



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

پویا محمدی^۱، محمدرضا رازفر^{۲*}، منصور حاجیان^۳، نسیم صباخی^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، صندوق پستی ۴۴۱۳-۵۸۷۵، Razfar@aut.ac.ir

چکیده

ماشین کاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی روش غیرسنتی نوظهوری برای ماشین کاری قطعات نارسانا می باشد. در این روش خوردگی شیمیایی به کمک ذوب ناشی از دمای بالای موضعی باعث باربرداری می شود. فرزکاری با این روش بحث جدیدی است که در صنایع مختلف از جمله الکترونیک، بیومکانیک، بیوالکتریک و پزشکی کاربرد فراوان دارد. در این پژوهش شیارهایی به طول تقریبی ۱۰ میلی متر با استفاده از ابزار قطر ۱ میلی متر بر روی شیشه زده شد. مشاهده شد که با تغییر سرعت حرکت ابزار در امتداد شیار (سرعت پیشروی)، کیفیت و عمق شیار تغییر می کند. طی آزمایشات متعدد این گونه استنتاج شد که به طور کلی با افزایش سرعت پیشروی، افزایش سطح ولتاژ به منظور حفظ کیفیت شیار امری الزامی می باشد. علاوه بر پیشروی، تأثیر سرعت دورانی ابزار بر روی مشخصات شیار نیز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و ملاحظه شد که چرخش ابزار به طور کلی باعث بهبود کیفیت و دقت عمق شیار می شود.

کلید واژگان: 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 specially 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 جریانی الکتریکی روی سطح ماشین کاری شده تأثیر می گذارد که این بر عملکرد قطعه حاصله اثر می گذارد [۳]. شیارهای زده شده به روش فوتولیتوگرافی زبری سطح بالایی دارند. ماشین کاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی^۲ (در برخی منابع با عنوان باربرداری شیمیایی به کمک جرقه^۳) در این بین تکنولوژی جدید و قابل اعتمادی برای ماشین کاری مواد نارسانا، عمدتاً شیشه، می باشد [۴]. در این روش ماشین کاری داخل یک سلول الکتروشیمیایی صورت می گیرد در حالی که ابزار به عنوان کاتد و بلوک فلزی به عنوان آند به کار گرفته می شوند (شکل ۱). با اعمال ولتاژی بالاتر از مقداری معین، که به ولتاژ بحرانی معروف است، حباب هایی شروع به رشد بر

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و توسعه آن در صنایعی مثل الکترونیک، اپتیک و زیست 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 روش های متنوع متناسب با جنس های مختلف بوده است. این روش ها علاوه بر داشتن رنج طولی گسترده (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 نمی دهد [۲]. میکرو ماشین کاری به کمک تخلیه الکتریکی^۱ بر قطعات نارسانا الکتریکی بی تأثیر

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:

متصل به شفت بیرون آمده از موتور تصدیق می‌شود. قطعه‌کار 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 مقطع مستطیل، نوک مته با سمباده 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 سنگ‌زنی 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 هیدروکسید سدیم با درصد جرمی ۲۵ به عنوان الکترولیت استفاده می‌شود. طبق گزارش‌های دیگر محققین در این زمینه، این محلول در بین درصدهای مختلف هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم کیفیت سطح بهتری را حاصل می‌شود.

انجام الکترولیز از حجم الکترولیت می‌کاهد و این باعث افت جریان بین کاتد و آند می‌شود. برای جلوگیری از این امر با افزودن الکترولیت حین آزمایش سطح الکترولیت به مقدار ثابت ۲ میلی‌متر بالاتر از سطح لام نگه داشته می‌شود. این مقدار با خط‌کش 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 $5 \times 30 \times 50$ میلی‌متر مکعب از جنس فولاد زنگ نزن به عنوان آند انتخاب می‌شود. اختلاف پتانسیل مورد نظر 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 بنابراین لام با آب و الکل شسته و خشک می‌شود [۷]. کیفیت سطح شیار (به صورت کیفی) و عمق شیار (با مشاهده مقطع شیار) زیر میکروسکوپ سنجیده می‌شود.

۲-۲- طراحی آزمایش

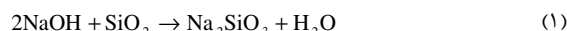
به منظور بررسی سرعت دورانی ابزار بر شیار، ماشین کاری در سرعت‌های ۵۰۰ و ۸۰۰ دور بر دقیقه و همچنین بدون چرخش انجام می‌شود. برای سرعت پیشروی ابزار مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرون بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. تأثیر ولتاژ بر شیار نیز به طور همزمان بررسی شده (۳۲، ۳۵، ۳۶، ۳۷ و ۴۰ ولت)، به منظور بررسی صحت و دقت و تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر آزمایش ۳ بار تکرار می‌شود.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

تأثیر ولتاژ بر عمق قابل پیش‌بینی می‌باشد. افزایش اختلاف پتانسیل بین دو الکترود انرژی جرعه حاصله را افزایش می‌دهد. در نتیجه حرارت تولید شده در اطراف ابزار بیشتر شده و مقدار بیشتری از نمونه را باربرداری 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 مقطع دو شیار را نشان می‌دهد. چرخش ابزار باعث دوزنقه‌ای شدن هرچه بیشتر شیار می‌شود. در اندازه‌گیری عمق، مقدار متوسطی در نتایج گزارش می‌شود.

شکل‌های ۳ تا ۵ تأثیر افزایش سرعت دورانی ابزار بر عمق باربرداری 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 (یکی از مهم‌ترین مفاهیم در ماشین‌کاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی) تشکیل می‌شود. بدین ترتیب بین ابزار و الکترولیت تخلیه‌های الکتریکی صورت می‌گیرد که با نزدیک کردن ابزار به قطعه‌کار (لام) باربرداری صورت می‌گیرد. ولتاژ بحرانی تابعی از مقاومت بین الکترودی است و عموماً در حدود ۳۰ ولت می‌باشد [۵]. عمده محققین مکانیزم باربرداری را ترکیب "ذوب ناشی از حرارت موضعی حاصل از تخلیه‌های الکتریکی" و "خوردگی‌های شیمیایی در دمای بالا" می‌دانند [۶]. یک جرعه 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 الکترولیت و ابزار، دمای عمومی ناحیه اطراف ابزار را در حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نگه می‌دارد. شیشه در این درجه حرارت نرم بوده و خوردگی شیمیایی با سهولت بیشتری روی آن انجام می‌گیرد. این فعل و انفعال در محلول هیدروکسید سدیم به شکل رابطه (۱) می‌باشد [۴]:

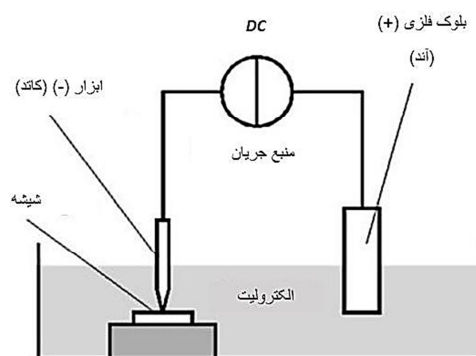


با توجه به این‌که تحقیق پیش‌رو بر رسیدن به سطح با ترک کمتر و صافی سطح بیشتر برای شیارها تمرکز دارد. در این رابطه بهبود کیفیت سطح در حضور دوران ابزار گزارش شده است. این مقاله گزارش‌های مربوط به دقت ابعادی و کیفیت سطح شیارهای زده شده با روش ماشین‌کاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی را ارائه می‌دهد. شیارها طی یک بار عبور ابزار روی سطح شیشه ماشین‌کاری شدند. به علاوه به منظور رسیدن به بهترین شیار، از نظر ابعادی و کیفی، باربرداری تحت ولتاژهای مختلف صورت گرفت. غلظت و نوع الکترولیت 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 x- و عمودی- در راستای z- کنترل داشت. این حرکات هریک به کمک موتور پله‌ای جداگانه‌ای تأمین شده‌اند و با جعبه‌دنده معینی سرعت‌های میکرونی مورد نیاز 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 تأیید و دستور چرخش داده می‌شود. سرعت توسط تاکومتر

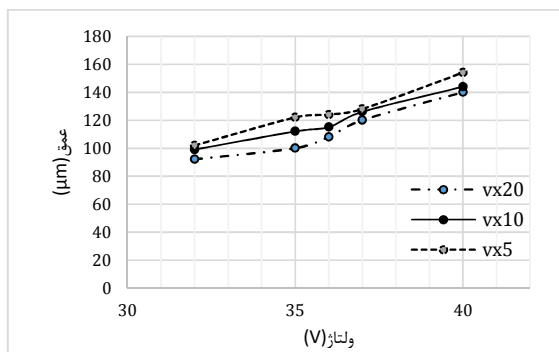


شکل ۱ نمای شماتیک سلول الکترولیت

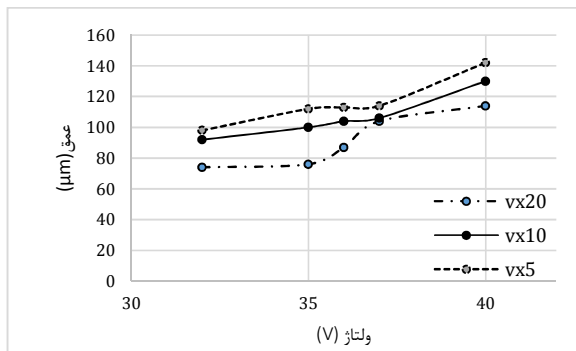
فیلم به بدنه استوانه‌ای آن می‌شود. یکی از دلایل افزایش اندک در عرض شیار، همین ضخیم شدن فیلم گاز دور تا دور ابزار می‌باشد. بدین ترتیب ابزار چرخان جرقه‌های کم انرژی‌تری را در کف خود تجربه می‌کند.

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

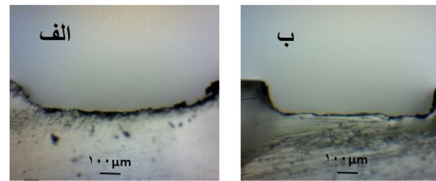
عمق‌ها در سرعت‌های پیشروی مختلف در شکل‌های ۶ و ۷ با هم مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که حرکت کند ابزار روی شیشه، شیارهای عمیقی را ایجاد کرده است. این امر را می‌توان به تعداد جرقه‌های ایجاد شده حین ماشین کاری ارتباط داد. در حقیقت این تعداد در واحد زمان برای هر سه سرعت یکسان می‌باشد اما در واحد طول شیار برای سرعت‌های بالاتر، کمتر است. بدین ترتیب مقدار انرژی آزاد شده ناشی از جرقه‌ها کمتر بوده و بار کمتری برداشته می‌شود. تشکیل فیلم گاز ناپایدار و با ضخامت کم نیز در این امر بی تأثیر 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.



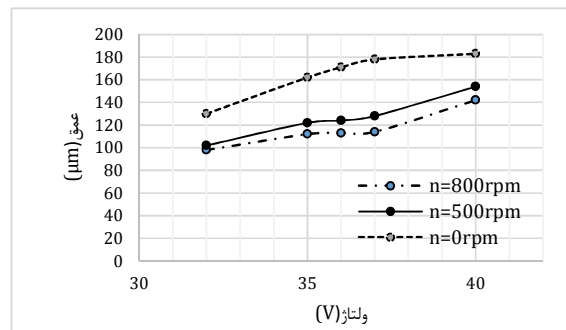
شکل ۶ منحنی تغییرات عمق برحسب اختلاف پتانسیل، سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه



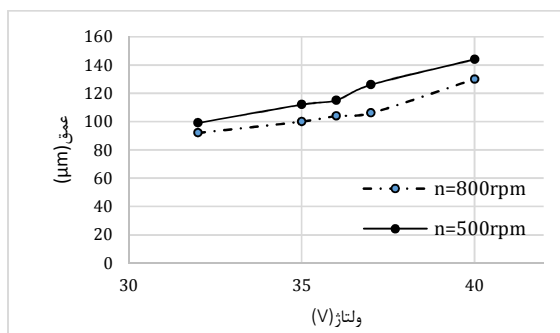
شکل ۷ منحنی تغییرات عمق برحسب اختلاف پتانسیل، سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه



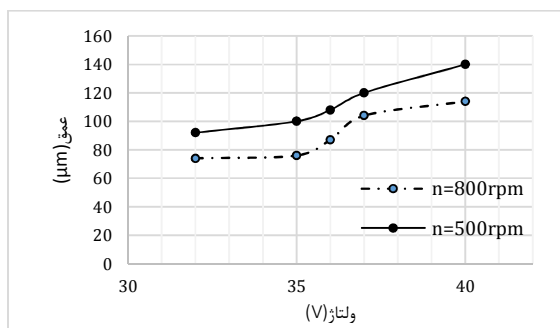
شکل ۸ مقاطع شیار زده شده در ولتاژ ۳۷ و سرعت ۱۰ میکرون بر ثانیه (الف: ۸۰۰ دور بر دقیقه، ب: بدون چرخش ابزار)



شکل ۹ منحنی تغییرات عمق برحسب اختلاف پتانسیل، سرعت پیشروی برابر ۵ میکرون بر ثانیه



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



شکل ۱۱ منحنی تغییرات عمق برحسب 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 کمتر باشد انرژی جرقه کمتر است. چرخش ابزار باعث کاهش ضخامت و پایداری فیلم گاز در کف ابزار و هدایت

1. HAZ (Heat Affected Zone)

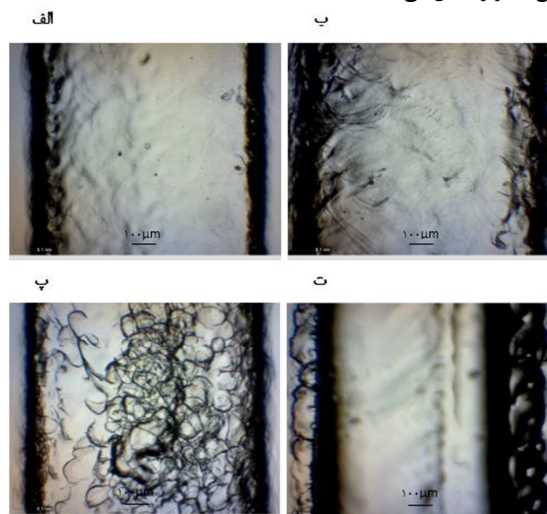
۴- جمع بندی

در این مقاله نشان داده شده است که افزایش سرعت پیشروی باعث کاهش عمق شیار می شود. از طرفی تأثیر اختلاف پتانسیل بین دو الکترود بر کیفیت شیار در سرعت های بالا، کم است. در حالی که در سرعت های پایین به منظور دستیابی به کیفیت های 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 می دهد. به علاوه تکرارپذیری شیارها به شدت زیاد می شود. هرچند میزان سرعت دورانی تأثیر چندانی بر کیفیت شیار ندارد و در واقع سرعت های پایین دورانی کیفیت بهتر و عمق بیشتری را به دست می دهد. به علاوه هرچه سرعت دورانی بیشتر باشد، شکل شیار از حالت مستطیلی بیشتر به حالت دوزنقه ای میل پیدا می کند. 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، می توان این دو پارامتر را همزمان با داشتن نرخ باربرداری مناسب به سطح مطلوب رساند.

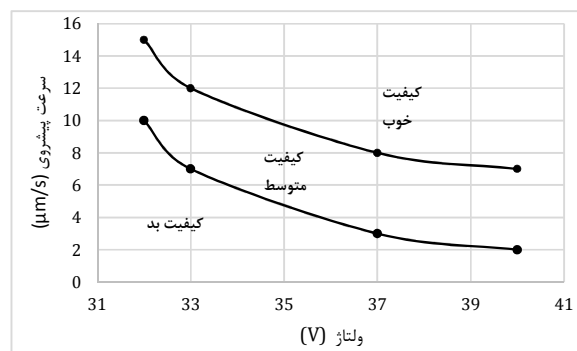
۵- مراجع

- [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 عکس های موجود از سطح شیارها نتایج جالب توجهی حاصل شده است. در سرعت پیشروی $20 \mu\text{m/s}$ ، کیفیت سطح شیارها بدون توجه به ولتاژ اعمالی یا میزان سرعت دورانی ابزار در سطح عالی می باشند. در مقابل، در سرعت پیشروی $5 \mu\text{m/s}$ ، سطح شیار تنها در ولتاژهای پایین کیفیت مطلوبی داشت. چهار شیار نشان داده شده در شکل ۸ تنها در سرعت پیشروی تفاوت دارند. در سرعت ۵ میکرون بر ثانیه (شکل ۸-پ) نسبت به سرعت ۱۰ (شکل ۸-ب) و ۲۰ (شکل ۸-الف) میکرون بر ثانیه ترک های بیشتری در سطح شیشه پدید می آید. انرژی جرقه ای که حین ماشین کاری به شیشه منتقل می شود، باعث افزایش دمای سطح شیار می شود. مسلماً در سرعت های پایین پیشروی این افزایش دما و در نتیجه انبساط بیشتر است. جریان الکترولیت روی شیار باعث سرد شدن و انقباض شیشه می شود. ترک های روی سطح شیار ناشی از این انبساط و انقباض است. عدم چرخش ابزار در حین فرایند (شکل ۸-ت) باعث گسترده تر شدن منطقه متأثر از حرارت و ناهمواری های شدید در سطح شیار می شود. با بررسی شیارها مشاهده می شود که در سرعت پیشروی های پایین (برای مثال ۱۰ میکرون بر ثانیه)، کیفیت سطح مناسب در ولتاژهای بالای ۳۶ ولت به دست می آید. با افزایش سرعت پیشروی (مثلاً ۲۰ میکرون بر ثانیه)، شیارهای زده شده در ولتاژهای بین ۳۲ تا ۴۰ همگی کیفیت مناسبی دارند. شکل ۹ ارتباط بین ولتاژ، سرعت پیشروی و کیفیت سطح شیار را نشان می دهد.



شکل ۸ شیارهای زده شده در ولتاژ ۳۲ و سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه با سرعت های پیشروی مختلف (الف: ۲۰، ب: ۱۰، پ: ۵ میکرون بر ثانیه، ت: بدون چرخش، سرعت پیشروی ۱۰ میکرون بر ثانیه)



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