



مطالعه تجربی ماشین کاری چرخشی با جریان مواد ساینده و تاثیر دمای خمیر ساینده بر نرخ براده برداری فرآیند

مهدی اسحق^۱، سید جلال همتی^{*}

^۱ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخچه داوری:

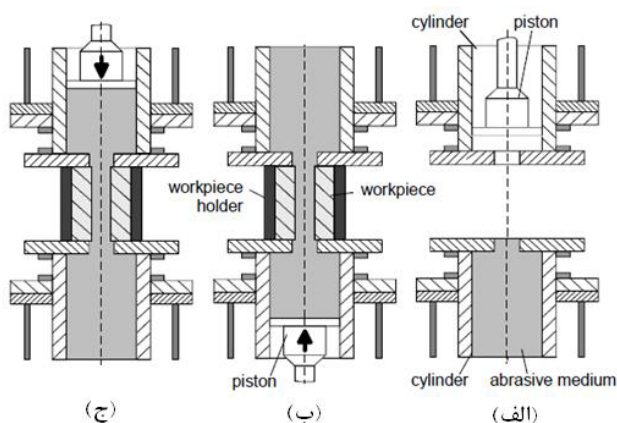
دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۰۲
پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۲/۲۸

کلمات کلیدی:

ماشین کاری با جریان مواد ساینده
ماشین کاری چرخشی با جریان مواد
ساینده
پولیش کاری
پرداخت کاری
نرخ براده برداری

خلاصه: ماشین کاری چرخشی با جریان مواد ساینده، شکل جدیدی از فرآیند ماشین کاری با جریان مواد ساینده است که مولفان بتازگی آن را به عنوان یک روش پرداخت کاری و پولیش کاری غیرسنتی معرفی نموده‌اند. از آنجایی که در ماشین کاری با جریان مواد ساینده، تاثیر منفی افزایش درجه حرارت ماده ساینده در حین فرآیند بر نرخ براده برداری گزارش شده است در این تحقیق نقش این متغیر بر فرآیند ماشین کاری چرخشی با جریان مواد ساینده مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابزار جدیدی مجهز به وسایل اندازه‌گیری فشار و دما و نیز وسیله‌ی تنظیم دما طراحی و ساخته شده و تغییرات دمای خمیر ساینده در حین فرآیند، اندازه‌گیری شده است. متغیرهای فرآیند در این حالت بر اساس شرایط بهینه ماشین کاری با حداکثر نرخ براده برداری در مطالعه قبلی مولفان انتخاب شده‌اند. نتایج تجربی با ابزار جدید نیز موید آن است که نرخ براده برداری و صافی سطح قابل حصول با ماشین کاری با جریان مواد ساینده، در فرآیند ماشین کاری چرخشی با جریان مواد ساینده نیز دست‌یافتنی هستند. همچنین در بازه زمانی مورد نیاز برای پرداخت کاری در ماشین کاری چرخشی با جریان مواد ساینده، افزایش محسوسی در دمای خمیر اتفاق نمی‌افتد که این امر از مزایای روش جدید است. لیکن در صورت ادامه عملیات ماشین کاری، به دلیل افزایش درجه حرارت خمیر، نرخ براده برداری کاهش می‌یابد که از این حیث رفتار مشابهی با فرآیند ماشین کاری با جریان مواد ساینده از خود نشان می‌دهد.

خمیر ساینده، قطعه کار موجود در نگهدارنده‌ی قطعه را پرداخت می‌کند. این روند طبق شکل ۱ج، معکوس می‌شود و ترکیبی از این رفت و برگشت‌ها، چرخه کاری فرآیند را تشکیل می‌دهد.



شکل ۱: نمای کلی ابزار ماشین کاری با ماده ساینده [۱]

Fig1. Schematic of AFM tool [1]

برای رسیدن به بافت بهتر سطحی و همچنین برای غلبه بر برخی

۱- مقدمه

برای غلبه بر محدودیت‌های مختلف موجود در پرداخت کاری سنتی، فرآیندهای پیشرفته‌ای در این زمینه توسعه یافته‌اند. فرآیند ماشین کاری با جریان ساینده^۱، یکی از فرآیندهای پیشرفته پرداخت کاری و صیقل کاری است که می‌تواند با استفاده از یک خمیر ساینده، صیقل کاری قطعات فلزی دارای بخش‌های پیچیده یا بسیار ریز را که نیاز به پرداخت سطح عالی دارند با توجه اقتصادی انجام دهد. شکل ۱ به صورت شماتیک اجزا و تنظیمات تجربی فرآیند ماشین کاری با جریان ساینده را نمایش می‌دهد. تجهیزات شامل (الف) سیلندرها و پیستون‌ها با فشار هیدرولیک، (ب) قطعه کار و گیره نگهدارنده آن و (ج) یک جفت مخزن خمیر ساینده و کنترل‌کننده آن هستند. طبق شکل ۱الف پیستون، خمیر ساینده را که در مخزن پایین جمع شده است طبق شکل ۱ب به بالا فشار داده و آن را از اطراف قطعه عبور می‌دهد تا به سیلندر دیگر وارد شود. در نتیجه

1 Abasive Flow Machining (AFM)

* نویسنده‌دار مکاتبات: hemmati@hormozgan.ac.ir



خود جلب کرده است [۶]:

• ماشین کاری با جریان ساینده التراسونیک^۵ را شارما و همکاران مطالعه کرده‌اند [۷]. در این فرآیند مخلوط پلیمر و ذرات ساینده به سمت مرکز وسیله تقویت شده با امواج التراسونیک پمپ می‌شود و در خروجی، جریان به وسیله ابزار و قطعه کار محدود می‌گردد. مخلوط، دایره‌وار نسبت به محور ابزار به جریان می‌افتد. ترکیب جریان و ارتعاش در مخلوط، منجر به سایش مؤثرتر و بهبود پرداخت سطح می‌شود.

• ماشین کاری با جریان ساینده اربیتالی^۶ می‌تواند صیقل کاری دقیق روی لبه‌ها و سطوح پیچیده و حفره‌ها را با دقت، یکنواختی و صحت بالاتر انجام دهد. ترکیب جریان و حرکت اربیتالی مکانیکی پرداخت سطح را ۲۰ تا ۳۰ بار بهتر از صافی ابتدایی می‌کند [۸].

• ماشین کاری با جریان ساینده الکتروشیمیایی^۷ با استفاده از الکترولیت‌های پلیمری امکان‌پذیر است. در این حالت با افزایش نرخ براده‌برداری، پرداخت سطح کاهش می‌یابد [۹].

در تمام روش‌های فوق‌الذکر، حرکت رفت و برگشتی ماده ساینده وجود دارد. این حرکت مستلزم درگیری ماده ساینده با سطوحی غیر از سطح قطعه بوده و موجب استهلاک دانه‌های ساینده و براده‌برداری از سطوح ناخواسته خواهد شد. از نظر مصرف ماده ساینده نیز به حجم قابل توجهی از ماده ساینده گران‌قیمت نیاز می‌باشد که به‌ویژه در مواردی که برای هر قطعه، به چندین بار استفاده از پودر ساینده با مش‌های متفاوت نیاز باشد هزینه‌های فرآیند را بالا می‌برد. مؤلفان با هدف استفاده بهینه از ماده ساینده ضمن افزایش کارایی فرآیند، روشی به نام ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده^۸ را پیشنهاد نموده‌اند [۱۰]. شکل ۲ الف نمای مقطعی ابزار مخصوص ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده و شکل ۲ ب تصویر حین فرآیند آن را نشان می‌دهد. مبانی کار این سامانه مشابه با ماشین کاری با ماده ساینده است با این تفاوت که در این روش حرکت رفت و برگشتی حذف شده و به جای آن از حرکت چرخشی اعمالی به قطعه کار توام با هم‌زدن خمیر ساینده استفاده شده است. یعنی ذرات ساینده مخلوط با رسانه تحت فشار قرار گرفته و این فشار توام با هم‌خوردن خمیر هم‌زمان با چرخش قطعه کار، باعث نفوذ ذرات در قطعه کار و عمل سایش می‌شود. در این ابزار، محفظه دوغاب توسط ژل پلیمری حاوی مواد ساینده پر می‌شود. سپس فلنج میانی همراه فیکسچر و قطعه کار توسط دستگاه پرس تا فشار مطلوب تحت فشار قرار می‌گیرد. سپس فلنج پایینی با تعدادی پیچ در بدنه محفظه ثابت می‌شود. سپس ابزار مذکور مطابق شکل ۲ ب روی دستگاه تراش نصب شده و پس از تنظیمات، عملیات ماشین کاری انجام می‌گیرد.

از تنگناهای ماشین کاری با جریان ساینده همچون نرخ براده‌برداری پایین و عدم توانایی ماشین کاری قطعات ته‌بسته، تلاش‌های پیوسته‌ای در زمینه ارتقای ماشین و فرآیند مذکور صورت گرفته است. نتیجه این تلاش‌ها، معرفی روش‌ها و ماشین‌های جدیدی بوده است.

والیا و همکاران [۲] میله‌های خیلی کوچکی با شکل‌های متفاوت را در مسیر جریان دوغاب ساینده با لزجت پایین قرار داده و آن‌ها را چرخاندند. به اعتقاد ایشان، به دلیل اعمال نیروی گریز از مرکز به دانه‌های ساینده، پرداخت سطح بهتری قابل حصول خواهد بود و به همین خاطر این فرآیند، ماشین کاری با جریان ماده ساینده به کمک نیروی گریز از مرکز^۱ نامیدند.

سانکار و همکاران [۳] تلاش خود را بر بهبود نرخ پرداخت کاری و بافت سطحی متمرکز کردند. آن‌ها قطعه‌ی سر مته ماندنی را در مسیر جریان ماده ساینده قرار دادند و آن را پرداخت کاری با جریان مواد ساینده‌ی هدایت شونده توسط سر مته^۲ نامیدند. ماده ساینده در امتداد شیار مارپیچی جریان می‌یابد که با این کار در ناحیه داخلی، برای دانه‌های ساینده حرکت تصادفی ایجاد می‌شود. این امر موجب به هم‌ریختگی مجدد دانه‌ها در ناحیه بیرونی می‌شود. بنابراین نسبتاً تعداد بیشتری از دانه‌های نو و سالم با سطح قطعه درگیر می‌شوند. در این حالت مسیر طی شده توسط دانه‌ها از مسیر پیموده شده در حالت سنتی ماشین کاری با جریان ساینده، طولانی‌تر بوده و در نتیجه باعث افزایش نرخ پرداخت می‌شود. در صورت کاهش قطر سر مته، براده‌برداری کاهش خواهد یافت.

در هر دو روش پیش‌گفته، ممکن است دوغاب در نزدیکی محور میانی، چرخش داشته باشد ولی در محل درگیری ماده ساینده با قطعه، این چرخش خیلی کم شود. سانکار و همکاران [۴] یک طرح جدید برای چرخش قطعه کار ایجاد کردند تا احتمال چرخش دانه ساینده فعال، در ناحیه پرداخت قطعه بالا رود و در نتیجه هم پرداخت سطحی و هم نرخ براده‌برداری بهبود یابند.

سینگ و شان [۵] با افزودن ذرات فرومغناطیسی به مخلوط ساینده و اعمال میدان مغناطیسی در اطراف قطعه کار مشاهده نمودند برای براده‌برداری بیشتر به تعداد سیکل‌های کمتری نیاز است. در این روش که به ماشین کاری با جریان مواد ساینده به کمک میدان مغناطیسی^۳ معروف شده است با نرخ جریان پایین ماده ساینده و چگالی شار مغناطیسی بالا، براده‌برداری زیاده‌تر و تغییر در زبری سطح بیشتر شد.

فرآیندهای ماشین کاری ترکیبی^۴ با هدف دستیابی به عملکرد بهتر در حوزه فرآیندهای ماشین کاری پیشرفته، توجه زیادی را به

- 1 Centrifugal Force Assisted Abrasive Flow Machine (CFAAFM)
- 2 Drill Bit Guided Abrasive Flow Finishing (DBG-AFF)
- 3 Magnetic Assisted Abrasive Flow Machining (MAAFM)
- 4 Hybrid machining Processes (HMP)

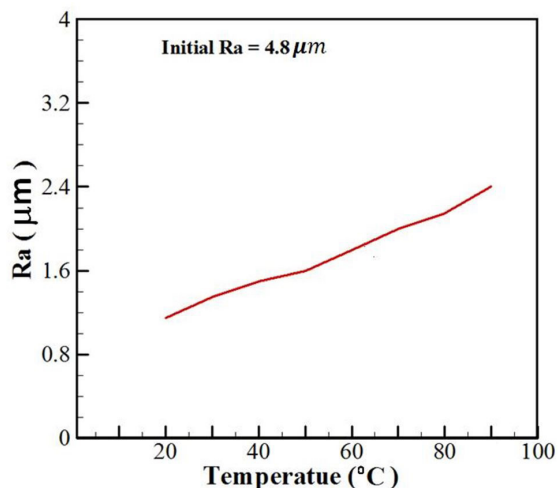
- 5 Ultrasonic Flow Polishing
- 6 Orbital Flow Machining
- 7 Electrochemical Aided AFM (ECAFM)
- 8 Abrasive Flow Rotary Machining (AFRM)

فانگ و همکاران [۱۳] به طور تجربی پی بردند که در ماشین کاری با ماده ساینده لزجت خمیر ساینده به طور معناداری تحت تاثیر دما تغییر می کند به طوری که افزایش دما، باعث کاهش لزجت خمیرهای بسیار ویسکوز و کاهش نرخ براده برداری می شود.

جدول ۱: متغیرهای آزمون برای مطالعه تاثیر دما روی زبری سطح در ماشین کاری با ماده ساینده [۱۲]

Table 1. Test variables for studying temperature effect on surface roughness in AFM [12]

Natural polymer of easter group	جنس خمیر
۶۰	غلظت مواد ساینده (%)
۸۰	سایز مش
۲۱۷	سرعت جریان رسانه m/min
۶	فشار هیدرولیک MPa
۱۰	تعداد سیکل

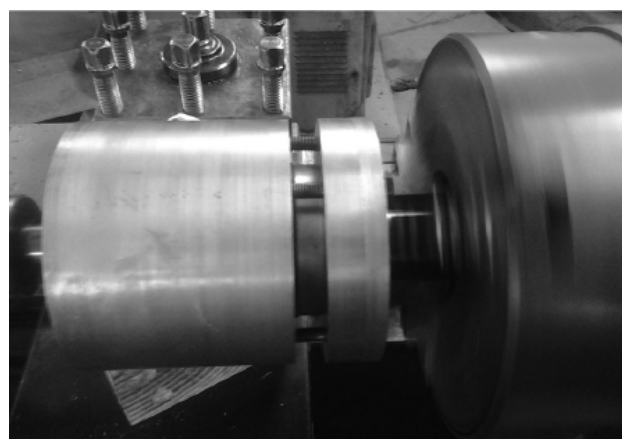
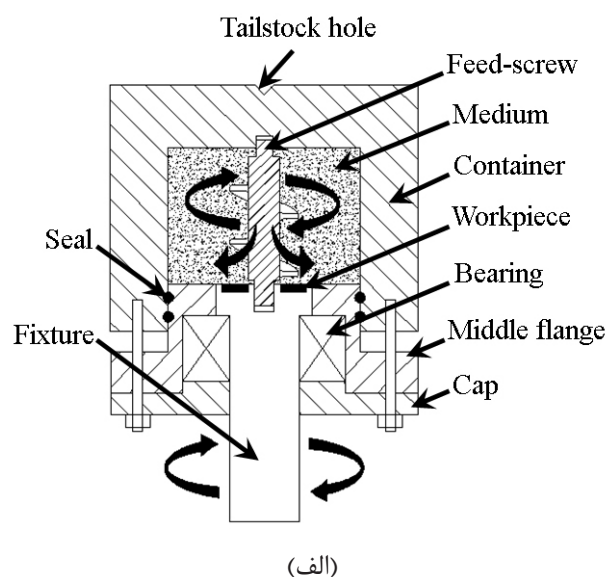


شکل ۳: افزایش زبری سطح با افزایش دمای خمیر ساینده در ماشین کاری با ماده ساینده [۱۲]

Fig3. Increasing the surface roughness with rising abrasive paste temperature in AFM [12]

با توجه به نقش مهم تغییرات درجه حرارت خمیر ساینده بر نرخ براده برداری در ماشین کاری با ماده ساینده و لزوم بررسی مشابه برای فرآیند ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده در این مقاله به این موضوع پرداخته شده است. اما با توجه به این که ابزار به کار رفته در مرجع [۱۰] (شکل ۲) برای این منظور قابل استفاده نبود، ابتدا ابزار جدیدی مجهز به وسایل تنظیم و اندازه گیری فشار و دما طراحی و ساخته شد و عملکرد این ابزار تحت شرایط مختلف از فشار، سرعت دورانی محور و زمان مورد ارزیابی قرار گرفت و نرخ براده برداری اندازه گیری شد. سپس در شرایط بهینه از نظر براده برداری، صافی سطح قطعات مطالعه گردید. همچنین برای بررسی میزان براده برداری و تغییر دمای خمیر ساینده در زمان های طولانی تر، آزمون هایی در دو

در فرآیند ماشین کاری با ماده ساینده در اثر تماس مواد ساینده با قطعه کار و براده برداری، دمای خمیر افزایش می یابد. در مورد پیش بینی تغییرات دما در حین این فرآیند گزارش هایی ارائه شده است. جین و جین [۱۱] برای درک بهتر پدیده های حرارتی در این فرآیند و پیش بینی تغییرات دما در حین فرآیند یک مدل تحلیلی ساده پیشنهاد کردند. همچنین توزیع حرارت در خمیر ساینده و قطعه کار پیش بینی گردید. سانگ و لی [۱۲] با در نظر گرفتن متغیرهای جدول ۱، آزمون هایی را ترتیب دادند و تاثیر دمای خمیر ساینده بر زبری سطح قطعه کار در ماشین کاری با ماده ساینده را بررسی کردند و دریافتند که مطابق شکل ۳ با افزایش دمای خمیر ساینده، زبری سطح افزایش می یابد.



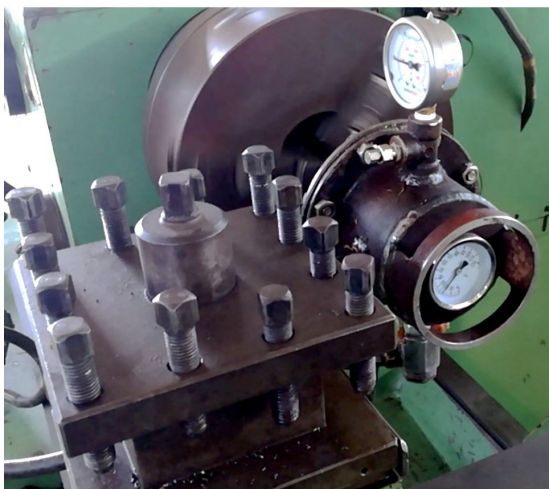
شکل ۲: الف) نمای مقطعی ابزار ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده و ب) تصویر ابزار در حین فرآیند [۱۰]

Fig2. a) Sectional view of AFM tool and b) tool image during the operation [10]

جدول ۲: فهرست اجزاء داخلی ابزار جدید ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده

Table 2. The part list of new tool proposed for the AFRM

نام اجزاء	
هیتر گرمایشی	۱
حفاظ پکینگ و یاتاقان	۲
شافت	۳
یاتاقان	۴
پکینگ آب بندی	۵
درب محفظه	۶
محفظه خمیر ساینده	۷
گسکت	۸
صفحه نگهدارنده قطعه	۹
گیره قطعه کار	۱۰
قطعه کار	۱۱
غلاف ترموکوپل	۱۲
درپوش محفظه	۱۳
سنجهی دما	۱۴
گریس خور	۱۵
نیپل	۱۶
سه راهی شیر	۱۷
شیر تخلیه فشار	۱۸
سنجه فشار	۱۹
-	۲۰



شکل ۶: تصویر ابزار جدید ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده در موقعیت کار روی دستگاه تراش

Fig.6. Figure of new tool proposed for the AFRM in working position on a lathe

مرحله ۱۶ و ۲۲ دقیقه انجام گرفت. در آخر، میزان براده برداری و نرخ آن در دماهای مختلف از خمیر ساینده اندازه گیری و تفسیر شدند.

۲- تنظیمات روش تجربی

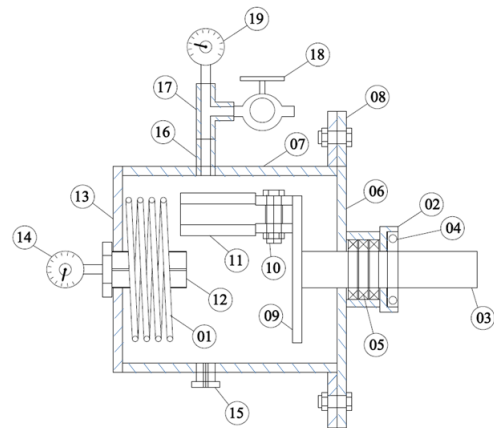
برای بررسی تاثیر دمای خمیر ساینده بر میزان براده برداری در فرآیند ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده نمونه‌ها طبق شکل ۴ طوری در نظر گرفته شده‌اند که با پروفیلی مشابه ایرفویل پره‌های توربین قادر به هم‌زدن خمیر ساینده و توزیع یکنواخت دما در حجم خمیر باشند. ابزار جدیدی نیز با اعمال تغییرات روی نمونه قبلی، طراحی و مطابق شکل ۵ ساخته شد. جدول ۲ فهرست قطعات بکار رفته در ابزار مخصوص جدید را نشان می‌دهد. در این ابزار از ادوات اندازه‌گیری دما و فشار و همچنین المنت گرمایش برای تنظیم دمای خمیر ساینده استفاده شده است. شکل ۶ ابزار جدید ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده در حال کار روی ماشین تراش را نشان می‌دهد. مشخصات وسایل اندازه‌گیری به کار رفته در ابزار و جنس مخزن و قطعه کار به شرح جدول ۳ می‌باشند.

خمیر ساینده در این فرآیند از پلیمر سیلیکون قالب‌گیری و پودر ساینده سیلیکون کارباید^۱ تشکیل شده است. این خمیر با غلظت ۷۰٪ وزنی سیلیکون کارباید مش ۴۰۰ به صورت تکه‌های ریز شده به همراه ۱۰۰ گرم روغن صنعتی شماره ۴۰ که برای کارکرد صحیح هیتر، افزوده شده و ۵۰ گرم کاربید سیلیس با مش ۱۰۰ مخلوط با روغن، بکار رفته است و در این جا به اختصار خمیر ساینده نامیده می‌شود.



شکل ۴: قطعه کارهای مورد استفاده در آزمون‌ها قبل از فرآیند

Fig.4. Samples used in tests before the operation



شکل ۵: نمای برش خورده ابزار جدید ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده

Fig.5. Sectional view of new tool proposed for the AFRM



شکل ۷: نحوه گیره‌بندی قطعه کارها روی صفحه نگهدارنده

Fig7. Clamping method of workpieces on holding plate

۳- بررسی عملکرد ابزار، نتایج و بحث

برای پیدا کردن شرایط بهینه براده‌برداری با ابزار جدید، آزمون‌های اولیه براساس متغیرهای مختلف فرآیند و مقادیر جدول ۴ طراحی شدند. میزان براده‌برداری (MR) و نرخ براده‌برداری (MRR) از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌گردند:

$$MR = \text{وزن قطعه بعد از آزمون} - \text{وزن قطعه قبل از آزمون} \quad (1)$$

$$MRR = MR / \text{Time} \quad (2)$$

جدول ۴: متغیرهای فرآیند و مقادیر هر یک برای انجام آزمون‌ها

Table4. The process variables and their levels of variations in tests

متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
فشار (bar)	۴۰	۳۰	۲۰
سرعت دوران (rpm)	۷۱	۴۵	۲۲/۵
زمان (min)	۱۲	۸	۴

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش فشار مقدار براده‌برداری افزایش می‌یابد. در فشارهای پایین‌تر انرژی برشی تولید شده برای برش پیک‌های ناصافی کافی نیست. با افزایش فشار از ۲۰ تا ۳۰ بار، MR به سرعت افزایش می‌یابد ولی با گذر از فشار ۳۰ بار، شیب منحنی براده‌برداری کاهش یافته که ممکن است ناشی از این واقعیت باشد که در فشارهای بالاتر خاصیت انعطاف‌پذیری خمیر ساینده کاهش یافته و درصد احتمال برخورد ذرات ساینده با سطح قطعه‌کار کم می‌شود. همچنین با افزایش زمان، میزان براده‌برداری افزایش می‌یابد و در بازه دوم (از ۸ تا ۱۲ دقیقه)، شیب منحنی کمی افت می‌کند و پس از ۱۲ دقیقه فقط دمای خمیر بالا می‌رود. با افزایش سرعت دورانی قطعه‌کار، میزان براده‌برداری افزایش می‌یابد که می‌تواند ناشی از به هم خوردن سریع‌تر خمیر و احتمال بیشتر برخورد ذرات ساینده فعال با سطح قطعه در دوره‌های بالاتر باشد. شکل

جدول ۳: نوع ادوات اندازه‌گیری و جنس مخزن

Table3. The type of measuring equipments as well as workpiece and container materials

مورد	نوع و جنس	ملاحظات
سنجه دما	Bi metal	رزولوشن سنجه ۱ °C
سنجه فشار	روغنی	رزولوشن سنجه ۰/۲ MPa
ترازو	دیجیتالی	رزولوشن ترازو ۰/۰۰۰۱ گرم
مخزن	فولاد کربنی (CS)	A ۱۰۵
قطعه‌کار	آلومینیوم سری ۱	(Fe: %۰/۴, Mn: %۰/۱۸, Al: %۹۹/۳۳)

مراحل اجرای عملیات به شرح زیر است:

- ۱- قطعه کارها در گیره‌های مخصوص در صفحه نگهدارنده ابزار بسته می‌شوند (طبق شکل ۷)؛
 - ۲- محفظه ابزار با خمیر ساینده پر شده و درب آن با هشت عدد پیچ تعبیه شده و گسکت آب‌بندی می‌شود؛
 - ۳- پیچ تنظیم هواگیری ابزار را باز کرده و با گریس پمپ مقداری گریس جهت هواگیری محفظه اضافه می‌شود. این گریس از نوع مصرفی در صنایع نفت و گاز برای پولیش‌کاری نشیمن شیرهای ایمنی است که حاوی سیلیکون کارباید می‌باشد. مقدار گریس (حدوداً ۱۰ سی سی) در مقایسه با حجم محفظه‌ی ابزار (حدوداً ۶۵ سی سی) ناچیز است؛
 - ۴- پس از اتمام هواگیری و در شروع فشارگیری (فشار حدود ۳۰ psi) تزریق گریس متوقف شده و هیتر روشن می‌شود؛
 - ۵- از آنجایی که سایش، فرآیندی گرمازاست و از طرفی، در خلال آزمون‌های تاییدی معلوم شد که دما در ۱۲ دقیقه ابتدایی تغییر محسوسی ندارد تا رسیدن دمای خمیر به دمای مورد نیاز، هیتر روشن نگه داشته می‌شود. در حین گرمایش با هیتر، محور ابزار با دست چرخانده می‌شود تا با استفاده از ویژگی به هم زندگی قطعه کارها، گرما در کل خمیر به طور یکنواخت توزیع گردد؛
 - ۶- پس از این‌که ترموکوپل دمای مورد نظر را نشان داد هیتر خاموش شده و فشار خمیر با استفاده از گریس پمپ تا فشار مطلوب اضافه می‌شود؛
 - ۷- ابزار، روی ماشین تراش بسته شده و عملیات ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده آغاز می‌گردد.
- بعد از هر آزمون خمیر کاملاً تعویض شده است زیرا ذرات ساینده سیلیکون کارباید پس از هر بار آزمون به علت شکسته شدن در حین تماس با سطح قطعه‌کار مقداری از کارایی خود را از دست می‌دهند و برای حصول اطمینان از یکسان بودن شرایط، تعویض خمیر لازم است.

جدول ۵: مقادیر مبنا در انجام آزمون‌های گرم

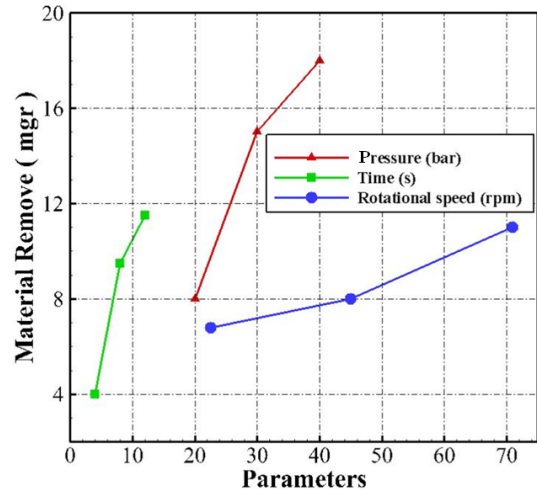
Table 5. Reference values in warm tests

مقدار	متغیر
۴۰	فشار (بار)
۷۱	سرعت گردش شفت ابزار (rpm)
۴۰۰	مش SiC
۷۰٪	غلظت کاربید سیلیس
۱	تولرانس دما (°C)
۱۲	زمان (دقیقه)
آلومینیم سری ۱	جنس قطعه‌کار

راجشا و ونکاتش [۱۴] تاثیر متغیرهای مختلف بر میزان براده‌برداری و صافی سطح در فرآیند ماشین‌کاری با ماده ساینده را طبق جدول ۶ بررسی کرده و بر اساس نتایج خود که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده‌اند، دریافتند که با افزایش فشار مقدار براده‌برداری افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت حرکت پیستون و به تناسب افزایش دبی جریان خمیر ساینده، کیفیت نهایی سطح بهبود می‌یابد. سانگ و لی [۱۲] گزارش کردند طبق شکل ۱۲ دمای خمیر در فرآیند ماشین‌کاری با ماده ساینده در چند چرخه اول به شدت افزایش می‌یابد و پس از ۴ چرخه به بالاترین مقدار (۹۱°C) می‌رسد در صورتی که در ماشین‌کاری چرخشی با جریان مواد ساینده مطابق شکل ۱۳، این افزایش دما تا ۱۲ دقیقه پس از شروع فرآیند بسیار ناچیز بوده و بعد از آن به کندی شروع به افزایش می‌کند. آزمون‌ها در دمای محیط انجام شد و طبق شکل ۱۳ دمای خمیر در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری و ثبت گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود تا حدود ۸ دقیقه پس از شروع فرآیند هیچ‌گونه افزایش دمایی در ظرف حاوی خمیر مشاهده نمی‌گردد که این موضوع می‌تواند به واسطه به هم خوردن خمیر درون ظرف و جابه‌جایی مداوم خمیر از اطراف قطعه‌کار باشد. پر واضح است که این موضوع از مزایای ویژه سیستم ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده در مقایسه با ماشین‌کاری با ماده ساینده است.

برای بررسی تاثیر کارکرد بلند مدت ابزار ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده روی میزان MR، آزمون‌هایی در شرایط یکسان برای شش قطعه‌کار، در دو مرحله ۱۶ دقیقه و ۲۲ دقیقه انجام گرفت. در هر آزمون سه قطعه‌کار مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و میانگین براده‌برداری لحاظ گردیده است. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود از ۸ دقیقه پس از شروع آزمون، دمای خمیر ساینده در حال افزایش است اما میزان براده‌برداری تقریباً ثابت می‌ماند که نشان دهنده مستقل

۹ سطح قطعه‌کار قبل و بعد از اجرای فرآیند ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده با ابزار جدید را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، مقادیر جدول ۵ می‌توانند مبنای انجام آزمون‌های بررسی تاثیر دمای خمیر ساینده بر میزان براده‌برداری واقع شوند.



شکل ۸: میزان براده‌برداری در فشار، زمان و سرعت‌های مختلف
Fig8. MR at different pressures, times and rotational speeds

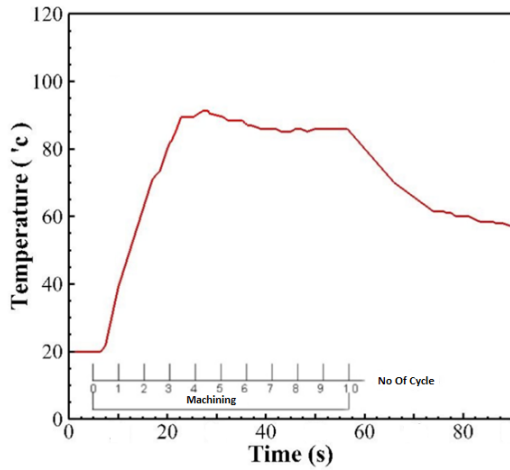


(الف)

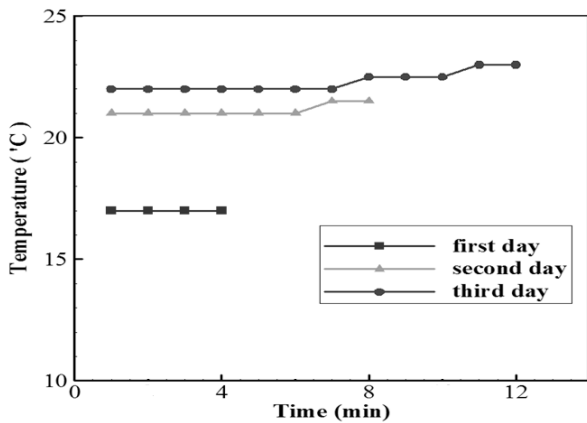


(ب)

شکل ۹: ظاهر قطعه‌کار (الف) قبل و (ب) بعد از پرداخت
Fig9. Workpiece appearance a) before and b) after finishing

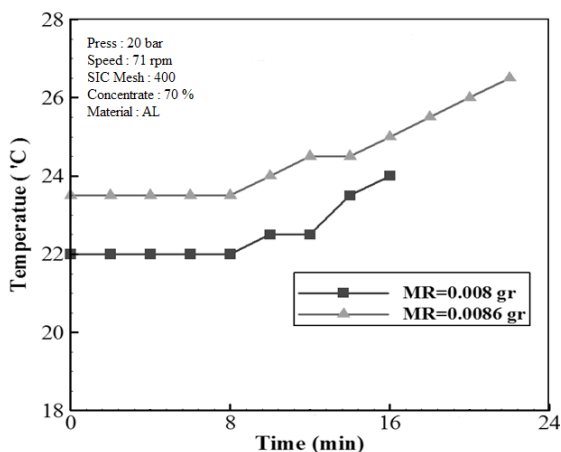


شکل ۱۲: روند افزایش دمای خمیر ساینده در ماشین کاری با ماده ساینده [۱۲]
Fig12. Increasing rate of abrasive paste temperature in AFM [12]



شکل ۱۳: تغییرات دمای خمیر ساینده حین انجام فرآیند ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده

Fig13. Variations of the abrasive paste temperature during the AFRM



شکل ۱۴: میزان افزایش دمای خمیر ساینده و براده برداری در ابزار جدید ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده پس از ۱۶ و ۲۲ دقیقه کارکرد

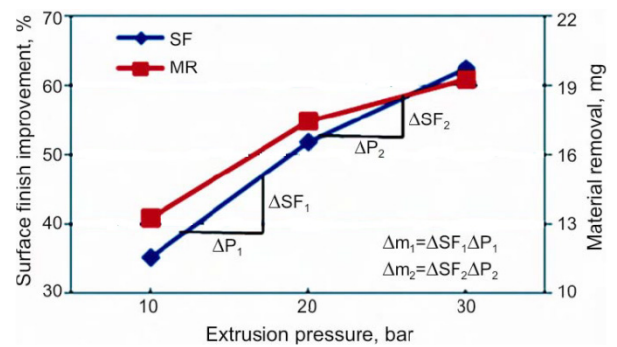
Fig14. Temperature rise of the abrasive paste and MR with new tool of AFRM after 16 and 22 minutes of operation

بودن میزان MR نسبت به زمان پس از مدت زمان مشخصی از شروع آزمون می‌باشد. (برای هر دو مورد تست، مقدار براده برداری حدود ۸ میلی گرم بوده است). مقایسه منحنی‌های شکل ۱۴ نشان می‌دهد که پس از طی یک بازه زمانی مشخص، توان براده برداری دانه‌های ساینده کم می‌شود به طوری که قادر به حذف ناصافی‌های با عمق و یا عرض بیشتر نیستند.

جدول ۶: متغیرهای مختلف جهت بررسی میزان براده برداری و صافی سطح در فرآیند ماشین کاری با ماده ساینده [۹]

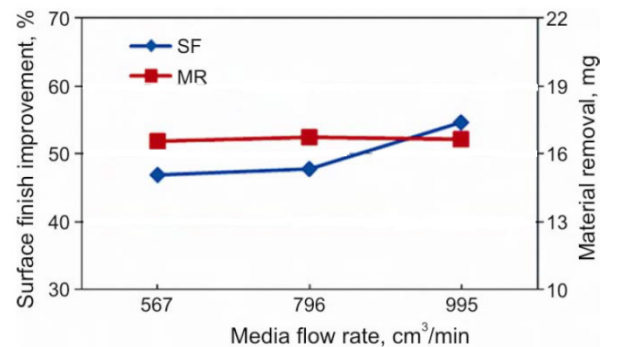
Table6. Different variables considered for investigating MRR and surface finish in AFM [9]

مقدار	متغیر
۲۰۰	سایز ذرات ساینده (مش)
۵	زمان پروسه (min)
۳۵±۲	دمای خمیر ساینده (°C)
۱/۲-۰/۹	زبری اولیه سطح (mm)



شکل ۱۰: تاثیر فشار مدیا بر صافی و براده برداری در ماشین کاری با ماده ساینده [۱۴]

Fig10. Surface finish and MR at different media pressures in AFM [14]



شکل ۱۱: اثر سرعت حرکت بر صافی و براده برداری در ماشین کاری با ماده ساینده [۱۴]

Fig11. Surface finish and MR at different media flow rates in AFM [14]

		۱/۶۴۳	۰/۵۶۲	۲/۲۰۵	افقی	
شماره ۵	۹	۱/۴۳۴	۰/۳۶۵	۱/۰۶۹	عمودی	۱/۳۹۷
		۲/۵۳۹	۱/۰۶۰	۱/۴۷۹	مورب	
		۲/۷۲۳	۰/۵۵۰	۲/۱۷۳	افقی	
شماره ۶	۱۱	۲/۴۲۲	۰/۵۲۳	۱/۸۹۹	عمودی	۲/۰۳۴
		۲/۶۵۸	۰/۶۲۹	۲/۰۲۹	مورب	

جدول ۹: عمق محاسباتی براده حذف شده از روی سطح قطعه کار

Table 9. Calculated depth of chip removed from the workpiece surface

شماره قطعه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
Δh (mm)	۳/۲۹	۳/۵۷	۴/۱۲	۳/۲۹	۲/۴۷	۳/۰۲

۳-۲- تحلیل نظری مکانیزم براده برداری در ماشین کاری با ماده ساینده

و مقایسه ابزار جدید ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده با آن برای بررسی حالت تماس بین دانه ساینده و قطعه کار در ماشین کاری با ماده ساینده، نظریه‌های مختلفی ارائه شده‌اند، ماروچکین [۱۵] سه رژیم متفاوت از تماس بین دانه و قطعه کار را شرح داده است (رژیم تراشه، رژیم پلاستیک، رژیم الاستیک). وی برای رفتار پلاستیک ماده موقع ایجاد یک خراش توسط یک مخروط ناقص، یک تحلیل متقارن محوری^۲ ارائه داده است. همچنین نشان داده که دانه‌های ساینده با تقریب خوبی می‌توانند کاملاً به شکل کره در نظر گرفته شوند. محققین قبلی از نظریه هرتر^۳ در فرآیند سنگ زنی استفاده کرده‌اند و به این وسیله عمق نفوذ را هنگامی که دانه ساینده به سطح تخت فشرده می‌شود تخمین زده‌اند. در ماشین کاری با ماده ساینده نیز می‌توان عمق نفوذ را با استفاده از نظریه هرتر تخمین زد زیرا دو فرآیند سنگ زنی و ماشین کاری با ماده ساینده از جهات زیادی شبیه به هم هستند. بر اساس نظریه هرتر [۱۶] حداکثر مقدار $\bar{\sigma}$ (تنش متوسط روی ناحیه تماس برای تماس الاستیک بین یک کره با شعاع (R) و یک سطح تخت)، موقع شروع تغییر شکل پلاستیک خواهد بود و مقدار آن با سختی سطح تحت H_w برابر است. لذا برای d' (عمق نفوذ) خواهیم داشت:

$$d'/2R = 9.22 [H_w/E_m]^2 \quad (3)$$

تراشه تشکیل نخواهد شد تا زمانی که یک دانه تا عمق مشخصی که تقریباً برابر با ۶٪ از شعاعش (R) است در سطح نفوذ کند. هنگامی که عمق نفوذ از ۶٪ شعاع دانه بیشتر شود سطح قطعه کار برش خورده و تراشه تشکیل خواهد شد. هنگامی که عمق نفوذ d' کمتر از $R/58$ باشد ماده جابه‌جا شده و محتمل تغییر شکل

2 Axisymmetric

3 Hertz

۳-۱- بررسی عملکرد ابزار روی صافی سطح قطعه کار

برای بررسی عملکرد ابزار جدید از نظر صافی سطح قطعات پرداخت شده، ۶ قطعه کار نمونه از جنس آلومینیم سری Yxxx با ترکیب شیمیایی مذکور در جدول ۷ آماده‌سازی و طبق شرایط جدول ۵ تحت آزمایش قرار گرفتند^۱. در جدول ۸، منظور از Ra^1 و Ra^2 ، صافی سطح نمونه‌ها به ترتیب قبل و بعد از کار روی آن‌ها توسط ابزار جدید ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود Ra^2 در بیشتر موارد کمتر از ۵٪ گزارش شده که نشان از عملکرد خوب ابزار جدید دارد. با توجه به ابعاد قطعه کار (مساحت سطح براده برداری شده: $13/5 \text{ cm}^2$ و چگالی آلومینیم: 2700 kg/m^3) و مقدار براده برداری مطابق با جدول ۸ داریم:

$$MR / 10^3 = \Delta h \times 2700 \times 10^3 / 1350 = 10^9$$

از مقادیر محاسباتی Δh (μm) در جدول ۹ می‌توان نتیجه گرفت عمق براده حذف شده از روی سطح قطعه کار به روش ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده، در بازه موثر ماشین کاری با ماده ساینده قرار داشته و به طور تقریبی قابل قیاس با ΔRa (μm) average می‌باشد.

جدول ۷: ترکیب شیمیایی آلومینیم سری Yxxx مورد آزمایش

Table 7. Chemical composition of 7xxx series of tested Aluminum

Al	۹۱/۳%	Mg	۱/۹۷%	Si	۰/۴%
Zn	۳/۹۶%	Cu	۱/۴۳%	Fe	۰/۳۸%

جدول ۸: نتایج اندازه‌گیری صافی سطح و مقدار براده برداری حاصل از کار با ابزار جدید ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده

Table 8. Surface finish and MR values achieved with new tool in the AFRM

ردیف	جهت	Ra 1	Ra 2	ΔRa	MR average (mgr)
شماره ۱	افقی	۲/۸۵۱	۰/۴۸۴	۲/۳۶۷	۱۲
	عمودی	۱/۹۳	۰/۳۴۵	۱/۵۸۵	
	مورب	۱/۶۶۶	۰/۴۹۱	۱/۱۷۵	
شماره ۲	افقی	۲/۶۲۹	۰/۳۵۰	۱/۲۷۹	۱۳
	عمودی	۲/۰۶۸	۰/۳۲۳	۱/۷۴۵	
شماره ۳	مورب	۲/۵۶۱	۰/۶۰۶	۱/۹۵۵	۱۵
	افقی	۳/۱۰۳	۰/۱۴۱	۲/۹۶۴	
شماره ۴	عمودی	۱/۸۸۶	۰/۲۷۲	۱/۶۱۴	۱۲
	مورب	۲/۷۸۲	۰/۶۷۲	۲/۱۱	
شماره ۴	افقی	۲/۸۵۹	۰/۲۳۱	۲/۶۲۸	۱۲
	عمودی	۲/۰۶۸	۰/۲۹۳	۱/۷۷۵	
	مورب	۲/۶۶۹	۰/۵۲۶	۲/۱۴۳	

۱ خمیر ساینده مورد استفاده در آزمون‌های سنجش صافی سطح، فاقد ذرات کاربرد سیلیس با مش ۱۰۰ که به طور جداگانه با روغن میکس شده بودند می‌باشد

۲) در ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده در بازه زمانی مفید ماشین‌کاری، دمای خمیر ساینده تغییر چندانی نمی‌کند و در نتیجه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان براده‌برداری ندارد که این امر از مزایای ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده نسبت به ماشین‌کاری با ماده ساینده است. ولی با توجه به گرمازا بودن فرآیند ماشین‌کاری، در صورت طولانی‌تر شدن فرآیند و افزایش دمای خمیر، این متغیر تاثیر منفی بر MR خواهد داشت و برای دستیابی به یک ماشین‌کاری پایدار، بایستی دما در حین فرآیند کنترل گردد؛

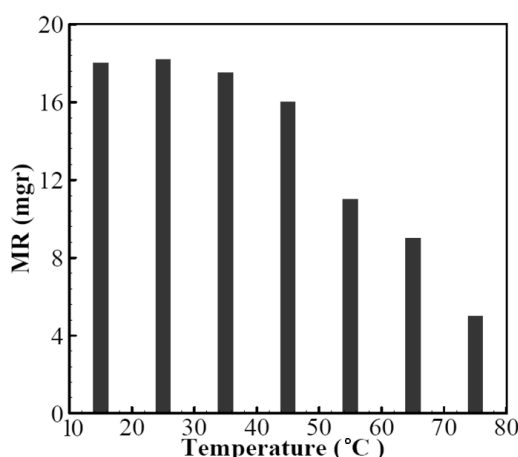
۳) گرچه بنا به ملاحظات استحکام ابزار و ایمنی آزمایش‌ها، حداکثر فشار خمیر ساینده ۴۰ بار در نظر گرفته شده است مقادیر ارائه شده برای هر یک از متغیرهای موثر می‌تواند به عنوان شرایط ماشین‌کاری در فرآیند ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده به کار گرفته شوند. پیشنهاد می‌گردد در طراحی‌های بعدی در فشارهای بالاتر نیز، نتایج فرآیند مورد مطالعه قرار گیرد.

جدول ۱۰: نتایج براده‌برداری در دماهای مختلف در فرآیند ماشین‌کاری

چرخشی با ماده ساینده

Table 10. Resultant material removal at different temperatures in AFRM process

شماره آزمون	دما (°C)	MR (mgr)	MRR (mgr/min)
۱	۱۵	۱۸	۱/۵
۲	۲۵	۱۸/۲	۱/۵۱۷
۳	۳۵	۱۷/۵	۱/۴۵۸
۴	۴۵	۱۶	۱/۳۳۳
۵	۵۵	۱۱	۰/۹۱۷
۶	۶۵	۹	۰/۷۵
۷	۷۵	۵	۰/۴۱۷



شکل ۱۵: کاهش براده‌برداری با افزایش دما در فرآیند ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده

Fig15. Decreasing the MR with rising temperature in the AFRM process

پلاستیک می‌شود و به شکل شیار و برآمدگی در می‌آید و بنابراین برداشت فلز صورت نمی‌گیرد. رابطه (۳) برای فرآیند ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده و در شرایط جدول ۵ بررسی شد و با توجه به نسبت عمق نفوذ به شعاع دانه حدود ۱۰/۵٪ نشان دهنده قرار گرفتن این فرآیند در رژیم تراشه می‌باشد.

۳-۳- بررسی اثر دمای خمیر ساینده بر میزان براده‌برداری در فرآیند ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده

برای بررسی اثر دمای خمیر ساینده بر میزان براده‌برداری، آزمون‌های ثانویه در دماهای مختلف خمیر و سایر شرایط یکسان طبق جدول ۵ طراحی و انجام شد. نتایج این آزمون‌ها در جدول ۱۰ آورده شده‌اند. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب روند کاهش میزان براده‌برداری و نرخ براده‌برداری با افزایش دما مشهود است. هر آزمون در هر دما در دو مرحله و با شش قطعه کار انجام شد و میانگین آن جهت بررسی و مقایسه ثبت شده است. کاهش میزان و نرخ براده‌برداری با افزایش دمای خمیر ساینده می‌تواند ناشی از لهدگگی ناصافی‌ها یا پلیسه‌های روی سطح قطعه کار در حین تماس با ذرات ساینده در دمای بالا به جای برش و حذف آن‌ها باشد. این فرضیه می‌تواند با بررسی میزان صافی سطح قطعه کار در دماهای مختلف محرز گردد. در این شرایط خاص، حداکثر مقدار براده‌برداری در دمای اتاق پیش‌بینی می‌شود.

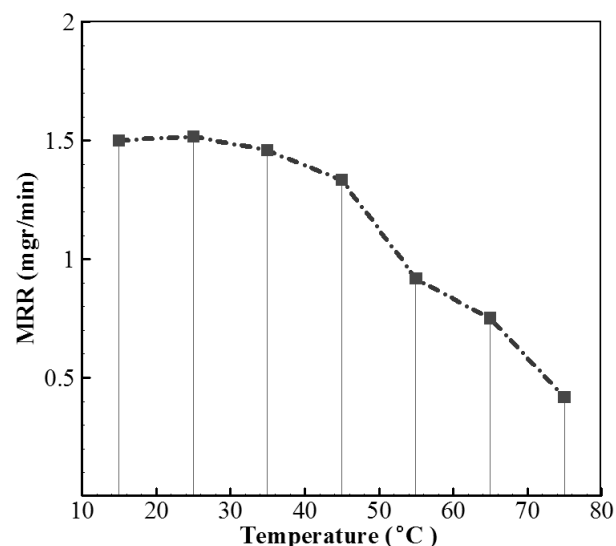
۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله شکل جدیدی از فرآیند ماشین‌کاری با ماده ساینده برای پرداخت و پولیش‌کاری قطعات صنعتی پیشنهاد گردید و به روش تجربی، کارآمدی آن نشان داده شد. مقایسه نتایج نشان داد میزان براده‌برداری قابل دستیابی در این فرآیند با ماشین‌کاری با ماده ساینده قابل مقایسه است در حالی که در این فرآیند با حذف حرکت رفت و برگشتی خمیر ساینده و هم زدن آن به همراه چرخش قطعه کار در یک محفظه تحت فشار، ضمن استفاده بهینه از ماده‌ی ساینده می‌توان به نتایج مشابهی با ماشین‌کاری با ماده ساینده دوطرفه دست یافت و فرآیند را با ابزار ساده‌تر روی دستگاه تراش انیورسال اجرا نمود. در این تحقیق همچنین متغیرهای مؤثر بر فرآیند و اثر دمای خمیر ساینده بر مقدار براده برداشته شده مطالعه گردید. به عنوان نتیجه‌گیری، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) کارایی فرآیند ماشین‌کاری چرخشی با ماده ساینده با استفاده از ابزار جدید، در مقیاس صنعتی تری نسبت به نمونه‌ی آزمایشگاهی قبلی، مشهود است؛ در آزمایش‌های انجام شده نمونه‌های بزرگ‌تر با صافی سطح و نرخ براده‌برداری همخوان با مقادیر مشابه در ماشین‌کاری با ماده ساینده پرداخت کاری شده‌اند؛

Materials Today: Proceedings, 4(8) (2017) 7208-7218.

- [7] A.K. Sharma, G. Venkatesh, S. Rajesha, P. Kumar, Experimental investigations into ultrasonic-assisted abrasive flow machining (UAAFMM) process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80(1-4) (2015) 477-493.
- [8] S.S. Kumar, S.S. Hiremath, A review on abrasive flow machining (AFM), Procedia Technology, 25 (2016) 1297-1304.
- [9] B. Brar, R. Walia, V. Singh, Electrochemical-aided abrasive flow machining (ECA 2 FM) process: a hybrid machining process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 79(1-4) (2015) 329-342.
- [10] M.A. Marzban, S.J. Hemmati, Modeling of abrasive flow rotary machining process by artificial neural network, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89(1-4) (2017) 125-132.
- [11] R.K. Jain, V.K. Jain, Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41(12) (2001) 1689-1704.
- [12] G.Z. Song, Y.Z. Li, G. Ya, Temperature dependence and effect on surface roughness in abrasive flow machining, in: Advanced Materials Research, Trans Tech Publ, 2008, pp. 375-380.
- [13] L. Fang, J. Zhao, K. Sun, D. Zheng, D. Ma, Temperature as sensitive monitor for efficiency of work in abrasive flow machining, Wear, 266(7-8) (2009) 678-687.
- [14] S. Rajesha, G. Venkatesh, A. Sharma, P. Kumar, Performance study of a natural polymer based media for abrasive flow machining, Indian Journal of engineering & Material Sciences, 17 (2010)407-413.
- [15] V. Marochkin, The limiting plastic state in indenting and compressing a truncated cone, Friction and Wear in Machinery, 13 (1959) 79-131.
- [16] L. Rhoades, Abrasive flow machining with not-so-silly putty, Met. Finish., 85(7) (1987) 27-29.



شکل ۱۶: کاهش نرخ براده برداری با افزایش دما در فرآیند ماشین کاری چرخشی با ماده ساینده

Fig16. Decreasing the MRR with rising temperature in the AFRM process

مراجع

- [1] A.F. Ibrahim, S.K. Shather, W.K.Hamdan, 2014, Studying Abrasive Flow Machining Conditions by Using Taguchi Method, Engineering and Technology Journals, 32A(4) (2014) 1071-1072.
- [2] R. Walia, H. Shan, P. Kumar, Multi-response optimization of CFAAFM process through Taguchi method and utility concept, Materials and Manufacturing Processes, 21(8) (2006) 907-914.
- [3] M.R. Sankar, S. Mondal, J. Ramkumar, V. Jain, Experimental investigations and modeling of drill bit-guided abrasive flow finishing (DBG-AFF) process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 42(7-8) (2009) 678-688.
- [4] M.R. Sankar, V. Jain, J. Ramkumar, Experimental investigations into rotating workpiece abrasive flow finishing, Wear, 267(1-4) (2009) 43-51.
- [5] S. Singh, H. Shan, Development of magneto abrasive flow machining process, International Journal of machine tools and manufacture, 42(8) (2002) 953-959.
- [6] P. Ali, S. Dhull, R. Walia, Q. Murtaza, M. Tyagi, Hybrid Abrasive Flow Machining for Nano Finishing-A Review,