



بررسی و مطالعه اثر جنس ابزار و مقدار جریان سیال دی‌الکتریک بر عملکرد فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک

فریدون رجبی نسب^{۱*}، محمدجعفر حداد^۲، وحید عابدینی^۳، رمضانعلی حاجی قربانی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید، دانشگاه تهران، تهران

۳- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید، دانشگاه سمنان، سمنان

۴- مربی دانشکده مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۳۱۹۱۱۱، Rajabinasab.f@semnan.ac.ir

چکیده

یکی از پرکاربردترین فرآیندهای ماشین‌کاری غیرسنتی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی می‌باشد که برای ماشین‌کاری قطعاتی با سختی بالا، بخصوص در صنعت قالب‌سازی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک به‌منظور بررسی تاثیر جنس ابزار و مقدار سیال دی‌الکتریک بر نرخ براده‌برداری، سایش ابزار، زبری سطح و توپوگرافی سطح مورد مطالعه قرار گرفته است. سه جنس ابزار (مس، کروم، مس-قلع) و سه سطح از نرخ سیال دی‌الکتریک استفاده شده است، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که ابزار مس به دلیل رسانایی حرارتی و الکتریکی بهتر، دارای نرخ براده‌برداری و سایش ابزار بیشتری می‌باشد. افزایش نرخ سیال دی‌الکتریک در هر سه سطح از انرژی تخلیه الکتریکی باعث نرخ براده‌برداری و سایش بالا شده است، همچنین در شدت جریان تخلیه الکتریکی بالا سطح قطعه کار ماشین‌کاری شده با ابزار مس-قلع زبری پایین‌تری دارد.

کلید واژگان: ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار، زبری سطح قطعه کار

Investigation and study of the tool material and the dielectric fluid rate effect on the performance of near dry electrical discharge machining

Fereydoon Rajabinasab^{1*}, Mohamadjafar Hadad², Vahid Abedini¹, Ramzan Ali Hajighorbani¹

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

2- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

* P.O.B. 3513119111 semnan, Iran, Rajabinasab.f@semnan.ac.ir

ABSTRACT

One of the most widely used non-traditional machining processes is electrical discharge machining (EDM) that is used for machining of parts with the high hardness such as die sinking. In this paper, the near-dry electrical discharge machining process has been studied to investigate the effect of the tool material and the dielectric fluid rate on material removal rate, tool wear rate, surface roughness and surface topography. Three tools material (copper, copper-chromium, and copper-tin) and three levels of dielectric fluid rate have been considered. The results showed that the copper tool has the higher material removal rate and the higher tool wear rate due to the higher thermal and electrical conductivity coefficient. Increase in dielectric fluid rate in all of the levels of electrical discharge energy causes the higher material removal rate and the higher tool wear. Also, in high current intensity of electrical discharge, the copper-tin tool has the lowest surface roughness.

Keywords: Electrical Discharge Machining, Material Removal Rate, Surface Roughness, Tool Wear Rate.

از مهم‌ترین مشکلات و محدودیت‌های این فرآیند محسوب می‌شوند [۲،۱].

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، فرآیندهای دیگری بر پایه این فرآیند توسعه داده شده‌اند و هر کدام به نوعی از محدودیت‌های این فرآیند کاسته و بر قابلیت‌های آن می‌افزایند که از جمله می‌توان به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با ارتعاشات التراسونیک، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک و نیمه‌خشک و فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیال دی‌الکتریک حاوی پودرهای ساینده اشاره کرد [۳]. ماشین‌کاری نیمه خشک اولین بار در سال ۱۹۸۷ توسط آقای تانیمورا و همکاران با استفاده از مخلوط آب، هوا، نیتروژن و آرگون مورد بررسی قرار گرفت [۴]. کائو و همکاران به بررسی فرآیند برش-کاری سیمی^۵ و سوراخ‌کاری تخلیه الکتریکی خشک، غوطه‌وری و نیمه خشک

۱- مقدمه

یکی از روش‌های ماشین‌کاری غیرسنتی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است، که در آن فلز از سطح قطعه کار به کمک یک سری پالس‌های الکتریکی برداشته می‌شود. با توجه به تنوع عملیات انجام شده با استفاده از این روش، به‌عنوان یکی از مرسوم‌ترین روش‌های ماشین‌کاری غیرسنتی در صنعت شناخته می‌شود. علی‌رغم کاربردهای منحصر به فرد این فرآیند، نرخ براده‌برداری^۱ پایین، زبری سطح^۲ و نرخ سایش ابزار^۳ بالا و تشکیل لایه ریگست^۴ بر روی سطح قطعه کار (که محل عیوب و ترک بوده و استحکام قطعه کار را کاهش می‌دهد)

1. Material Removal Rate (MRR)

2. Surface Roughness (SR)

3. Tool Wear Rate (TWR)

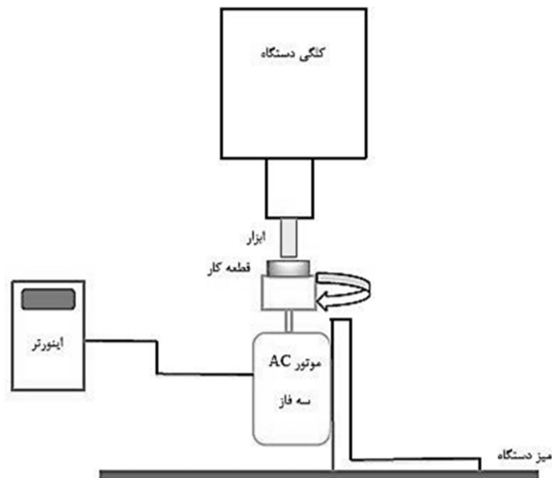
4. Recast Layer

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

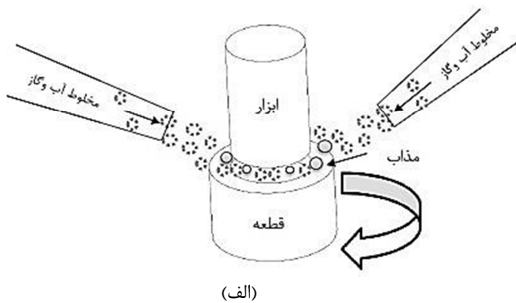
5. Wire Cutting Machining

Please cite this article using:

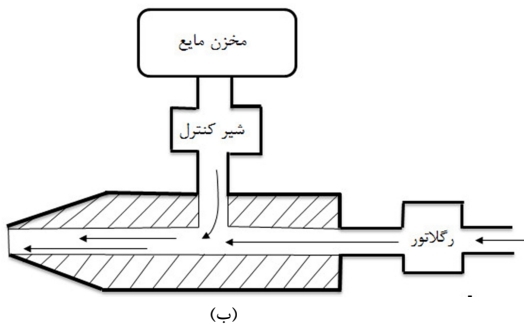
F. Rajabinasab, M.J. Hadad, V. Abedini, R.A. Hajighorbani, Investigation and study of the tool material and the dielectric fluid rate effect on the performance of near dry electrical discharge machining, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 365-370, 2015 (in Persian)



شکل ۱ نمایی از تجهیزات نصب شده بر روی دستگاه

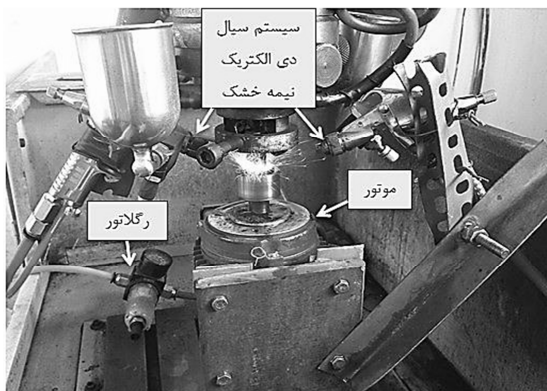


(الف)



(ب)

شکل ۲ (الف) نمای از پاشش مخلوط آب و گاز، (ب) پیستوله



شکل ۳ نمایی از آزمایش

پرداختند. آن‌ها بیان کردند که در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی خشک^۱ نرخ براده‌برداری بالا بوده و تیز بودن لبه برش در وایرکات و رسوبات باقی‌مانده (لایه ریکست) در مقایسه با ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی غوطه‌وری کمتر است. در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک^۲ با انرژی تخلیه کم، درصد نرخ براده‌برداری بیشتر بوده و فاصله گپ^۳ کوچک‌تر است. با این حال مکان-های حرارتی بالاتر در الکتروود ماشین‌کاری نیمه خشک قرار دارد که منجر به شکستن سیم در وایرکات و ساییش الکتروود ابزار در سوراخ‌کاری تخلیه الکتریکی می‌شود [۵]. تائو و همکاران، سوراخ‌کاری تخلیه الکتریکی خشک و نیمه خشک با مخلوط آب با اکسیژن، نیتروژن و هلیوم ارائه دادند. وی از اکسیژن برای عمل خشن‌کاری و استفاده از مخلوط آب و نیتروژن برای عمل پرداخت‌کاری استفاده کردند، آن‌ها اعلام کردند که ماشین‌کاری نیمه خشک با کیفیت سطح بالا مناسب برای پرداخت‌کاری است [۶].

در این پژوهش، فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک به منظور بررسی تاثیر جنس ابزار و مقدار سیال دی‌الکتریک بر نرخ براده‌برداری، ساییش ابزار، زبری سطح و توپوگرافی سطح مورد مطالعه قرار گرفته است. سه جنس ابزار (مس، مس-کروم، مس-قلع) و سه سطح از نرخ سیال دی-الکتریک استفاده شده است.

۲- شرایط تجربی آزمایش

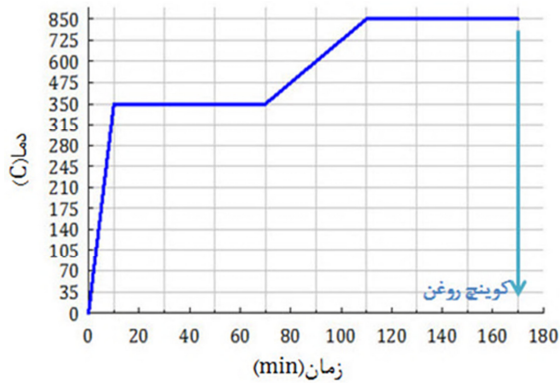
۲-۱- تجهیزات موردنیاز برای انجام آزمایش

جهت انجام تست‌ها از دستگاه اسپارک پیشرفته مدل ۵۱۱ با ژنراتور ایزوپالس استفاده شده است. به‌علت ثابت بودن کلیه دستگاه اسپارک و قادر نبودن چرخش ابزار، قطعه‌کار در این آزمایش تحت دوران قرار می‌گیرد. بدین منظور از یک موتور AC سه فاز و اینورتر جهت تامین دوران قطعه‌کار استفاده شده است، که در شکل ۱ نمایش داده شده است. برای تامین مخلوط آب و گاز به-عنوان سیال دی‌الکتریک به فاصله گپ در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک با توجه به عدم عبور سیال دی‌الکتریک از داخل ابزار به منظور بهبود عمل شست و شو و دور کردن براده‌ها از گپ ماشین‌کاری دو عدد پیستوله در دو طرف قطعه‌کار در حال چرخش قرار داده شده است. یک رگلاتور برای تنظیم فشار گاز و یک شیر کنترل برای تنظیم جریان سیال دی الکتریک به‌کار گرفته شده است، در شکل ۲ و ۳ نمایی از پاشش مخلوط آب و گاز، پیستوله و همچنین نمایی از آزمایش نشان داده شده است.

۲-۲- قطعه‌کار و ابزار

قطعه‌کار مورد استفاده در این مطالعه فولاد استوانه‌ای از جنس AISI4140، (42CrM04) است که سطوح پیشانی آن سنگ‌زنی و پرداخت‌کاری شده و قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر دارد که در صنعت به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطعه‌کار جهت سخت‌کاری، عملیات حرارتی شده و سختی 50 ± 2 را کول دارد، شکل ۴ نمودار عملیات حرارتی قطعه‌کار را نشان می‌دهد. آلیاژهای مس موجود در بازار به عنوان ابزارهای مورد مطالعه می‌باشند. قطر ابزار مس، مس-کروم، مس-قلع به‌کار گرفته در این آزمایش 15 ± 0.5 است. جداول ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ به‌ترتیب ترکیبات قطعه‌کار مورد مطالعه، خواص فیزیکی مس، کروم، قلع و AISI4140 و آنالیز XRF ابزارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

1. Dry Electrical Discharge Machining
2. Near Dry Electrical Discharge Machining
3. Gap



شکل ۴ نمودار عملیات حرارت قطعه کار

تخلیه الکتریکی، نرخ سیال دی الکتریک و زمان روشنی و خاموشی پالس به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده است. جدول ۶ شرایط آزمایش را نشان می‌دهد. جهت افزایش سرعت براده برداری زمان روشنی پالس بیشتر از زمان خاموشی پالس قرار گرفته. زمان روشنی و خاموشی پالس در هر شدت جریان تخلیه الکتریکی متفاوت می‌باشد، به خاطر شرایط و محدودیت سطح مقطع ابزار و شدت جریان تخلیه الکتریکی عبوری از آن که در کاتالگ دستگاه اسپارک پیشراهن جهت تنظیم زمان های روشنی و خاموشی پالس آمده است به منظور جلوگیری از پدیده‌ی آرک^۱ ناچار به گرفتن زمان روشنی و خاموشی پالس متفاوت در هر شدت جریان تخلیه الکتریکی شده. ولتاژ گپ، سرعت دورانی قطعه کار، فشار گاز و قطب الکترود به عنوان پارامترهای ثابت می‌باشند، که در جدول ۷ پارامترهای ثابت آزمایش آمده است. آب دیونیزه به عنوان سیال دی الکتریک در ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک می‌باشد، هوافشرده که با کمپرسور تامین شده به عنوان گاز مصرفی بوده و زمان انجام هر تست ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. برای اندازه گیری نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار از ترازوی ساتورس^۲ با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم استفاده شده. وزن قطعه کار و ابزار قبل و بعد از انجام تست اندازه گیری شده. نرخ براده برداری (MRR) و نرخ سایش ابزار (TWR) با معادلات (۱) و (۲) بدست می‌آیند [۸].

$$(1) \quad \text{نرخ براده برداری} = \frac{\text{مقدار ماده برداشته شده از قطعه}}{\text{زمان ماشین کاری}} \quad (\text{میلی گرم بر دقیقه})$$

$$(2) \quad \text{نرخ سایش ابزار} = \frac{\text{مقدار ماده برداشته شده از ابزار}}{\text{زمان ماشین کاری}} \quad (\text{میلی گرم بر دقیقه})$$

زبری سطح نمونه قطعه کار ماشین کاری شده با زبری سنج مدل ماهر مارسوف PS1^۳ اندازه گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نرخ براده برداری

در شکل ۵ نشان می‌دهد که در هر سه سطح از شدت جریان تخلیه الکتریکی ابزار مس بهتر عمل می‌کند، ابزارهای مس-کروم، مس-قلع به دلیل مقاومت الکتریکی ۴ بالایی که عنصر کروم و قلع مخلوط در آنها دارد، نرخ براده برداری

جدول ۱ ترکیبات قطعه کار مورد مطالعه [۷]

عنصر	C	Mn	P	Si	Cr	Mo	Fe
درصد	۰/۳۸	۰/۷۵	۰/۰۳۵	۰/۰۴	۰/۸	۰/۱۵	تعداد
وزنی	۰/۴۳	۱			۱/۱	۰/۳۵	

جدول ۲ خواص فیزیکی مس، کروم، قلع و AISI4140

AISI4140	قلع	کروم	مس	
۷/۸۵	۵/۷۶	۷/۱۹	۸/۹۶	وزن مخصوص (g/cm ³)
۱۴۱۶	۲۳۲	۱۹۰۷	۱۰۸۴	نقطه ذوب (°C)
۲۲۲	۱۱۵	۱۱۸	۱۵/۴۳	مقاومت الکتریکی (nΩm)
۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۴۶	۰/۳۹	گرمای ویژه (KJ/kg k)
۴۲/۶	۶۷	۹۴	۴۰۱	رسانای حرارتی (W/mk)

جدول ۳ آنالیز XRF ابزار مس

عنصر	درصد وزنی
Cu	۹۹/۴۴
Sb	۰/۰۰۷
Sn	۰/۰۰۶
Ca	۰/۰۲
S	۰/۰۲۵
Cl	۰/۰۲۶
Mg	۰/۴۷

جدول ۴ آنالیز XRF ابزار مس-کروم

عنصر	درصد وزنی
Cu	۹۷/۵۲۴
Cr	۰/۷۹۵
S	۰/۲۰۱
K	۰/۰۳۹
Ca	۰/۰۷۱
Fe	۰/۰۸۴
Si	۰/۱۵۳
Cl	۰/۲۲۴
Al	۰/۹۰۹

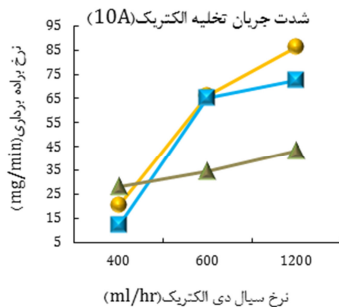
جدول ۵ آنالیز XRF ابزار مس-قلع

عنصر	درصد وزنی
Cu	۸۶/۴۷۲
Sn	۱۲/۲۸۶
S	۰/۱۱۵
Si	۰/۰۴۹
Fe	۰/۰۶۴
Al	۰/۰۶۹
Cl	۰/۱۲۶
Zn	۰/۸۱۹

۳-۲- شرح آزمایش

این مطالعه به بررسی تاثیر جنس ابزار و مقدار سیال دی الکتریک بر عملکرد فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک پرداخته است. شدت جریان

1. Arc
2. Sartorius
3. Mahr Marsurf PS1
4. Electrical resistivity

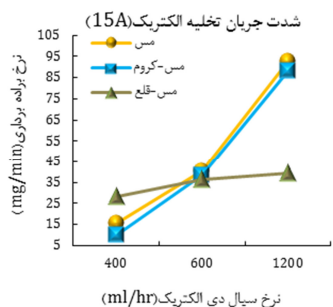


جدول ۶ شرایط آزمایش

پارامترها	مقدار
شدت جریان تخلیه الکتریکی (A)	۵
زمان روشنی پالس (μs)	۱۲
زمان خاموشی پالس (μs)	۲۵
نرخ سیال دی‌الکتریک (ml/hr)	۴۰۰

جدول ۷ پارامترهای ثابت آزمایش

پارامترها	مقدار
سرعت دورانی قطعه‌کار (rpm)	۶۰۰
فشار گاز (bar)	۱
ولتاژ گپ (V)	۳۰
قطب الکترود	[+]

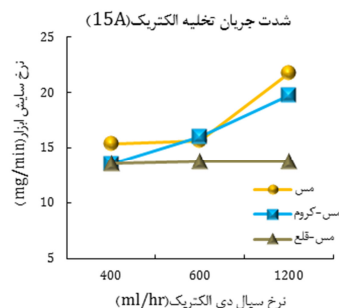
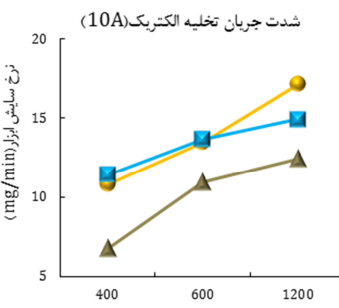
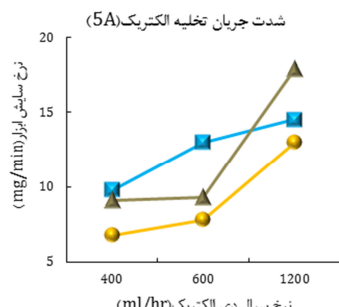


شکل ۵ نمودار بررسی نرخ براده برداری

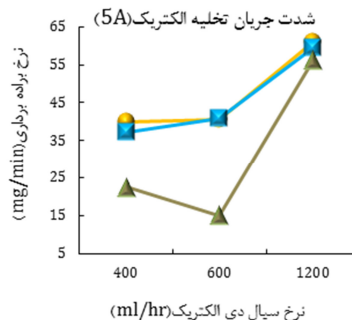
کمتری دارند. به‌خاطر درصد ناچیز کروم موجود در ابزار مس- کروم این ابزار بهتر از مس- قلع عمل می‌کند. اگرچه استفاده از ژنراتور آیزوپالس، زمان تاخیر جرقه تأثیری بر زمان روشنایی پالس و مقدار انرژی هر جرقه ندارد، ولی افزایش زمان تاخیر جرقه موجب افزایش زمان غیر ماشین‌کاری شده و نرخ براده‌برداری را کاهش می‌دهد [۸]. با افزایش مقدار سیال دی‌الکتریک در هر سه سطح از تخلیه الکتریکی و هر سه ابزار، به‌علت دور کردن بهتر آلودگی‌های ناشی از براده‌های برداشته شده از سطح قطعه‌کار، امکان ایجاد پدیده‌ی آرک کمتر شده و میزان نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد.

۳-۲- نرخ سایش ابزار

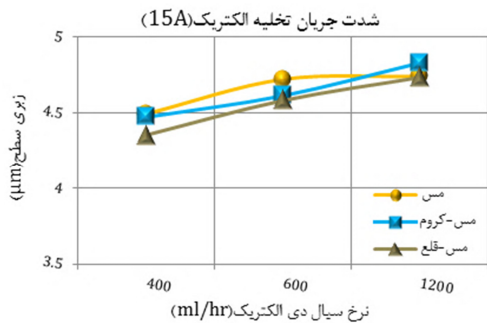
مقاومت الکتریکی بالای عنصر کروم موجود در ابزار مس- کروم، سبب می‌شود که الکترون‌ها به اتم‌های سازنده‌ی آن برخورد کرده و منجر به گرم شدن ابزار و از دست دادن اتم‌های آن شود. به همین دلیل ابزار مس- کروم در تمام سه سطح از تخلیه الکتریکی سایش بیشتری از ابزار مس- قلع دارد که در شکل ۶ نشان داده شده است. در حالی که ابزار مس در انرژی تخلیه الکتریکی پایین به دلیل رسانایی حرارتی^۱ و چگالی^۲ بالاتر، میزان سایش کمتری دارد. در شدت جریان تخلیه الکتریکی بالا به‌علت نرخ براده‌برداری بالاتر ابزار مس نسبت به سایر ابزارها میزان نرخ سایش ابزار افزایش یافته است. با افزایش نرخ سیال دی‌الکتریک در هر سه سطح از شدت جریان الکتریکی سایش ابزار افزایش می‌یابد. عنصر قلع به‌خاطر رسانای حرارتی پایین، نمی‌تواند شوک‌های حرارتی را از خود عبور دهد که این امر باعث سوختگی ابزار مس- قلع می‌شود که در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶ نمودار بررسی نرخ سایش ابزار



1. Thermal conductivity
2. Density



شکل ۸ نمودار زبری سطح



شکل ۷ سوختگی ابزار مس-قلع

۳-۳- زبری سطح

شکل ۸ زبری سطح حاصل از سه ابزار مس، مس- کروم، مس- قلع را در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک نشان می‌دهد. ابزار مس- قلع در سطوح تخلیه انرژی پایین به علت مقاومت الکتریکی بالا و عبور ندادن جریان الکتریکی یکنواخت، باعث ایجاد تخلیه الکتریکی نامنظم شده که این امر باعث می‌شود که در سطح قطعه کار حفره‌هایی غیریکنواخت و خشن ایجاد شود که زبری سطح آن نسبت به ابزار مس، مس- کروم بیشتر شده است. ابزار مس و مس- کروم به خاطر انتقال یکنواخت انرژی الکتریکی به سطح قطعه کار و ایجاد حفره‌هایی کوچک زبری سطح قطعه کار کاهش یافته است. در ابزار مس- قلع با افزایش آمپر قدرت جریان الکتریکی بر مقاومت الکتریکی ابزار غلبه کرده و تخلیه الکتریکی منظم شده، لذا زبری سطح به علت منظم شدن حفره‌ها و عمق کمتر آن‌ها رو به کاهش می‌باشد. در همه ابزارها با افزایش نرخ سیال دی الکتریک زبری سطح افزایش یافته چون نرخ براده برداری و مقدار ماده برداشته شده از قطعه کار با افزایش سیال دی الکتریک بیشتر می‌شود و آلودگی گپ زیاد شده و احتمال پالس غیرطبیعی مانند آرک بالا رفته در نتیجه زبری افزایش یافته است.

۴-۳- توپوگرافی سطح

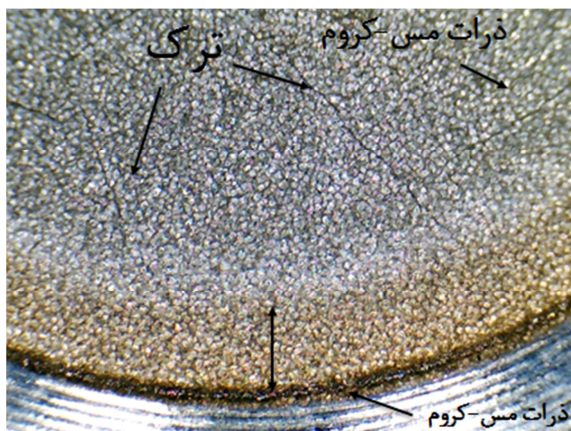
ابزار مس به خاطر نرخ براده برداری و رسانای حرارتی بهتر نسبت به ابزار مس- کروم و مس- قلع، سطح قطعه کار ماشین کاری شده آن دارای ترک‌های بیشتری بوده که این ترک‌ها عیوب می‌باشند و باعث کاهش مقاومت قطعه کار می‌شود. در شکل ۹ عکس از سطح قطعه کار ماشین کاری شده با ابزارهای مختلف آمده است.

۴- نتیجه گیری

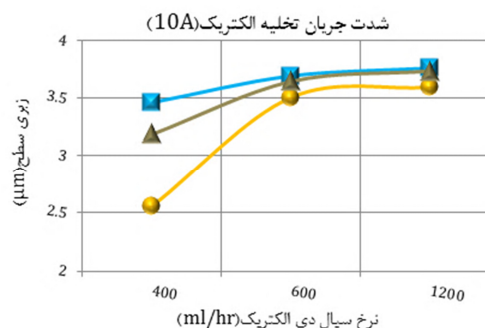
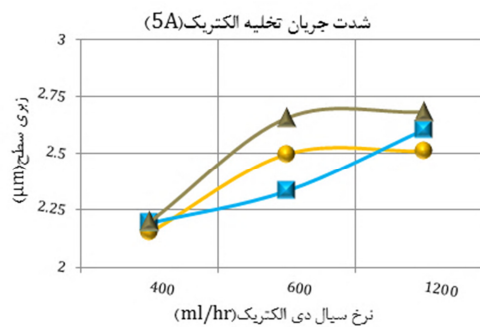
در تحقیق حاضر به مطالعه تاثیر جنس ابزار و مقدار سیال دی الکتریک در ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک بر نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار، زبری سطح و توپوگرافی سطح پرداخته شده است، نتایج حاصله نشان می‌دهد که:

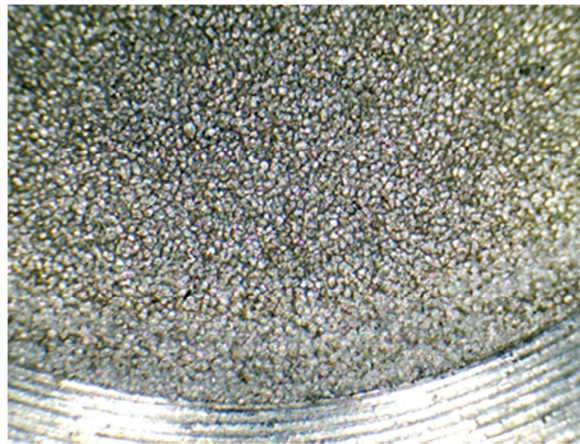


(الف)



(ب)





(د)

شکل ۹ عکس از سطح، (الف) قطعه کار ماشین‌کاری شده با ابزار مس در ۵ آمپر، نرخ سیال دی‌الکتریک ۱۲۰۰ میلی لیتر بر ساعت (ب) قطعه کار ماشین‌کاری شده با ابزار مس- کروم در ۵ آمپر، نرخ سیال ۱۲۰۰ دی‌الکتریک میلی لیتر بر ساعت (د) قطعه کار ماشین‌کاری شده با ابزار مس- قلع در ۵ آمپر، نرخ سیال دی‌الکتریک ۱۲۰۰ میلی لیتر بر ساعت

- ۱- نرخ براده‌برداری ابزار مس بیشتر از ابزار مس- کروم و ابزار مس- کروم بیشتر از مس- قلع می باشد، به دلیل خواص فیزیکی عناصر مس، کروم و قلع موجود در آن‌ها همچنین با افزایش نرخ سیال دی‌الکتریک بخاطر دور کردن بهتر آلودگی‌ها و پدیده آرک کمتر نرخ براده برداری افزایش یافته است.
- ۲- سایش ابزار مس- کروم بیشتر از مس- قلع و ابزار مس بیشتر از مس- کروم است. افزایش سیال دی‌الکتریک باعث سایش بالای ابزار شده است.
- ۳- در شدت جریان تخلیه الکتریکی بالا ابزار مس- قلع زبری سطح بهتری نسبت به ابزارهای مس و مس- کروم دارد، نرخ سیال دی‌الکتریک بالا به دلیل افزایش نرخ براده‌برداری، زبری سطح قطعه کار افزایش یافته است.

۵- مراجع

- [1] J. Simao, H. G. Lee, D. K. Aspinwall, R. C. Dewes, E. M. Aspinwall, Workpiece surface modification using electrical discharge machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 121-128, 2003.
- [2] B. Jabbaripour, M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, Sh. Faridvand, Investigating the effects of tool materials on the properties of electrical discharge machining of γ -TiAl intermetallic, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 135-146, 2011. (In Persian)
- [3] N. M. Abbas, D. G. Solomon, M. F. Bahari, A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1214-1228, 2007.
- [4] J. Tao, *Investigation of dry and near-dry electrical discharge machining processes*, 2008.
- [5] C. C. Kao, J. Tao, A. J. Shih, Near dry electrical discharge machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 2273-2281, 2007.
- [6] J. Tao, A. J. Shih, J. Ni, Experiment Study of the Dry and Near-Dry Electrical Discharge Milling Processes, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 130, pp. 1-9, 2008.
- [7] M. H. Sadeghi & M. J. Hadad & T. Tawakoli & A. Vesali & M. Emami, An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique, *International Journal Mater Form*, Vol. 3, pp. 241-251, 2010.
- [8] A. Gholipour, H. Baseri, M. Shakeri, Experimental investigation of near dry EDM process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 99, No. 9, pp. 9-99, 9999, 2013. (In Persian)