



The Application of Intermediate Part to Improve the Accuracy of Electrochemical Discharge Drilling



ARTICLE INFO

Authors

Elhami S.^{1*},
Rezvani P.²,
Razfar M.R.²

¹ Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

* Correspondence

Address: Azadi Sq., Mashhad
Sadeghelhami@um.ac.ir

How to cite this article

Elhami S, Rezvani P, Razfar M.R. The Application of Intermediate Part to Improve the Accuracy of Electrochemical Discharge Drilling. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):87-92.

ABSTRACT

Today, the application of materials such as glass has been widely developed in the manufacture of micronutrients, electronics and medical equipment because of its high hardness, chemical resistance and high abrasion. But due to high hardness and low toughness, mechanical machining cannot be applied. The Electrochemical discharge method is a new machining method that is capable of machining hard and non-conductive electrical materials such as glass. In the process of electrochemical discharge drilling, the dimensional accuracy of the hole and especially its inlet area is important. But almost, the inlet of the hole has a high slope, which leads to excessive hole overcut and tapering of the hole side wall. In this study, to remove the high slope entrance area, a thin intermediate part was used which will be separated from the main workpiece after the drilling process. The results showed that mentioned method reduced the entrance overcut of the hole by 50 to 76% depending on the diameter of the tool. Also, the hardness measuring of points on the hole inlet showed that using the intermediate part led to the smaller heat-affected zone (HAZ) around the hole entrance.

Keywords Electrochemical Discharge Machining, Intermediate Part, Overcut, Tapering, Hardness.



ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین کاری و ماشین های ابزار پیشرفته.
مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۸۷-۹۲.

بهبود دقت سوراخکاری تخلیه الکتروشیمیایی با استفاده از قطعه واسط



چکیده

مشخصات مقاله

نویسندگان

صادق الهامی جوشقان^{۱*}

پرگل رضوانی^۲

محمدرضا رازفر^۲

^۱ دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

^۲ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* نویسنده مسئول

آدرس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه

فردوسی مشهد

Sadeghelhami@um.ac.ir

امروزه استفاده از موادی مانند شیشه به دلیل خواصی مانند سختی بالا، مقاومت شیمیایی و سایش بالا، به طور گسترده در ساخت تجهیزات میکرونی، الکترونیکی و تجهیزات پزشکی توسعه یافته است. اما به دلیل سختی بالا و چقرمگی پایین، باربرداری مکانیکی و ایجاد ساختارهای میکرونی بر روی آن با روش های سنتی دشوار است. روش تخلیه الکتروشیمیایی یک روش نوین ماشینکاری است که قابلیت ماشینکاری مواد سخت و نارسای الکتریکی از جمله شیشه را دارد. در فرآیند سوراخکاری تخلیه الکتروشیمیایی، دقت ابعادی سوراخ و به ویژه ناحیه ورودی آن حائز اهمیت است اما در بیشتر موارد، ورودی سوراخ دارای شیب زیاد بوده که منجر به اضافه برش زیاد و مخروط شدگی دیواره سوراخ می گردد. در این تحقیق برای حذف ناحیه شیب دار ورودی سوراخ (عامل کاهش دقت سوراخکاری) از قطعه واسط با ضخامت کم استفاده شده است که پس از سوراخکاری از سطح قطعه اصلی جدا خواهد شد. نتایج نشان داد که این روش اضافه برش نواحی ورودی سوراخ را با توجه به قطر ابزار مورد استفاده، بین ۵۰ تا ۷۶٪ کاهش داده است. همچنین، نتایج سختی سنجی قطعه کار نشان داد با استفاده از قطعه واسط، سوراخ نهایی دارای ناحیه متاثر از حرارت کوچکتر در اطراف سوراخ است.

کلیدواژه ها ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی، قطعه واسط، اضافه برش، مخروطی شدن، سختی سنجی.

۱- مقدمه

قطعات شیشه‌ای معمولاً نارسانای الکتریکی بوده، مقاومت شیمیایی بالایی در محیط‌های خورنده داشته، هدایت و تغییر شکل حرارتی پایینی دارند و از طرفی شفاف و شکننده هستند، لذا در انواع کاربردهای میکروالکترونیک، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، صنایع ایتیک و انواع کاربردهای پزشکی به طور روزافزون مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. با این حال سختی و شکنندگی بالای شیشه، ماشینکاری و شکل‌دهی آنرا با مشکلات زیادی همراه کرده است.

در ماشینکاری با شرایط معمول، برش شیشه در حالت ترد اتفاق می‌افتد و این موضوع سبب ایجاد ترک‌های پرشمار در شیشه و شکست آن می‌شود. همچنین، روش‌های مبتنی بر فرآیندهای شیمیایی بسیار کند می‌باشند [1]. یکی از روش‌های نوینی که در سال‌های اخیر جهت ماشینکاری قطعات سخت، شکننده و نارسانای الکتریکی نظیر شیشه و سرامیک معرفی شده است، روش ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی (ECDM) می‌باشد. این فرایند برای ساخت ریز سازه‌های کانال شکل و ریز سوراخ‌ها مناسب بوده و نسبت به بسیاری از روش‌های دیگر کم هزینه‌تر و اقتصادی‌تر می‌باشد.

۱-۱- اصول ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی

ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی از پدیده‌های الکتروشیمیایی و فیزیکی برای ماشینکاری مواد سخت و نارسانای الکتریکی نظیر شیشه و سرامیک بهره می‌برد. در این روش، قطعه‌کار درون محلول الکترولیت مناسب (عمدتاً سدیم هیدروکسید یا پتاسیم هیدروکسید) غوطه‌ور شده و یک ولتاژ ثابت مستقیم به دو الکترود (که یکی از آنها ابزار سواخکاری است) اعمال می‌شود. وقتی ولتاژ اعمالی پایین است، فرآیند الکترولیز اتفاق می‌افتد. حباب‌های گاز هیدروژن اطراف الکترود ابزار تشکیل شده و حباب‌های اکسیژن اطراف الکترود کمکی تشکیل می‌شوند. 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 به اصطلاح تخلیه الکتروشیمیایی، بین ابزار و الکترولیت اطراف آن اتفاق می‌افتد. اگر قطعه‌کار در مجاورت الکترود ابزار باشد، ماشینکاری امکان‌پذیر می‌شود.

۲-۱- مروری بر تحقیقات پیشین

در دهه ۱۹۹۰، اولین کاربرد ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی در زمینه ریز سیستم‌های الکترومکانیکی توسط ایساشی و همکاران ارائه شد [3]. به‌طور همزمان، مطالعه‌های بنیادی راجع به ماهیت ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی صورت گرفت. به ویژه گوش و

همکاران برای اولین بار ارتباط روشنی بین فرآیند ماشینکاری و پدیده تخلیه الکتروشیمیایی برقرار کرد [4,5].

کولکاری و همکارانش [6] نیز با انجام چند آزمایش ساده و تحلیل نتایج اندازه‌گیری مختلف نشان دادند که بعد از هر جرقه دمای قطعه کار به بالاتر از دمای ذوب و حتی در برخی مواقع در انرژی بسیار زیاد به بالاتر از دمای تبخیر می‌رسد. آن‌ها پیش بینی کردند که ۷۷٪-۹۶٪ انرژی اعمال شده در فرآیند شامل گرم شدن الکترولیت و تبخیر آن و تشکیل حباب‌ها و فیلم گاز و همچنین افزایش دمای ابزار می‌شود و فقط در حدود ۲٪-۶٪ برای افزایش دمای قطعه کار مصرف می‌شود.

بررسی‌های مختلفی نشان دهنده افزایش نرخ باربرداری ECDM با افزایش ولتاژ اعمال شده توسط منبع تغذیه می‌باشند. در حقیقت با افزایش ولتاژ فرآیند، انرژی جرقه‌ها افزایش یافته و نرخ باربرداری نیز افزایش می‌یابد. البته افزایش بیش از اندازه انرژی جرقه‌ها، احتمال ترک خوردگی شیشه و آسیب‌های حرارتی (منطقه متأثر از حرارت) آن را افزایش می‌دهد.

ووتریچ [7] در سال ۲۰۰۶ نشان داد که کیفیت فیلم گاز نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی دارد و هر قدر فیلم گاز تشکیل شده در اطراف ابزار نازک‌تر باشد، ولتاژ بحرانی کاهش یافته و دقت ماشینکاری افزایش می‌یابد. ووتریچ نشان داد که گرم شدن موضعی الکترولیت در حین فرآیند موجب افزایش رسانایی الکترولیت شده و تشکیل فیلم گاز را سرعت می‌بخشد. همچنین دمای بالای الکترولیت منجر به ایجاد فیلم گاز نازک‌تر می‌گردد [8].

دقت سوراخکاری به وسیله دو پارامتر اضافه برش ورودی سوراخ و مخروطی بودن دیواره سوراخ تعیین می‌شود. اضافه برش در ورودی سوراخ همواره مقادیری بزرگتر نسبت به دیواره (میانه) سوراخ از خود نشان داده است. همچنین شیب ورودی سوراخ موجب مخروطی شدن دیواره سوراخ می‌گردد که نامطلوب است. با توجه به این موضوع، نویسندگان استفاده از قطعه واسط در ورودی سوراخ را مطالعه خواهند کرد تا بتوان این ناحیه را که ضخامت کوچکی نیز دارد از پروفیل سوراخ حذف نموده و اضافه برش و مخروطی بودن را به صورت قابل توجهی کاهش داده و سوراخکاری دقیقتری انجام گردد.

۲- رویه تجربی انجام آزمایش‌ها

۲-۱- تجهیزات

منبع تغذیه جریان مستقیم دارای حداکثر خروجی ۶۰ ولت و ۵ آمپر مورد استفاده قرار گرفت. از میکروسکوپ نوری با حداکثر بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر و از میکروسکوپ الکترونی مدل SERON-AIS2100C استفاده شده است. تغییرات سختی با استفاده از دستگاه میکروسختی سنج ویکرز Bareiss مدل V-Test اندازه‌گیری شده است. ابزار مورد استفاده، مته و از جنس فولاد

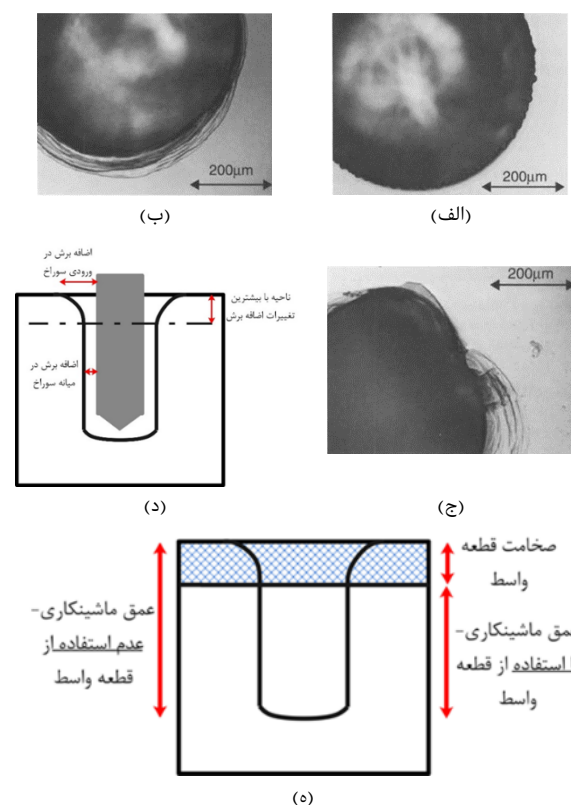
از حرارت احاطه شده و ترک‌هایی در اطراف سوراخ مشاهده می‌شود (شکل ۱-ج). شکل ۱-د مقطع سوراخ و تغییرات اضافه برش در حین سوراخکاری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ورودی سوراخ شکلی مخروطی به خود می‌گیرد که منجر به اضافه برش بالا در ورودی می‌شود. با افزایش عمق، اضافه برش با شیب زیاد کاهش یافته و به مقدار تقریباً ثابت و نسبتاً کوچکی می‌رسد. ناحیه با تغییرات زیاد اضافه برش، ضخامت کمی داشته (شکل ۱-ه) و در صورت حذف آن از پروفیل سوراخ (با استفاده از قطعه واسط)، دقت به صورت قابل توجهی بالا خواهد رفت.

افزایش اضافه برش در ورودی سوراخ از دو منشا سرچشمه می‌گیرد. همانطور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود، در لحظات اولیه سوراخکاری و در ورودی سوراخ، فیلم گاز شکل گسترده‌تری در راستای افقی دارد و لذا تخلیه‌های الکتریکی ایجاد شده بین ابزار و فیلم گاز در راستای افقی ناحیه بزرگتری را تحت تاثیر قرار می‌دهند که این موضوع خود منجر به افزایش باربرداری در راستای افقی می‌شود. نتیجه نهایی، افزایش اضافه برش خواهد بود. منشا دوم مربوط به مدت زمان و تعداد تخلیه‌های الکتریکی است که به هر ناحیه از سوراخ وارد می‌شود (شکل ۲-ب). ورودی سوراخ اولین ناحیه از پروفیل سوراخ است که تخلیه‌های الکتریکی به آن برخورد می‌کنند. از طرف دیگر هنگامی که ابزار در عمق پیشروی داشته باشد، تخلیه‌های الکتریکی بر دیواره جانبی ابزار ادامه داشته که پیوسته با ناحیه ورودی سوراخ برخورد خواهند کرد و ناحیه باربرداری را افزایش می‌دهد. به طور مثال ناحیه میانی سوراخ، حدوداً نصف بازه زمانی ماشینکاری در معرض تخلیه‌های الکتریکی قرار دارد در حالیکه ناحیه ورودی سوراخ تمام زمان ماشینکاری در معرض انرژی حرارتی تخلیه الکتریکی قرار می‌گیرد. نکته دیگری که در این قسمت باید مد نظر باشد، وابستگی انرژی تخلیه الکتریکی با رژیم باربرداری است. در نواحی نزدیک به ورودی سوراخ، الکترولیت به میزان کافی در دسترس بوده لذا فیلم گاز راحت‌تر تشکیل شده و جرقه‌ها انرژی بالاتری خواهند داشت (رژیم تخلیه الکتریکی). از طرف دیگر، در عمق سوراخ معمولاً الکترولیت به میزان کافی در دسترس نیست و تشکیل فیلم گاز سخت‌تر خواهد بود که نتیجه آن تخلیه‌های الکتریکی با تعداد و انرژی کمتر همراه خواهد بود. این موضوع نیز نشان می‌دهد انرژی حرارتی بالایی (ناشی از تخلیه الکتریکی) به ناحیه ورودی سوراخ رسیده و مواد بیشتری را از قطعه‌کار جدا خواهد کرد.

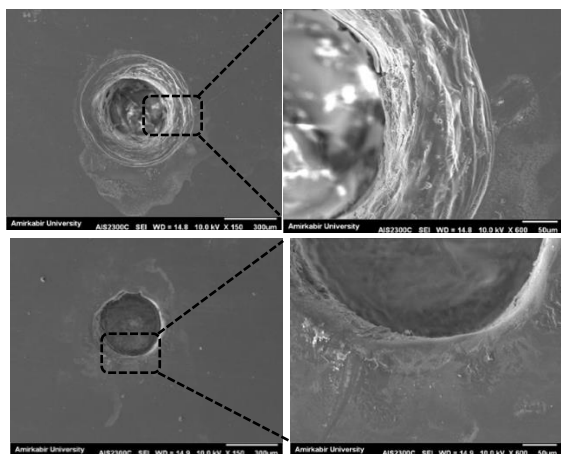
تندبر با قطرهای ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ میکرومتر انتخاب شد. قطعه‌کار و قطعه واسط از جنس شیشه سودالایم و با ضخامت‌های ۱ و ۰/۲ میلیمتر انتخاب شدند. ولتاژ کاری ۳۵ ولت، الکترولیت سدیم هیدروکسید (۲۵٪ وزنی) و زمان ماشینکاری ۱۸۰ ثانیه برای آزمایش‌ها به کار گرفته شدند.

۲-۲- دقت پروفیل سوراخ در ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی

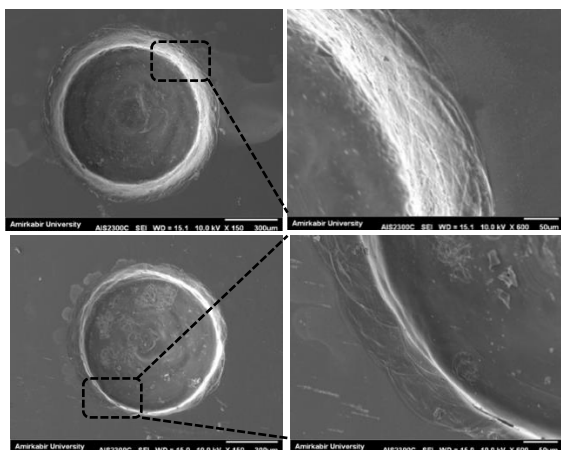
در فرآیند سوراخکاری تخلیه الکتروشیمیایی، در ورودی سوراخ اشکال مختلفی قابل مشاهده هستند که در شکل ۱-الف-ج نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱-الف نشان داده شده است، ورودی سوراخ دارای لبه‌های کنگره ای شکل است که در ولتاژهای کاری کمی بالاتر از ولتاژ بحرانی ایجاد می‌شوند. در شکل ۱-ب سوراخ‌هایی با اضافه برش قابل توجه در ورودی سوراخ که همراه با ناحیه متأثر از حرارت است، نشان داده شده است. به طور کلی در سوراخ‌های با ولتاژ حدود ۳۰ ولت، سوراخ با ناحیه متأثر از حرارت احاطه می‌شود که با افزایش عمق و ولتاژ این ناحیه بزرگتر می‌گردد. افزایش ولتاژ منجر به افزایش انرژی اعمالی بر قطعه‌کار شیشه‌ای و ترد می‌شود، لذا در ولتاژهای بالاتر از ۳۷ ولت، ورودی سوراخ توسط ناحیه بزرگتری از منطقه متأثر



شکل ۱) کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده روی شیشه در فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی توسط ابزار مته به قطر ۴۰۰ میکرومتر و الکترولیت سدیم هیدروکسید با غلظت ۲۵٪ وزنی. الف) سوراخ با لبه‌های کنگره‌ای (ب) سوراخ‌هایی با اضافه برش و ناحیه متأثر از حرارت (ج) سوراخ‌هایی با ترک-های حرارتی [2]. د) نمایی شماتیک از پروفیل مقطع سوراخ و اضافه برش‌های نواحی مختلف (ه) نمایی شماتیک از اثر قطعه واسط بر دقت سوراخ.



(الف)

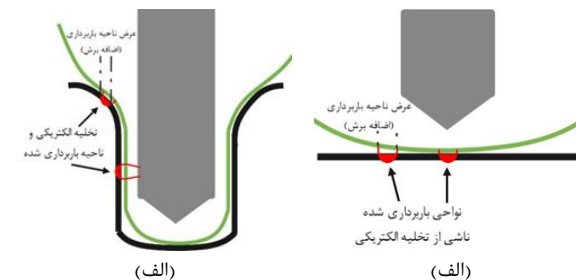


(ب)

شکل ۴) عکس‌های SEM از اثر قطعه واسط بر ورودی سوراخ (الف) قطر ۳۰۰ میکرومتر (ب) قطر ۷۰۰ میکرومتر

برش را نشان می‌دهند. در شکل ۳ با استفاده از میکروسکوپ نوری، از مقطع سوراخ تصویربرداری شده است. با مقایسه تصاویر، به وضوح مشاهده می‌شود که ناحیه ورودی سوراخ که دارای شیب زیاد است، با استفاده از قطعه واسط حذف شده است و پروفیل سوراخ به شکل استوانه‌ای نزدیک‌تر گردیده است که دستاوردی مطلوب است. در سوراخکاری همیشه هدف ایجاد سوراخ با فرم استوانه‌ای است. همچنین، از اضافه برش در ورودی سوراخ به وسیله میکروسکوپ الکترونی تصویربرداری شده و در شکل‌های ۴ نشان داده شده است. در این تصاویر نیز اثر حذف ناحیه با شیب زیاد در ورودی سوراخ مشهود است.

با توجه به اهمیت اضافه برش بر دقت سوراخ حاصل، از روش پردازش تصویر به منظور مقایسه کمی این پارامتر در قطره‌های مختلف ابزار استفاده گردیده است که نمای شماتیک از این رویه در شکل ۵-الف نشان داده شده است. در شکل ۵-ب، نتایج مربوط به درصد کاهش اضافه برش برای قطره‌های مختلف ابزار بیان شده است. درصد کاهش اضافه برش در حالت استفاده از قطعه واسط نسبت به حالت عدم استفاده از قطعه واسط بیان شده است. در همه حالت‌های ممکن، قطعه واسط ناحیه با شیب



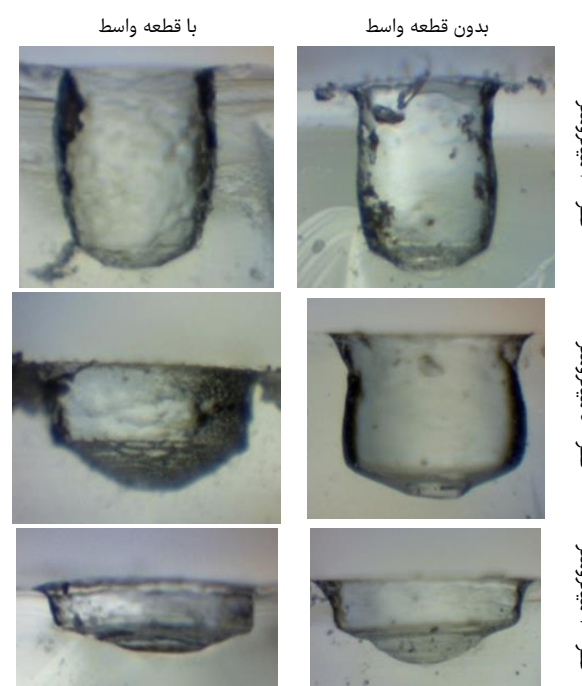
شکل ۲) لحظات اولیه سوراخکاری در محل ورودی سوراخ و ناحیه باربرداری افقی (ب) ناحیه اضافه برش در ورودی و میانه سوراخ.

۲- تحلیل نتایج

در این بخش، نتایج استفاده از قطعه واسط بر افزایش کیفیت سوراخ و کاهش اضافه برش در ورودی سوراخ و مخروطی شدن دیواره سوراخ بررسی می‌شود. قطعه پیشنهاد شده در این بخش به عنوان قطعه واسط، شیشه سودا لایم (همجنس قطعه‌کار اصلی) با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد. این قطعه بر روی سطح قطعه‌کار اصلی قرار داده می‌شود و بعد از انجام آزمایش، قطعه واسط جدا می‌گردد و سوراخ اصلی بر روی قطعه اصلی باقی می‌ماند. در شکل ۱-د می‌توان به صورت شماتیک اثر قطعه واسط را مشاهده کرد.

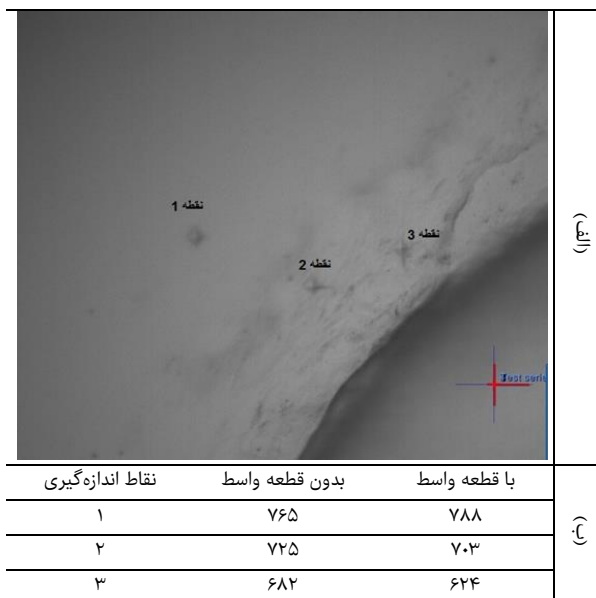
مشهود است که در این روش عمق سوراخ به علت وجود قطعه واسط کمتر از حالت بدون قطعه واسط است. بنابراین این روش زمانی مورد استفاده است که دقت ورودی سوراخ دارای اهمیت بالایی باشد که به واسط حصول آن، کاهش اندک نرخ باربرداری قابل چشم‌پوشی باشد.

شکل‌های ۳ و ۴ تصاویر مخروطی شدن دیواره سوراخ و اضافه



شکل ۳) تصاویر مقطع سوراخ در قطره‌های مختلف ابزار

شده است در حالی که بدون استفاده از قطعه واسط این تغییرات در ناحیه بزرگتری ایجاد می‌شود (برای حالت عدم استفاده از قطعه واسط سختی اولیه شیشه برای نقطه‌ای دورتر از نقطه ۱ حاصل می‌شود که نشان‌دهنده گسترده‌تر بودن ناحیه متأثر از حرارت است).



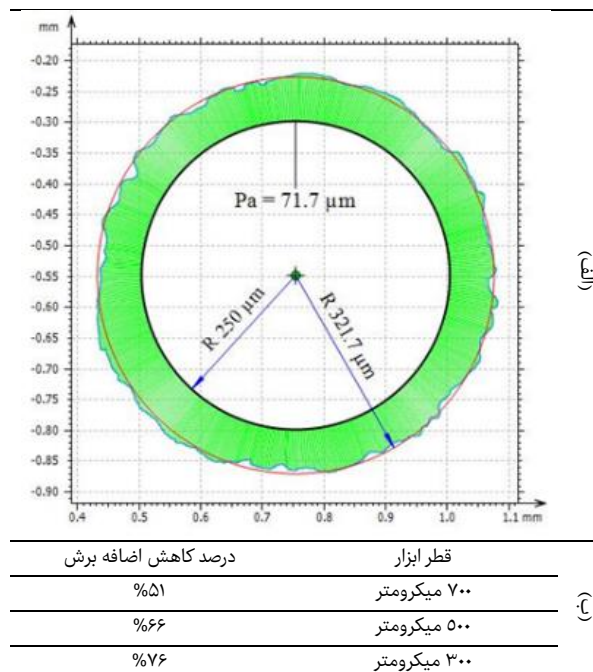
شکل ۶ (الف) نقاط اندازه‌گیری سختی (ب) نتایج سختی سنجی (ویکرز) با/بدون استفاده از قطعه واسط

۳- نتیجه‌گیری

در این پروژه، استفاده از تکنیک قطعه واسط در فرآیند سوراخکاری تخلیه الکتروشیمیایی در راستای افزایش دقت و کیفیت سوراخ حاصل مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده به شرح زیر حاصل شدند:

۱. مقایسه تصاویر مقطع سوراخ در دو حالت با/بدون استفاده از قطعه واسط نشان داد، این روش ناحیه با شیب زیاد در ورودی سوراخ را حذف کرده و مقطعی استوانه‌ای شکل را در دسترس قرار می‌دهد.
۲. با استفاده از پردازش تصویر اضافه برش در ورودی سوراخ، مشخص شد که استفاده از قطعه واسط بیش از ۵۰٪ ناحیه اضافه برش را کاهش داده و تاثیر زیادی بر بهبود دقت خواهد داشت. درصد کاهش اضافه برش برای قطرهای کوچکتر ابزار بیشتر بوده و تا حدود ۷۶٪ در قطر ابزار ۳۰۰ میکرومتر حاصل شده است.
۳. نتایج سختی سنجی نشان داد که در صورت استفاده از قطعه واسط ناحیه متأثر از حرارت در ورودی سوراخ کوچکتر خواهد شد و در آن تغییرات شدیدتر سختی رخ خواهد داد.

زیاد را از دیواره سوراخ حذف کرده است و به همین دلیل بیش از ۵۰٪ کاهش اضافه برش حاصل شده است. با در نظر گرفتن ضخامت ثابت قطعه واسط، اندازه کلی ناحیه اضافه برش در قطرهای کوچکتر ابزار، کمتر خواهد بود لذا در این حالتها، ناحیه اضافه برش کاملاً حذف شده و درصد کاهش بالایی (۷۶٪) حاصل شده است.



شکل ۵ (الف) نمونه‌ای از محاسبه کمی پارامتر اضافه برش (ب) درصد کاهش اضافه برش در صورت استفاده از قطعه واسط برای قطرهای مختلف ابزار

با توجه به تاثیر قطعه واسط بر سطح باربرداری شده، ناحیه متأثر از حرارت در اطراف سوراخ نیز دچار تغییرات خواهد شد که از نقطه نظر ساختار و خواص مواد قابل توجه خواهد بود، لذا در ادامه بررسی ناحیه متأثر از حرارت پرداخته شده است. به منظور تعیین ناحیه متأثر از حرارت، در سه نقطه به فواصل ۲۵، ۴۵ و ۱۰۰ میکرومتر از دیواره سوراخ سختی سطحی اندازه‌گیری شده است (شکل ۶-الف). این اندازه‌گیری در محل ورودی سوراخ و برای دو حالت بدون قطعه واسط و با استفاده از قطعه واسط (بعد از جدا کردن این قطعه) انجام گردیده است و نتایج حاصل (سختی ویکرز) در شکل ۶-ب بیان گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که برای دورترین نقطه اندازه‌گیری (نقطه ۱) سختی در حالت استفاده از قطعه واسط بالاتر است (۷۸۸ نسبت به ۷۶۵ ویکرز) که نشان دهنده عدم تاثیر پذیری این نقطه از حرارت تخلیه‌های الکتریکی است. برای دو نقطه دیگر، سختی در حالت استفاده از قطعه واسط پایین‌تر است که نشان می‌دهد سطح، تاثیر شدیدتری از حرارت پذیرفته است. این روند تغییرات نشان می‌دهد در حالت استفاده از قطعه واسط، تغییرات سختی ناشی از سیکل حرارتی تخلیه‌های الکتریکی در ناحیه کوچکتری متمرکز

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

تعارض منافع: نویسندگان تأیید می‌نمایند که تعارض منافی وجود ندارد.

منابع مالی: منابع مالی برای این پژوهش نبوده است.

مراجع

- 1- Hülsenberg D, Harnisch A, Bismarck A. Microstructuring of glasses: Springer; 2008.
- 2- Wüthrich R. Micromachining using electrochemical discharge phenomenon: fundamentals and applications of spark assisted chemical engraving: William Andrew; 2009.
- 3- Esashi M, Matsumoto Y, Shoji S. Absolute pressure sensors by air-tight electrical feedthrough structure. Sensors and Actuators A: Physical. 1990;23(1):1048-1052.
- 4- Basak I, Ghosh A. Mechanism of material removal in electrochemical discharge machining: a theoretical model and experimental verification. Journal of materials processing technology. 1997;71(3):350-359.
- 5- Jain V, Dixit P, Pandey P. On the analysis of the electrochemical spark machining process. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1999;39(1):85-165.
- 6- Kulkarni A, Sharan R, Lal G. Measurement of temperature transients in the electrochemical discharge machining process. Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry; Volume 7, Part 2. 2003;684:1069-1074.
- 7- Wüthrich R, Spaelter U, Bleuler H. The current signal in spark-assisted chemical engraving (SACE): what does it tell us? Journal of micromechanics and microengineering. 2006;16(4):779.
- 8- Wüthrich R, Hof L. The gas film in spark assisted chemical engraving (SACE)—a key element for micro-machining applications. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006;46(7):828-835.