



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

منصور حاجیان^۱، اردشیر حمصیان ایتفاق^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
* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، Razfar@aut.ac.ir

چکیده

ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی از جمله فرآیندهای نوین تولید می‌باشد که از ترکیب دو فرآیند الکتروشیمیایی و فرآیند تخلیه الکتریکی تشکیل شده است. مکانیزم‌های براده‌برداری در این روش شامل براده‌برداری به کمک واکنش شیمیایی و همچنین براده‌برداری به کمک حرارت ناشی از جرقه می‌باشد. در این فرآیند قطعه‌کار در محلول الکترولیت غوطه‌ور می‌شود و ابزار به قطعه‌کار نزدیک می‌شود. با اعمال ولتاژ در ابزار و الکترود فرعی فیلم گازی در اطراف ابزار تشکیل می‌شود که با افزایش ولتاژ، جرقه در اطراف ابزار زده می‌شود. حرارت ناشی از این جرقه منجر به بار برداری از قطعه‌کار می‌شود. لذا یکی از پارامترهای مهم در این فرآیند انرژی جرقه می‌باشد. دستیابی به حد بهینه از انرژی جرقه همواره موردنظر محققان بوده است. در این مقاله با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی و به کمک منبع تغذیه پالسی بر روی شیشه شیارهای میناتوروی ایجاد می‌شود و کنترل انرژی جرقه به کمک کنترل وضعیت پالس‌ها انجام می‌گیرد. پارامترهای مورد بررسی در این مقاله زمان روشنی و خاموشی و همچنین فرکانس پالس می‌باشد. اثر این پارامترها بر روی عمق شیار و کیفیت سطح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان روشنی پالس عمق شیار افزایش می‌یابد و کیفیت سطح اندکی بهبود می‌یابد. زمان روشنی پالس و نسبت زمان روشنی به خاموشی پالس در شکل‌گیری ریز جرقه‌ها یا حذف آن‌ها اثر به‌سزایی داشته و نرخ براده‌برداری را تعیین می‌نماید.

کلید واژگان: ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی، شیارهای میناتوروی، 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 نمی‌باشند [۲]. روش ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی^۱، روشی است که با بهره‌گیری از خواص خوردگی الکترولیت و حرارتی جرقه‌های ایجاد شده، از مواد نارسانایی نظیر شیشه باربرداری انجام می‌دهد، در ضمن این‌که مشکلات دیگر فرآیندهای ماشین‌کاری شیشه را به حداقل رسانده است [۳]. یک سلول ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی از واحدهای زیر تشکیل شده است: ۱- منبع تغذیه که می‌تواند منبع DC پیوسته یا پالسی باشد ۲- الکترولیت، عمدتاً از الکترولیت-

۱- مقدمه

مواد نارسانا نظیر شیشه و سرامیک، به دلیل خواص منحصر به فردی چون مقاومت به خوردگی، نارسانایی در برابر جریان الکتریسته و حرارت و همچنین شفافیت مناسب برای شیشه، امروزه مورد توجه قرار گرفته‌اند و در زمینه‌هایی چون مهندسی پزشکی، و ساخت وسایل بسیار کوچک نظیر میکرو پمپ‌ها و میکروراکتورها به‌کار گرفته می‌شوند [۱]. در ماشین‌کاری شیشه از روش‌هایی چون ماشین‌کاری با لیزر و ماشین‌کاری آلتراسونیک استفاده می‌شود که به دلیل کیفیت سطح پایین و ترک‌های ریز در ناحیه ماشین‌کاری، 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].

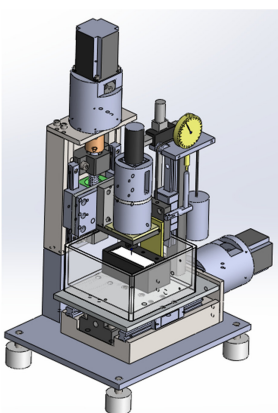
در این مقاله، به بررسی تاثیر تغییر زمان روشنی پالس برای دو زمان خاموشی پالس متفاوت، ۱ و ۰/۵ میلی ثانیه (Toff=0.5 and 1 ms) بر روی وضعیت شیار ایجاد شده با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی پرداخته شده است و عمق، کیفیت شیار و وضعیت جرقه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در واقع عمده تفاوت تحقیق حاضر با سایر تحقیقات 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 آزمایش‌های تجربی ارائه گردیده است. در بخش سوم نتایج آزمایش‌ها آورده شده است و بر روی آن‌ها بحث شده است و در بخش پایانی مقاله، نتایج جمع‌بندی 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 سنباده‌زنی، انتهای آن تخت شد، بروی کولت ابزار-گیر فرز میکروماشین کاری نصب گردید. محورهای حرکتی این دستگاه قادر است سرعت خطی از محدوده ۱ الی ۱۲۰ میکرومتر بر ثانیه (μm/s) را تامین نماید و ابزار ماشین کاری را با لنگی دورانی کمتر از ۵μm در محدوده سرعت دورانی ۱۵۰۰-۰ rpm به چرخش درآورد. در شکل ۱، شماتیک تجهیز فرزکاری ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی نمایش داده شده است.

قطعه کار از جنس شیشه لام و به ابعاد ۱x۲۰x۴۰ میلی‌متر مکعب می‌باشد که توسط نگه‌دارنده از جنس پلکسی گلاس در نزدیکی ابزار و در فاصله ۱۰μm از آن قرار می‌گیرد. با توجه به کارهای محققان قبلی، در این تحقیق از محلول سود سوزآور یا غلظت وزنی ۲۵wt% استفاده می‌شود. این محلول در حدود ۴۰°C در ظرف محتوی نگه دارنده قطعه کار ریخته می‌شود به نحوی که در حدود ۲mm از سطح فوقانی قطعه کار درون محلول قرار گیرد. از طریق یک مدار الکترونیکی پالس‌ساز، ولتاژ پیوسته مدار با افتی قابل اغماض



شکل ۱ تجهیز فرزکاری تخلیه الکتروشیمیایی:

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

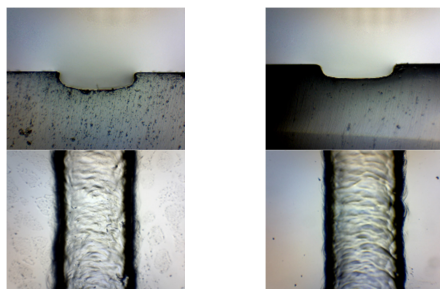


های قلبیایی نظیر هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم با درصدهای مختلف حدود با درصدهای مختلف حدود ۳۰-۲۰ در صد وزنی استفاده می‌شود ۳- الکتروود کاتد یا قطب منفی، که به نام ابزار شناخته می‌شود و عموماً قطری کمتر از یک میلی‌متر داشته و در حدود یک تا دو میلی‌متر در الکتروولت فرو می‌رود ۴- الکتروود آند یا قطب مثبت که در محلول الکتروولت شناور بوده و سطح مقطعی به اندازه حدود چند صد برابر سطح مقطع فروری ابزار در الکتروولت دارد و عموماً از جنس فولاد زنگ نزن یا گرافیت می‌باشد. با اتصال جریان الکتروسیسته بین ابزار و الکتروود آند، فرایند الکتروولیز آغاز می‌شود و حباب‌های گاز در اطراف الکتروودها ایجاد می‌شوند. با افزایش سطح ولتاژ و رسیدن آن به ولتاژ بحرانی، سطح ابزار از حباب‌ها پوشیده می‌شود و زمینه برای ایجاد جرقه بین ابزار و الکتروولت فراهم می‌آید. در صورتی که قطعه کاری نظیر شیشه در فاصله‌ای نزدیک، کمتر از ۲۵μm، از ابزار قرار گیرد، حرارت ناشی از ایجاد تخلیه الکتروولتی به سطح آن برخورد کرده و زمینه را برای انجام واکنش ناحیه‌ای از قطعه کار با الکتروولت فراهم می‌آورد و به این ترتیب باربرداری از قطعه کار انجام می‌شود [۴]. یکی از راه‌های مرسوم در روش فرزکاری با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی، حرکت‌دهی ابزار بر روی سطح قطعه کار و در فاصله‌ای معین می‌باشد که سبب ایجاد شیارهای مینیاتوری می‌شود [۵].

تخلیه الکتروشیمیایی از مهم‌ترین ارکان این فرآیند محسوب می‌شود [۶]. در واقع کنترل مقدار انرژی رسیده به قطعه کار که از تخلیه الکتروشیمیایی حاصل می‌شود می‌تواند فرآیند ماشین کاری را کنترل نماید و به این ترتیب می‌توان میزان نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح را تحت کنترل در آورد. در صورتی که سهم حرارت دریافتی قطعه کار زیاد باشد، ممکن است ترک‌های سطحی در ناحیه ماشین کاری پدید آید. از طرفی تکرارپذیری 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 به‌عنوان عوامل ورودی برای کنترل حرارت در فرآیند ECDM در نظر گرفته می‌شوند و در دسته پارامترهای فعال کنترل حرارت جای داده می‌شوند. از طرفی منابع انتقال حرارت در تخلیه الکتروشیمیایی شامل الکتروولت و ابزار می‌باشند که انتخاب مشخصات هدایت حرارتی موردنظر می‌توان تا حدی سهم حرارت دریافتی قطعه کار را کنترل نمود [۵].

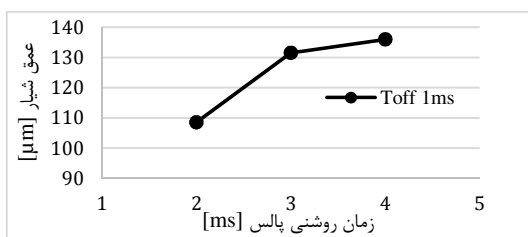
در مورد فرزکاری با فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی، بر روی انتخاب پارامترهای فرآیندی و تاثیر آن‌ها بر روی کیفیت شیار، عمق و ناحیه متاثر حرارتی به صورت محدودی تحقیقات انجام گرفته است [۸،۷]. عمده تحقیقات صورت گرفته بر به کارگیری ولتاژ پیوسته برنامه‌ریزی شده است و کمتر به ولتاژ پالسی پرداخته شده است. اولین بررسی‌ها برای به کارگیری ولتاژ پالسی در روش فرزکاری با فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی توسط زنگ^۱ و همکارانش انجام شده است [۹]. فرآیند ماشین کاری آن‌ها در حضور محلول هیدروکسید پتاسیم با غلظت وزنی ۲۰٪ بوده است که با ثابت نگه‌داشتن 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 می‌نماید. افزایش زمان خاموشی پالس علاوه بر طولانی نمودن فرآیند ماشین کاری، می‌تواند در اثر تماس مکانیکی ابزار با قطعه کار

1. Zheng

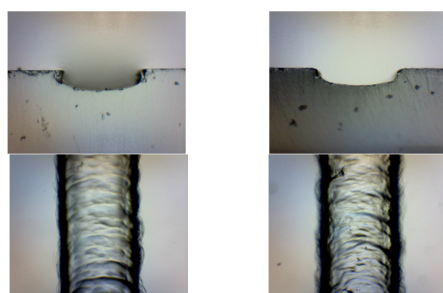


الف) ولتاژ ۳۴ v و Ton = ۲ ms عمق شیار: ۱۰۸ μm
ب) ولتاژ ۳۴ v و Ton = ۴ ms عمق شیار: ۱۳۸ μm

شکل ۲ عکس از سطح و مقطع عرضی شیار ماشین کاری شده با ولتاژ پالسی و زمان خاموشی (الف) Ton = ۲ ms، (ب) Ton = ۴ ms



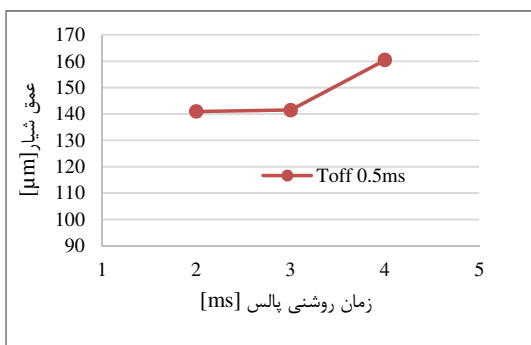
شکل ۳ نمودار تغییرات عمق متوسط شیار بر حسب زمان روشن پالس



الف) ولتاژ ۳۴ v و Ton = ۲ ms عمق شیار: ۱۴۱ μm
ب) ولتاژ ۳۴ v و Ton = ۴ ms عمق شیار: ۱۶۰ μm

شکل ۴ عکس از سطح و مقطع عرضی شیار ماشین کاری شده با ولتاژ پالسی و زمان خاموشی (الف) ToFF = ۰/۵ ms، (ب) Ton = ۴ ms

در این حالت نمودار تغییرات عمق متوسط شیار بر حسب زمان روشن پالس در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶ نمودار تغییرات عمق متوسط شیار بر حسب زمان روشن 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 ۵۰x۴۰x۵ 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 نمایی ۱۶۰X، 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 ۳۴V و با ابزار از جنس فولاد تندبر و به قطر ۰/۵mm بر روی سطح شیشه با روش فرزکاری با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی ایجاد می شوند. ابزار دارای سرعت دورانی ۸۰۰ rpm بوده که در فاصله ۱۰ μm از قطعه کار قرار می گیرد و قطعه کار (میز محور X) با سرعت ۱۰ μm/s نسبت به ابزار در راستای افقی حرکت می نماید. در تمامی آزمایش ها، شیار به طول ۱۰mm بر روی سطح شیشه ایجاد می شود. زمان روشن پالس ۲ و ۳ و ۴ میلی ثانیه (ms) و زمان خاموشی پالس ۱ و ۰/۵ 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.

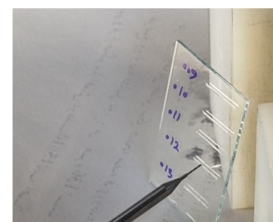
۳- بحث و نتیجه گیری

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

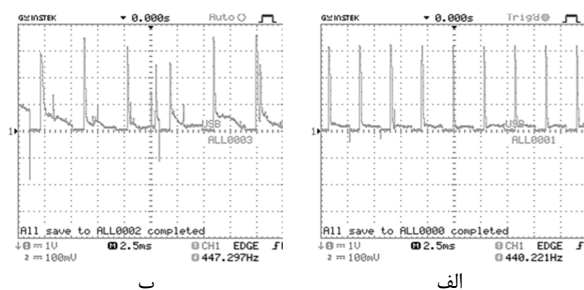
در مجموعه آزمایش های اول، با در نظرگیری زمان خاموشی پالس ۱ms، زمان روشن پالس از ۲ و ۳ و ۴ میلی ثانیه (ms) تغییر می نماید. در واقع نسبت زمان روشن پالس به خاموشی پالس به ترتیب: ۲/۳ و ۳/۴ برابر می باشد. همان طور که در شکل ۳ دیده می شود، با افزایش زمان روشن پالس عمق شیار افزایش می یابد. همچنین کیفیت سطح شیار افزایش می یابد و ناهمواری های کمتری در کف شیار به چشم می خورد. همچنین نمودار تغییرات عمق بر حسب زمان روشن پالس در شکل ۴ آورده شده است.

۳-۲- بررسی تاثیر ولتاژ پالسی با زمان خاموشی ۰/۵ میلی ثانیه

در مجموعه آزمایش های دوم، با در نظرگیری زمان خاموشی پالس ۰/۵ms، زمان روشن پالس از ۲ و ۳ و ۴ میلی ثانیه (ms) تغییر می نماید. در واقع نسبت زمان روشن پالس به خاموشی پالس به ترتیب: ۴/۶ و ۶/۸ 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



الف ب

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

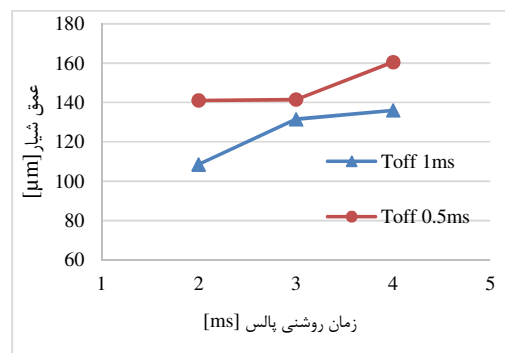
الف) زمان روشنایی پالس ۲ میلی ثانیه و خاموشی ۱ میلی ثانیه:

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

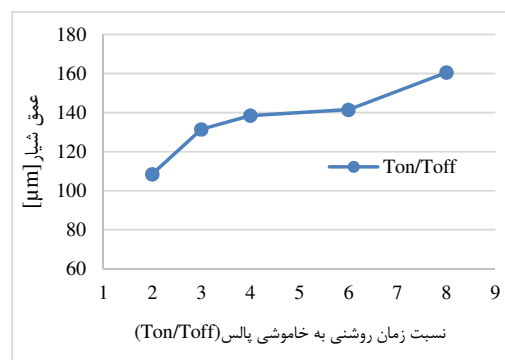
ب) زمان روشنایی پالس ۴ میلی ثانیه و خاموشی ۰/۵ میلی ثانیه:

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 روشنایی پالس، ریز جرقه‌هایی نیز شکل می‌گیرند. این مطلب نشان می‌دهد که در حالتی که زمان روشنایی 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 روشنایی

پالس، ب) نسبت زمان روشنایی به خاموشی پالس