ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):99-103.

Improvement of Electrochemical Discharge Machining Depth through Modification of Tool-Workpiece Engagement Area

ARTICLE INFO

Authors
Rezvani P.[1],
Elhami S. [2*],
Razfar M.R. [1]

[1] Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
[2] Ferdowsi University of Mashhad, Mashahd, Iran.

*** Correspondence**
Address: Azadi Sq., Mashahd
Sadeghelhami@um.ac.ir

How to cite this article
Rezvani P, Elhami S, Razfar M.R. Improvement of Electrochemical Discharge Machining Depth through Modification of Tool-Workpiece Engagement Area. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):99-103.

ABSTRACT

Electrochemical discharge machining (ECDM) is a novel non-conventional micro-machining method that can be applied to machining hard, brittle and non-conductive materials such as glass and ceramic. Due to the hardness and brittleness of mentioned materials, the application of conventional machining is associated with serious technical problems. In this article, the machining process was performed in two steps, and hole depth is considered as the main machining output. The obtained results of the new method are compared to single pass micro-drilling (a common micro-drilling process). The achieved results indicated that depth improvements of 36% and 70% were obtained for voltages of 33 and 38V. Also, by increasing the diameter difference, a deeper hole can be achieved.

Keywords Electrochemical Discharge Machining, Micro Drilling, Depth, Current Signal.

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته.
مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۹۹-۱۰۳.

بهبود عمق ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی با روش تغییر مساحت ناحیه درگیری ابزار-قطعه کار

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها
پرگل رضوانی همدانی [1]
صادق الهامی جوشقان [2*]
محمدرضا رازفر[1]

[1] دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
[2] دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

*** نویسنده مسئول**
آدرس: مشهد، میدان آزادی
Sadeghelhami@um.ac.ir

چکیده

ماشین کاری به روش تخلیه الکتروشیمیایی رویکردی نوین در ماشین کاری مواد سخت، شکننده و نارسانای الکتریکی (نظیر شیشه و سرامیک) می باشد. ماشین کاری این نوع مواد با روش های متداول ماشین کاری که عمدتاً بر مبنای برش مکانیکی قطعه استوار هستند، به دلیل سختی و تردی بالای این قطعات، بسیار مشکل است. لذا، اخیراً توجه به ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی جهت ماشین کاری این مواد، به دلیل سهولت در اجرا، هزینه ی کم و نرخ براده برداری مناسب، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از پارامترهای خروجی بسیار مهم در این فرآیند، عمق ماشینکاری شده می باشد. در این مقاله سوراخکاری دو مرحله انجام و مورد بررسی قرار می گیرد و نتایج آن با حالت سوراخ کاری معمولی در شرایط یکسان مقایسه می شود. نتایج نشان می دهد روش جدید باعث افزایش عمق سوراخ شده که به ترتیب در ولتاژهای ۳۳ و ۳۸ ولت افزایش عمق در حدود ۳۶٪ و ۷۰٪ حاصل شد. همچنین، اختلاف قطر بیشتر باعث افزایش عمق سوراخ گردیده است.

کلیدواژه‌ها فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی، میکرو سوراخکاری، عمق، منحنی جریان

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2022-12-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.16.9]

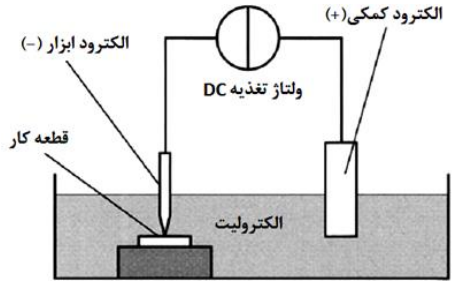
۱- مقدمه

امروزه نیاز روزافزون به قطعات شیشه ای به دلیل خواص ویژه الکتریکی، حرارتی، شیمیایی و مکانیکی آنها، محققان را برآن داشته که روش های متنوع ساخت قطعات با استفاده از این نوع ماده را توسعه دهند. از آنجایی که این مواد معمولا نارسانای الکتریکی بوده، مقاومت شیمیایی بالایی در محیطهای خورنده داشته، هدایت و تغییر شکل حرارتی پایینی دارند و از طرفی شفاف و سخت هستند در انواع کاربردهای میکروالکترونیک، سیستمهای میکروالکترومکانیکی، صنایع اپتیک و انواع کاربردهای پزشکی به طور روزافزون مورد استفاده قرار می گیرند [1].

با این حال سختی و شکنندگی بالای شیشه، ماشینکاری و شکل دهی آنرا بسیار مشکل کرده به نحوی که با روش های سنتی و متداول تولید، نمی-توان به هندسه و ساختار مطلوب دست یافت. به همین جهت توسعه روش های نوین به منظور تولید قطعات شیشه ای از اولویت های تحقیق در این زمینه می باشد.
یکی از روش های نوینی که در سال های اخیر جهت ماشینکاری قطعات سخت و شکننده ای نظیر شیشه و سرامیک معرفی و استفاده شده است، روش ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی می باشد. این روش نوین، قابلیت ماشینکاری با نسبت عمق به قطر بالا و سرعت براده برداری مناسب را داشته و نسبت به سایر روش ها، کم هزینه تر و اقتصادی تر می باشد.

۱-۱- مکانیزم فرایند تخلیه الکتروشیمیایی

ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی (ECDM) از پدیده های الکتروشیمیایی و فیزیکی برای ماشین‌کاری موادی نظیر شیشه و سرامیک بهره می‌برد. اصول کلی این روش در شکل ۱ نشان داده شده است. این روش برای ماشین‌کاری قطعات سخت و شکننده و نارسانای الکتریکی مناسب است. در این روش، قطعه‌کار درون محلول الکترولیت مناسب (عمدتاً سدیم هیدروکسید یا پتاسیم هیدروکسید) غوطه‌ور شده و یک ولتاژ مستقیم ثابت به دو الکترود اعمال می‌شود. الکترود ابزار به اندازه چند میلی‌متر درون الکترولیت فرو برده شده و الکترود کمکی نیز که معمولاً خیلی بزرگ‌تر از الکترود ابزار بوده (۱۰۰ برابر یا بیشتر) و غالباً به شکل یک صفحه مسطح است، درون الکترولیت قرار داده می‌شود. قطب منفی ولتاژ به الکترود ابزار وصل شده و قطب مثبت به الکترود کمکی وصل می‌شود [2].



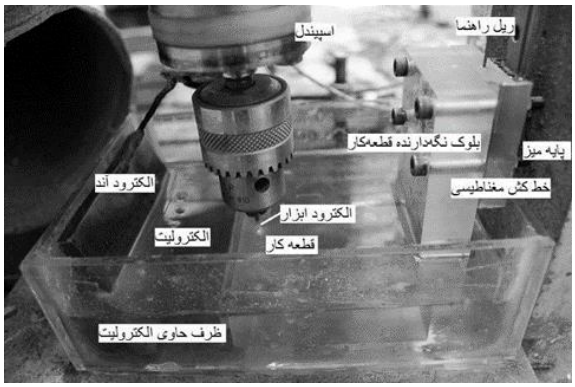
شکل ۱) شماتیک فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی [3]

وقتی ولتاژ اعمالی به سلول پایین است (پایین‌تر از یک مقدار بحرانی به نام ولتاژ بحرانی که معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ ولت است)، فرآیند الکترولیز اتفاق می‌افتد. حباب‌های گاز هیدروژن اطراف الکترود ابزار تشکیل شده و حباب‌های اکسیژن اطراف الکترود کمکی تشکیل می‌شوند. وقتی ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد، جریان الکتریکی نیز افزایش یافته و حباب‌های بیشتری تشکیل می‌شود. با افزایش ولتاژ اعمالی، تعداد حباب‌های تشکیل شده و شعاع آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. وقتی ولتاژ اعمالی از ولتاژ بحرانی بیشتر شود، حباب‌های هیدروژن به هم پیوسته و یک فیلم گاز در اطراف الکترود ابزار تشکیل می‌شود. در این صورت تخلیه الکتریکی یا به‌اصطلاح تخلیه الکتروشیمیایی بین ابزار و الکترولیت اطراف آن اتفاق می‌افتد که نور آن قابل مشاهده می‌باشد. اگر قطعه‌کار در مجاورت الکترود ابزار باشد، ماشین‌کاری امکان‌پذیر می‌شود. عموماً ابزار باید در فاصله‌ای کمتر از ۲۵ میکرومتر نسبت به قطعه‌کار باشد تا ماشین‌کاری اتفاق بیفتد [3].
در سال ۱۹۶۸ اولین طرح ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی توسط کورافوجی و سودا ارائه شد [4]. ۵ سال بعد کوک و همکاران [5] مقاله ای ارائه دادند که نشان داد این روش برای مواد نارسانا نیز کاربرد دارد. گوش و همکاران [6] بر این باور بودند که مکانیزم اصلی باربرداری ذوب قطعه کار است. جنبه شیمیایی باربرداری از ابتدای قرن حاضر بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است. یانگ و همکاران مکانیزم براده برداری در این فرآیند را یک اچ شیمیایی دما بالا تعریف کرده اند [7].
با وجود تحقیقات انجام شده، هنوز دستیابی به عمق بالاتر و در عین حال به حداقل رساندن آسیب‌های سطحی از موضوعات مورد توجه در زمینه ماشینکاری ECDM است. در این راستا مقاله حاضر به بررسی روش جدیدی می‌پردازد که شامل انجام ماشینکاری در دو مرحله خواهد بود. مرحله اول با شرایط ماشینکاری خشن و نرخ براده برداری بالا همراه خواهد بود و در مرحله دوم شرایط ماشینکاری مشابه حالت پرداخت خواهد بود تا آسیب‌های سطحی زیادی به وجود نیاید. عمق ماشینکاری پارامتر اصلی پژوهش حاضر است تا بتوان به حداکثر نرخ باربرداری دست یافت.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2022-12-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.16.9]

۲- تجهیزات آزمایش

در مجموعه آزمایش های میکروسوراخکاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی، قطعه کار باید بر روی یک تکیه گاه به طور ثابت قرار داده شود (شکل ۲). تکیه گاه با استفاده از ریل راهنما به پایه L مانند، متصل می شود و این امکان را دارد که در جهت عمودی حرکت کند. ابعاد تکیه گاه به گونه ای است که به طور کامل داخل ظرف حاوی الکترولیت قرار می گیرد و سطح الکترولیت بالاتر از سطح آزاد شیشه باشد تا عملیات جرقه زنی و براده برداری انجام شود. نکته دیگر در طراحی بستر آزمایشگاهی استفاده از روش گرانشی برای عمق دهی می باشد. در این فرآیند، ابزار در راستای عمودی ثابت در نظر گرفته شده است و عمق سوراخکاری با حرکت رو به بالای شیشه به دلیل استفاده از نیروی گرانشی و با اتصال وزنه یک نیوتونی به تکیه گاه انجام می شود.پارامترهای تنظیم شده بر روی دستگاه در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲) چیدمان میکروسوراخکاری تخلیه الکتروشیمیایی

جدول ۱) پارامترهای آزمایش

پارامتر	تعریف
جنس قطعه کار	شیشه سودا لایم
جنس ابزار	فولاد تندبر
شکل ابزار	مته مخروطی
اختلاف قطر ابزار(میکرو متر)	۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰
آند	بلوک فولادی
الکترولیت	سدیم هیدروکسید۲۵درصد وزنی
طول غوطه وری ابزار(میلی متر)	۱/۵
ولتاژ (ولت)	۳۳، ۳۸
زمان کل (ثانیه)	۱۲۰
زمان هر پاس در حالت دو مرحله ای (ثانیه)	۶۰

۲-۱- طراحی آزمایش

در این مقاله حالت دو مرحله ای ماشین کاری و مقایسه آن با حالت معمولی و اثرات آن بر عمق سوراخ و منحنی جریان بررسی گردیده است. در ماشین کاری دو مرحله ای دو ابزار با قطرهای مختلف به عنوان ابزارهای پاس اول و دوم انتخاب می شوند. بدین صورت که در پاس اول از ابزاری با قطر کوچکتر از ۷۰۰ میکرومتر استفاده شده و مدت زمان ماشینکاری ۶۰ ثانیه در نظر گرفته می شود. در ادامه و در پاس دوم، از ابزار با قطر ۷۰۰ میکرومتر استفاده شده و مجددا ماشینکاری برای ۶۰ ثانیه انجام می شود. در مجموع زمان ماشینکاری دو مرحله ای برابر ۱۲۰ ثانیه خواهد بود. ماشینکاری دو مرحله ای با ماشینکاری ECDM معمولی که شامل ۱۲۰ ثانیه و با استفاده از یک ابزار به قطر ۷۰۰ میکرومتر خواهد بود، مقایسه خواهد شد. لازم به ذکر است که ابزار یا قطعه کار حرکت جانبی نداشته و کاملا موقعیت ثابتی دارند.

قطر نهایی در این آزمایش ها ۷۰۰ میکرومتر و اختلاف قطرهای ابزارهای پاس اول و پاس دوم ۲۰۰،۳۰۰ و۱۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. ماشینکاری با استفاده از دو ولتاژ کاری ۳۳ و ۳۸ ولت انجام شده است. برای هر یک از موارد، آزمایش سه بار تکرار گردید و مقدار عمق میانگین با استفاده از میکروسکوپ نوری اندازه گیری شد.

۳- تحلیل نتایج

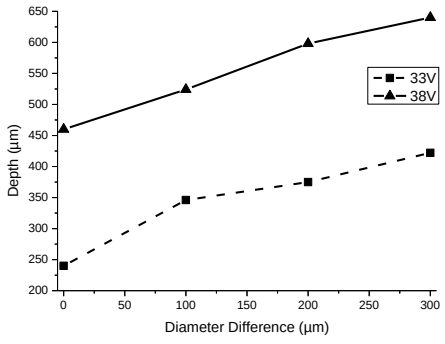
در این بخش به مقایسه ی نتایج به دست آمده از آزمایش های حالت دو مرحله ای و معمولی پرداخته و اثرات آن ها بر عمق بررسی می شود.

۳-۱- بررسی و مقایسه اثر عمق در حالت های دو مرحله ای و معمولی

در این قسمت به بیان نتایج آزمایش های دو مرحله ای با اختلاف قطرهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومتر در دو ولتاژ ۳۳ و ۳۸ ولت پرداخته می شود. (حالت معمولی با قطر ۷۰۰ میکرومتر به صورت حالت دو مرحله ای با اختلاف قطر صفر در نمودارها و اشکال بیان شده است)

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود در هر دو سطح ولتاژ، با افزایش اختلاف قطر، مقدار عمق سوراخ افزایش می یابد.

مقدار عمق ماشین کاری شده در حالت معمولی (اختلاف قطر صفر) در ولتاژ ۳۳ ولت از مقدار ۲۴۰ میکرومتر به ۴۲۲ میکرومتر در حالت دو مرحله ای با اختلاف قطر ۳۰۰ میکرومتر افزایش یافته است (۳۶٪ بهبود) و در ولتاژ ۳۸ ولت از ۴۶۰ میکرومتر به ۶۴۰ میکرومتر افزایش داشته است (۷۰٪ بهبود).



شکل ۳) تأثیر اختلاف قطرهای مختلف بر عمق ماشین کاری

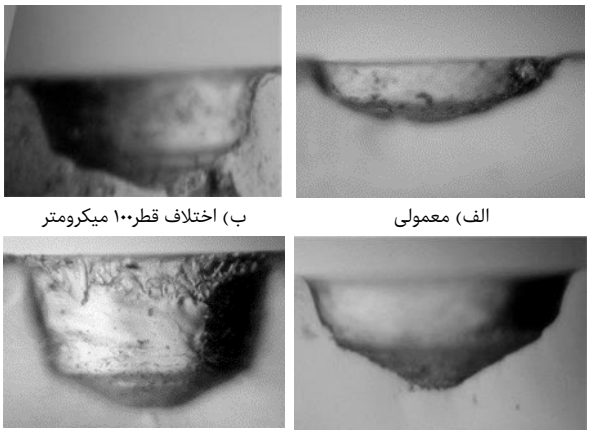
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2022-12-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.16.9]

شکل های ۴ و ۵ نتایج عمق سوراخ کاری را برای ولتاژهای ۳۳ و ۳۸ ولت نشان می دهند. در هر دو شکل ها، پارامتر اصلی مورد بررسی تغییر قطر ابزار است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، در حالت ماشینکاری معمولی حداقل عمق سوراخ حاصل شده است. با تغییر شرایط ماشینکاری به حالت دو مرحله ای، تغییر شدیدی در عمق حاصل می شود. به طور کلی، علت اصلی این تغییر شامل در دسترس قرار گرفتن الکترولیت در داخل سوراخ در حالت دو مرحله ای است. در نواحی داخلی سوراخ به هنگام ماشینکاری، الکترولیت به علت فضای کم به سختی جریان یافته و در رویه اصلی فرآیند باربرداری یعنی الکترولیز، فیلم گاز و تخلیه الکتریکی خلل ایجاد شده و باربرداری کاهش می یابد. در حالت دو مرحله ای، به علت فضای ایجاد شده با واسطه مرحله اول ماشینکاری، الکترولیت در این ناحیه تجمع کرده و در مرحله دوم مقدار مناسبی در دسترس است که رویه تشکیل فیلم گاز را تسهیل کرده و باربرداری افزایش می یابد. با توجه به شکل ۴ و ۵ مشاهده می شود با افزایش اختلاف قطر، عمق بیشتری حاصل شده است. مقایسه یک به یک اشکال از شکل های ۴ و ۵ نشان می دهد که افزایش ولتاژ اعمالی به افزایش عمق منجر شده است. علت این امر ان است که با افزایش ولتاژ، الکترولیز با شدت بیشتری انجام شده و در نهایت فیلم گاز با سرعت بیشتری تشکیل شده و در نهایت زمان بیشتری از کل زمان ماشینکاری به جرقه زنی اختصاص می یابد. در عین در ولتاژ بالاتر، جرقه علاوه بر زمان بیشتر دارای انرژی بالاتری خواهند بود که در نهایت به افزایش عمق منجر خواهد شد.

۳-۲- بررسی و مقایسه منحنی های جریان در حالت های دو مرحله ای و معمولی

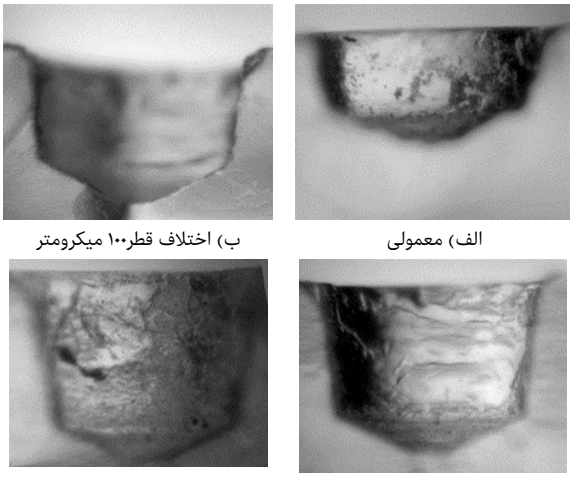
یکی از روش های ارزیابی فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی، تحلیل پالس جریان الکتریکی آن است. شکل های ۶ و ۷ منحنی جریان



الف) معمولی ب) اختلاف قطر۱۰۰ میکرومتر

ج) اختلاف قطر۲۰۰ میکرومتر د) اختلاف قطر۳۰۰ میکرومتر

شکل ۴) نتایج اختلاف قطرهای مختلف در ولتاژ ۳۳ ولت



الف) معمولی ب) اختلاف قطر۱۰۰ میکرومتر

ج) اختلاف قطر۲۰۰ میکرومتر د) اختلاف قطر۳۰۰ میکرومتر

شکل ۵) نتایج اختلاف قطرهای مختلف در ولتاژ ۳۸ ولت

در پاس دوم حالت دو مرحله ای با اختلاف قطرهای متفاوت و حالت معمولی را نشان می دهند. پارامترهای مهم در بررسی منحنی های جریان، بیشترین مقدار جریان و مدت زمان تشکیل فیلم گاز و جرقه زنی می باشد.

در این منحنی ها همان طور که در شکل ۶ مشخص شده است، قله های مرتفع نشان دهنده تشکیل فیلم گاز و قسمت های با ارتفاع کم جرقه ها را نشان می دهد.

در ماشین کاری دو مرحله ای مدت زمان تشکیل فیلم گاز به علت در دسترس بودن الکترولیت کوتاه تر است. در اختلاف قطر بالاتر (۳۰۰میکرومتر) زمان تشکیل فیلم گاز بسیار کوتاه تر از سایر اختلاف قطرها می باشد. در حالت معمولی تشکیل فیلم گاز به مدت زمان بیشتری نسبت به حالت دو مرحله ای نیاز دارد. در مقایسه بین اختلاف قطرهای متفاوت، اختلاف قطر ۳۰۰ میکرومتر منحنی جریان یکنواخت تری نسبت به سایر اختلاف قطرها و همچنین حالت معمولی دارد.

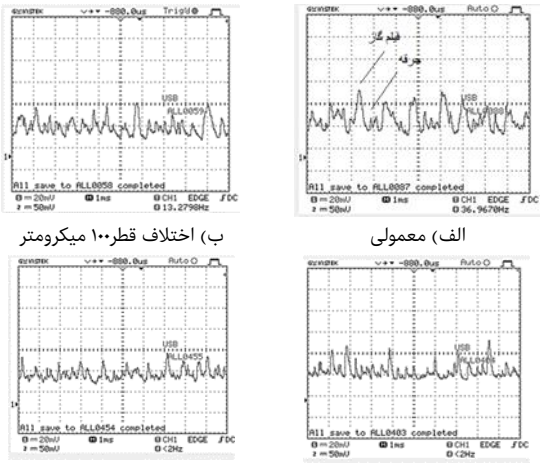
در حالت دو مرحله ای وقتی سوراخ با پاس اول (ابزار قطر کوچک تر) زده می شود، برای پاس دوم (ابزار قطر بزرگتر) امکان دسترسی الکترولیت نسبت به حالت تک پاس بیشتر است. در جریان بودن الکترولیت سبب می شود تولید و تشکیل حباب و فیلم گاز به خوبی صورت گیرد و فرآیند جرقه زنی به طور مناسبی انجام شود. هم چنین در روش دو مرحله ای به ازای هر پاس یک سری جرقه زنی و در مجموع دو سری جرقه زنی رخ می دهد. در نتیجه تخلیه های الکتریکی سهم عمده باربرداری را برعهده دارند. درحالت معمولی با فراتر رفتن عمق از مقدار معینی، (حدود ۲۰۰ میکرومتر) گردش الکترولیت به دشواری انجام می شود و در نتیجه حجم الکترولیت مورد نیاز برای تشکیل فیلم گاز کم می شود و فرآیند جرقه زنی با دشواری صورت می گیرد. در چنین شرایطی، انحلال شیمیایی شیشه عامل اصلی باربرداری است. سرعت نفوذ ابزار در این شرایط پایین تر از حالتی است که جرقه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2022-12-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.16.9]

های الکتریکی به فرآیند باربرداری کمک می کنند. دلایل مذکور بیشتر بودن عمق در حالت دو مرحله ای نسبت به معمولی را توجیه می کنند.

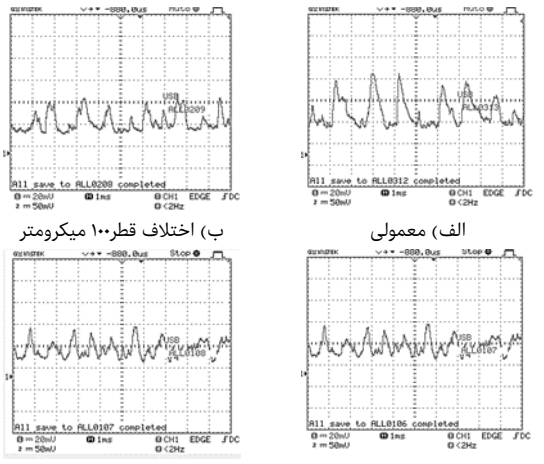
همچنین با بررسی نتایج می توان مشاهده کرد که مدت زمان رسیدن به یک عمق معین در ماشین کاری دو مرحله ای کمتر از حالت معمولی می باشد. در حالت معمولی برای رسیدن به عمق ۴۵۰ میکرومتر مدت زمان ۴ دقیقه نیاز است اما در حالت دو مرحله ای با اختلاف قطر ۳۰۰میکرومتر به مدت زمانی ۲/۵ دقیقه نیاز است. با احتساب زمان تعویض ابزار باز در حالت دو مرحله ای مدت زمان کمتری برای رسیدن به عمق معین نیاز است.



الف) معمولی ب) اختلاف قطر۱۰۰ میکرومتر

ج) اختلاف قطر۲۰۰ میکرومتر د) اختلاف قطر۳۰۰ میکرومتر

شکل ۶) منحنی جریان اختلاف قطرهای مختلف در ولتاژ ۳۳ولت



الف) معمولی ب) اختلاف قطر۱۰۰ میکرومتر

ج) اختلاف قطر۲۰۰ میکرومتر د) اختلاف قطر۳۰۰ میکرومتر

شکل ۷) منحنی جریان اختلاف قطرهای مختلف در ولتاژ ۳۸ ولت

۴- نتیجه گیری

ماشین کاری در حالت دو مرحله ای در فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی موجب افزایش عمق سوراخ ایجاد شده نسبت به حالت معمولی می شود. هرچه اختلاف قطر بیشتر شود عمق افزایش می یابد. این نتیجه در تمامی سطوح ولتاژ قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که روش جدید باعث افزایش عمق سوراخ شده که به ترتیب در ولتاژهای ۳۳ و ۳۸ ولت افزایش عمق در حدود ۳۶٪ و ۷۰٪ حاصل شد. همچنین، اختلاف قطر بیشتر باعث افزایش عمق سوراخ گردیده است.

تاییدیه اخلاقی: همه جنبه‌های اخلاقی در انجام پژوهش رعایت شده است.

تعارض منافع: نویسندگان تایید می‌نمایند که تعارض منافعی وجود ندارد.

منابع مالی: منابع مالی برای این پژوهش نبوده است.

مراجع

1- Hülsenberg D, Harnisch A, Bismarck A. Microstructuring Glasses Using Lasers. Springer Berlin Heidelberg; 2008.

2- Wuthrich R, Abou Ziki JD. Micromachining using electrochemical discharge phenomenon: fundamentals and application of spark assisted chemical engraving. William Andrew; 2014.; 189:162.

3- Wüthrich R, Fascio V. Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon—an overview. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005;45(9):1095-108.

4- Kurafuji H. Electrical discharge drilling of glass-I. Annals of the CIRP. 1968;16:415.

5- Cook NH, Foote GB, Jordan P, Kalyani BN. Experimental studies in electro-machining.

6- Ghosh A. Electrochemical discharge machining: principle and possibilities. Sadhana. 1997;22(3):435-47.

7- Yang CT, Ho SS, Yan BH. Micro hole machining of borosilicate glass through electrochemical discharge machining (ECDM). InKey Engineering Materials 2001 (Vol. 196, pp. 149-166). Trans Tech Publications Ltd.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2022-12-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.16.9]