



بررسی اثر سرعت پیشروی و دورانی ابزار بر کیفیت و عمق شیارهای مینیاتوری، در ماشین‌کاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی

پویا محمدی^۱، محمدرضا رازفر^{۲*}، منصور حاجیان^۳، نسیم صباحی^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

*تهران، صنوق پستی ۸۵۷۵-۴۴۱۳ Razfar@aut.ac.ir

چکیده

ماشین‌کاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی روش غیرسترنی نوظهوری برای ماشین‌کاری قطعات نارسانا می‌باشد. در این روش خودگی شیمیایی به کمک ذوب ناشی از دمای بالای موضعی باعث پاربرداری می‌شود. فرزکاری با این روش بحث جدیدی است که در صنایع مختلف از جمله الکترونیک، بیومکانیک، پزشکی کاربرد فراوان دارد. در این پژوهش شیارهای به طول تقیبی ۱۰ میلی‌متر با استفاده از ابزار قطر ۱ میلی‌متر بر روی شیشه زده شد. مشاهده شد که با تغییر سرعت حرکت ابزار در امتداد شیار (سرعت پیشروی)، کیفیت و عمق شیار تغییر می‌کند. طی آزمایشات متعدد این گونه استنتاج شد که بهمکانیکی با افزایش سرعت پیشروی، افزایش سطح و لاثا به مظور حفظ کیفیت شیار امری الزاماً می‌باشد. علاوه بر پیشروی، تأثیر سرعت دورانی ابزار بر روی مشخصات شیار نیز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و ملاحظه شد که چرخش ابزار بهمکانیکی باعث بهبود کیفیت و دقت عمق شیار می‌شود.

کلیدوازگان: تخلیه الکتروشیمیایی، شیار، چرخش ابزار

A study on the effect of tool travel speed and tool rotational speed on the surface quality and depth of micro-channels in electrochemical discharge machining

Pouya Mohammadi, Mohammadreza Razfar*, Mansour Hajian, Nasim Sabahi

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
*P.O.B 158754413, Tehran, Iran, Razfar@aut.ac.ir

ABSTRACT

Electrochemical discharge machining (ECDM) is an unconventional technique for surface micro-machining of non-conductive materials especially glass. Material removal is mostly attributed to a combination of thermal melting due to the local heating by the electrochemical discharges and some chemical effects. ECDM offers many advantages for various industries such as electronics, aerospace, biomedical and biomechanical systems. In this paper, the effect of tool travel speed and tool rotational speed on channel depth and surface integrity is evaluated. Micro-channels were machined by one millimeter tool of stainless steel. Based on the depth measurements and results of microscopic photos of channel surface, it is concluded that increasing the voltage is necessary for obtaining an ideal channel in high tool travel speed.

Keywords: Channel, Electrochemical Discharge, Tool Rotation.

است. به علاوه جریان الکتریکی روی سطح ماشین‌کاری شده تأثیر می‌گذارد که این بر عملکرد قطعه حاصله اثر می‌گذارد [۳]. شیارهای زده شده به روش فوتولیتوگرافی زبری سطح بالایی دارند. ماشین‌کاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی (در برخی منابع با عنوان پاربرداری شیمیایی به کمک جرقه) در این بین تکنولوژی جدید و قابل اعتمادی برای ماشین‌کاری مواد نارسانا، عدّتاً شیشه، می‌باشد [۴]. در این روش ماشین‌کاری داخل یک سلول الکتروشیمیایی صورت می‌گیرد در حالی که ابزار به عنوان کاتد و بلوك فلزی به عنوان آند به کار گرفته می‌شوند (شکل ۱). با اعمال ولتاژی بالاتر از مقداری معین، که به ولتاژ بحرانی معروف است، حباب‌هایی شروع به رشد بر

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و توسعه آن در صنایعی مثل الکترونیک، اپتیک و رزیست دارو، ایجاد سطوح میکرو و نانو اهمیت فراوانی پیدا کرده است. از این رو طی سالیان گذشته تحقیقات وسیعی در زمینه ایجاد سطوح میکرو به عمل آمده که نتیجه آن ارائه روش‌های متنوع مناسب با جنس‌های مختلف بوده است. این روش‌ها علاوه بر داشتن ربع طولی گستردگی (شامل ابعاد ماکرو، میکرو و نانو) و سازگاری با جنس قطعات جدید و پرکاربرد، بایستی توجیه اقتصادی داشته باشد. فرزکاری میکرو محدودیت ابعادی دارد [۱]. لیزر به دلیل تولید حرارت بالا کیفیت سطح مناسبی را ارائه نمی‌دهد [۲]. میکرو ماشین‌کاری به کمک تخلیه الکتریکی بر قطعات نارسانای الکتریکی بی‌تأثیر

2. ECDM- Electrochemical Discharge Machining

3. SACE- Spark Assisted Chemical Engraving

Please cite this article using:

P. Mohammadi, M.R. Razfar, M. Hajian, N. Sabahi, A study on the effect of tool travel speed and tool rotational speed on the surface quality and depth of micro-channels in electrochemical discharge machining, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 406-409, 2015 (in Persian) فارسی

1. Micro EDM

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

P. Mohammadi, M.R. Razfar, M. Hajian, N. Sabahi, A study on the effect of tool travel speed and tool rotational speed on the surface quality and depth of micro-channels in electrochemical discharge machining, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 406-409,

متصل به شفت بیرون آمده از موتور تصدیق می‌شود. قطعه کار مورد استفاده در این سری آزمایش‌ها لام به ضخامت ۱ میلی‌متر است که به وسیله قطعه‌ای نارسانا ثابت نگه داشته شده است. ابزار مورد استفاده، مته از جنس فولاد زنگنزن به قطر ۱ میلی‌متر می‌باشد. به منظور ایجاد شیار با مقطعه مستطیل، نوک مته با سمت‌باده مسطح شده است. هنگام سنگ زدن باید به تولید حرارت زیاد در مته دقت کرد. این حرارت می‌تواند شرایط متالورژیکی و مکانیکی نوک مته را تغییر دهد و در نتیجه جنس مته را از حالت همگن خارج کند. سنگ زدن با فاصله و پاشش آب حین سنگنزنی در این مورد به کار بسته می‌شود. فاصله بین لام و ابزار در عمق شیار بسیار مؤثر است. این فاصله با مکانیزم دقیقی ۱۵ میکرون در نظر گرفته می‌شود. از هیدرولیکسید سدیم با درصد جرمی ۲۵٪ به عنوان الکتروولیت استفاده می‌شود. طبق گزارش‌های دیگر محققین در این زمینه، این محلول در بین درصدهای مختلف هیدرولیکسید سدیم و هیدرولیکسید پتاسیم کیفیت سطح بهتری را حاصل می‌شود.

انجام الکتروولیت از حجم الکتروولیت می‌کاهد و این باعث افت جریان بین کاتد و آند می‌شود. برای جلوگیری از این امر با افزودن الکتروولیت حین آزمایش سطح الکتروولیت به مقدار ثابت ۲ میلی‌متر بالاتر از سطح لام نگه داشته می‌شود. این مقدار با خط کن دقیق اندازه‌گیری می‌شود. به علاوه ثبات عدد جریانی که از روی منبع ولتاژ خوانده می‌شود این مسأله را کنترل می‌کند.

ابزار به عنوان کاتد به قطب منفی منبع و قطعه مکعبی $5 \times 5 \times 5$ میلی‌متر مکعب از جنس فولاد زنگ نزن به عنوان آند انتخاب می‌شود. اختلاف پتانسیل موردنظر به وسیله منبع به سیستم اعمال می‌شود. شیارهای به طول حدوداً ۱۰ میلی‌متر روی لام ایجاد می‌شود. تمیزی و پاکی لام قبل از مشاهده زیر میکروسکوپ لازم است بنابرین لام با آب و الكل شسته و خشک می‌شود [۷]. کیفیت سطح شیار (به صورت کیفی) و عمق شیار (با مشاهده مقاطع شیار زیر میکروسکوپ سنجیده می‌شود).

۲-۲- طراحی آزمایش

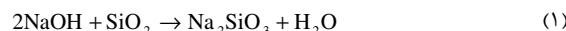
به منظور بررسی سرعت دورانی ابزار بر شیار، ماشین‌کاری در سرعت‌های ۵۰۰ و ۸۰۰ دور بر دقیقه و همچنین بدون چرخش انجام می‌شود. برای سرعت پیشروی ابزار مقدادر ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرون بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. تأثیر ولتاژ بر شیار نیز به طور هم‌زمان بررسی شده (۳۲، ۳۶، ۳۵ و ۴۰ ولت)، به منظور بررسی صحت و دقت و تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر آزمایش ۳ بار تکرار می‌شود.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

تأثیر ولتاژ بر عمق قابل پیش‌بینی می‌باشد. افزایش اختلاف پتانسیل بین دو الکتروولیت اثری جرقه حاصله را افزایش می‌دهد. در نتیجه حرارت تولید شده در اطراف ابزار بیشتر شده و مقدار بیشتری از نمونه را بازبرداری می‌کند. تمامی آزمایش‌ها در شرایط مختلف گویای این مسأله هستند. در مقابل، رابطه ولتاژ با کیفیت سطح شیار متأثر از پارامترهای دیگری چون سرعت پیشروی و دورانی ابزار می‌باشد. شکل ۲ مقاطعه دو شیار را نشان می‌دهد. چرخش ابزار باعث ذوزنقه‌ای شدن هرچه بیشتر شیار می‌شود. در اندازه‌گیری عمق، مقدار متوضیع در نتایج گزارش می‌شود.

شکل‌های ۳ تا ۵ تأثیر افزایش سرعت دورانی ابزار بر عمق بازبرداری را در سرعت‌های پیشروی مختلف نشان می‌دهد. نمودارها برای حالت ابزار بدون چرخش به دلایلی که در ادامه خواهد آمد بررسی جدی نشده‌اند.

روی سطح ابزار می‌کند. از به هم پیوستن این حباب‌ها فیلم گاز (بکی از مهم‌ترین مفاهیم در ماشین‌کاری به کمک تخلیه الکتروشیمیابی) تشکیل می‌شود. بدین ترتیب بین ابزار و الکتروولیت تخلیه‌های الکتریکی صورت می‌گیرد که با نزدیک کردن ابزار به قطعه کار (لام) بازبرداری صورت می‌گیرد. ولتاژ بحرانی تابعی از مقاومت بین الکتروولیت است و عموماً در حدود ۳۰ ولت می‌باشد [۵]. عمدۀ محققین مکانیزم بازبرداری را ترکیب "ذوب ناشی از حرارت موضعی حاصل از تخلیه‌های الکتریکی" و "خوردگی‌های شیمیابی در دمای بالا" می‌دانند [۶]. یک جرقه با انرژی کافی می‌تواند درجه حرارت ناحیه اطراف خود را تا بالای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بالا ببرد. این حرارت برای ذوب یا حتی تبخیر شیشه کافی می‌باشد. هرچند این حرارت، موضعی و بسیار موقتی بوده و در عمل انتقال حرارت از طریق الکتروولیت و ابزار، دمای عمومی ناحیه اطراف ابزار را در حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نگه می‌دارد. شیشه در این درجه حرارت نرم بوده و خوردگی شیمیابی با سهولت بیشتری روی آن انجام می‌گیرد. این فعل و اتفاعل در محلول هیدرولیکسید سدیم به شکل رابطه (۱) می‌باشد [۶]:

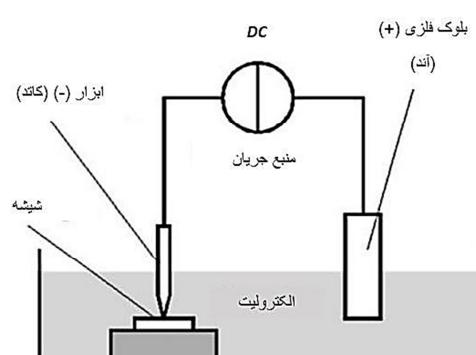


با توجه به این که تحقیق پیش‌رو بر رسیدن به سطح با ترک کمتر و صافی سطح بیشتر برای شیارها تمرکز دارد. در این رابطه بهبود کیفیت سطح در حضور دوران ابزار گزارش شده است. این مقاله گزارش‌های مربوط به دقت ابعادی و کیفیت سطح شیارهای زده شده با روش ماشین‌کاری به کمک تخلیه الکتروشیمیابی را ارائه می‌دهد. شیارها طی یک بار عبور ابزار روی سطح شیشه ماشین‌کاری شدند. به علاوه به منظور رسیدن به بهترین شیار، از نظر ابعادی و کیفی، بازبرداری تحت ولتاژهای مختلف صورت گرفت. غلط و نوع الکتروولیت و فاصله ابزار تا شیشه ثابت گرفته شد.

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- تجهیزات آزمایش

برای زدن شیار بر روی شیشه باید روی دو حرکت افقی - در راستای $-z$ و عمودی - در راستای $-x$ - کنترل داشت. این حرکات هریک به کمک موتور پله‌ای جداگانه‌ای تأمین شده‌اند و با جعبه‌دنده معینی سرعت‌های میکروونی موردنیاز حاصل می‌شود. علاوه بر این دو موتور، موتور جریان مستقیمی برای تأمین حرکت دورانی ابزار به کار گرفته شده است. سرعت دورانی ابزار در کامپیوتر مرکزی تأیین و دستور چرخش داده می‌شود. سرعت توسط تاکومتر

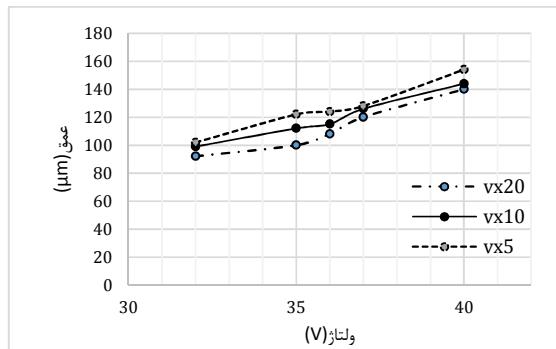


شکل ۱ نمای شماتیک سلول الکتروشیمیابی

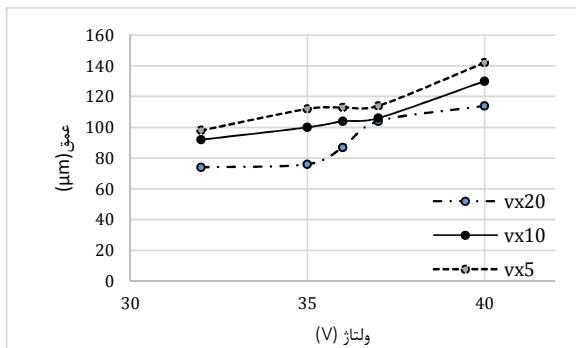
فیلم به بدن استوانه‌ای آن می‌شود. یکی از دلایل افزایش اندازه در عرض شیار، همین ضخیم شدن فیلم گاز دور تا دور ابزار می‌باشد. بدین ترتیب ابزار چرخان جرقه‌های کم انرژی‌تر را در کف خود تحریبه می‌کند.

عمق شیار در حالتی که ابزار نمی‌چرخد بیشترین مقدار را دارد. در عوض کیفیت سطح شیار در این حالت به قدری پایین است که شیارزینی در این شرایط را نامطلوب می‌کند. به علاوه طبق مشاهدات ما تکرار پذیری این حالت نیز سیار پایین است. منطقه متأثر از حرارت^۱ گستره دارد و نزدیک باربرداری پایین از دیگر معایب ماشین کاری بدون چرخش ابزار می‌باشد. بنابراین نتایج حاصل تحت این شرایط قابل بررسی نمی‌باشند.

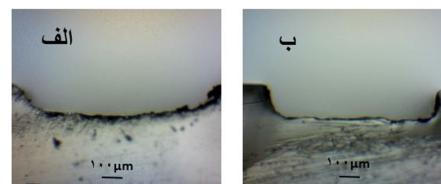
عمق‌ها در سرعت‌های پیشروی مختلف در شکل‌های ۶ و ۷ با هم مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که حرکت کند ابزار روی شیشه، شیارهای عمیقی را ایجاد کرده است. این امر را می‌توان به تعداد جرقه‌های ایجاد شده حین ماشین کاری ارتباط داد. در حقیقت این تعداد در واحد زمان برای هر سه سرعت یکسان می‌باشد اما در واحد طول شیار برای سرعت‌های بالاتر، کمتر است. بدین ترتیب مقدار انرژی آزاد شده ناشی از جرقه‌ها کمتر بوده و با رکمتری برداشته می‌شود. تشکیل فیلم گاز ناپایدار و با ضخامت کم نیز در این امر بی‌تأثیر نیست. به این صورت که با افزایش سرعت پیشروی نیروی برشی ناشی از سرعت برشی سیال نسبت به ابزار مانع گسترش فیلم گاز می‌شود. مشاهده می‌شود که نتایج آزمایش‌های انجام شده در سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه مقادیر بیشتری را نسبت به سرعت ۸۰۰ نشان می‌دهد که این با نتایج قبلی در همین گزارش مطابقت دارد.



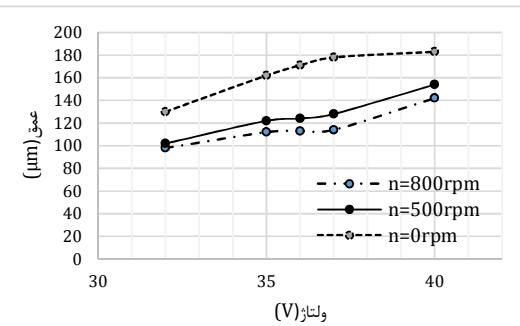
شکل ۶ منحنی تغییرات عمق بر حسب اختلاف پتانسیل، سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه



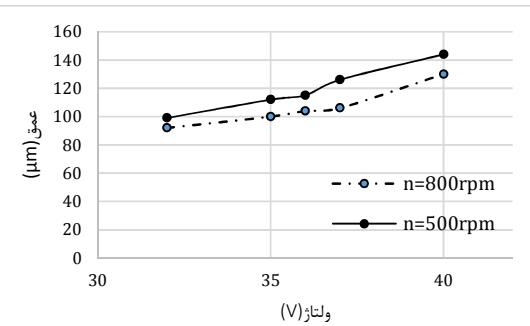
شکل ۷ منحنی تغییرات عمق بر حسب اختلاف پتانسیل، سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه



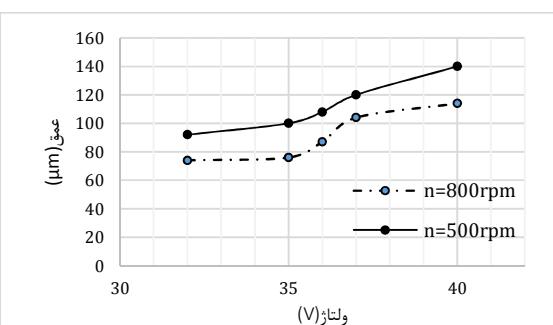
شکل ۲ مقاطع شیار زده شده در واتاژ ۳۷ و سرعت ۱۰ میکرون بر ثانیه (الف: دور بر دقیقه، ب: بدون چرخش ابزار)



شکل ۳ منحنی تغییرات عمق بر حسب اختلاف پتانسیل، سرعت پیشروی برابر ۵ میکرون بر ثانیه



شکل ۴ منحنی تغییرات عمق بر حسب اختلاف پتانسیل، سرعت پیشروی برابر ۱۰ میکرون بر ثانیه



شکل ۵ منحنی تغییرات عمق بر حسب اختلاف پتانسیل، سرعت پیشروی برابر ۲۰ میکرون بر ثانیه

افزایش سرعت دورانی ابزار کاهش عمق شیار را در پی دارد که امری نامطلوب است. می‌دانیم که با تجمع حباب‌های گازی و تشکیل فیلم گاز روی سطح ابزار، شرایط برای تخلیه الکتروشیمیایی محیا می‌شود. مشاهدات قبلی نشان داده‌اند که هر چه ضخامت فیلم گاز باشد انرژی جرقه کمتر است. چرخش ابزار باعث کاهش ضخامت و پایداری فیلم گاز در کف ابزار و هدایت

1. HAZ (Heat Affected Zone)

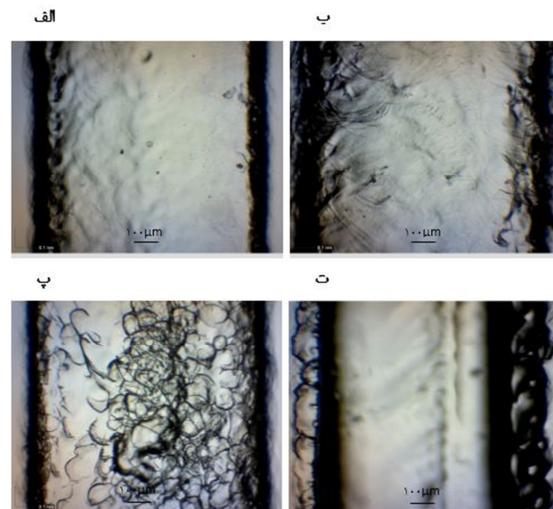
۴- جمع‌بندی

در این مقاله نشان داده شده است که افزایش سرعت پیشروی باعث کاهش عمق شیار می‌شود. از طرفی تأثیر اختلاف پتانسیل بین دو الکترود بر کیفیت شیار در سرعت‌های بالا، کم است. در حالی که در سرعت‌های پایین به منظور دستیابی به کیفیت‌های مطلوب، سطح ولتاژ باید پایین نگه داشته شود. تأثیر سرعت دورانی ابزار روی عمق شیار شبیه سرعت پیشروی است. چرخش ابزار کیفیت شیار را به طور محسوسی افزایش می‌دهد. به علاوه تکرار پذیری شیارها به شدت زیاد می‌شود. هرچند میزان سرعت دورانی تأثیر چندانی بر کیفیت شیار ندارد و در واقع سرعت‌های پایین دورانی کیفیت بهتر و عمق بیشتری را به دست می‌دهد. به علاوه هرچه سرعت دورانی بیشتر باشد، شکل شیار از حالت مستطیلی بیشتر به حالت ذوزنقه‌ای میل پیدا می‌کند. به طور کلی داشتن عمق بیشتر، از دست رفتن کیفیت سطح شیار را در پی دارد. با تنظیم سرعت چرخش ابزار در سرعت پیشروی مناسب، می‌توان این دو پارامتر را هم‌زمان با داشتن نزدیکی باربرداری مناسب به سطح مطلوب رساند.

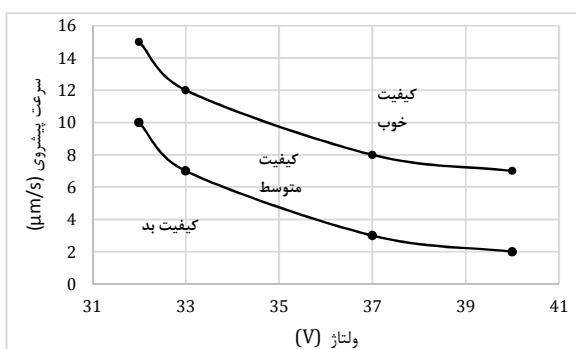
۵- مراجع

- [1] J. D. Abou Ziki, T. Fatanat Didar, R. Wüthrich, Micro-texturing channel surfaces on glass with spark assisted chemical engraving, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 57, pp. 66-72, 2012/06, 2012 .
- [2] L. Alting, F. Kimura, H.N. Hansen, G. Bissacco, Micro engineering, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 2, pp. 635-657, 2003 .
- [3] B. Wang, Y. Liang, Y. Sun, Y. Tan, Micro Milling of the Inertial Components with 3D structure, *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, Vol. 19, pp. 1473-1475, 2006 .
- [4] R. Wüthrich, V. Fascio, Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon—an overview, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 9, pp. 1095-1108, 2005 .
- [5] R. Wüthrich, Machining with Electrochemical Discharges—An Overview, *Micromachining Using Electrochemical Discharge Phenomenon*, Elsevier BV, pp. 1-9, 2009 .
- [6] K. Allesu, A. Ghosh, M. Muju, A preliminary qualitative approach of a proposed mechanism of material removal in electrical machining of glass, *European journal of mechanical engineering*, Vol. 36, No. 3, pp. 201-207, 1991 .
- [7] T. F. Didar, A. Dolatabadi, R. Wüthrich, Local hardness and density variation in glass substrates machined with Spark Assisted Chemical Engraving (SACE), *Materials Letters*, Vol. 63, No. 1, pp. 51-53, 2009/01, 2009 .

با مشاهده عکس‌های موجود از سطح شیارها نتایج جالب توجهی حاصل شده است. در سرعت پیشروی $s = 20 \mu\text{m}/\text{s}$ ، کیفیت سطح شیارها بدون توجه به ولتاژ اعمالی یا میزان سرعت دورانی ابزار در سطح عالی می‌باشند. در مقابل، در سرعت پیشروی $s = 5 \mu\text{m}/\text{s}$ ، سطح شیار تنها در ولتاژهای پایین کیفیت مطلوبی داشت. چهار شیار نشان داده شده در شکل ۸ تنها در سرعت پیشروی تقاضوت دارند. در سرعت $5 \text{ میکرون بر ثانیه}$ (شکل ۸-ب) نسبت به سرعت $10 \text{ میکرون بر ثانیه}$ (شکل ۸-ب) و $20 \text{ میکرون بر ثانیه}$ (شکل ۸-الف) میکرون بر ثانیه ترک‌های بیشتری در سطح شیشه پدید می‌آید. انرژی جرقه‌ای که حین ماشین کاری به شیشه منتقل می‌شود، باعث افزایش دمای سطح شیار می‌شود. مسلماً در سرعت‌های پایین پیشروی این افزایش دما و در نتیجه انساط بیشتر است. جریان الکتروولیت روی شیار باعث سرد شدن و انتقاض شیشه می‌شود. ترک‌های روی سطح شیار ناشی از این انساط و انقباض است. عدم چرخش ابزار در حین فرایند (شکل ۸-ت) باعث گستردگی شدن منطقه متأثر از حرارت و ناهمواری‌های شدید در سطح شیار می‌شود. با بررسی شیارها مشاهده می‌شود که در سرعت پیشروی‌های پایین (برای مثال $10 \text{ میکرون بر ثانیه}$)، کیفیت سطح مناسب در ولتاژهای بالای 36 ولت به دست می‌آید. با افزایش سرعت پیشروی (مثلاً $20 \text{ میکرون بر ثانیه}$ ، شیارهای زده شده در ولتاژهای بین $32 \text{ تا } 40 \text{ همگی}$ کیفیت مناسبی دارند. شکل ۹ ارتباط بین ولتاژ، سرعت پیشروی و کیفیت سطح شیار را نشان می‌دهد.



شکل ۸ شیارهای زده شده در ولتاژ 32 V و سرعت دورانی 800 rpm با سرعت‌های پیشروی مختلف (الف: $20 \text{ }\mu\text{m}/\text{s}$ ، ب: $5 \text{ }\mu\text{m}/\text{s}$ ، پ: $10 \text{ }\mu\text{m}/\text{s}$ ، ت: بدون چرخش، سرعت پیشروی $10 \text{ }\mu\text{m}/\text{s}$ بر ثانیه)



شکل ۹ نمودار کیفیت سطح شیار با توجه به سرعت پیشروی و اختلاف پتانسیل