



## مطالعه تجربی فرآیند پرداختکاری فولاد گرم کار AISI H13 به روش جریان ساینده

محمد رضا شهبگرد<sup>1\*</sup>، بهنام کرم زاده<sup>2</sup>، رضا علیزادگان<sup>3</sup>، احد قلی پور<sup>4</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز  
 2- دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه مراغه، مراغه  
 3- دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز  
 4- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز  
 \* تبریز، صندوق پستی 51664-16471، mrshabgard@tabrizu.ac.ir

## چکیده

در این تحقیق فرآیند پرداختکاری فولاد گرم کار AISI H13 به روش جریان ساینده (AFF) مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر پارامترهای مختلف پروسه از قبیل فشار اکستروژن، غلظت ذرات ساینده، اندازه ذرات ساینده و وضعیت اولیه سطح بر روی میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش غلظت ذرات ساینده باعث افزایش میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده می‌شود. افزایش فشار اکستروژن از 4 مگاپاسکال تا 6 مگاپاسکال منجر به افزایش میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده و از 6 مگاپاسکال تا 8 مگاپاسکال باعث کاهش میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مویید این موضوع است که افزایش زمان پرداختکاری به بیش از 4 ساعت، سبب نفوذ و ماندگاری ذرات ساینده در سطح نمونه گردیده و بدین طریق موجب تخریب آن می‌شود. همچنین مطابق نتایج این تحقیق، با افزایش اندازه ذرات ساینده، میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده افزایش یافته و این فرآیند در سطوح اولیه خشن کاری شده، تأثیرگذاری بیشتری بر کیفیت سطح مورد نظر دارد.

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 19 آذر 1393  
 پذیرش: 15 دی 1393  
 ارائه در سایت: 04 بهمن 1393  
 کلید واژگان:  
 پرداختکاری به روش جریان ساینده  
 مشخصات ذرات ساینده  
 فشار اکستروژن  
 کیفیت سطح اولیه  
 زبری سطح

## Experimental study of finishing of AISI H13 hot work steel using Abrasive Flow Finishing (AFF) process

Mohammad Reza Shabgard<sup>1\*</sup>, Behnam Karamzadeh<sup>2</sup>, Reza Alizadegan<sup>1</sup>, Ahad Gholipoor<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran  
 2- Department of Mechanical Engineering, Maragheh University, Maragheh, Iran  
 3- 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 10 December 2014  
 Accepted 05 January 2015  
 Available Online 24 January 2015

Keywords:  
 Abrasive Flow finishing  
 Abrasive Particles Specifications  
 Extrusion Pressure  
 Primary Surfaces Quality  
 Surface Roughness

## ABSTRACT

In this research the abrasive flow finishing process (AFF) of AISI H13 hot work steel was studied and the effects of various process parameters such as flow pressure (extrusion pressure), abrasive particles densities, abrasive particles sizes and the first quality of surfaces on variations of surface roughness and material removal have been investigated. The results showed that increasing the density of abrasive particles leads to increase in variations of surface roughness and material removal. Increase of extrusion pressure from 4 to 6 MPa causes the increase in variations of surface roughness and material removal and from 6 to 8 Mpa leads to decrease in variations of surface roughness and material removal. Electron microscopic results showed that increasing finishing process time over 4 hours causes a detrimental effect on the surface of the specimens, as a result of penetration and stabilization of abrasive particles in the form of broken particles. Also, according the results of this paper, increasing the size of abrasive particles leads to higher variations of surface roughness and material removal, and this process is more effective in finishing of rougher surfaces.

## 1- مقدمه

پرداختکاری، برای پرداختکاری سطوح پیچیده و غیرقابل دسترس نیز مناسب است. در این فرآیند یک ماده نیمه جامد پلیمری با نسبت‌های معین با ذرات ساینده مخلوط شده و تحت فشار و به صورت ماسی از میان قطعه کار مورد نظر عبور داده می‌شود [1، 2].

مؤلفه‌های موثر در فرآیند براده برداری توسط ذرات ساینده را می‌توان به دو مولفه محوری ( $F_a$ ) و شعاعی ( $F_r$ ) مطابق شکل 1، تجزیه نمود. همانطوریکه در شکل 1، ملاحظه می‌شود، پس از اعمال نیروی شعاعی به ذرات ساینده و

امروزه بسیاری از قطعات صنعتی مورد استفاده باید صافی سطح بالایی داشته باشند. اغلب روش‌های سنتی جهت حصول صافی سطح مورد نیاز در صنایع مختلف وقت‌گیر و هزینه بر می‌باشند. بر اساس گزارش‌های موجود، فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده<sup>1</sup>، ضمن کاهش زمان و هزینه

1- Abrasive Flow Machining (AFM)

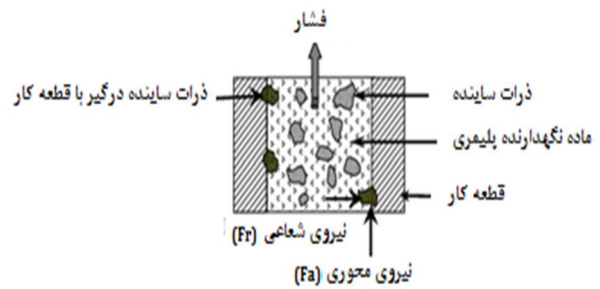
ورود آن‌ها به سطح داخلی قطعه کار، این ذرات با اعمال نیروی محوری در راستای محور قطعه کار پیشروی کرده و زبری سطح را کاهش می‌دهند. مکانیزم برداشت براده در فرآیند پرداختکاری توسط ذرات ساینده در شکل 2، نشان داده شده است. مطابق این شکل، اگر نیروی محوری وارد شده به ذرات ساینده بزرگ‌تر از مقدار نیروی لازم برای برداشتن براده ( $F_{req}$ ) باشد، عمل براده برداری و کاهش زبری سطح انجام می‌شود [3].

لاولس و همکاران به مطالعه میزان ماده برداشته شده از قطعه کار بعد از فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده پرداخته و گزارش نموده‌اند که شرایط اولیه سطح تأثیر عمده‌ای در قابلیت فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده در ایجاد یک سطح پرداخت شده دارد [2]. سانکار و همکاران نانو پرداختکاری سطح قطعه کار از جنس کامپوزیت پایه آلومینیوم توسط فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده را با استفاده از محیط نگهدارنده از جنس استایرن بوتادین<sup>1</sup> مطالعه کرده و گزارش نمودند که افزایش بیش از حد ویسکوزیته محیط نگهدارنده سبب کاهش نیروی شعاعی و در نتیجه کاهش نرخ برداشت ماده می‌شود [3].

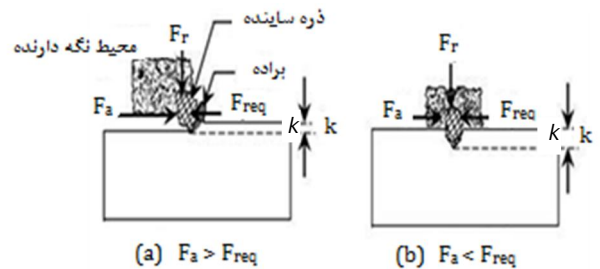
چین و همکاران فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده را با استفاده از شبکه عصبی مدل‌سازی نموده و از روش الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی این فرآیند استفاده کردند. جنس قطعه کار بررسی شده توسط آن‌ها آلومینیوم و محیط ساینده از جنس بتونه تنبل<sup>2</sup> به همراه ذرات ساینده سیلیکون کارباید انتخاب شد، درحالی‌که سرعت متوسط پیستون، غلظت ذرات ساینده، اندازه متوسط ذرات ساینده و تعداد سیکل‌ها به عنوان پارامترهای ورودی و نرخ برداشت ماده و صافی سطح به عنوان پارامترهای خروجی مطالعه در نظر گرفته شدند [4]. گورانا و همکاران در یک مطالعه تجربی، نیروهای ماشینکاری موجود و غلظت ذرات ساینده در طی فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که اجزای نیروی برشی و چگالی ذرات ساینده فاکتورهای حاکم بر زبری

فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده پرداخته و گزارش نموده‌اند که شرایط اولیه سطح تأثیر عمده‌ای در قابلیت فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده در ایجاد یک سطح پرداخت شده دارد [2]. سانکار و همکاران نانو پرداختکاری سطح قطعه کار از جنس کامپوزیت پایه آلومینیوم توسط فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده را با استفاده از محیط نگهدارنده از جنس استایرن بوتادین<sup>1</sup> مطالعه کرده و گزارش نمودند که افزایش بیش از حد ویسکوزیته محیط نگهدارنده سبب کاهش نیروی شعاعی و در نتیجه کاهش نرخ برداشت ماده می‌شود [3].

چین و همکاران فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده را با استفاده از شبکه عصبی مدل‌سازی نموده و از روش الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی این فرآیند استفاده کردند. جنس قطعه کار بررسی شده توسط آن‌ها آلومینیوم و محیط ساینده از جنس بتونه تنبل<sup>2</sup> به همراه ذرات ساینده سیلیکون کارباید انتخاب شد، درحالی‌که سرعت متوسط پیستون، غلظت ذرات ساینده، اندازه متوسط ذرات ساینده و تعداد سیکل‌ها به عنوان پارامترهای ورودی و نرخ برداشت ماده و صافی سطح به عنوان پارامترهای خروجی مطالعه در نظر گرفته شدند [4]. گورانا و همکاران در یک مطالعه تجربی، نیروهای ماشینکاری موجود و غلظت ذرات ساینده در طی فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که اجزای نیروی برشی و چگالی ذرات ساینده فاکتورهای حاکم بر زبری



شکل 1 نیروهای موثر بر روی ذرات ساینده در فرآیند AFM [3]



شکل 2 مکانیزم براده برداری در فرآیند AFM [3]

## 2- شرایط تجربی آزمایش‌ها

### 2-1- تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها

در فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده، یک ماده نیمه جامد پلیمری حاوی ذرات ساینده، تحت فشار و به صورت مماسی از سطح قطعه کار عبور

3- Natural Rubber  
4- Butyl Rubber

1- Butadiene Styrene  
2- Silly Putty

آورده شده‌اند. همچنین در ادامه این مطالعه، از تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی برای بررسی سطوح پرداختکاری شده با این روش استفاده شده است.

جهت مشاهده توپوگرافی سطح قطعه کار و مکانیزم برداشت ماده از سطح نمونه‌ها از دستگاه میکروسکوپ الکترونی مدل میرا<sup>1</sup> 3 تسکان<sup>1</sup> استفاده شد. وزن قطعات قبل و بعد از فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده توسط ترازوی دیجیتال مدل سارتوریوس<sup>2</sup> با دقت 1/1 میلی‌گرم اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری زبری سطح قطعات قبل و بعد از فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده از زبری سنج الکترونیکی دیجیتال مدل ماهر<sup>3</sup> استفاده گردید.

جدول 1 پارامترهای متغیر ورودی این مطالعه

پارامتر	مقادیر
درصد وزنی (غلظت) ذرات ساینده در ماده نگهدارنده	40 و 50 و 60
فشار اکستروژن (مگاپاسکال)	4 و 6 و 8
اندازه مش ذرات ساینده	150 و 220
کیفیت اولیه سطح	خشن و پرداخت

جدول 2 پارامترهای ثابت این مطالعه

پارامتر	مقدار
زمان هر تست	2 ساعت
جنس محیط نگهدارنده	لاستیک سیلیکونی
جنس ذرات ساینده	سیلیکون کارباید
درصد وزنی روغن اضافه شده به محیط نگهدارنده	5%

جدول 3 آزمایش‌های طراحی شده در این مطالعه

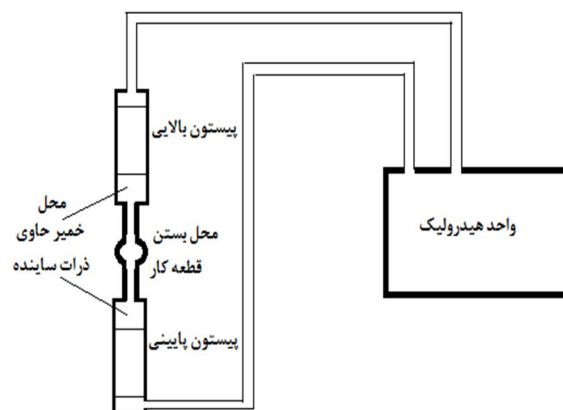
شماره آزمایش	درصد وزنی (غلظت) ذرات ساینده در ماده نگهدارنده	فشار اکستروژن (مگاپاسکال)	اندازه مش ذرات ساینده	وضعیت سطح اولیه
1	50	6	150	پرداخت
2	50	6	150	خشن
3	50	6	220	پرداخت
4	50	6	220	خشن
5	40	4	220	خشن
6	40	6	220	خشن
7	40	8	220	خشن
8	50	4	220	خشن
9	50	6	220	خشن
10	50	8	220	خشن
11	60	4	220	خشن
12	60	6	220	خشن
13	60	8	220	خشن

1- Mira 3- Tescan  
2- Sartorius  
3- Mahr

داده می‌شود. برای انجام آزمایش‌ها یک دستگاه پرداختکاری با جریان ساینده طراحی و ساخته شد. این دستگاه که شماتیک آن در شکل 3، نشان داده شده است، از دو قسمت اصلی تشکیل شده است. قسمت اول از دو عدد پیستون رفت و برگشتی و محفظه نگهدارنده قطعه کار تشکیل شده که حرکت دادن پودرهای ساینده روی سطح قطعه کار و مهار کردن مناسب قطعه کار را بر عهده دارد. قسمت دوم واحد هیدرولیک است که نیروهای لازم برای ماشینکاری (حرکت پیستون‌ها) را تأمین می‌کند. شکل 4، دستگاه پرداختکاری به روش جریان ساینده مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

## 2-2- اجرای آزمایش‌ها

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر اندازه ذرات ساینده و کیفیت سطح اولیه بر میزان برداشت ماده و میزان کاهش زبری سطح در فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده، تعداد 4 آزمایش به صورت فول فاکتوریل طراحی و انجام شده و سپس با در نظر گرفتن نتایج بهینه مربوط به اندازه ذرات ساینده و کیفیت سطح اولیه، تعداد 9 آزمایش برای بررسی تأثیر فشار اکستروژن و غلظت ذرات ساینده، به صورت فول فاکتوریل طراحی و انجام شد. پارامترهای متغیر ورودی در جدول 1، و پارامترهای ثابت در جدول 2، آورده شده است. آزمایش‌های طراحی شده در این مطالعه در جدول 3،



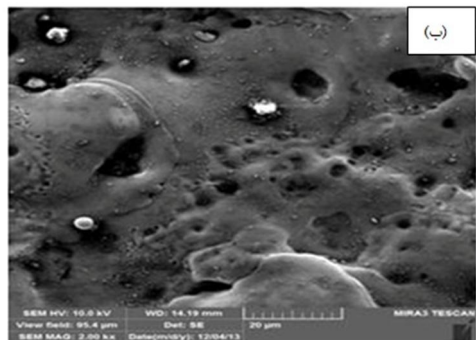
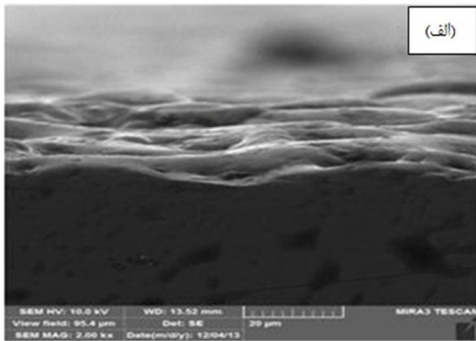
شکل 3 شماتیک دستگاه پرداختکاری با جریان ساینده



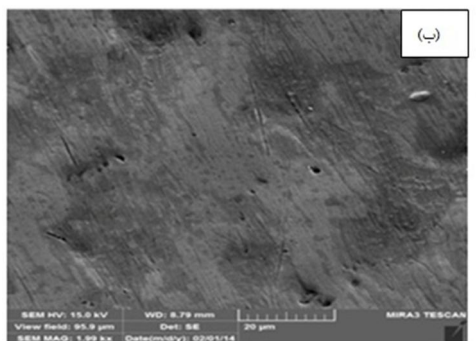
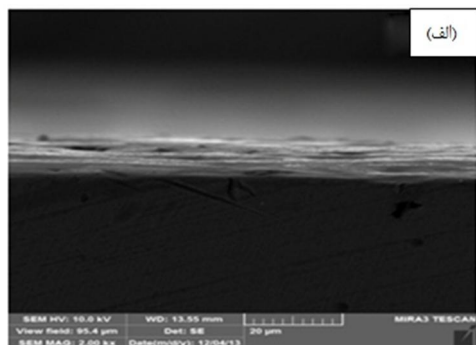
شکل 4 دستگاه پرداختکاری با جریان ساینده

جدول 4 عناصر آلیاژی تشکیل دهنده فولاد گرم کار AISI H13

عنصر آلیاژی	آهن	کربن	سیلیسی م	کروم	وانادیوم	مولیبدن
درصد وزنی %	89/7	0/37	0/998	5/23	1/07	1/12



شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح قطعه کار قبل از فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده



شکل 7 سطح قطعه کار بعد از فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده

برای مخلوط کردن مواد تشکیل دهنده محیط ساینده از دستگاه مخلوط کن مدل هوبارت<sup>1</sup> بهره گرفته شد. مطابق اندازه گیری های انجام شده، هر سیکل قطعه کار حدود 1/2 ثانیه طول می کشد.

### 2-3- مواد مورد استفاده در آزمایش ها

جنس قطعات مورد استفاده در این مطالعه از فولاد ابزار AISI H13 در ابعاد 8 × 8 × 30 میلی متر است. درصد عناصر آلیاژی فولاد استفاده شده در این مطالعه در جدول 4، ارائه شده است. سطح نمونه ها قبل از فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده توسط دستگاه اسپارک مدل شارمیلز ربوفرم<sup>2</sup> 2000 با استفاده از الکتروود مسی و در دو حالت خشن و پرداخت ماشینکاری گردید تا آماده پرداختکاری با روش جریان ساینده شوند.

### 2-4- آماده سازی محیط ساینده

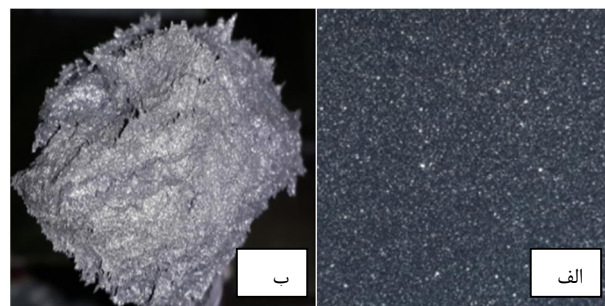
محیط ساینده از سه بخش اصلی شامل پلیمر حمل کننده ذرات ساینده (ماده نگهدارنده)، خود ذرات ساینده و روغن تعدیل کننده گرانیوی<sup>3</sup> ماده پلیمری و ذرات ساینده جهت تسهیل حرکت ذرات ساینده، تشکیل شده است. شکل 5، تصویر ذرات ساینده و خمیر حاوی ذرات ساینده را نشان می دهد. در این پژوهش از پودر ساینده سیلیکون کاربرد با دو مش 150 و 220 استفاده شد. نسبت وزنی پودر ساینده در ماده نگهدارنده به ترتیب 40، 50 و 60 درصد انتخاب گردید. همچنین ماده نگهدارنده مورد استفاده در این تحقیق لاستیک سیلیکونی قالب گیری و روغن مورد استفاده روغن صنعتی شرکت بهران بوده است.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- تأثیر فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده بر کیفیت

##### سطوح قطعه کار

شکل 6، سطح قطعه کار قبل از فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده و شکل 7، سطح قطعه کار بعد از فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده به مدت 2 ساعت با درصد وزنی ذرات ساینده در ماده نگهدارنده معادل با 50، فشار اکستروژن 8 مگاپاسکال، اندازه مش ذرات ساینده 220 و سطح اولیه خشن را نشان می دهد. با توجه به متناظر بودن شکل 6 الف) با شکل 7 الف) و شکل 6 ب) با شکل 7 ب)، بهبود صافی سطح با انجام این فرآیند که منجر به تولید سطوحی با کیفیت بهتر می شود، به وضوح دیده می شود.



شکل 5 الف) ذرات ساینده سیلیکون کاربرد (ب) خمیر حاوی ذرات ساینده

1- Hobart  
2- Charmilles Robofil 2000  
3- viscosity



3-2- تأثیر اندازه ذرات ساینده بر روی میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده از سطح قطعه کار

شکل 8، تأثیر اندازه ذرات ساینده را بر روی میزان کاهش زبری سطح به دست آمده در فشار اکستروژن 4 مگاپاسکال و در دو حالت کیفیت اولیه سطح خشن و پرداخت نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش اندازه ذرات ساینده، میزان کاهش زبری سطح بیشتر می‌شود.

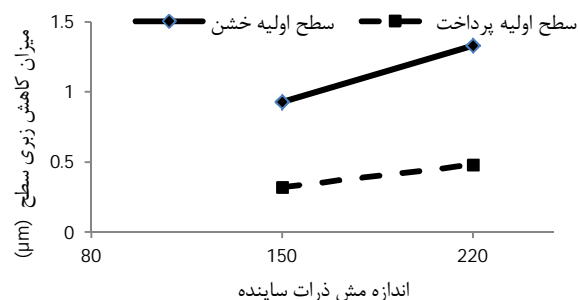
شکل 9، شماتیکی از نحوه عملکرد یک ذره ساینده دایروی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش قطر دانه، ضخامت براده تغییر شکل نیافته ( $b$ )، افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان براده برداری از سطح افزایش یافته و زبری سطح کمتری به دست می‌آید.

3-3- تأثیر کیفیت اولیه سطح بر روی میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده از سطح قطعه کار

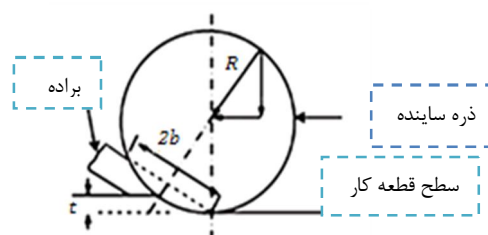
مطابق شکل 8، با افزایش زبری سطح اولیه قطعه کار میزان کاهش زبری سطح افزایش می‌یابد و این فرآیند در سطوح خشن تأثیرگذاری بیشتری بر کیفیت سطح مورد نظر دارد. دلیل این موضوع را می‌توان در طبیعت سطوح خشن جستجو کرد، یعنی با برداشت نسبی از نقاط تیز و برجسته سطح خشن، زبری سطح به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد، اما در سطح اولیه پرداخت شده حتی با برداشت چشمگیر ماده نیز، زبری سطح به میزان کمی کاهش خواهد یافت. در ضمن، در سطح با زبری اولیه بیشتر، ذرات ساینده فضای بیشتری برای نفوذ به قطعه کار و برداشت براده خواهند داشت و زبری سطح کاهش بیشتری دارد.

3-4- تأثیر غلظت ذرات ساینده بر روی میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده از سطح قطعه کار

شکل 10 تأثیر غلظت ذرات ساینده بر روی میزان کاهش زبری سطح و شکل



شکل 8 نمودار تأثیر اندازه ذرات ساینده و کیفیت اولیه سطح بر روی میزان کاهش زبری سطح

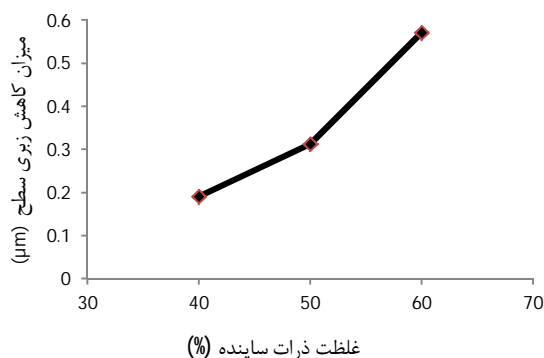


شکل 9 دانه ساینده در حین تولید براده

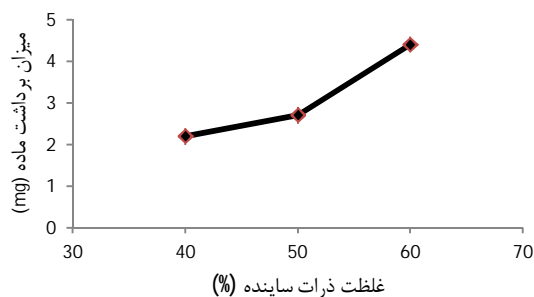
3-5- تأثیر فشار اکستروژن بر روی میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده از سطح قطعه کار

تأثیر فشار اکستروژن بر میزان کاهش زبری سطح قطعه کار در شکل 12، نشان داده شده است. همانطوریکه این شکل نشان می‌دهد، میزان کاهش زبری سطح یک رابطه یکنواخت با افزایش فشار اکستروژن دارد، به گونه‌ای که با افزایش فشار از 4 مگاپاسکال به 6 مگاپاسکال، منحنی یک شیب مثبت داشته و در ادامه با افزایش بیشتر فشار اکستروژن تا 8 مگاپاسکال، میزان کاهش زبری سطح کمتر می‌شود.

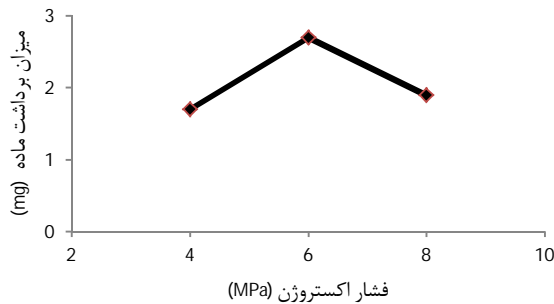
تأثیر فشار اکستروژن بر میزان ماده برداشته شده از قطعه کار در شکل 13، نشان داده شده است. همان طوریکه این شکل نشان می‌دهد، با افزایش فشار از 4 مگاپاسکال به 6 مگاپاسکال میزان ماده برداشته شده از قطعه کار بیشتر شده ولی با افزایش فشار اکستروژن از 6 تا 8 مگاپاسکال، میزان ماده برداشت شده از قطعه کار کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان این گونه بیان نمود که، با افزایش فشار اکستروژن تا 6 مگاپاسکال، مؤلفه شعاعی نیرو افزایش می‌یابد و افزایش در مؤلفه شعاعی نیرو سبب افزایش میزان نفوذ



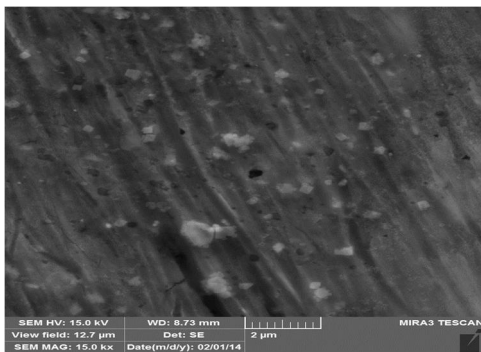
شکل 10 نمودار تأثیر غلظت ذرات ساینده بر روی میزان کاهش زبری سطح در فشار اکستروژن 6 مگاپاسکال



شکل 11 نمودار تأثیر غلظت ذرات ساینده بر روی میزان برداشت ماده در فشار اکستروژن 6 مگاپاسکال



شکل 13 نمودار تأثیر فشار اکستروژن بر روی میزان برداشت ماده در درصد وزنی ذرات ساینده معادل با 50 %



شکل 14 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح قطعه کار بعد از فرآیند پرداختکاری با جریان ساینده با فشار اکستروژن 8 مگاپاسکال

پدیده افزایش میزان نفوذ ذرات ساینده در سطح و شکسته شدن این ذرات به ذرات کوچکتر و ماندگاری برخی از این ذرات در سطح قطعه کار (شکل 12) باعث افزایش میزان زبری سطح و تخریب سطح قطعه کار و ایجاد یک مقاومت سطحی در برابر سایش می‌شود. همچنین با خروج تعدادی از این ذرات ساینده از سطح قطعه کار، حفره‌هایی در سطح قطعه کار ایجاد می‌شود که تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی در شکل 12، نیز این امر را تأیید می‌کند.

#### 4- نتیجه‌گیری

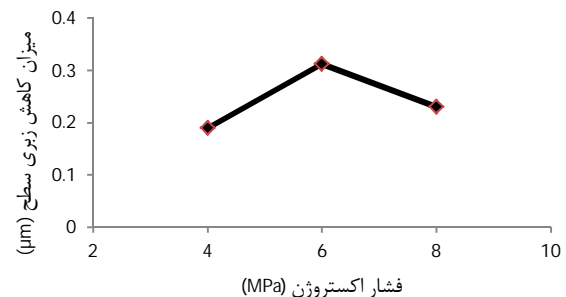
- 1- نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که در فرآیند ماشینکاری به روش جریان ساینده، برداشت ماده از برجستگی‌های سطح قطعه کار صورت گرفته و سطحی با کیفیت بهتر به دست می‌آید که با برداشته شدن برجستگی‌ها تأثیر این فرآیند کاهش می‌یابد.
- 2- با افزایش اندازه ذرات ساینده، میزان ماده برداشته شده از سطح قطعه کار و میزان کاهش زبری سطح افزایش می‌یابد.
- 3- میزان تغییرات مقدار ماده برداشته شده و میزان کاهش زبری سطح به دست آمده برای سطوح اولیه خشن توسط فرآیند پرداختکاری به روش جریان ساینده، بیشتر از سطوح اولیه پرداخت شده است.
- 4- افزایش غلظت ذرات ساینده باعث افزایش میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده می‌شود.
- 5- افزایش فشار اکستروژن از 4 مگاپاسکال تا 6 مگاپاسکال منجر به افزایش میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده شده و از 6

ذرات ساینده در سطح قطعه کار می‌شود. در ضمن در محدوده فشار اکستروژن 4 تا 6 مگاپاسکال، مولفه محوری نیرو بیشتر از مولفه نیروی لازم برای برش جنس قطعه کار است و بنابراین نیروی محوری می‌تواند ذرات ساینده‌ای را که به وسیله نیروی شعاعی به داخل قطعه کار فرورفته‌اند، به بیرون براند که نتیجه این عمل از بین رفتن برجستگی‌های قطعه کار و افزایش صافی سطح قطعه کار است [14]. از طرف دیگر افزایش مولفه شعاعی نیرو با افزایش فشار اکستروژن سبب بیشتر شدن سطح تماس ذرات ساینده با سطح کار می‌گردد. بنابراین حداکثر میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده در فشار اکستروژن 6 مگاپاسکال اتفاق می‌افتد.

همچنین با افزایش فشار اکستروژن تا 6 مگاپاسکال تعداد ذرات ساینده موثر در فرآیند سایش بیشتر شده و در نتیجه میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده بیشتر می‌شود، درحالی‌که با افزایش فشار اکستروژن به بیش از 6 مگاپاسکال، منجر به کاهش تعداد ذرات ساینده موثر می‌شود [5]. افزایش فشار اکستروژن از 6 به 8 مگاپاسکال، موجب افزایش بیش از حد نیروی شعاعی وارد بر ذرات ساینده می‌شود و عمق نفوذ ذرات ساینده و میزان سطح تماس ذرات ساینده با سطح قطعه کار تا اندازه‌ای افزایش می‌یابد که مولفه محوری نیرو کمتر از مولفه مورد نیاز برای برداشت ماده از سطح قطعه کار می‌شود و مطابق شکل 14، این ذرات در داخل قطعه کار باقی می‌مانند و میزان کاهش زبری سطح و میزان ماده برداشته شده از سطح قطعه کار کاهش می‌یابد. مولفه مورد نیاز برای برداشت ماده از سطح قطعه کار مطابق رابطه (1) محاسبه می‌شود.

$$F_{req} = \tau_s \times A_p \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $F_{req}$  نیروی لازم برای برش جنس قطعه کار،  $A_p$  سطح تصویر نفوذ ذرات ساینده و  $\tau_s$  استحکام برشی مواد قطعه کار است. شکل 14، تصویر میکروسکوپ الکترونی بعد از عملیات پرداختکاری به روش جریان ساینده با درصد وزنی ذرات ساینده در ماده نگهدارنده معادل با 50، فشار اکستروژن 8 مگاپاسکال، اندازه مش ذرات ساینده 220، سطح اولیه خشن و به مدت 4 ساعت را نشان می‌دهد. همانطوریکه از این شکل ملاحظه می‌شود در اثر پرداختکاری به روش جریان ساینده در این شرایط، ذرات ساینده در سطح قطعه کار نفوذ کرده و تعداد زیادی از آن‌ها در سطح باقی می‌مانند و باعث افزایش وزن قطعه کار می‌شوند. یکی از دلایل کاهش میزان ماده برداشت شده از سطح قطعه کار با افزایش فشار اکستروژن به بیش از 6 مگاپاسکال نیز همین موضوع است.



شکل 12 نمودار تأثیر فشار اکستروژن بر روی میزان کاهش زبری سطح در درصد وزنی ذرات ساینده معادل با 50 %

- [6] V. Gorana, V. Jain, G. Lal, Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining, *Wear*, Vol. 260, pp. 128-139, 2006.
- [7] A. M. Wani, V. Yadava, A. Khatri, Simulation for the prediction of surface roughness in magnetic abrasive flow finishing (MAFF), *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, pp. 282-290, 2007.
- [8] A. C. Wang, S. J. Lee, Study the characteristics of magnetic finishing with gel abrasive, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp. 1063-1069, 2009.
- [9] M. R. Sankar, V. K. Jain, J. Ramkumar, Experimental investigations into rotating workpiece abrasive flow finishing, *Wear*, Vol. 267, pp. 43-51, 2009.
- [10] K. K. Kar, N. L. Ravikumar, P. B. Tailor, J. Ramkumar, D. Sathiyamoorthy, Performance evaluation and rheological characterization of newly developed butyl rubber based media for abrasive flow machining process, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, pp. 2212-2221, 2009.
- [11] M. R. Sankar, V. K. Jain, J. Ramkumar, Y. M. Joshi, Rheological characterization of styrene-butadiene based medium and its finishing performance using rotational abrasive flow finishing process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, pp. 947-957, 2011.
- [12] S. K. Yadav, M. K. Singh, B. R. Singh, Effect of Unconventional Machining on Surface Roughness of Metal: Aluminum and Brass- A Case Study of Abrasive Flow, *S-JSET*, Vol. 2, ISSN: 2229-7111, Issue 1.
- [13] J. Cherian, D. J. M. Issac, Effect of Process Variables in Abrasive Flow Machining, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 3, Issue 2, 2013.
- [14] S. C. Jayswal, V. K. Jain, P. M. Dixit, Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26 (5-6), pp. 477-490, 2005.

مگاپاسکال تا 8 مگاپاسکال، باعث کاهش میزان کاهش زبری سطح و میزان برداشت ماده می‌شود.

**6-** افزایش زمان پرداختکاری به بیش از 4 ساعت، با فشار اکستروژن 8 مگاپاسکال، نه تنها سبب بهبود شرایط سطحی نمی‌گردد، بلکه یک اثر مخربی را بر روی سطح از طریق نفوذ و ماندگاری درصدی از ذرات ساینده (به صورت لبه‌های شکسته ذرات ساینده) در سطح پرداختکاری شده با این فرآیند می‌گردد.

#### 5- مراجع

- [1] N. Taniguchi, Current status in and future trends of ultraprecision machining and ultrafine materials processing, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 32, pp. 573-582, 1983.
- [2] 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. 47, pp. 133-151, 1994.
- [3] M. R. Sankar, J. Ramkumar, V.K. Jain, Experimental investigation and mechanism of material removal in nano finishing of MMCs using abrasive flow finishing (AFF) process, *Wear*, Vol. 266, pp. 688-698, 2009.
- [4] R. K. Jain, V. K. Jain, Optimum selection of machining conditions in abrasive flow machining using neural network, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 108, pp. 62-67, 2000.
- [5] V. Gorana, V. Jain, G. Lal, Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 201-211, 2004.