



بررسی تجربی پارامترهای ولتاژ پالس در ایجاد شیار بر روی شیشه با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی

منصور حاجیان^۱، اردشیر حمصیان اتفاق^۲، محمدرضا رازفر^{۳*}، ساسان جهانگیرزاده^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

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

* Razfar@aut.ac.ir، ۰۲۱-۸۵۸۷۵۰۴۴۱۳، صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

چکیده

ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی از جمله فرآیندهای نوین تولید می باشد که از ترکیب دو فرآیند الکتروشیمیایی و فرایند تخلیه الکتریکی تشکیل شده است. مکانیزم های براده برداری در این روش شامل براده برداری به کمک واکنش شیمیایی و همچنین براده برداری به کمک حرارت ناشی از جرقه می باشد. در این فرآیند قطعه کار در محلول الکترولیت غوطه ور می شود و ابزار به قطعه کار نزدیک می شود. با اعمال ولتاژ در ابزار و الکتروود فرعی فیلم گازی در اطراف ابزار تشکیل می شود که با افزایش ولتاژ، جرقه در اطراف ابزار زده می شود. حرارت ناشی از این جرقه منجر به بار برداری از قطعه کار می شود. لذا یکی از پارامترهای مهم در این فرایند انرژی جرقه می باشد. دستیابی به حد بهینه از انرژی جرقه همواره مورد نظر محققان بوده است. در این مقاله با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی و به کمک منبع تغذیه پالسی بر روی شیشه شیارهای میناتور ایجاد می شود و کنترل انرژی جرقه به کمک کنترل وضعیت پالس ها انجام می گیرد. پارامترهای مورد بررسی در این مقاله زمان روشنی و خاموشی و همچنین فرکانس پالس می باشد. اثر این پارامترها بر روی عمق شیار و کیفیت سطح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که با افزایش زمان روشنی پالس عمق شیار افزایش می یابد و کیفیت سطح اندکی بهبود می یابد. زمان روشنی پالس و نسبت زمان روشنی به خاموشی پالس در شکل گیری ریز جرقه ها یا حذف آن ها اثر به سزایی داشته و نرخ براده برداری را تعیین می نماید.

کلید واژگان: ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی، شیارهای میناتور، ولتاژ پالسی، عمق شیار

Experimental investigation of continuous voltage and pulsed voltage into electrochemical discharge machining

Mansour Hajian, Ardeshir Hemasian Etefagh, Mohammadreza Razfar*, Sasan Jahangirzadeh

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, razfar@aut.ac.ir

ABSTRACT

Electrochemical discharge machining (ECDM) is a new method that has been developed for machining of materials such as glass or ceramic. This process also has a high capacity for machining brittle and non-conductive materials. Electrochemical discharge machining is the process of combining electrical discharge machining (EDM) and electrochemical machining (ECM). ECDM has the ability to engrave non-conductive materials such as glass. In this process, the gap between the tool and the workpiece is filled by electrolyte solution. Gas film is generated by applying a voltage to the tool and axillary electrode. Increasing the voltage leads to spark occurring in the gas film. Moreover, the thermal removal mechanism is the dominant material removal mechanism. The most effective parameters in ECDM are the voltage and the shape of the voltage. In this article, the effects of pulsed and continuous voltage on the machining parameters are discussed. Experimental results showed that the depth of machining was increased by increasing the voltage. Moreover, pulsed voltage was capable of controlling the process and the depth of machining.

Keywords: Continuous Voltage, Depth of Machining, Electrochemical Discharge Machining, Pulsed Voltage.

در ابعاد کوچک و کاربردهای ظریف خیلی مناسب نمی باشند [۲]. روش ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی^۱، روشی است که با بهره گیری از خواص خوردگی الکترولیت و حرارتی جرقه های ایجاد شده، از مواد نارسایی نظیر شیشه باربرداری انجام می دهد، در ضمن این که مشکلات دیگر فرآیندهای ماشین کاری شیشه را به حداقل رسانده است [۳]. یک سلول ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی از واحدهای زیر تشکیل شده است: ۱- منبع تغذیه که می تواند منبع DC پیوسته یا پالسی باشد ۲- الکترولیت، عمدتاً از الکترولیت-

۱- مقدمه

مواد نارسا نظیر شیشه و سرامیک، به دلیل خواص منحصر به فردی چون مقاومت به خوردگی، نارسایی در برابر جریان الکتریسته و حرارت و همچنین شفافیت مناسب برای شیشه، امروزه مورد توجه قرار گرفته اند و در زمینه هایی چون مهندسی پزشکی، و ساخت وسایل بسیار کوچک نظیر میکرو پمپ ها و میکرو اکتورها به کار گرفته می شوند [۱]. در ماشین کاری شیشه از روش هایی چون ماشین کاری با لیزر و ماشین کاری آلتراسونیک استفاده می شود که به دلیل کیفیت سطح پایین و ترک های ریز در ناحیه ماشین کاری، برای ساخت

1. Electrochemical Discharge Machining (ECDM)

Please cite this article using:

M. Hajian, A. Hemasian Etefagh, M. Razfar, S. Jahangirzadeh, Experimental investigation of continuous voltage and pulsed voltage into electrochemical discharge machining, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 393-396, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سبب شکست ابزار گردد. از طرفی به کارگیری ولتاژ پالسی برای کنترل بهتر فیلم گاز و حرارت واصله به قطعه کار مفید خواهد بود [۵].

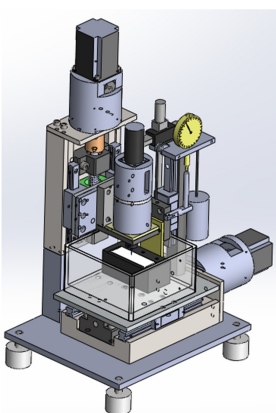
در این مقاله، به بررسی تاثیر تغییر زمان روشنی پالس برای دو زمان خاموشی پالس متفاوت، ۱ و ۰/۵ میلی ثانیه ($T_{off}=0.5$ and 1 ms) بر روی وضعیت شیار ایجاد شده با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی پرداخته شده است و عمق، کیفیت شیار و وضعیت جرقه ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در واقع عمده تفاوت تحقیق حاضر با سایر تحقیقات ارائه شده در این زمینه عبارت است از: الف) به کارگیری محلول NaOH با غلظت ۲۵wt% برای انجام ماشین کاری شیشه ب) تغییر زمان روشنی پالس. در بخش دوم مقاله، تجهیزات و برنامه آزمایش های تجربی ارائه گردیده است. در بخش سوم نتایج آزمایش ها آورده شده است و بر روی آن ها بحث شده است و در بخش پایانی مقاله، نتایج جمع بندی شده است.

۲- آزمایشات تجربی

۲-۱- تجهیزات و مواد آزمایش

به دلیل سرعت پایین فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی، لازم است تا ابزار (یا قطعه کار) بر روی سطح قطعه کار (در نزدیکی سطح پیشانی ابزار) با سرعت کم حرکت داده شود. ابزار مته از جنس فولاد تند بر و به قطر ۰/۵mm پس از آن که با عملیات سنباده زنی، انتهای آن تخت شد، بروی کولت ابزار-گیر فرز میکرو ماشین کاری نصب گردید. محورهای حرکتی این دستگاه قادر است سرعت خطی از محدوده ۱ الی ۱۲۰ میکرومتر بر ثانیه ($\mu\text{m/s}$) را تامین نماید و ابزار ماشین کاری را با لنگی دورانی کمتر از $5\mu\text{m}$ در محدوده سرعت دورانی ۱۵۰۰-۰ rpm در چرخش درآورد. در شکل ۱، شماتیک تجهیز فرز کاری ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی نمایش داده شده است.

قطعه کار از جنس شیشه لام و به ابعاد $1 \times 20 \times 40$ میلی متر مکعب می باشد که توسط نگه دارنده از جنس پلکسی گلاس در نزدیکی ابزار و در فاصله $10\mu\text{m}$ از آن قرار می گیرد. با توجه به کارهای محققان قبلی، در این تحقیق از محلول سود سوزآور یا غلظت وزنی ۲۵wt% استفاده می شود. این محلول در حدود 40°C در ظرف محتوی نگه دارنده قطعه کار ریخته می شود به نحوی که در حدود ۲mm از سطح فوقانی قطعه کار درون محلول قرار گیرد. از طریق یک مدار الکترونیکی پالس ساز، ولتاژ پیوسته مدار با افتی قابل اغماض



شکل ۱ تجهیز فرز کاری تخلیه الکتروشیمیایی:

سمت چپ: نمای شماتیک، سمت راست: ابزار در حال ماشین کاری

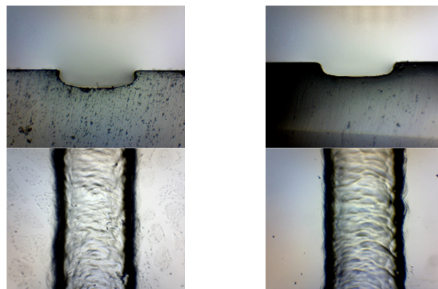


های قلبیایی نظیر هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم با درصدهای مختلف حدود درصدهای مختلف حدود ۳۰-۲۰ در صد وزنی استفاده می- شود ۳- الکترو د کاتد یا قطب منفی، که به نام ابزار شناخته می شود و عموما قطری کمتر از یک میلی متر داشته و در حدود یک تا دو میلی متر در الکترو لیت فرو می رود ۴- الکترو د آند یا قطب مثبت که در محلول الکترو لیت شناور بوده و سطح مقطعی به اندازه حدود چند صد برابر سطح مقطع فروبری ابزار در الکترو لیت دارد و عموما از جنس فولاد زنگ نزن یا گرافیت می باشد. با اتصال جریان الکتریسته بین ابزار و الکترو د آند، فرایند الکترو لیز آغاز می شود و حباب های گاز در اطراف الکترو دها ایجاد می شوند. با افزایش سطح ولتاژ و رسیدن آن به ولتاژ بحرانی، سطح ابزار از حباب ها پوشیده می شود و زمینه برای ایجاد جرقه بین ابزار و الکترو لیت فراهم می آید. در صورتی که قطعه- کاری نظیر شیشه در فاصله ای نزدیک، کمتر از $25\mu\text{m}$ از ابزار قرار گیرد، حرارت ناشی از ایجاد تخلیه الکتریکی به سطح آن برخورد کرده و زمینه را برای انجام واکنش ناحیه ای از قطعه کار با الکترو لیت فراهم می آورد و به این ترتیب با بر برداری از قطعه کار انجام می شود [۴]. یکی از راه های مرسوم در روش فرز کاری با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی، حرکت دهی ابزار بر روی سطح قطعه کار و در فاصله ای معین می باشد که سبب ایجاد شیارهای مینیاتوری می شود [۵].

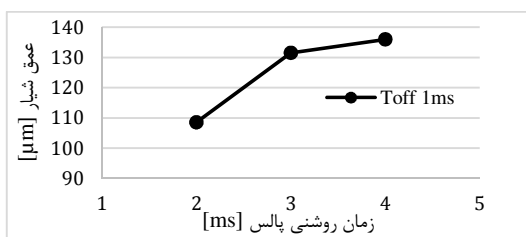
تخلیه الکتروشیمیایی از مهم ترین ارکان این فرآیند محسوب می شود [۶]. در واقع کنترل مقدار انرژی رسیده به قطعه کار که از تخلیه الکتروشیمیایی حاصل می شود می تواند فرآیند ماشین کاری را کنترل نماید و به این ترتیب می توان میزان نرخ براده برداری و کیفیت سطح را تحت کنترل در آورد. در صورتی که سهم حرارت دریافتی قطعه کار زیاد باشد، ممکن است ترک های سطحی در ناحیه ماشین کاری پدید آید. از طرفی تکرار پذیری در عملیات ماشین کاری سهم مهمی دارد که در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی تحت کنترل در آوردن حرارت رسیده به قطعه در تکرار پذیری عملیات اهمیت زیاد دارد. در واقع نوع منبع تغذیه، پیوسته و پالسی و سطح ولتاژ به عنوان عوامل ورودی برای کنترل حرارت در فرآیند ECDM در نظر گرفته می شوند و در دسته پارامترهای فعال کنترل حرارت جای داده می شوند. از طرفی منابع انتقال حرارت در تخلیه الکتروشیمیایی شامل الکترو لیت و ابزار می باشند که انتخاب مشخصات هدایت حرارتی مورد نظر می توان تا حدی سهم حرارت دریافتی قطعه کار را کنترل نمود [۵].

در مورد فرز کاری با فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی، بر روی انتخاب پارامترهای فرآیندی و تاثیر آن ها بر روی کیفیت شیار، عمق و ناحیه متاثر حرارتی به صورت محدودی تحقیقات انجام گرفته است [۸، ۷]. عمده تحقیقات صورت گرفته بر به کارگیری ولتاژ پیوسته برنامه ریزی شده است و کمتر به ولتاژ پالسی پرداخته شده است. اولین بررسی ها برای به کارگیری ولتاژ پالسی در روش فرز کاری با فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی توسط زنگ^۱ و همکارانش انجام شده است [۹]. فرآیند ماشین کاری آن ها در حضور محلول هیدروکسید پتاسیم با غلظت وزنی ۲۰٪ بوده است که با ثابت نگه داشتن زمان روشنی پالس (Ton) در حدود ۲ms و تغییر دادن زمان خاموشی پالس (Toff)، کیفیت و عرض شیارهای حاصله را بررسی نمودند. مشاهدات حاکی از آن است که با افزایش زمان خاموشی پالس، عمق شیار و عرض شیار کاهش پیدا می نماید. افزایش زمان خاموشی پالس علاوه بر طولانی نمودن فرآیند ماشین کاری، می تواند در اثر تماس مکانیکی ابزار با قطعه کار

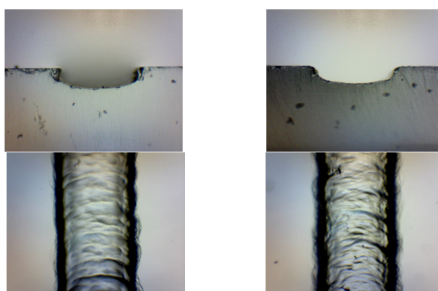
1. Zheng



شکل ۳ عکس از سطح و مقطع عرضی شیار ماشین کاری شده با ولتاژ پالسی و زمان خاموشی (الف) $T_{off} = 1 \text{ ms}$ (ب) $T_{on} = 2 \text{ ms}$ ، $T_{off} = 4 \text{ ms}$

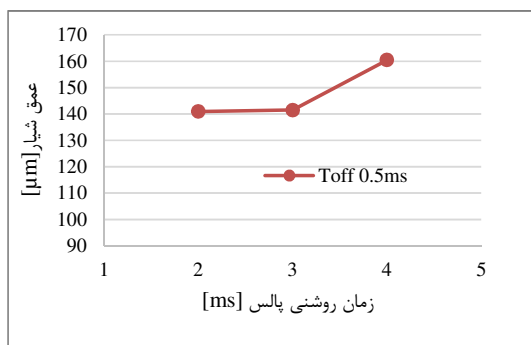


شکل ۴ نمودار تغییرات عمق متوسط شیار برحسب زمان روشنایی پالس



شکل ۵ عکس از سطح و مقطع عرضی شیار ماشین کاری شده با ولتاژ پالسی و زمان خاموشی (الف) $T_{off} = 0.5 \text{ ms}$ (ب) $T_{on} = 2 \text{ ms}$ ، $T_{off} = 4 \text{ ms}$

در این حالت نمودار تغییرات عمق برحسب زمان روشنایی پالس در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶ نمودار تغییرات عمق متوسط شیار برحسب زمان روشنایی پالس

به مجموعه هدایت می شود به نحوی که ابزار به قطب منفی متصل می شود. همچنین آند از جنس فولاد زنگ نزن و به ابعاد $5 \times 4 \times 50$ میلی متر مکعب بوده که درون محلول الکترولیت قرار می گیرد و به قطب مثبت متصل می شود. به کمک اوسیلوسکوپ و مدار پالس ساز، زمان روشنی و خاموشی پالس تنظیم می شود. همچنین تغییرات ولتاژ مدار از طریق اوسیلوسکوپ ثبت می شود. پس از انجام آزمایش، توسط میکروسکوپ نوری از سطح شیار، با بزرگ نمای $160\times$ ، عکس برداری می شود پس از آن با برش نمونه های شیار خورده از وسط، عمق شیار با میکروسکوپ نوری مشاهده شده و ثبت می شود.

۲-۲- برنامه آزمایش ها

شیارها در ولتاژ 34V و با ابزار از جنس فولاد تندبر و به قطر 0.5mm بر روی سطح شیشه با روش فرزکاری با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی ایجاد می شوند. ابزار دارای سرعت دورانی 800rpm بوده که در فاصله $10\mu\text{m}$ از قطعه کار قرار می گیرد و قطعه کار (میز محور X) با سرعت $10\mu\text{m/s}$ نسبت به ابزار در راستای افقی حرکت می نماید. در تمامی آزمایش ها، شیار به طول 10mm بر روی سطح شیشه ایجاد می شود. زمان روشنایی پالس 2 و 3 و 4 میلی ثانیه (ms) و زمان خاموشی پالس 1 و 0.5 میلی ثانیه انتخاب می شود. تمامی آزمایش ها به صورت فول فاکتوریل انجام می گیرد و برای هر سری آزمایش، دو مرتبه تکرار انجام می گیرد و برای عمق شیار، متوسط مقدار حاصله از دو آزمایش گزارش می شود. در شکل ۲ چند نمونه از شیارهای ایجاد شده بر روی سطح شیشه و ابزار ماشین کاری نمایش داده شده است.

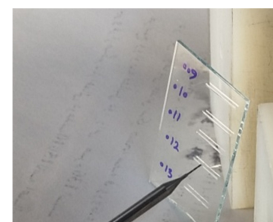
۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- بررسی تاثیر ولتاژ پالسی با زمان خاموشی 1 میلی ثانیه

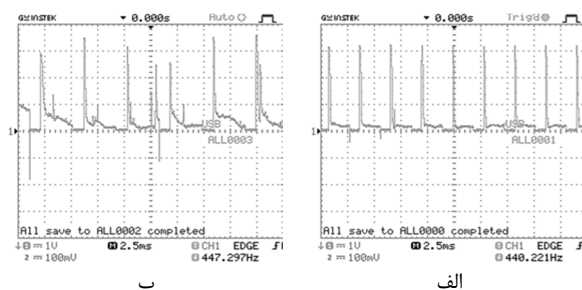
در مجموعه آزمایش های اول، با در نظرگیری زمان خاموشی پالس 1ms ، زمان روشنایی پالس از 2 و 3 و 4 میلی ثانیه (ms) تغییر می نماید. در واقع نسبت زمان روشنایی پالس به خاموشی پالس به ترتیب: $2/3$ و $3/4$ و $Ton/Toff = 4/3$ برابر می باشد. همان طور که در شکل ۳ دیده می شود، با افزایش زمان روشنایی پالس عمق شیار افزایش می یابد. همچنین کیفیت سطح شیار افزایش می یابد و ناهمواری های کمتری در کف شیار به چشم می خورد. همچنین نمودار تغییرات عمق برحسب زمان روشنایی پالس در شکل ۴ آورده شده است.

۳-۲- بررسی تاثیر ولتاژ پالسی با زمان خاموشی 0.5 میلی ثانیه

در مجموعه آزمایش های دوم، با در نظرگیری زمان خاموشی پالس 0.5ms ، زمان روشنایی پالس از 2 و 3 و 4 میلی ثانیه (ms) تغییر می نماید. در واقع نسبت زمان روشنایی پالس به خاموشی پالس به ترتیب: $4/6$ و $6/8$ و $Ton/Toff = 8/6$ برابر می باشد. در شکل ۵، تصویر سطح شیارها و مقطع عرضی آن ها آورده شده است.



شکل ۷ نمونه ای از شیارهای ایجاد شده بر روی سطح شیشه



ب

الف

شکل ۸ نمودار وضعیت جرقه‌ها در فرآیند ماشین‌کاری:

الف) Ton/Toff=2 (Toff=1ms, Ton=2ms)

ب) Ton/Toff=8 (Toff=0.5ms, Ton=4ms)

کمتری ایجاد شده و عمق شیار کمتر خواهد بود. در حالی که زیاد بودن زمان روشنی پالس و کوچک‌تر بودن زمان خاموشی پالس منجر به شکل‌گیری ریز جرقه‌ها شده که خود نقش مهمی در انجام ماشین‌کاری و افزایش عمق شیار دارند.

۴- جمع‌بندی

برخلاف نتایج گزارش شده در دیگر کارهای تحقیقاتی، عرض شیارهای حاصله در حالات مختلف ولتاژ پالسی تغییر خاصی ننموده است و اما افزایش کیفیت سطح، عمق شیار و کاهش مقدار ناهمواری‌ها با افزایش نسبت زمان روشنی پالس به خاموشی آن، مشاهده می‌شود. انتخاب مقدار زمان روشنی و خاموشی پالس و نسبت بین آن‌ها تاثیر مهمی در کنترل فیلم گاز، وضعیت جرقه‌ها و حرارت واصله به قطعه‌کار داشته و نرخ براده‌برداری را تعیین می‌نماید. در این میان شکل‌گیری ریز جرقه‌ها نقش مهمی در افزایش نرخ براده‌برداری دارد.

۵- مراجع

- [1] N. M. Dhawale, Investigation of machining forces during constant velocity drilling in SACE (spark assisted chemical engraving) technology, M.Sc. Thesis, Concordia University, 2009.
- [2] S. K. Jui, A. B. Kamaraj, M. M. Sundaram, High aspect ratio micromachining of glass by electrochemical discharge machining (ECDM), *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 4, pp. 460-466, 2013.
- [3] C. Yang, S. Ho, B. H. Yan, Micro hole machining of borosilicate glass through electrochemical discharge machining (ECDM), in *Proceeding of, Trans Tech Publ*, pp. 149-166, 2004.
- [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, Micromachining using electrochemical discharge phenomenon: fundamentals and applications of spark assisted chemical engraving: *William Andrew Publication*, 2009.
- [6] R. Wüthrich, L. Hof, The gas film in spark assisted chemical engraving (SACE)—a key element for micro-machining applications, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 7, pp. 828-835, 2006.
- [7] T. F. Didar, A. Dolatabadi, R. Wüthrich, Characterization and modeling of 2D-glass micro-machining by spark-assisted chemical engraving (SACE) with constant velocity, *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 065016, 2008.
- [8] J. D. A. Ziki, T. F. 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.
- [9] Z.-P. Zheng, W.-H. Cheng, F.-Y. Huang, B.-H. Yan, 3D microstructuring of Pyrex glass using the electrochemical discharge machining process, *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 960, 2007.
- [10] R. Wüthrich, U. Spaelter, H. Bleuler, The current signal in spark-assisted chemical engraving (SACE): what does it tell us, *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 779, 2006.

۳-۳- مقایسه عمق شیار در حالت ولتاژ پالسی با زمان خاموشی متفاوت

عمق شیار برای دو حالت ماشین‌کاری با زمان خاموشی‌های ۱ و ۰/۵ ms میلی ثانیه در شکل ۷-الف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود با افزایش نسبت زمان روشنی پالس به زمان خاموشی پالس، عمق شیار افزایش می‌یابد. در حالتی که نسبت زمان روشنی پالس به زمان خاموشی پالس ۸ برابر باشد، زمان خاموشی پالس ۰/۵ و زمان روشنی ۴ میلی ثانیه، عمق شیار ۱۶۰ μm می‌باشد. در شرایطی که این نسبت دو باشد، یعنی زمان خاموشی پالس ۱ و زمان روشنی ۲ میلی ثانیه، عمق شیار ۱۰۷ μm می‌باشد. همچنین روند افزایش عمق شیار با افزایش نسبت زمان روشنی پالس به زمان خاموشی آن متناظر است (شکل ۷-ب).

جهت قضاوت بهتر در مورد اثرات ولتاژ پالسی، مطالعه وضعیت جرقه‌ها از روی نمودارهای خروجی اوسیلوسکوپ مفید می‌باشد [۱۰]. مطابق شکل ۸، تخلیه‌های الکتریکی برای دو حالت زیر ثبت شده است.

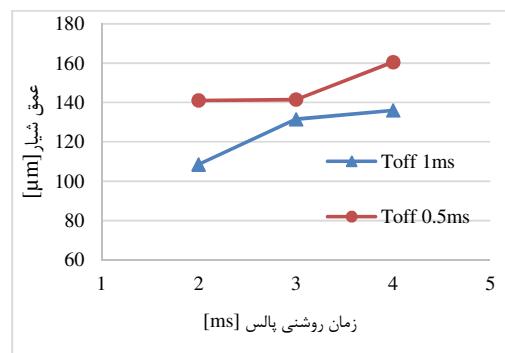
الف) زمان روشنی پالس ۲ میلی ثانیه و خاموشی ۱ میلی ثانیه:

Ton/Toff=2 (Toff=1ms, Ton=2ms)

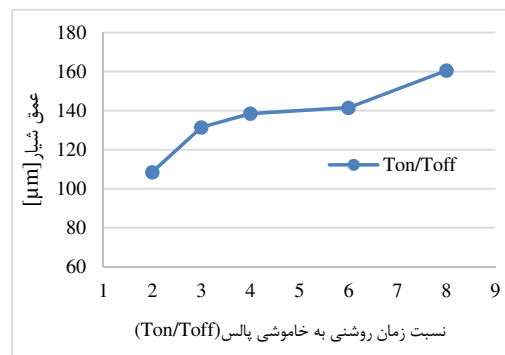
ب) زمان روشنی پالس ۴ میلی ثانیه و خاموشی ۰/۵ میلی ثانیه:

Ton/Toff=8 (Toff=0.5ms, Ton=4ms)

در حالت الف، جرقه‌ها با مقدار ماکسیمم یکسان و بدون هیچ ریز جرقه‌ای انجام شده‌اند در حالی که مقادیر ماکزیمم جرقه‌ها در حالت ب متفاوت بوده و در طول زمان روشنی پالس، ریز جرقه‌هایی نیز شکل می‌گیرند. این مطلب نشان می‌دهد که در حالتی که زمان روشنی پالس و نسبت آن به زمان خاموشی پالس کوچک باشد، جرقه‌ها بیشتر تحت کنترل بوده، حرارت



الف



ب

شکل ۷ نمودار تغییرات عمق متوسط شیار بر حسب: الف) زمان روشنی

پالس، ب) نسبت زمان روشنی به خاموشی پالس