



مطالعه تجربی تاثیر سختی قطعه کار و اندازه ذرات ساینده در فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی

محمد رضا شهبگرد^{1*}، علی اصغر امینی خسرقی²، احد قلی پور³

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3.3 مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 51664-16471، mrshabgard@tabrizu.ac.ir

چکیده

فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده دورانی یکی از فرآیندهای نوین پرداخت سطح محسوب می‌گردد که در آن برداشت ماده در ابعاد میکرو یا نانو و به کمک ذرات ریز ساینده انجام می‌شود. ماشینکاری به روش جریان ساینده دورانی در مقایسه با دیگر روشهای پرداختکاری، برای پرداخت سطوح داخلی و خارجی پیچیده خیلی موثر و مناسب می‌باشد. در این پژوهش فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده دورانی در پرداختکاری فولاد ابزار گرم کار H 13 مورد بررسی قرار گرفته و با دوران قطعه کار سعی در افزایش نرخ براده برداری و کاهش زبری سطح شده است. در این راستا، تاثیر سرعت دورانی، مش ذرات ساینده و سختی قطعه کار بعنوان پارامترهای ورودی فرآیند بر روی پارامترهای خروجی فرآیند شامل زبری سطح و نرخ براده برداری مطالعه شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که اعمال سرعت دورانی موجب افزایش نرخ براده برداری و بهبود صافی سطح می‌شود. افزایش مش ذرات ساینده سبب کاهش نرخ براده برداری و افزایش زبری سطح می‌گردد. همچنین با افزایش سختی قطعه کار، نرخ براده برداری کاهش یافته و در شرایط یکسان پرداخت، صافی سطح بدست آمده برای قطعه کار با سختی بیشتر بهتر از صافی سطح بدست آمده برای قطعه کار با سختی کمتر می‌باشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 آذر 1396

پذیرش: 09 اسفند 1396

ارائه در سایت: 23 فروردین 1397

کلید واژگان:

پرداختکاری به روش جریان ساینده دورانی

فولاد H 13

سرعت دورانی

مش ذرات ساینده

سختی قطعه کار

Experimental investigation of the effects of work piece hardness and abrasive particle size in rotational abrasive flow Machining

Mohammad Reza Shabgard^{1*}, Ali Asghar Amini Khasraghi¹, Ahad Gholipoor²

1- Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

* P.O.B. 51664-16471 Tabriz, Iran, mrshabgard@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 November 2017
Accepted 28 February 2018
Available Online 12 April 2018

Keywords:

Rotational abrasive flow finishing process
H13 steel
Rotational speed
Abrasive particle size
Workpiece hardness

ABSTRACT

Rotational abrasive flow machining process (RAFM) is one of the modern surface polishing processes where in the material removal in micro and nano sizes is performed by tiny abrasive particles. Rotational abrasive flow machining is very effective in finishing of complex internal and external surfaces. In comparison with other finishing methods. In this study, the rotational abrasive flow machining process has been investigated in polishing of AISI H 13 hot work steel. The main objectives of workpiece rotation was increasing the material removal rate and decreasing the surface roughness of workpiece. So the effects of rotational speed and hardness of workpiece and the mesh size of abrasive particles as input variables on the output parameters including surface roughness and material removal rate have been studied. The results showed that applying of rotational speed of workpiece leads to higher material removal rate and lower surface roughness. Furthermore, the material removal rate is decreased and surface roughness is improved by increasing the mesh size of abrasive particles. Also, increasing the hardness of workpiece leads to decreasing the material removal rate, and in similar cutting conditions, the surface of workpiece with more hardness is better polished in comparison with the surface of workpiece with lower hardness.

یکی از روشهای نوین پرداختکاری با دقت بالا، ماشینکاری با جریان ساینده است که در سال 1960 به عنوان روشی برای پلیسه گیری اطراف سوراخ ها، پرداخت شعاع ها و لبه های غیر قابل دسترس با جریان دادن پلیمرهای ویسکوالاستیک¹ دارای مواد ساینده روی سطوح گسترش یافت.

1- مقدمه
عملیات پرداختکاری در تولید قطعات با صافی سطح بالا و ابعاد دقیق به دلیل حساسیت، پیچیدگی و هزینه بر بودن همیشه مورد توجه بوده است. صافی سطح و دقت بالای قطعات تولید شده، در موارد بسیاری از جمله افزایش عمر خستگی بسیار مهم است [1].

¹ Visco elastic

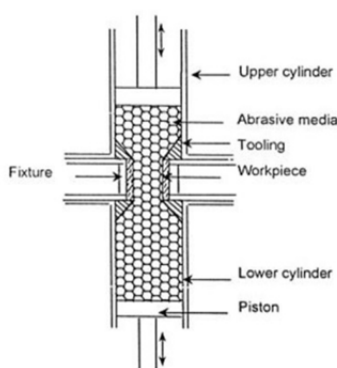


Fig. 1 Schematic of abrasive flow machining process [2]

شکل 1 شماتیک فرآیند ماشینکاری با جریان ساینده [2]

کیفیت سطح دارد. اعظمی و همکاران [9]، به بررسی پرداختکاری قطعه کاری از جنس چدن با روش فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی پرداخته و تاثیر سرعت دورانی و زمان پرداختکاری را بر زبری سطح پرداختکاری مطالعه نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش زمان پرداختکاری، درصد بهبود زبری سطح افزایش می یابد. سانکار و همکاران [10]، در مطالعه ای دیگر بر روی پرداختکاری فولاد استوانه ای شکل AISI4340 به کمک فرآیند جریان ساینده دورانی، تاثیر فشار اکستروژن، تعداد سیکلها و ترکیب های مختلف از مواد واسطه را بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشار اکستروژن 6 مگاپاسکال، زبری سطح کاهش و بعد از آن، افزایش می یابد. شبگرد و همکاران [11]، به بررسی به مطالعه فرآیند جریان ساینده مغناطیسی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با اعمال میدان مغناطیسی و افزایش شدت میدان مغناطیسی در فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده، با توجه به افزایش نیروی شعاعی، نرخ براده برداری و درصد بهبود سطح افزایش می یابد.

در این پژوهش فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده دورانی مورد مطالعه قرار گرفت و تاثیر سرعت دورانی، اندازه ذرات ساینده و سختی قطعه کار به عنوان پارامترهای ورودی بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح بدست آمده بررسی شد.

2- مواد و روشها

2-1- تجهیزات مورد استفاده

شکل 2 شماتیکی از دستگاه پرداختکاری با جریان ساینده دورانی را نشان می دهد که برای انجام آزمایش ها طراحی و ساخته شده است. در این روش، تماس و جابه جایی ترکیب ساینده تحت فشار پیستون بر روی سطح مورد نظر باعث برداشت لایه ی سطحی می گردد و از طرفی سرعت دورانی اعمال شده حول قطعه کار باعث افزایش سرعت حرکتی ذرات ساینده روی سطح قطعه کار و در نتیجه افزایش بازدهی فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی می شود. فشار مورد نظر توسط نیروی اعمال شده توسط دو چک هیدرولیکی که در مقابل هم قرار گرفته اند ایجاد می گردد و سایش ناشی از جابه جا شدن ترکیب ساینده می باشد. حرکت دورانی نیز از طریق یک الکتروموتور که بر روی سیستم نصب شده، بر قطعه اعمال می شود.

به منظور تامین سرعت دورانی قطعه کار، تغییراتی در سیستم ابزار بندی دستگاه مذکور انجام گرفت. بدین صورت که از یک فیکسچر که در شکل 3

در شکل 1 شماتیک ماشینکاری با جریان ساینده نشان داده شده است. در این روش یک ماده نیمه جامد پلیمری با نسبتی معین با ذرات ساینده مخلوط شده و تحت فشار از میان قطعه کار عبور داده می شود. سایش زمانی رخ می دهد که مدیوم (خمیر ساینده) از مسیر مورد نظر عبور می کند. خمیر ساینده را می توان به عنوان یک سنگ سنباده تغییر شکل پذیر در نظر گرفت که با خارج شدن از میان لبه ها یا سطوح یک قطعه، سطح قطعه کار را صیقلی و صاف می نماید. همچنین ابزار بندی مناسب برای محدود کردن و هدایت این ترکیب به محل مورد نظر روی قطعه کار، از اهمیت ویژه ای در پرداختکاری قطعات برخوردار است [1].

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه ماشینکاری با جریان ساینده صورت گرفته که در ادامه به تعدادی از تحقیقات مرتبط با کارهای انجام شده اشاره شده است.

لاولس و همکاران [1] به بررسی تاثیر فرآیند پرداختکاری جریان ساینده بر روی زبری سطوحی که به روشهای مختلف از جمله تراشکاری، فرزکاری، سنگزنی و وایرکات¹ ماشینکاری شده بودند، پرداختند. نتایج بدست آمده توسط این محققان نشان داد که شرایط اولیه سطح قطعه کار تاثیر عمده ای در عملکرد فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دارد. جین و همکاران [2] به مطالعه تجربی تاثیر پارامترهای ورودی فرآیند پرداختکاری جریان ساینده شامل تعداد سیکل، غلظت ذرات ساینده، اندازه مش ذرات ساینده و سرعت جریان خمیر ساینده بر روی پارامترهای خروجی فرآیند شامل میزان برداشت براده و درصد بهبود زبری سطوح پرداختند. مطابق نتایج آنها، غلظت ذرات ساینده بیشترین تاثیر را روی پارامترهای خروجی دارد. گرانا و همکاران [3] نیروهای محوری و شعاعی ایجاد شده در فرآیند پرداختکاری جریان ساینده را مطالعه نمودند. شبگرد و همکاران [4] فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده را مورد مطالعه قرار دادند و تاثیر پارامترهای مختلف پروسه از قبیل فشار اکستروژن، غلظت ذرات ساینده، اندازه ذرات ساینده و وضعیت اولیه سطح را بر روی میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده بررسی کردند. یکی از عمده نتایج به دست آمده این بود که افزایش غلظت ذرات ساینده باعث افزایش میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده می شود. کندا و همکاران [5] به بررسی یکپارچگی سطوح ایجاد شده بعد از پرداختکاری به کمک فرآیند پرداختکاری جریان ساینده پرداختند. این محققان به این نتیجه رسیدند که می توان توسط این فرآیند سطوح منظم و یکپارچه ای را پرداختکاری نمود. راجندرا و همکاران [6] با شبیه سازی خمیر و ذرات ساینده با استفاده از نرم افزار المان محدود، چگالی دانه های فعالی را که در تماس با سطح قطعه کار بودند، تعیین کردند. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که هر چه ذرات ساینده بیشتری در مجاورت سطح قطعه کار باشد، بازده فرآیند افزایش پیدا می کند.

سانکار و همکاران [7]، فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده دورانی را مورد مطالعه قرار دادند و تاثیر فشار اکستروژن، تعداد سیکلها و سرعت دورانی قطعه کار را بر روی زبری سطح و نرخ برداشت ماده بررسی نمودند. این محققان به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت دورانی قطعه کار تا یک حد مشخص، بهبود زبری سطح به یک میزان بهینه رسیده و با افزایش بیشتر سرعت دورانی کاهش پیدا می کند. سانکار و همکاران [8]، تاثیر فرآیند جریان ساینده دورانی روی توپوگرافی سطح پرداخت شده را بررسی کردند. مطابق نتایج این محققان، اعمال سرعت دورانی باعث افزایش مسیر حرکتی ذرات ساینده حول قطعه کار می شود و تاثیر بسزایی در بهبود درصد افزایش

¹ Wire cut



Fig. 4 RA FM process machine

شکل 4 دستگاه فرآیند ماشینکاری با ساینده دورانی

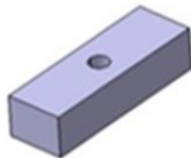


Fig. 5 The used workpiece at experiments

شکل 5 قطعه کار مورد استفاده در آزمایشها

درصد وزنی و با بهره گیری از روش سنجش وزن توسط ترازوی دیجیتالی با درصد وزنی 40 درصد پودر سیلیکون کارباید⁴ و 60 درصد مدیوم ویسکوالاستیک تعیین گردید. لازم به ذکر است که درصد وزنی اجزای تشکیل دهنده خود مدیوم ویسکوالاستیک 80 درصد وزنی پارافین و 20 درصد وزنی گریس به عنوان روانکار می باشد.

4-2- انجام آزمایش ها

در این پژوهش، سرعت دورانی قطعه کار، مش ذرات ساینده و سختی قطعه کار بعنوان متغیرهای ورودی و سطوح آنها، مطابق جدول 1 در نظر گرفته شد. سایر پارامترهای ورودی فرآیند نیز، شامل فشار اکستروژن، سیکل ماشینکاری، ویسکوزیته خمیر ساینده، جنس ذرات ساینده، جنس قطعه کار و جهت بافت سطحی ثابت در نظر گرفته شده است. در جدول 2 پارامترهای ثابت، مقادیر و نوع آنها آورده شده است که با توجه به آزمایشهای اکتشافی انجام شده تعیین شدند. برای بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی (درصد بهبود زبری سطح و نرخ براده برداری) فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی، 24 تست بر اساس روش عاملی کامل طراحی و انجام شد.

$$\Delta Ra = \frac{Ra_1 - Ra_2}{Ra_1} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه (1)، Ra_1 زبری سطح اولیه قطعه کار و Ra_2 زبری سطح قطعه کار بعد از عملیات پرداختکاری به روش جریان ساینده دورانی است. نرخ براده برداری نیز (MRR) از رابطه (2) به دست می آید.

⁴ Silicon carbide

نشان داده شده است، برای گیره بندی قطعه کار در موقعیت مناسب استفاده گردید و هم چنین برای چرخش فیکسچر از دو عدد بلبرینگ کف گرد یکی در بالای فیکسچر و دیگری در پایین آن استفاده شد. از یک موتور و درایور پله ای نیز به منظور ایجاد سرعت دورانی حول قطعه استفاده شد. همچنین برای کنترل سرعت دورانی از نرم افزار لب ویو¹ استفاده شد. در شکل 4 دستگاه مورد استفاده با تجهیزات مذکور نشان داده شده است.

2-2- قطعه کار

قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه که در شکل 5 نشان داده شده است، از جنس فولاد گرم کار H 13، می باشد. به منظور موقعیت دهی مناسب قطعه کار در داخل فیکسچر سوراخی رزوه دار بر روی قطعه کار ایجاد شد.

3-2- ترکیب مواد ساینده

خمیر ساینده از دو بخش اصلی ویسکوالاستیک و ذرات ساینده تشکیل یافته است. بخش ویسکوالاستیک که وظیفه حمل و انتقال ذرات ساینده را روی سطح قطعه کار و بین دو پیستون بر عهده دارد، خود از دو قسمت پارافین² و گریس³ تشکیل شده است. در شکل 6 خمیر ساینده استفاده شده نشان داده شده است. نسبت هریک از اجزای تشکیل دهنده این محیط ساینده از طریق

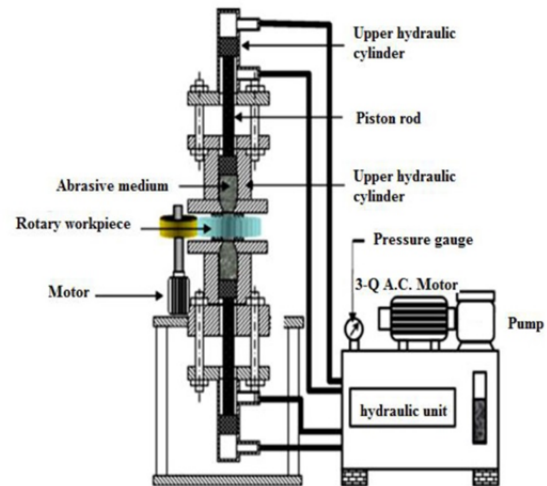


Fig. 2 Schematic of RA FM process machine

شکل 2 شماتیکی از دستگاه ماشینکاری با جریان ساینده دورانی



Fig. 3 The fixture used at this investigation

شکل 3 فیکسچر مورد استفاده در این مطالعه

¹ Labview

² Paraffin

³ Grease

به برآیند F_a و F_t وابسته است برآیند دو نیروی F_t و F_a که با F_c نشان داده شده، نیروی برشی است و با رابطه (4) تعریف می شود:

$$F_c = \sqrt{F_a^2 + F_t^2} \quad (4)$$

طی فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده دورانی یکی از دو شرایط نشان داده شده با روابط (5) و (6) اتفاق می افتد:

$$F_c < F_{req} \quad (5)$$

$$F_c \geq F_{req} \quad (6)$$

F_{req} نیروی مقاومی است که قطعه کار در برابر برداری از خود نشان می دهد و با رابطه (7) تعریف می شود:

$$F_{req} = \tau_s A_p \quad (7)$$

که در آن τ_s مقاومت برشی قطعه کار و A_p سطح نفوذ تصویر شده است. در چنین شرایطی اگر نیروی برآیند بزرگتر از نیروی مقاوم قطعه کار باشد، براده برداری انجام می گیرد [7].

4- نتایج و بحث

4-1 بررسی تاثیر اندازه مش ذرات ساینده بر روی نرخ براده برداری

شکل 10 نشان دهنده تاثیر اندازه مش ذرات ساینده بر روی نرخ براده برداری در سختی های مختلف قطعه کار و سرعت دورانی های مختلف قطعه کار (N) است. مطابق شکل 10 با افزایش مش ذرات ساینده (کوچکتر شدن اندازه ذره) نرخ براده برداری کاهش می یابد. طبق رابطه (8) اگر ذرات ساینده به صورت دایره ای با شعاع r در نظر گرفته شوند و d مسافت طی شده توسط هر ذره در طول یک برش باشد، حجم براده برداشته شده به ازای هر ذره در طول یک برش (V_g) با فرض این که دهانه ایجاد شده نیم دایره باشد، با توان دوم شعاع ذره ساینده متناسب است. رابطه (8) نشانگر این است که با کوچکتر شدن اندازه ی ذره ساینده مقدار ماده برداشته شده کاهش می یابد.

$$V_g = \left(\frac{1}{2}\pi r^2\right) d \quad (8)$$

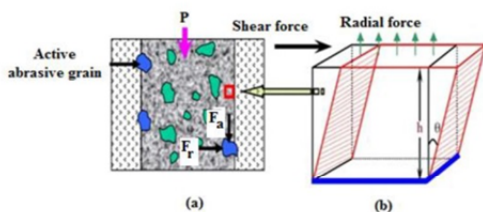


Fig. 7 (a) Forces acting on a single grain in AFF process, (b) applying radial force normal to shear force direction induced by visco-elastic behavior of medium [7]

شکل 7 (a) نیروهای وارد بر یک ذره در فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده اعمال نیروی شعاعی عمود بر جهت نیروی برشی ناشی از رفتار ویسکوالاستیک سیال عامل [7]

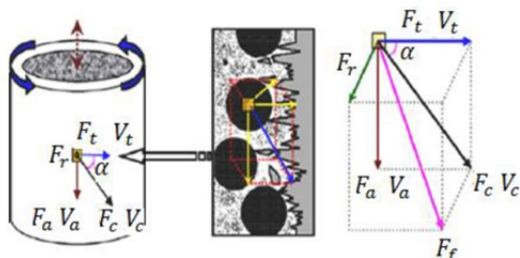


Fig. 8 Forces and velocity components in RAFF process in the finishing region [8]

شکل 8 مولفه های نیرو و سرعت در فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده دورانی [8]

$$MRR = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

در رابطه (2)، W_1 وزن اولیه قطعه کار و W_2 وزن قطعه کار بعد از عملیات پرداختکاری به روش جریان ساینده دورانی است.

3- روابط حاکم

مطابق شکل 7a در فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده دورانی، سیال ساینده در اثر فشار اکستروژن P در داخل قطعه کار با سرعت رفت و برگشتی V_a حرکت می کند و موجب اعمال نیروی محوری F_a به سطح قطعه کار می گردد. در اثر رفتار ویسکوالاستیک سیال عامل، مطابق شکل 7b یک نیروی شعاعی F_r نیز بر سطح قطعه کار وارد می شود. نیروهای محوری و شعاعی با فشار اکستروژن و ویسکوزیته سیال عامل رابطه مستقیم دارند.

مطابق شکل 8، در فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده دورانی، قطعه کار به هنگام چرخش با سرعت مماسی V_t ، در یک شرایط دینامیکی قرار می گیرد. بنابراین به سطح قطعه کار، نیروی مماسی F_t نیز وارد می شود. در طی فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده دورانی، حرکت دورانی قطعه کار منجر به سرعت مماسی V_t و حرکت رفت و برگشتی سیال عامل، مولفه سرعت V_a را پدید می آورد که برآیند این دو مولفه، سرعت V_c است. مطابق شکل 9 زاویه بین دو بردار V_a و V_c طبق رابطه (3) تعریف می شود. شکل 9 شماتیکی از نحوه حرکت ذرات ساینده را با و بدون اعمال سرعت دورانی در فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده نشان می دهد.

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

عمق براده برداری به F_r بستگی دارد، در حالی که میزان براده برداری

جدول 1 پارامترهای ورودی و مقادیر آنها

پارامترهای ورودی	مقادیر
سرعت دورانی (rpm)	0,50,75,100
مش ذرات ساینده #	80,120,170
سختی قطعه کار (HRC)	35,55

جدول 2 پارامترهای ثابت، مقادیر و نوع آنها

پارامترهای ثابت	نوع/مقدار
ذرات ساینده	SIC
جنس قطعه	H 13 steel
فشار اکستروژن (MPa)	6
زمان هر سیکل (s)	1.2
زمان کل پرداخت (min)	60



Fig. 6 Abrasive compound with paraffin and grease

شکل 6 ترکیب ساینده با پارافین و گریس

سختی های مختلف قطعه کار و اندازه مش های مختلف ذرات ساینده نشان می دهد. مطابق شکل 11 با افزایش سرعت دورانی قطعه کار تا 50 دور در دقیقه، نرخ براده برداری افزایش و سپس کاهش پیدا می کند. دلیل افزایش سرعت دورانی قطعه کار تا سرعت 50 دور در دقیقه را طبق شکل 9 اینگونه میتوان بیان نمود که با اعمال سرعت دورانی ذرات ساینده به جای پیچیدن مسیر خطی روی سطح قطعه کار مسیر مارپیچی را طی می کنند. در نتیجه ذرات ساینده مسیر بیشتری را روی سطح قطعه کار طی می کنند. با افزایش مسیر حرکتی ذرات ساینده، نرخ براده برداری نسبت به حالت سرعت دورانی صفر افزایش می یابد. می توان گفت، دلیل افزایش مسیر حرکتی ذرات ساینده به علت کاهش زاویه برخورد (α) ذرات ساینده با سطح قطعه کار در صورت اعمال سرعت دورانی به قطعه کار مطابق رابطه (3) می باشد. با افزایش بیشتر سرعت دورانی، چون مسیر حرکت ذرات ساینده خیلی افزایش می یابد، احتمال ساییده شدن ذرات و از بین رفتن تیزی آنها بیشتر می شود، که در اینصورت از کارآیی آنها کاسته شده و نرخ براده برداری نسبت به سرعت دورانی بهینه (50 دور در دقیقه) کمتر می شود، هر چند که حتی در این شرایط نیز نرخ براده برداری از حالت سرعت دورانی صفر بیشتر است.

3-4- بررسی تاثیر سختی قطعه کار بر روی نرخ براده برداری

شکل 12 نشان دهنده تاثیر سختی قطعه کار بر روی نرخ براده برداری در سرعت دورانی های مختلف قطعه کار و اندازه مش های مختلف ذرات ساینده می باشد. مطابق شکل 12 با افزایش سختی قطعه کار نرخ براده برداری کاهش می یابد. با افزایش سختی قطعه کار نیروی به مراتب بیشتری نیاز است تا پدیده نفوذ ذرات ساینده در سطح قطعه کار صورت گیرد. با توجه به این که در این تحقیق فشار اکستروژن ثابت فرض شده است و نیروی برشی مورد نیاز برای برداشت براده از سطح قطعه کار ثابت است، در نتیجه با افزایش سختی قطعه کار نرخ براده برداری کاهش می یابد. عبارت دیگر، با ثابت فرض نمودن نیروی برشی، نفوذ ذرات ساینده در قطعه نرم تر نسبت به قطعه سخت تر در شرایط یکسان بیشتر است، بطوری که براده بیشتری از قطعه نرم تولید می شود و نتیجه ی آن، بیشتر بودن نرخ براده برداری برای قطعه کار با سختی 35 راکول سی¹ می باشد.

4-4- آنالیز واریانس در مورد نرخ براده برداری

آنالیز واریانس برای طراحی آزمایش انجام شده در مورد نرخ براده برداری فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی در جدول 3 آورده شده است. با توجه به این جدول که مقدار P value را برای پارامترهای ورودی فرآیند (A) سرعت دورانی، B مش ذرات ساینده و C سختی قطعه کار) و اثرات متقابل بین پارامترهای ورودی نشان می دهد، فاکتوری که دارای مقدار P value کمتر از 0.05 باشد دارای اهمیت است و سایر موارد از لحاظ آماری فاقد اهمیت هستند. بدین ترتیب پارامترهای ورودی (A، B و C) و فقط اثر متقابل فاکتورهای A و B (A×B) در تاثیر گذاری بر نرخ براده برداری از لحاظ آماری دارای اهمیت هستند.

4-5- بررسی تاثیر اندازه مش ذرات ساینده بر روی درصد بهبود زبری سطح

مطابق شکل 13 که نشان دهنده تاثیر اندازه مش ذرات ساینده بر روی درصد بهبود زبری سطح در سختی های مختلف قطعه کار و سرعت دورانی های

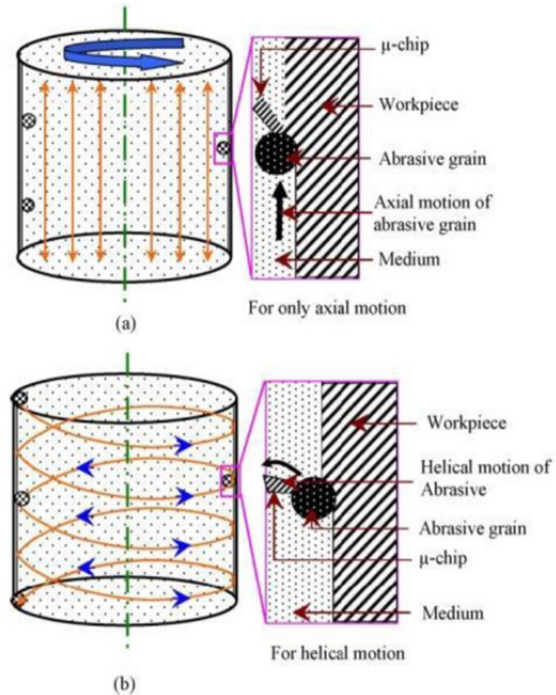


Fig. 9 Abrasive medium motions, (a) medium reciprocation and workpiece rotary motions in RAFF, (b) semi-helical finishing path on the workpiece surface induced by simultaneous axial and rotary motions [7]

شکل 9 حرکت سیال عامل (a) حرکت رفت و برگشتی سیال و حرکت دورانی قطعه کار (b) مسیر پرداخت کاری تقریباً مارپیچی ناشی از حرکت دورانی و محوری [7]

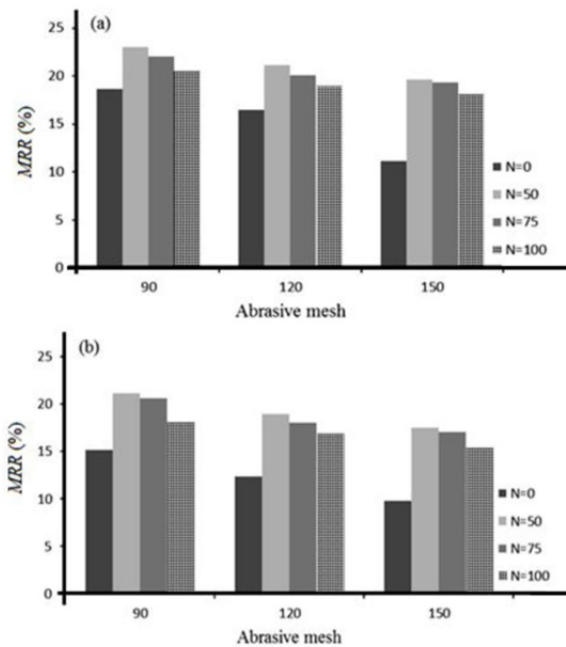


Fig. 10 The effect of abrasive particles mesh on material removal rate in different rotational speed (a) workpiece hardness 35 HRC (b) workpiece hardness 55 HRC

شکل 10 تاثیر اندازه مش ذرات ساینده بر روی نرخ براده برداری در سرعت دورانی های مختلف (a) سختی قطعه کار 35 HRC (b) سختی قطعه کار 55 HRC

2-4- بررسی تاثیر سرعت دورانی بر روی نرخ براده برداری

شکل 11، تاثیر سرعت دورانی قطعه کار را بر روی نرخ براده برداری در

¹ Rockwell C hardness (HRC)

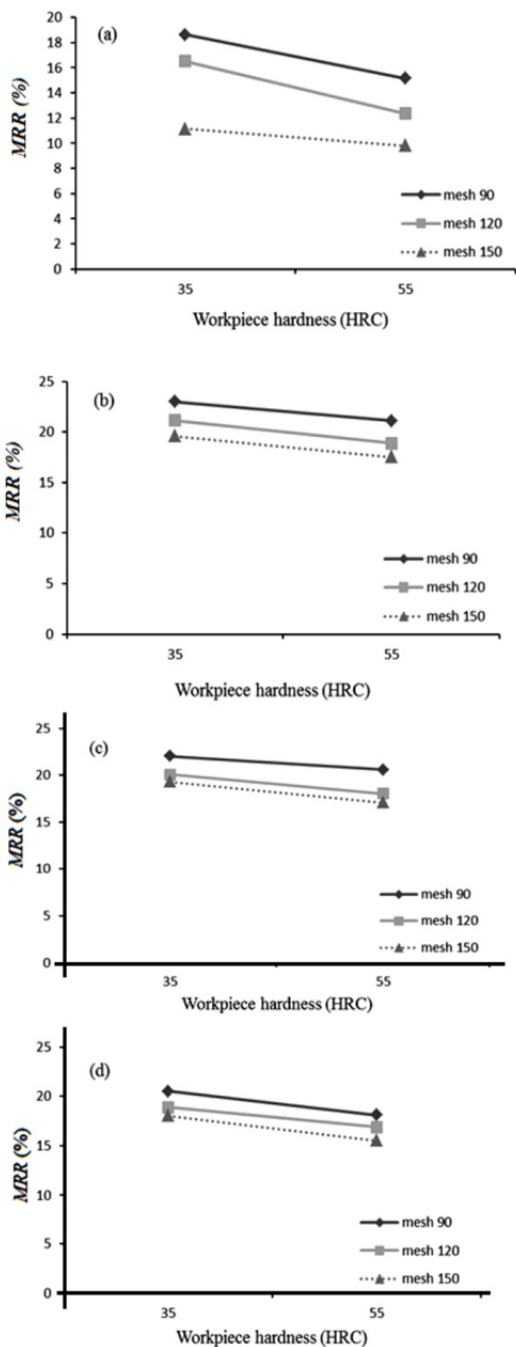


Fig. 12 The effects of workpiece hardness on material removal rate in different meshes (a) rotational speed $N=0$ rpm (b) rotational speed $N=50$ rpm (c) rotational speed $N=75$ rpm (d) rotational speed $N=100$ rpm

شکل 12 تاثیر سختی قطعه کار بر روی نرخ براده برداری در مش های مختلف ذرات

ساینده (a) سرعت دورانی 0 دور در دقیقه (b) سرعت دورانی 50 دور در دقیقه (c) سرعت دورانی 75 دور در دقیقه (d) سرعت دورانی 100 دور در دقیقه

زبری سطح در سرعت دورانی های مختلف قطعه کار و اندازه مش های مختلف ذرات ساینده می باشد، با افزایش سختی قطعه کار درصد بهبود زبری سطح افزایش می یابد. با افزایش سختی قطعه کار امکان نفوذ ذرات ساینده در سطح قطعه کار کاهش می یابد، بطوریکه ذرات ساینده می توانند با نفوذ و ماندگاری بیشتر در سطح قطعه کار با سختی کمتر علاوه بر افزایش نرخ براده برداری، می توانند موجب افزایش زبری سطح ماشینکاری شوند.

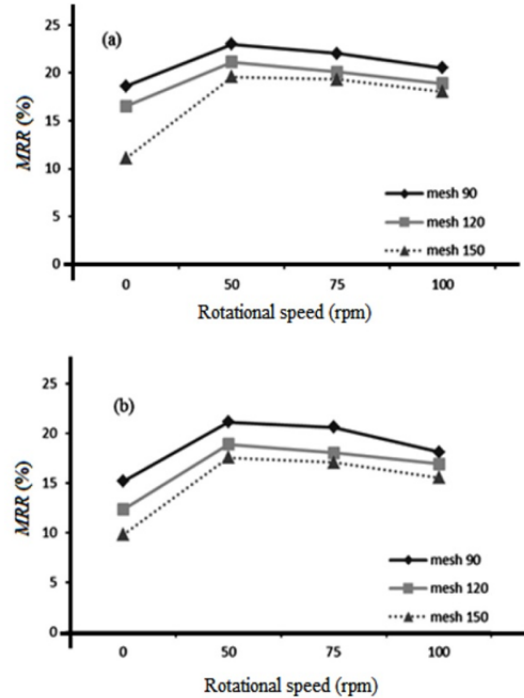


Fig. 11 The effects of rotational speed of workpiece on material removal rate in different meshes (a) workpiece hardness 35 HRC (b) workpiece hardness 55 HRC

شکل 11 تاثیر سرعت دورانی بر روی نرخ براده برداری در مش های مختلف ذرات ساینده (a) سختی قطعه کار 35 HRC (b) سختی قطعه کار 55 HRC

مختلف قطعه کار (N) است، با افزایش مش ذرات ساینده و متعاقباً کاهش اندازه ذرات ساینده، مقدار درصد بهبود زبری سطح افزایش می یابد. علت این امر طبق رابطه (8) ناشی از کاهش حجم براده برداشته شده به ازای هر کدام از ذرات ساینده، با کوچکتر شدن اندازه شعاع ذرات ساینده می باشد که باعث ایجاد یک سطح یکنواخت تر با صافی سطح بهتر می شود.

6-4- بررسی تاثیر سرعت دورانی بر روی درصد بهبود زبری سطح

مطابق شکل 14 که تاثیر سرعت دورانی قطعه کار را بر روی درصد بهبود زبری سطح در سختی های مختلف قطعه کار و اندازه مش های مختلف ذرات ساینده نشان می دهد، با افزایش سرعت دورانی درصد بهبود سطح افزایش می یابد. افزایش سرعت دورانی، باعث افزایش سرعت برخورد ذرات ساینده با دیواره جسم و افزایش فشار وارد بر دیواره قطعه کار می گردد. بنابراین نفوذ ذرات ساینده روی سطح قطعه افزایش می یابد و زبری سطح بهبود می یابد.

7-4- بررسی تاثیر سختی قطعه کار بر روی درصد بهبود زبری سطح

مطابق شکل 15، که نشان دهنده تاثیر سختی قطعه کار بر روی درصد بهبود

جدول 3 آنالیز واریانس مربوط به نرخ براده برداری

Table 3 Analysis of variance for material removal rate						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	3	142.661	142.661	47.554	129.55	0.000
B	2	60.461	60.461	30.230	82.36	0.000
C	1	32.294	32.294	32.294	87.98	0.000
A×B	6	10.513	10.513	1.752	4.77	0.039
A×C	3	1.032	1.032	0.344	0.94	0.479
B×C	2	0.327	0.327	0.163	0.45	0.660
خطا	6	2.202	2.202	0.367		
مجموع	23	249.490				

4-8- آنالیز واریانس در مورد زبری سطح

آنالیز واریانس برای طراحی آزمایش انجام شده در مورد زبری سطح فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی در جدول 4 آورده شده است. مطابق موارد مطرح شده، پارامترهای ورودی (A، B و C) و فقط اثر متقابل فاکتورهای A و C (A×C) در تاثیر گذاری بر زبری سطح از لحاظ آماری دارای اهمیت هستند.

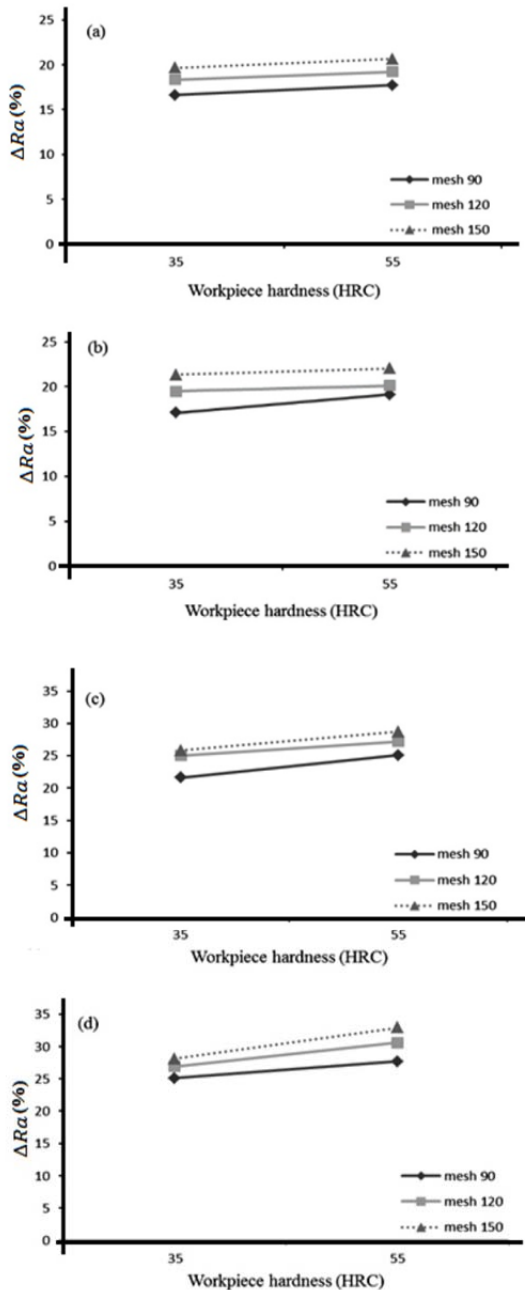


Fig. 15 The effects of workpiece hardness on percent of surface roughness improvement in different meshes (a) rotational speed N=0 rpm (b) rotational speed N=50 rpm (c) rotational speed N=75 rpm (d) rotational speed N=100 rpm

شکل 15 تاثیر سختی قطعه کار بر روی درصد بهبود زبری سطح در مش های مختلف ذرات ساینده (a) سرعت دورانی 0 دور در دقیقه (b) سرعت دورانی 50 دور در دقیقه (c) سرعت دورانی 75 دور در دقیقه (d) سرعت دورانی 100 دور در دقیقه

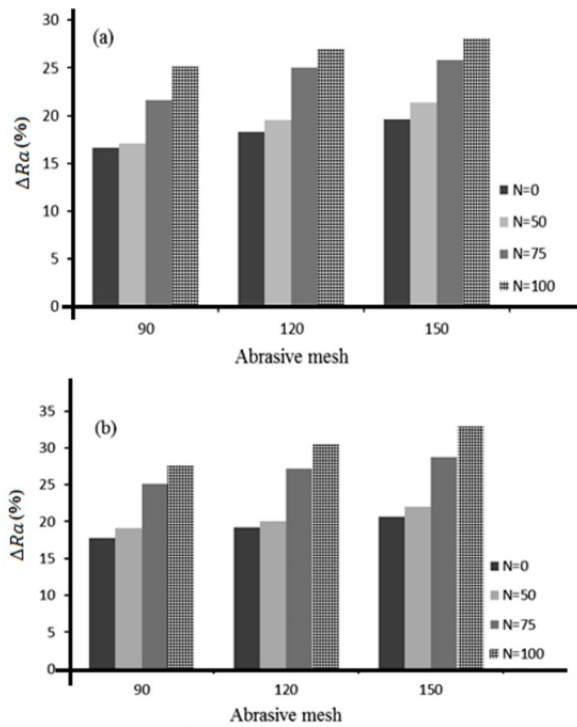


Fig. 13 The effect of abrasive particles mesh on percent of surface roughness improvement in different rotational speed (a) workpiece hardness 35 HRC (b) workpiece hardness 55 HRC

شکل 13 تاثیر اندازه مش ذرات ساینده بر روی درصد بهبود زبری سطح در سرعت دورانی های مختلف (a) سختی قطعه کار 35 HRC (b) سختی قطعه کار 55 HRC

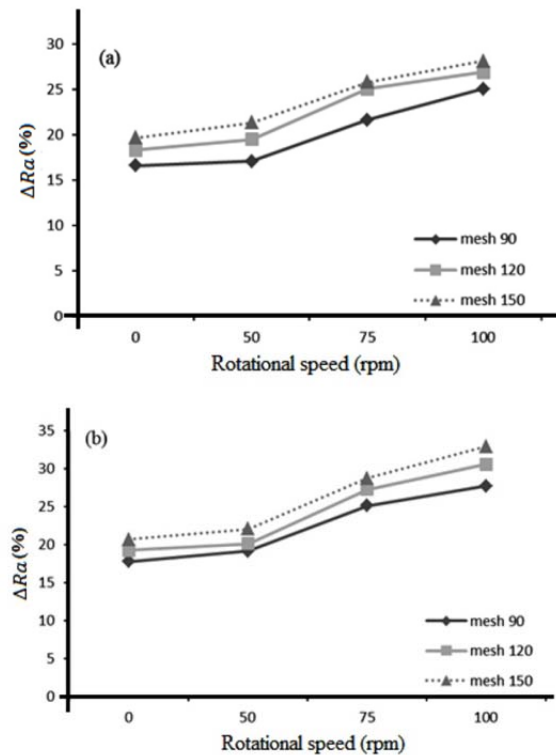


Fig. 14 The effects of rotational speed of workpiece on percent of surface roughness improvement in different meshes (a) workpiece hardness 35 HRC (b) workpiece hardness 55 HRC

شکل 14 تاثیر سرعت دورانی بر روی درصد بهبود زبری سطح در مش های مختلف ذرات ساینده (a) سختی قطعه کار 35 HRC (b) سختی قطعه کار 55 HRC

9-4- بررسی تاثیر فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی بر روی

کیفیت سطح

1-9-4- بررسی کیفیت سطح توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی

شکل 16، تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح قطعه کار را قبل از فرآیند پرداختکاری جریان ساینده و شکل های 17 و 18، تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح قطعه کار را بعد از فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی نشان می دهد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی تهیه شده از قطعات پرداخت شده توسط فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی در مش ذرات ساینده 150 و سختی قطعه کار 55 راکول سی، نشان دهنده ی تاثیر مطلوب این فرآیند در پرداخت فولاد H 13 است. همچنین با توجه به این شکلهای مشاهده می شود که در مش و سختی ثابت با افزایش سرعت دورانی از 50 دور در دقیقه به 100 دور در دقیقه، صافی سطح به دست آمده برای قطعات پرداخت شده بهبود می یابد.

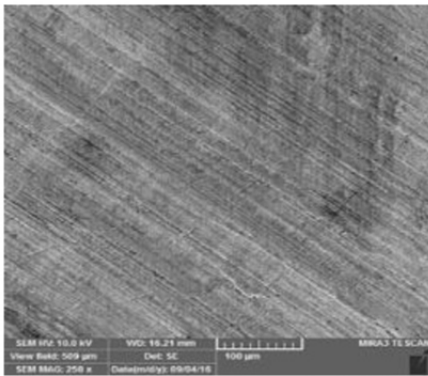


Fig. 18 SEM image of the surface workpiece after RAJM process with rotational speed of 100 rpm

شکل 18 تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح قطعه کار بعد از فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده دورانی با سرعت دورانی 100 rpm

2-9-4- بررسی کیفیت سطح با پروفیل سطحی

شکل 19 و 20 قطعه کار و پروفیل سطح آن را قبل و بعد از فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی نشان می دهد. مطابق شکل 20 پس از پرداختکاری توسط فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی در سرعت دورانی 100 دور در دقیقه و مش ذرات ساینده 150 مشاهده می شود که با کاهش ارتفاع زبری های سطح قطعه کار یک سطح یکنواخت با کیفیت بالا ایجاد می شود.

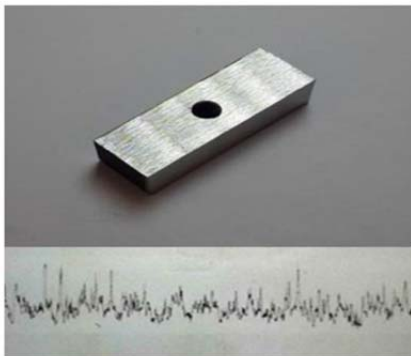


Fig. 19 Workpiece with hardness of 55 HRC and its surface profile before RAJM process

شکل 19 قطعه کار با سختی 55 راکول سی و پروفیل سطح آن قبل از فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی

جدول 4 آنالیز واریانس مربوط به زبری سطح

Table 4 Analysis of variance for surface roughness

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	3	393.911	393.911	131.304	410.54	0.000
B	2	53.485	53.485	26.743	83.61	0.000
C	1	27.950	27.950	27.950	87.39	0.000
A×B	6	1.382	1.382	0.230	0.72	0.650
A×C	3	7.980	7.980	2.660	8.32	0.015
B×C	2	0.330	0.330	0.165	0.52	0.621
Error	6	1.919	1.919	0.320		
Total	23	486.957				

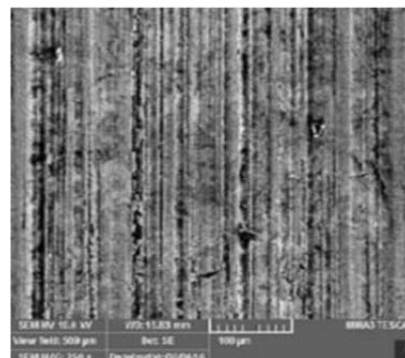


Fig. 16 SEM image of the workpiece surface before RAJM process

شکل 16 تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح قطعه کار قبل از فرآیند ماشینکاری با جریان ساینده دورانی



Fig. 20 Workpiece with 55 HRC hardness and its surface profile after RAJM process (mesh: 150 and N=100 rpm)

شکل 20 قطعه کار با سختی 55HRC و پروفیل سطح آن بعد از فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی (مش ذرات ساینده 150 و سرعت دورانی 100 دور در دقیقه)

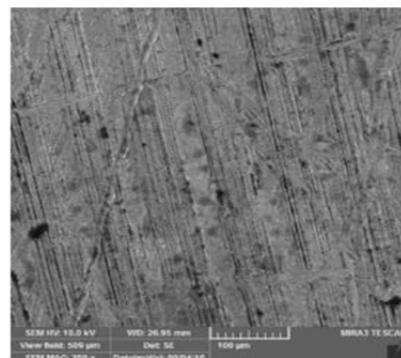


Fig. 17 SEM image of the workpiece surface after RAJM process with rotational speed of 50 rpm

شکل 17 تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح قطعه کار بعد از فرآیند ماشینکاری با جریان ساینده دورانی با سرعت دورانی 50 rpm

5- نتیجه گیری

در این مطالعه فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر سرعت دورانی قطعه کار، اندازه ذرات ساینده و سختی قطعه کار بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح بدست آمده بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد:

- اعمال سرعت دورانی در فرآیند پرداختکاری جریان ساینده باعث افزایش نرخ براده برداری می شود. این افزایش برای مش ثابت در سختی 35 راکول سی مقدار بیشتری نسبت به سختی 55 راکول سی است.
- سرعت دورانی بهینه برای بیشترین افزایش نرخ براده برداری در فرآیند پرداختکاری جریان ساینده دورانی 50 دور در دقیقه است.
- اعمال سرعت دورانی در فرآیند پرداختکاری جریان ساینده سبب کاهش زبری سطح پرداختکاری شده از 0.347 میکرون به 0.233 میکرون می شود و افزایش سرعت دورانی منجر به بهبود هر چه بیشتر زبری سطح پرداختکاری شده می گردد.
- افزایش مش ذرات ساینده باعث کاهش نرخ براده برداری و زبری سطح پرداختکاری شده می شود.
- نفوذ ذرات ساینده در قطعه کار با سختی بالا نسبت به قطعه نرم تر کمتر بوده و در نتیجه نرخ براده برداری قطعه سخت تر، کمتر بوده و سطح یکنواخت تر با کیفیت سطح بالاتری به دست می آید.

6- مراجع

- [1] T. R. Loveless, R. E. Williams, K. P. Rajurkar, A study of the effects of abrasive flow finishing on various machined surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 1, No. 47, pp. 133-151, 1994.
- [2] V. K. Jain, S. G. Adsul, Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 7, No. 40, pp. 1003-1021, 2000.
- [3] V. Gorana, V. Jain, G. Lal, Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining, *Wear*, Vol. 260, No. 1, pp. 128-139, 2006.
- [4] M. R. Shabgard, B. Karamzadeh, R. Alizadegan, A. Gholipoor, Experimental study of finishing of AISI H13 hot work steel using Abrasive Flow Finishing (AFF) process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 106-112, 2015. (In Persian)
- [5] J. Kenda, F. Pusavec, G. Kermouche, J. Kopac, Surface integrity in abrasive flow machining of hardened tool steel AISI D2, *Procedia Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 172-177, 2011.
- [6] R. Kumar Jain, V. K. Jain, Optimum selection of machining conditions in abrasive flow machining using neural network, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 1, No. 108, pp. 62-67, 2000.
- [7] M. R. Sankar, V. K. Jain, J. Ramkumar, Experimental investigations into rotating workpiece abrasive flow finishing, *Wear*, Vol. 267, No. 1, pp. 43-51, 2009.
- [8] M. R. Sankar, V. K. Jain, J. Ramkumar, Rotational abrasive flow finishing (R-AFF) process and its effects on finished surface topography, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 7, No. 50, pp. 637-650, 2010.
- [9] A. Azami, A. Azizi, Rotational abrasive finishing (RAF); novel design for micro/nanofinishing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 91, No. 9, pp. 3159-3167, 2017.
- [10] M. R. Sankar, V. K. Jain, J. Ramkumar, Nano-finishing of cylindrical hard steel tubes using rotational abrasive flow finishing (R-AFF) process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, No. 9, pp. 2179-2187, 2016.