاومت کششی نهایی (MPa)	۴۸۳
درصد ازدیاد طول (%) در هنگام شکست	۱۸
سختی (BHN)	۱۲۰
چگالی (Kg/m ³)	۲۸۰۰

¹ MarSurf PS 10

² Mahr GmbH



شکل ۶. تصاویر واقعی تعدادی از نمونه های لوله های آلایژ آلومینیوم ۲۰۲۴.
Fig. 6. Actual images of a number of 2024 aluminum alloy tubes samples.

$$\text{Surface roughness ratio (SRR)} = \left(\frac{\text{Final}_{Ra}}{\text{Initial}_{Ra}} \right) \quad (5)$$

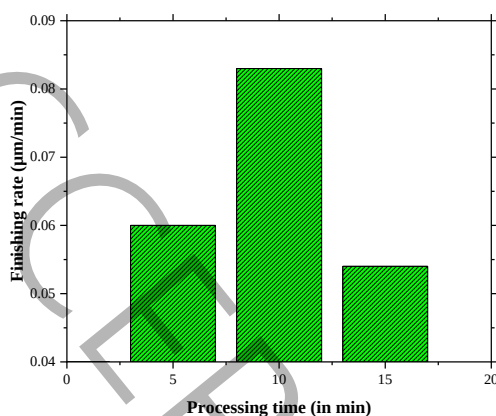
$$\text{Finishing rate } (\mu\text{m}/\text{min}) = \left(\frac{\text{Initial}_{Ra} - \text{Final}_{Ra}}{\text{Total finishing time}} \right) \quad (6)$$

$$\text{Material removal rate (mg/min)} = \left(\frac{\text{Initial weight} - \text{Final weight}}{\text{Total finishing time}} \right) \quad (7)$$

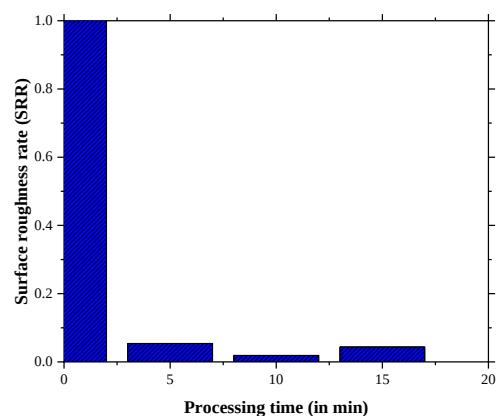
۴- نتایج و بحث

۴-۱- تأثیر زمان پردازش بر نسبت زبری سطح و نرخ پرداخت کاری

تأثیر زمان پردازش در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوت بر نسبت زبری سطح و نرخ پرداخت کاری لوله های آلومینیومی ۲۰۲۴ تحت شرایط بهینه (فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال، سرعت دورانی آهنرباها ۱۰۰ دور بر دقیقه و دامنه ارتعاشات فراصوت ۱۰ میکرومتر) در شکل ۷ نمایش داده شده است. نتایج نشان می دهد که در ابتدای فرآیند، پردازش به طور چشمگیری مؤثر است، اما با گذشت زمان و کاهش ناهمواری های سطح، از کارایی آن کاسته می شود. این رفتار به این دلیل است که با افزایش زمان پردازش، تعداد ذرات ساینده موجود در سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال که در هر ثانیه به سطح ناهموار قطعه کار برخورد می کنند، افزایش یافته و باعث حذف قله های زبری سطح لوله های آلومینیومی ۲۰۲۴ می شود. در نتیجه، در مراحل اولیه پردازش، نسبت زبری سطح کاهش قابل توجهی یافته و نرخ پرداخت کاری افزایش می یابد. بررسی جزئیات در شکل ۷ نشان می دهد که در بازه زمانی ۰ تا ۵ دقیقه، نسبت زبری سطح تا ۰/۰۵۴ کاهش می یابد، در حالی که نرخ پرداخت کاری تا ۰/۰۶ افزایش پیدا می کند. در بازه ۵ تا ۱۰ دقیقه، بیشترین کاهش نسبت زبری سطح (تا ۰/۰۱۹) و بیشترین افزایش نرخ پرداخت کاری (تا ۰/۰۸۳) مشاهده می شود. با این حال، پس از ۱۰ دقیقه، روند معکوس می شود؛ به طوری که با افزایش زمان پردازش تا ۱۵ دقیقه، نسبت زبری سطح تا ۰/۰۴۴ افزایش یافته (که نشان دهنده افت کیفیت سطح است) و نرخ پرداخت کاری تا ۰/۰۵۴ کاهش می یابد.



(ب)

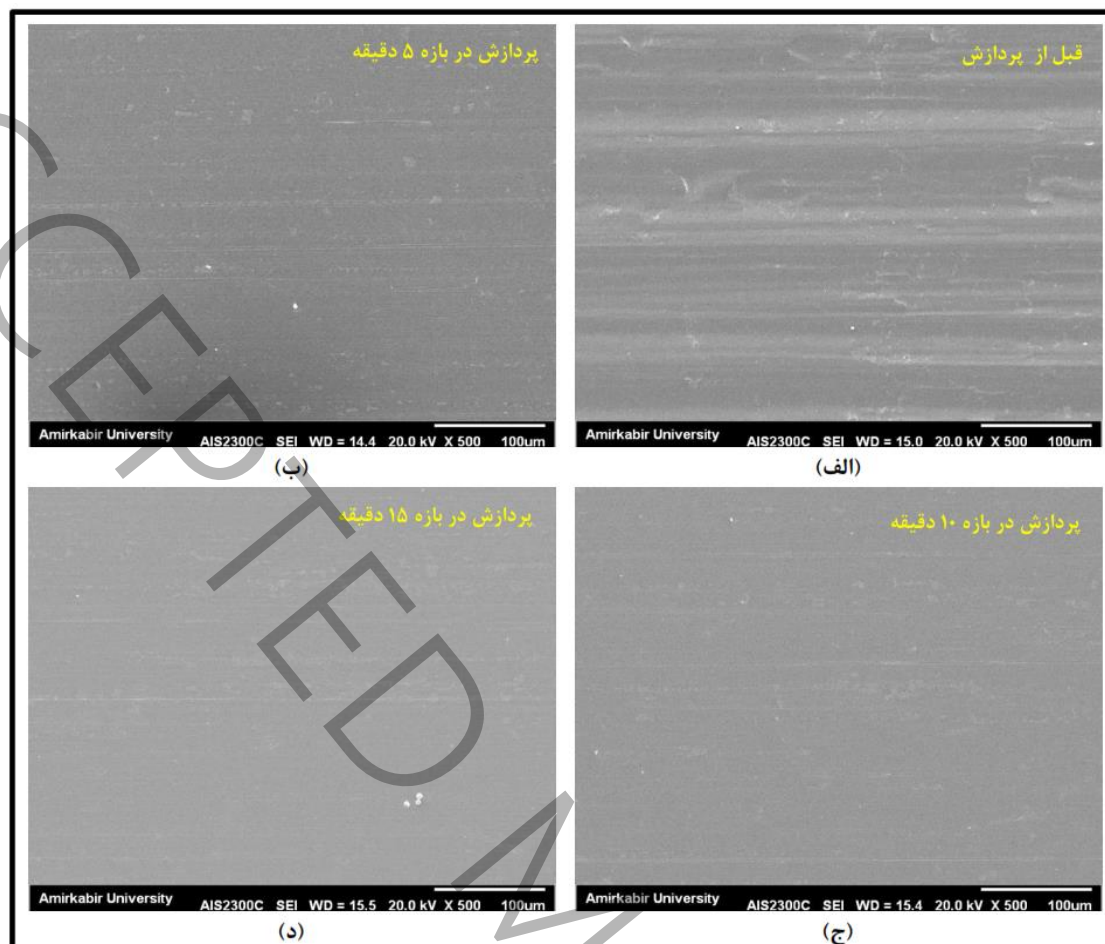


(الف)

شکل ۷. اثر زمان پردازش فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت بر روی (الف) نسبت زبری سطح و (ب) نرخ پرداخت کاری ($\mu\text{m}/\text{min}$)

Fig. 7. Effect of processing time of magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations on (a) surface roughness ratio and (b) finishing rate ($\mu\text{m}/\text{min}$).

برای درک بهتر روند مشاهده شده در شکل ۷، مورفولوژی سطح نمونه های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ قبل و بعد از پردازش با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۸ بررسی شده است. مقایسه ی شکل های ۸-الف و ۸-ب نشان می دهد که پردازش در ۵ دقیقه ابتدای فرآیند بیشترین تأثیر را در حذف ناهمواری های سطح دارد. این امر نشان دهنده آن است که در ابتدای پردازش، ذرات ساینده به راحتی به زبری های سطح قطعه کار دسترسی دارند. در این شرایط، قطعه کار در جهت عمود بر جریان سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال ارتعاش می کند که باعث می شود ناهمواری های سطح قطعه کار بهتر در معرض ذرات ساینده قرار بگیرند. با این توضیح، مشخص می شود که بیشترین میزان پردازش در زمان های اولیه انجام می گیرد و در نتیجه، سطح قطعه کار به سرعت به محدوده نانومتری می رسد. پس از ۱۰ دقیقه، سطحی کاملاً یکنواخت ایجاد می شود که زمان بهینه ی پردازش محسوب می گردد (بر اساس شکل ۸-ج). با ادامه ی فرآیند تا ۱۵ دقیقه، نه تنها تغییر قابل توجهی در کیفیت سطح مشاهده نمی شود، بلکه زبری سطح مجدداً افزایش می یابد (مقایسه ی شکل های ۸-ج و ۸-د). دلیل این امر آن است که پس از ۱۰ دقیقه (زمان بهینه)، قله های زبری سطح کاملاً هموار شده اند و ادامه فرآیند باعث برخورد ذرات ساینده به سطح صاف و ایجاد خراش های ریز می شود. در نتیجه، پس از ۱۰ دقیقه، کیفیت سطح به تدریج کاهش می یابد.



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی از مورفولوژی سطح نمونه‌ها: (الف) پیش از پردازش و (ب، ج و د) پس از پردازش در زمان‌های مختلف: (ب) ۵ دقیقه، (ج) ۱۰ دقیقه و (د) ۱۵ دقیقه.

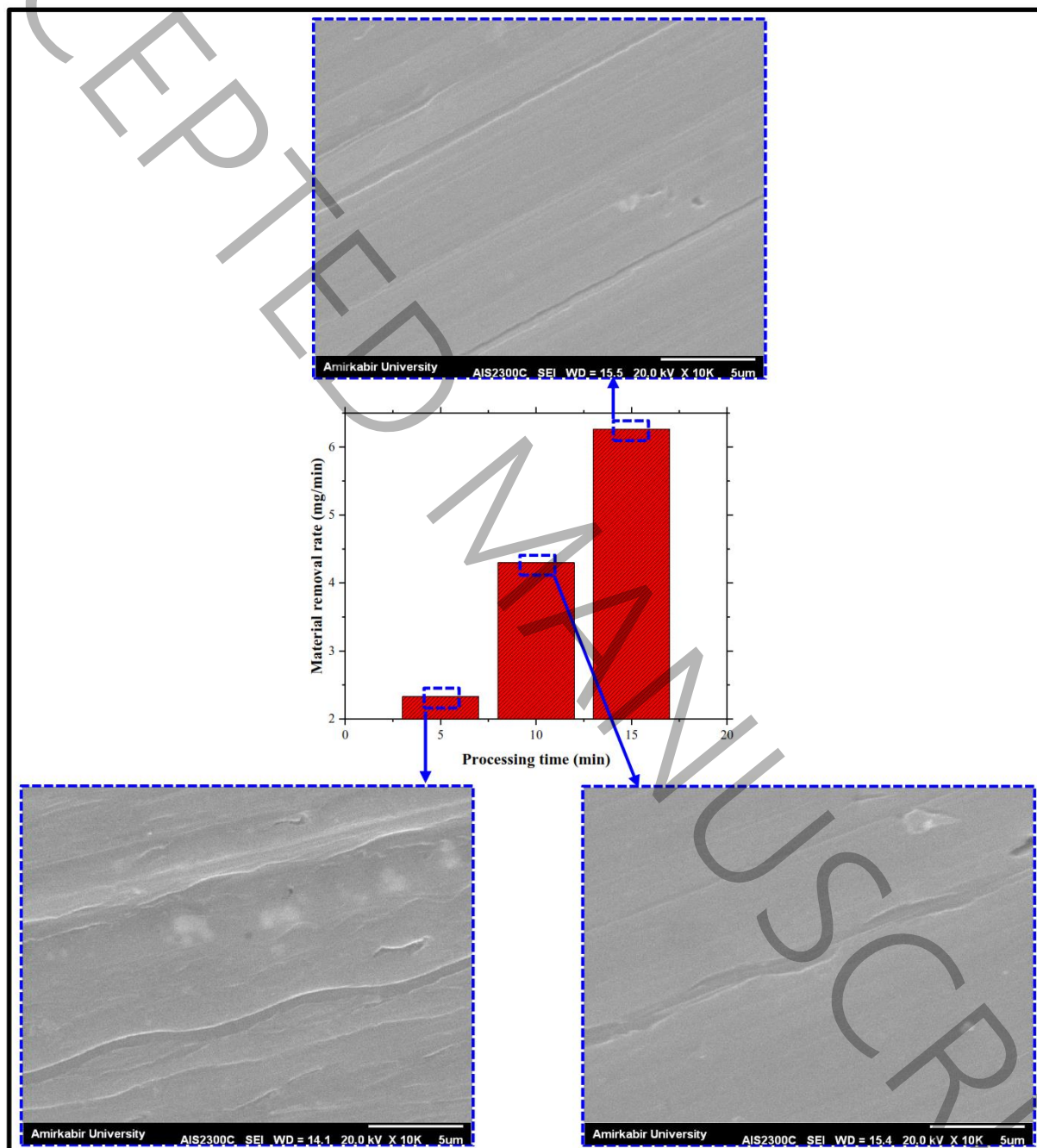
Fig. 8. Microscopic images of the surface morphology of the samples: (a) before processing and (b– d) after processing at different times: (b) 5 min, (c) 10 min, and (d) 15 min.

بررسی شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد که فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت در شرایط بهینه، به‌طور چشمگیری نسبت زبری سطح را کاهش داده و نرخ پرداخت کاری لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ را افزایش می‌دهد. همچنین، انتخاب زمان بهینه پردازش در محدوده ۱۰ دقیقه می‌تواند تعادل مناسبی بین کیفیت سطح و هزینه‌های فرآیند ایجاد کند.

۴-۲- تأثیر زمان پردازش بر نرخ برداشت ماده

تأثیر زمان پردازش در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت بر نرخ برداشت ماده لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ تحت شرایط بهینه (فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال، سرعت دورانی آهنرباها ۱۰۰ دور بر دقیقه و دامنه ارتعاشات فراصوت ۱۰ میکرومتر) در شکل ۹ نشان داده شده است. با افزایش زمان پردازش، نرخ برداشت ماده به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این امر ناشی از آن است که ذرات ساینده در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت همزمان دو نوع حرکت را تجربه می‌کنند: یک حرکت مارپیچی ناشی از جریان رفت و برگشتی سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال و چرخش آهنرباها، و یک حرکت سینوسی که در اثر ارتعاش قطعه کار ایجاد می‌شود. ترکیب این دو حرکت باعث می‌شود ذرات ساینده با زاویه مشخصی به ناهمواری‌های سطح قطعه کار برخورد کنند (جزئیات بیشتر در بخش ۲). با افزایش زمان پردازش، تعداد این برخوردها بیشتر شده و در نتیجه برداشت ماده افزایش می‌یابد. بررسی جزئیات در شکل

۹ نشان می‌دهد که پس از ۵ دقیقه پردازش، نرخ برداشت ماده به ۲/۳۳ میلی گرم بر دقیقه می‌رسد که بیشترین میزان در این مرحله است، چراکه ناهمواری‌های سطحی بیشتری در دسترس ذرات ساینده هستند. همچنین، به دلیل ارتعاش قطعه کار یک نیروی شعاعی به فرورفتگی ذرات ساینده به درون سطح قطعه کار اضافه می‌شود که منجر به افزایش عمق نفوذ ذرات ساینده می‌گردد. با ادامه فرآیند تا ۱۰ دقیقه، سطح قطعه کار یکنواخت‌تر شده و نرخ برداشت ماده به ۴/۳ میلی گرم بر دقیقه می‌رسد. در زمان ۱۵ دقیقه، این مقدار به ۶/۲۶ میلی گرم بر دقیقه افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزایش زمان پردازش بر عمق نفوذ ذرات ساینده و همچنین افزایش نیروی برشی کل تحت تأثیر فشار اکستروژن، چرخش آهنرباها و ارتعاشات فراصوت است.

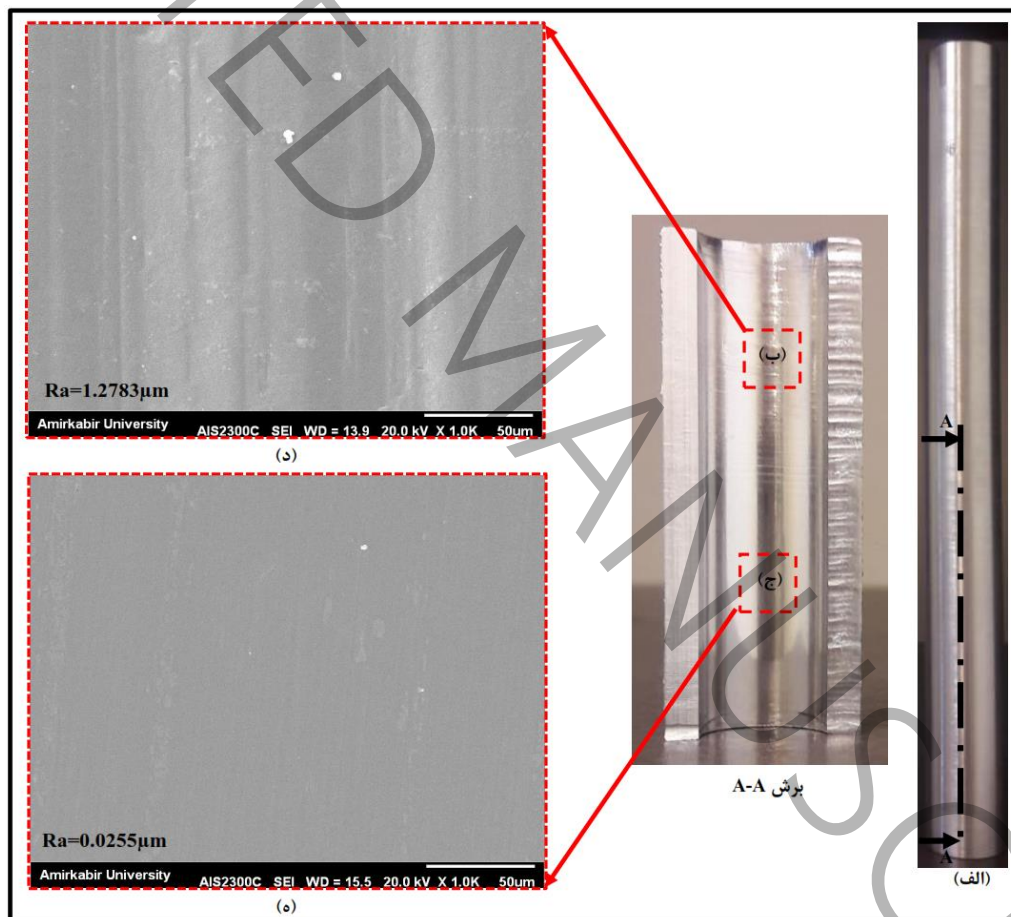


شکل ۹. اثر زمان پردازش فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت بر روی نرخ برداشت ماده (mg/min).

Fig. 9. Effect of processing time of magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations on the material removal rate (mg/min).

۳-۴- مقایسه مورفولوژی سطح قبل و بعد از پرداخت کاری

برای درک بهتر عملکرد فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت، مورفولوژی سطح داخلی لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ قبل و بعد از پرداخت کاری به صورت مقایسه‌ای بررسی شده است. مقایسه تصاویر واقعی (شکل‌های ۱۰-ب و ۱۰-ج) نشان می‌دهد که سطح داخلی لوله قبل از پرداخت کاری (پس از سوراخ کاری و برقو دستی) بسیار زبر است، به طوری که انعکاس محیط اطراف در آن محو شده است. در مقابل، پس از پرداخت کاری با فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت، سطحی صاف و یکنواخت ایجاد شده که انعکاس محیط را به وضوح نشان می‌دهد. همچنین، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل‌های ۱۰-د و ۱۰-ه) تأیید می‌کنند که عملیات اولیه (سوراخ کاری و برقو دستی) آسیب‌های سطحی مانند شیارها و خراش‌ها را ایجاد کرده و زبری سطح را به $1/2783$ میکرومتر رسانده است، در حالی که فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت این آسیب‌ها را کاملاً حذف کرده و زبری را تا $0/0255$ میکرومتر کاهش داده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش ناهمواری‌های سطح داخلی لوله‌ها را تا ۹۸٪ بهبود بخشیده و به عنوان یک راه حل کارآمد برای پرداخت و پلیسه‌گیری سطوح داخلی، به ویژه در لوله‌های بلند، توصیه می‌شود.



شکل ۱۰. تصاویر واقعی و تصاویر میکروسکوپی از مورفولوژی سطح نمونه‌ها: (الف) یک نمونه آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴، (ب و د) بعد از عملیات سوراخ کاری و برقو دستی با متوسط زبری سطح $1/2783$ میکرومتر و (ج و ه) بعد از فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت با متوسط زبری سطح $0/0255$ میکرومتر تحت شرایط تجربی (فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال، سرعت دورانی آهنرباها ۱۰۰ دور بر دقیقه، دامنه ارتعاشات فراصوت ۱۰ میکرومتر و زمان پردازش ۱۰ دقیقه).

Fig. 10. Actual images and microscopic images of the surface morphology of the samples: (a) a 2024 aluminum alloy sample, (b and d) after drilling and manual reaming with an average surface roughness of $1.2783 \mu\text{m}$, and (c and e) after the magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations with an average surface roughness of $0.0255 \mu\text{m}$ under experimental conditions (extrusion pressure of 2 MPa, magnets' rotational speed of 100 rpm, ultrasonic vibration amplitude of 10 μm , and a processing time of 10 min).

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، از میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت به عنوان راه حلی کارآمد در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. برای این منظور، ابتدا یک نمونه صنعتی از دستگاه پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال طراحی و ساخته شد و سپس بعد از آماده سازی سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال، میدان مغناطیسی دوار اعمال گردید. در نهایت، ارتعاشات فراصوت در جهت عمود بر جریان سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال به قطعه کار اعمال شد. برای ارزیابی عملکرد پرداخت کاری، آزمایش هایی انجام شد تا تأثیر زمان پردازش بر نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده از سطح داخلی لوله های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ بررسی شود. نتایج نشان می دهد که فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت در شرایط بهینه (فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال، سرعت چرخش آهنرباها ۱۰۰ دور بر دقیقه و دامنه ارتعاش ۱۰ میکرومتر)، تأثیر قابل توجهی بر کاهش زبری سطح و افزایش نرخ پرداخت کاری لوله های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ دارد. علاوه بر این، بررسی ها حاکی از آن است که در ۱۰ دقیقه اول پردازش، بیشترین بهبود کیفیت سطح رخ می دهد (کاهش زبری تا ۰/۱۹٪ و افزایش نرخ پرداخت کاری تا ۰/۸۳٪). اما ادامه فرآیند پس از این زمان، به دلیل برخورد ذرات ساینده با سطح صاف، منجر به افزایش مجدد زبری و کاهش کیفیت سطح می شود. از سوی دیگر، افزایش زمان پردازش باعث بهبود نرخ برداشت ماده (تا ۶/۲۶ میلی گرم بر دقیقه در ۱۵ دقیقه) می گردد. تصاویر میکروسکوپی تأیید می کنند که روش پیشنهادی ناهمواری های سطح را تا ۹۸٪ کاهش داده و سطحی یکنواخت ایجاد می کند. بنابراین، زمان بهینه پردازش ۱۰ دقیقه پیشنهاد می شود تا تعادلی مناسب بین کیفیت سطح و هزینه های فرآیند برقرار شود.

منابع

- [1] A. Fletcher, J. Hull, J. Mackie, S. Trengove, Computer modelling of the abrasive flow machining process, in: Proceedings of International Conference on Surface Engineering: Toronto, Canada, (1990) 592-601.
- [2] P. Davies, A. Fletcher, The assessment of the rheological characteristics of various polyborosiloxane/grit mixtures as utilized in the abrasive flow machining process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 209(6) (1995) 409-418.
- [3] R. Williams, K. Rajurkar, Stochastic modeling and analysis of abrasive flow machining, Trans the American Society of Mechanical Engineers (ASME), Journal of Engineering for Industry, 114 (1) (1992) 74-81.
- [4] M. Sarkar, V. Jain, Nanofinishing of freeform surfaces using abrasive flow finishing process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(9) (2017) 1501-1515.
- [5] Y. Fu, X. Wang, H. Gao, H. Wei, S. Li, Blade surface uniformity of blisk finished by abrasive flow machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(5) (2016) 1725-1735.
- [6] D. Jung, W. Wang, S. Hu, Microscopic geometry changes of a direct-injection diesel injector nozzle due to abrasive flow machining and a numerical investigation of its effects on engine performance and emissions, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 222(2) (2008) 241-252.
- [7] J. Guo, C. Song, Y. Fu, K.H. Au, C.W. Kum, M.H. Goh, T. Ren, R. Huang, C.-N. Sun, Internal surface quality enhancement of selective laser melted inconel 718 by abrasive flow machining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 142(10) (2020) 101003.
- [8] N. Dixit, V. Sharma, P. Kumar, Research trends in abrasive flow machining: A systematic review, Journal of manufacturing Processes, 64 (2021) 1434-1461.
- [9] G. Venkatesh, D. Sood, A.K. Sharma, On surface integrity of Al 2014 alloy finished by ultrasonic assisted abrasive flow machining, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 346 (2018) 012057.
- [10] Q. Wang, M.S. Vohra, S. Bai, S.H. Yeo, Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing and its fundamental performance in Al6061 machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 113(1) (2021) 473-481.

- [11] S. Singh, H. Shan, Development of magneto abrasive flow machining process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(8) (2002) 953-959.
- [12] M. Das, V. Jain, P. Ghoshdastidar, Fluid flow analysis of magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(3-4) (2008) 415-426.
- [13] Y. Choopani, M. Khajehzadeh, M.R. Razfar, Experimental investigations into the nano-finishing of Al2024 tubes using the rotational-magnetorheological abrasive flow finishing (R-MRAFF) process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 236(6) (2022) 2545-2557.
- [14] Y. Choopani, M.R. Razfar, M. Khajehzadeh, M. Khosrojerdi, Design and development of ultrasonic assisted-rotational magnetorheological abrasive flow finishing (UA-RMRAFF) process, *Applied Acoustics*, 197 (2022) 108950.
- [15] N. Dixit, V. Sharma, P. Kumar, Experimental investigations into ultrasonic assisted magnetic abrasive flow machining process, *Materials and Manufacturing Processes*, 38(10) (2023) 1291-1306.
- [16] M.R. Shabgard, A.A. Amini Khasraghi, A. Gholipoor, Experimental investigation of the effects of work piece hardness and abrasive particle size in rotational abrasive flow Machining, *Modares Mechanical Engineering*, 18(5), (2018) 75-83, (in Persian).
- [17] M.R. Shabgard, F. Arabzadeh Tabriz, A. Gholipoor, Experimental study of the effects of abrasive particle size and work piece hardness in Magnetic abrasive flow Machining, *Modares Mechanical Engineering*, 16(8) (2016) 131-138, (in Persian).
- [18] M. Aamir, M. Tolouei-Rad, K. Giasin, A. Vafadar, Machinability of Al2024, Al6061, and Al5083 alloys using multi-hole simultaneous drilling approach, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5) (2020) 10991-11002.

Synergistic Effect of Rotating Magnetic Field and Ultrasonic Vibrations in Magnetorheological Abrasive Flow Finishing

Yahya Choopani^{1*}, Mohsen Khajehzadeh², Mohammad Reza Razfar²

¹Department of Mechanical Engineering, Meybod University, Meybod, Iran.

²Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT

This study employed rotating magnetic fields and ultrasonic vibrations as an effective solution to overcome the limitations associated with the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process. To this end, first, an industrial prototype of the MRAFF setup was designed and fabricated. After preparing the magnetorheological polishing (MRP) fluid, a rotating magnetic field was applied, and subsequently, ultrasonic vibrations were applied to the workpiece in a direction perpendicular to the fluid flow. In order to evaluate the efficiency of the proposed technique, the effect of processing time on three indices, i.e., surface roughness rate, finishing rate, and material removal rate, in aluminum alloy 2024 tubes was investigated. The results indicated that during the first 10 minutes of processing, besides a decrease observed in the surface roughness rate, the finishing rate and material removal rate also increased; however, due to the destructive effects of abrasive particles, the continuation of the process caused a re-increase in the surface roughness. Microscopic images not only confirmed these findings but also indicated that under optimal conditions, in addition to creating a uniform surface, the proposed technique reduced the roughness of the inner surface of the tubes by 98%. As a result, this method offers a promising prospect as an efficient solution for finishing and deburring inner surfaces, especially in longer tubes.

KEYWORDS

Rotating Magnetic Field, Ultrasonic Vibrations, Surface Roughness Rate, Finishing Rate, Material Removal Rate

*Corresponding Author: Email: Choopani@meybod.ac.ir