



بررسی اثر غلظت و نوع الکترولیت بر کیفیت و عمق شیارهای مینیاتوری تولید شده به روش تخلیه الکتروشیمیایی

نسیم صباحی^{۱*}، محمدرضا رازفر^۲، منصور حاجیان^۳، پویا محمدی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران

۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، nasim.sabahi@aut.ac.ir

چکیده

به کارگیری قطعات شیشه‌ای در تجهیزات مرتبط با صنایع میکروالکترونیک، مهندسی پزشکی و بسیاری از صنایع مدرن، به علت ویژگی‌های خاص نظیر شفافیت، ضریب هدایت حرارتی پایین و مقاومت شیمیایی مناسب؛ بسیار مورد توجه قرار گرفته است. امروزه روش تخلیه الکتروشیمیایی با به کارگیری همزمان پدیده‌های حرارتی و شیمیایی به عنوان یکی از مناسب‌ترین روش‌های ماشین‌کاری برای ایجاد شیارهای کوچک بر روی قطعات شیشه‌ای مطرح شده است. پارامترهای فراوانی در کیفیت و هندسه شیارهای مینیاتوری نقش دارند. در این مقاله اثر غلظت و نوع الکترولیت که از جمله پارامترهای الکتروشیمیایی هستند؛ بررسی می‌گردد. الکترولیت‌های مورد استفاده در این مقاله NaOH و KOH هستند که در غلظت‌های وزنی بالا و پایین مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نشان داد با افزایش غلظت الکترولیت، عمق شیار افزایش می‌یابد. زیرا سبب افزایش نرخ براده برداری و خوردگی می‌گردد. عمق شیار تولید شده با محلول KOH نسبت به NaOH با درصد وزنی و شرایط آزمایش یکسان، بیشتر است. در غلظت وزنی پایین، کیفیت شیارهای تولید شده قابل قبول نیست. با افزایش غلظت، سطح شیارهای ماشین‌کاری شده هموارتر خواهد بود. در شیارهای تولید شده توسط KOH ۳۵٪، ترک مشاهده شد. شیارهای تولید شده توسط NaOH ۲۵٪ بهترین کیفیت سطح را دارند.

کلید واژگان: تخلیه الکتروشیمیایی، شیارهای مینیاتوری، پارامترهای الکتروشیمیایی، غلظت الکترولیت

Investigating the effect of the electrolyte concentration and type of electrolyte on the surface quality and depth of micro-channels produced by electrochemical discharge machining (ECDM)

Nasim Sabahi*, Mohammad Reza Razfar, Mansor Hajian, Pooya Mohammadi

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

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

ABSTRACT

Utilization of glass pieces are considered in the equipments associated with micro-electrical industries, medical engineering and most of modern industries because of its unique properties like its transparency, low thermal conductivity and good chemical resistance. Among machining technologies, electrochemical discharge machining is the most appropriate method to create micro-channels on glass pieces by applying chemical and thermal phenomena at the same time. Several parameters affect the quality and geometry of micro-channels. In this paper, the effect of concentration and type of electrolyte (the electrochemical parameters) will be considered. The electrolytes used are aqueous NaOH and KOH solutions (15, 25 and 35 wt%). The results on depth showed that it increases by increasing the concentration because the corrosion and removed material increase with the electrolyte concentration. The channel depth machined with KOH solution is deeper than NaOH in the same experimental condition and concentration. Micro-channels machined with lower electrolyte concentration are not acceptable. As the electrolyte concentration increases, a smoother micro-channel surface can be achieved. The crack appears on the surface of channels machined with 35 wt% KOH electrolyte. 25 wt% NaOH electrolyte concentration results in the best surface quality.

Keywords: Electrochemical Discharge, Electrochemical Parameters, Electrolyte Concentration, Micro-Channels.

۱- مقدمه

و نیز مهندسی پزشکی مانند سنسورهای جریان، دستگاه‌های انتقال دارو

کاربرد فراوانی دارند

در کنار ویژگی‌های مناسب ذکر شده برای شیشه، قابلیت براده‌برداری و شکل‌پذیری پایین آن سبب شده تا به کارگیری روش‌های متداول ماشین‌کاری برای براده برداری از آن با مشکلاتی همراه باشد.

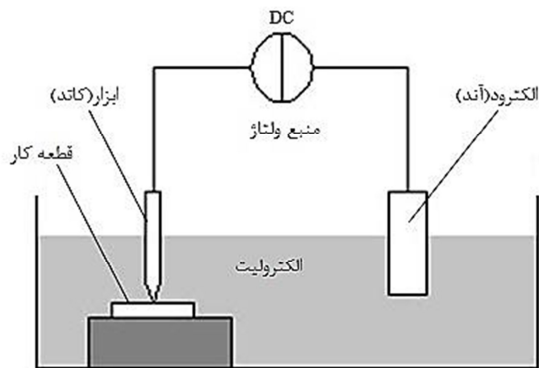
بدین ترتیب روش‌های مدرن ماشین‌کاری، برای ماشین‌کاری شیشه مورد توجه قرار گرفتند. این روش‌ها عموماً شامل روش‌های باربرداری مکانیکی

شیشه از جمله موادی است که به دلیل ویژگی‌های خاص نظیر شفافیت، سختی بالا، ضریب هدایت حرارتی بسیار کم و مقاومت شیمیایی مناسب برای ساخت قطعات در اندازه‌های کوچک بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به طور عمده قطعات شیشه‌ای در اندازه‌های کوچک در تجهیزات مرتبط با صنایع میکروالکترونیک مانند میکروستاپ‌سنج‌ها، میکروآکتورها، میکروپمپ‌ها

Please cite this article using:

N. Sabahi, M.R. Razfar, M. Hajian, P. Mohammadi, Investigating the effect of the electrolyte concentration and type of electrolyte on the surface quality and depth of micro-channels produced by electrochemical discharge machining (ECDM), *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 401-405, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

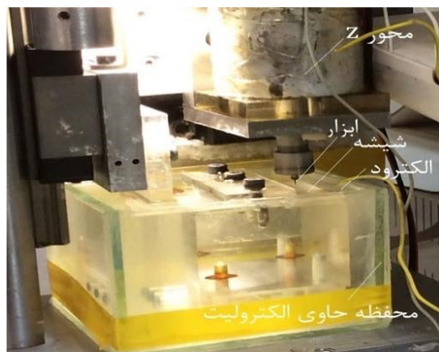


شکل ۱ شماتیک محفظه‌ی فرآیند ECDM

برای انجام این فرآیند به کارگیری مکانیزم حرکتی دقیقی که فاصله بین ابزار و قطعه کار را در طول فرآیند ثابت نگه داشته و توانایی ایجاد سرعت‌های حرکتی و پیشروی بسیار پایین (در حدود $40\text{--}5\text{ }\mu\text{m/s}$ به منظور بالا بردن تکرارپذیری در یافتن موقعیت جدید توسط محور Z دستگاه) را دارا باشد، ضروری است.

قطعه کار (شیشه با ضخامت 1 mm) همراه با الکترود آند (فولاد زنگ نزن)^۹، داخل محفظه فرآیند قرار گرفته‌اند و همزمان ابزار توسط کنگی ماشین (محور Z) نگه‌داشته شده است. لازم به ذکر است چرخش ابزار توسط موتور DC تأمین می‌شود (شکل ۲).

الکترود ابزار از جنس فولاد تندبر^{۱۰} و با قطر 0.5 mm می‌باشد. نوک ابزار توسط کاغذ سنباده اصلاح شده و به شکل تخت درآورده شده است. قبل از طی مسیر مشخص شده برای ایجاد شیار، الکترود ابزار با استفاده از حرکت دادن محور Z توسط موتور پله‌ای^{۱۱}، در موقعیت ابتدایی روی سطح شیشه قرار می‌گیرد. در نهایت با استفاده از مکانیزم پیشروی ثقلی^{۱۲}، فاصله ابزار و سطح شیشه روی $15\text{ }\mu\text{m}$ تنظیم می‌شود. محفظه تا سطح مشخص (تا حدود 2 mm بالاتر از سطح شیشه) از الکترولیت پر می‌شود. به منظور تأمین ولتاژ ماشین‌کاری بین ابزار و الکترود آند، یک منبع قدرت در نظر گرفته شده است. شیارها به طول 10 mm روی شیشه ماشین‌کاری می‌شوند. شکل موجی حاصل از پاسخ ولتاژ و جریان توسط اسیلوسکوپ اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت شیارهای تولید شده توسط میکروسکوپ نوری xps136 مشاهده می‌شود.



شکل ۲ محفظه‌ی فرآیند ECDM

(ماشین‌کاری آلتراسونیک و ماشین‌کاری جت ذرات ساینده)، روش‌های حرارتی (ماشین‌کاری لیزر) و روش‌های شیمیایی (روش خوردگی شیمیایی با اسید هیدروفلوئوریک) می‌باشند. روش‌های مکانیکی عموماً سبب ایجاد ترک‌های ریز و کاهش کیفیت سطح ماشین‌کاری شده، می‌شوند. روش‌های حرارتی نیز منجر به تخریب لایه‌ای از سطح شیشه بر اثر حرارت، شده و کیفیت سطح ماشین‌کاری کاهش می‌یابد. روش‌های شیمیایی نظیر خوردگی شیمیایی با اسید هیدروفلوئوریک، با وجود ماشین‌کاری با کیفیت سطح بالا، بسیار زمان‌بر و کند بوده و از طرفی قادر به ایجاد حفره با نسبت عمق به قطر زیاد نمی‌باشند. در این میان روش ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی^۱ با به کارگیری همزمان پدیده‌های حرارتی و شیمیایی به عنوان یک روش مناسب برای ایجاد شیارهای کوچک بر روی شیشه مطرح شده است [۱].

اولین کاربرد ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی در سوراخ‌کاری بود که در سال ۱۹۶۸ توسط کورافوجی^۲ و سودا^۳ ارائه شد [۲].

نام‌های متعددی برای این فرآیند مورد استفاده قرار گرفته است. مانند ماشین‌کاری قوس الکتروشیمیایی (کوبوتا^۴) [۳]، ماشین‌کاری جرقه الکتروشیمیایی (جین^۵ و همکارانش [۴])، حکاکی شیمیایی به کمک جرقه (لانگن^۶ و همکارانش [۵])، ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی (گوش^۷ و همکارانش [۶])، این تنوع در نام‌ها نشان‌دهنده پیچیده بودن این فرآیند است و توضیحات متعددی برای توصیف طبیعت این فرآیند پیشنهاد شده است.

پارامترهای زیادی در کیفیت هندسه‌ی شیارهای مینیاتوری تولید شده توسط این روش نقش دارند. می‌توان این پارامترها را به پارامترهای ابزار، منبع تغذیه و الکترولیت تقسیم‌بندی کرد. کارهای تحقیقاتی زیادی روی این پارامترها برای رسیدن به کیفیت مطلوب در تولید شیارها انجام شده است. پارامترهای مربوط به الکترولیت شامل مواردی چون جنس الکترولیت، غلظت، دما و ترکیبات موجود در الکترولیت می‌باشد.

در سال ۱۹۷۳، شخصی به نام کوک^۸ [۷] توسط همکارانش تحقیقاتی تجربی در الکتروماشین‌کاری انجام داد که در آزمایشات خود از الکترولیت‌های متنوعی استفاده کرد، کوک نشان داد برای این فرآیند خاص، محلول‌های آبی نتایج بهتری را رقم خواهند زد.

در این مقاله اثر غلظت و نوع الکترولیت بر کیفیت سطح و عمق شیارها بررسی می‌شود که بدین منظور از دو نوع الکترولیت NaOH و KOH که جزء محلول‌های آبی محسوب می‌شوند، با درصدهای وزنی ۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪ استفاده شده است.

۲- آماده‌سازی دستگاه

تجهیزات آزمایش ترکیب شده از محفظه‌ی فرآیند (سلول الکتروشیمیایی) و میز X-Z دقیق. شماتیک محفظه‌ی فرآیند در شکل ۱ [۸] آورده شده است. اجزای تشکیل دهنده‌ی محفظه‌ی فرآیند شامل ابزار (کاتد-قطب منفی)، آند (قطعه‌ای با سطح مقطع چند صد برابر بزرگتر از سطح مقطع ابزار-قطب مثبت)، الکترولیت (NaOH و KOH)، قطعه کار (شیشه) و منبع تغذیه D.C می‌باشد.

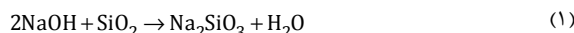
1. Electrochemical Discharge Machining (ECDM)
2. Kurafuji
3. Suda
4. Kubota
5. Jain
6. Langen
7. Ghosh
8. Cook

9. Stainless steel
10. High speed steel
11. Stepper motor
12. Gravity feed

۳- طرز کار ماشین کاری

دو الکترود داخل الکترولیت آبی غوطه‌ور هستند، با برقراری جریان DC فرآیند الکترولیز آغاز شده و حباب‌ها بر روی سطح ابزار و الکترود آند، تشکیل می‌شوند. با ادامه‌ی فرآیند و افزایش ولتاژ، حباب‌ها به یکدیگر پیوسته و یک فیلم گاز بر روی ابزار تشکیل می‌شود. با رسیدن سطح ولتاژ به یک ولتاژ بحرانی، فیلم گاز شکسته شده و جرقه الکتریکی زده می‌شود. در صورتی که فاصله بین ابزار و قطعه کار کمتر از $25\mu\text{m}$ باشد، گرمای ناشی از تخلیه الکتریکی و فعل و انفعالات شیمیایی الکترولیت با قطعه کار، براده برداری از سطح قطعه کار صورت می‌گیرد.

همان‌طور که اشاره شد روش ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی با بهره‌گیری همزمان پدیده‌های حرارتی و شیمیایی موجب باربرداری از سطح قطعه کار می‌شود. مکانیزم براده برداری از قطعه کار توسط اچ شیمیایی ۱ و با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید در شکل ۳ [۹] نشان داده شده است. حرارت تولید شده توسط تخلیه شیمیایی، قطعه کار را بصورت موضعی گرم می‌کند که باعث کاهش ویسکوزیته شیشه و بالا رفتن اچ شیمیایی توسط رادیکال‌های OH از الکترولیت می‌شود. به سبب حرارت ایجاد شده (در حدود 600°C که بالاتر از دمای ذوب NaOH (318°C) و پایین‌تر از نقطه‌ی ذوب آن می‌باشد (1388°C) [۹]، آب در مجاورت ناحیه ماشینکاری تبخیر شده و تنها NaOH به فرم نمک ذوب شده باقی می‌ماند که به همراه منطقه‌ای از شیشه با ویسکوزیته کاهش یافته در مقابل الکترود ابزار شکل می‌گیرد و فرآیند اچ شیمیایی به واسطه‌ی رابطه‌ی (۱) صورت می‌گیرد. سدیم سیلیکات شکل گرفته توسط الکترولیت خارج می‌شود.

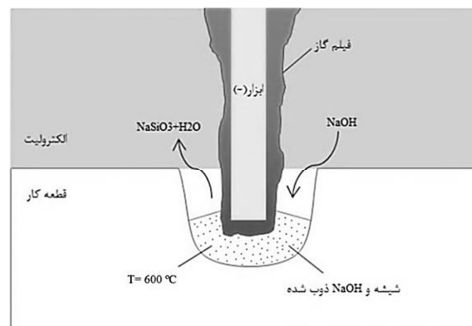


۴- تحلیل نتایج

۴-۱- اثر نوع و غلظت الکترولیت بر کیفیت سطح شیار

شکل ۴ نمونه شیارهای ماشین کاری شده توسط دو نوع الکترولیت KOH و NaOH با غلظت‌های وزنی ۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪ در ولتاژ ۳۲ ولت، سرعت پیشروی ابزار $10\mu\text{m/s}$ و سرعت دورانی 800rpm را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که بافت و کیفیت سطح شیار با تغییر غلظت و نوع الکترولیت تغییر می‌کند.

همان‌طور که از شکل ۴-الف و ۴-ج مشخص است با افزایش غلظت الکترولیت NaOH، کف شیار از حالت پرماند به حالت اسفنجی و مسطح‌تر تغییر می‌یابد [۹]. با توجه به شکل ۴-الف و ۴-ب، در غلظت ۱۵٪ وزنی،



شکل ۳ مکانیزم براده برداری از قطعه کار توسط اچ شیمیایی

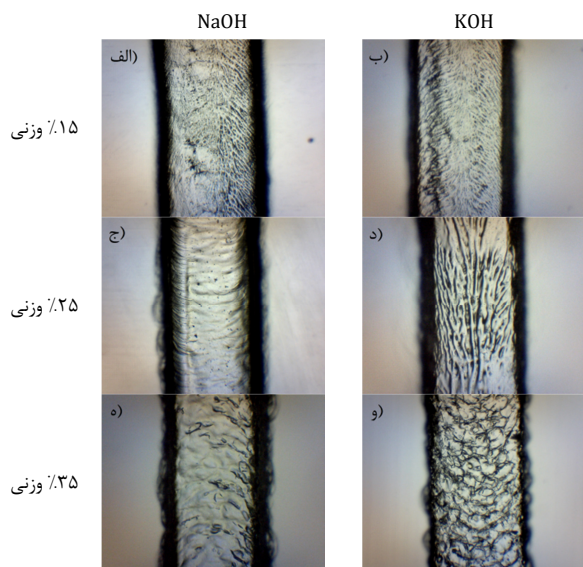
کیفیت شیارهای تولید شده قابل قبول نیست زیرا به علت کمبود یون، اچ شیمیایی فقط در منطقه تخلیه شیمیایی که دمای بالاتری را تجربه می‌کند، اتفاق می‌افتد [۱۰]. در الکترولیت NaOH ۳۵٪ وزنی آسیب‌های ناشی از خوردگی، بیشتر از غلظت‌های ۲۵٪ وزنی می‌باشد؛ زیرا با افزایش غلظت یون‌های داخل الکترولیت، اچ شیمیایی تشدید شده و نرخ براده برداری و میزان خوردگی افزایش می‌یابد [۱۱].

الکترولیت KOH نسبت به NaOH قدرت خوردگی بالاتر دارد. در واقع یون‌های K^+ بزرگتر از Na^+ هستند، بنابراین وقتی یون‌های K^+ روی سطح شیشه بنشینند، استحکام آن را کاهش می‌دهند. پس در شرایط ماشین کاری یکسان، نرخ براده برداری توسط محلول KOH بیشتر از NaOH می‌باشد [۱۲]. همان‌طور که از تصاویر شیارها پیداست، خوردگی سطح شیار تولید شده با محلول KOH نسبت به NaOH در شرایط یکسان بیشتر است.

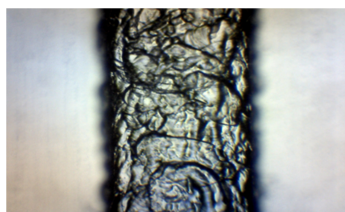
شکل ۵ مربوط به شیار تولید شده در الکترولیت KOH با غلظت ۳۵٪ وزنی می‌باشد. همان‌طور که از شکل پیداست، روی سطح شیار ترک مشاهده شد. به طور کلی ضریب هدایت حرارتی محلول‌های آبی کم است و با افزایش غلظت افزایش می‌یابد [۱۳]. هرچه ضریب هدایت حرارتی افزایش یابد، شیشه سریع‌تر خنک می‌شود و باعث ایجاد ترک در سطح شیار می‌شود.

۴-۲- اثر نوع و غلظت الکترولیت روی عمق شیار

همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است، عمق بدست آمده در یک غلظت وزنی معین در الکترولیت KOH نسبت به NaOH بیشتر است که این به دلیل بیشتر



شکل ۴ شیارهای ماشین کاری شده در ولتاژ ۳۲ ولت و سرعت پیشروی ابزار $10\mu\text{m/s}$ با استفاده از دو نوع الکترولیت NaOH و KOH با غلظت‌های وزنی مختلف



شکل ۵ رشد ترک در سطح شیار ماشین کاری شده توسط الکترولیت KOH با

غلظت ۳۵٪ وزنی، در ولتاژ ۳۲ ولت و سرعت پیشروی $10\mu\text{m/s}$

میزان جریان متوسط در غلظت ۳۵٪ وزنی، کمتر از جریان متوسط در غلظت ۲۵٪ وزنی می‌باشد و این به دلیل کاهش هدایت الکتریکی ناشی از برهم‌کنش یونی می‌باشد. در واقع در غلظت ۳۵٪ وزنی، اثر خوردگی شیمیایی نسبت به میزان انرژی حرارتی، نقش بیشتری در افزایش عمق دارد. برای اندازه‌گیری عمق شیارها، ابتدا شیار مورد نظر از وسط برش زده شد و پس از سنباده‌زنی و شستشو در محلول آب و الکل، با استفاده از میکروسکوپ نوری و لنز دیجیتال قابل نصب در چشمی میکروسکوپ، عمق شیار اندازه‌گیری شد. عمق شیارهای ماشین‌کاری شده در ولتاژ ۳۲ ولت برای هر دو الکترولیت و در درصدهای وزنی مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. مقدار عمق ذکر شده در تصاویر، مقدار متوسط عمق حاصل از ۳ بار تکرار هر آزمایش است.

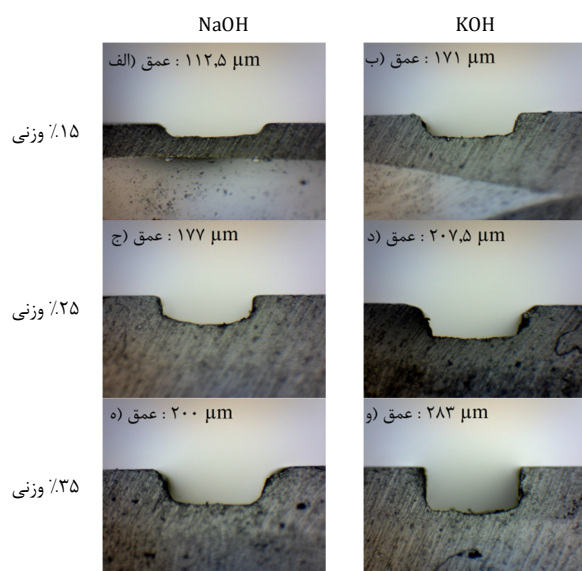
۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شد که پارامترهای نوع و غلظت الکترولیت روی کیفیت سطح و عمق شیارهای مینیاتوری تأثیرگذار است. کیفیت سطح شیارهای تولید شده توسط محلول NaOH نسبت به KOH در شرایط مشابه، به علت بالا بودن قدرت خوردگی و ضریب هدایت حرارتی KOH نسبت به NaOH، بهتر است. همچنین در شرایط مشابه عمق شیار تولید شده توسط KOH نسبت به NaOH بیشتر می‌باشد.

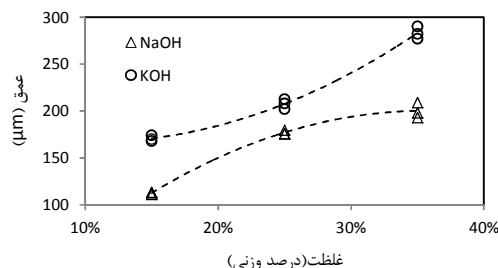
در غلظت‌های کم الکترولیت، به علت پایین بودن نرخ براده‌برداری، کیفیت سطح شیارهای تولید شده قابل قبول نیست. با افزایش غلظت، کف شیار وضعیت مسطح‌تری پیدا کرده و کیفیت سطح قابل قبول می‌باشد. همچنین افزایش غلظت، افزایش عمق کانال‌ها را در پی خواهد داشت.

اگر غلظت الکترولیت از حد مشخصی فراتر رود، رشد ترک‌ها و آسیب‌های ناشی از خوردگی روی سطح شیار را شاهد خواهیم بود که این اتفاق به ترتیب در شیارهای تولید شده توسط الکترولیت KOH ۳۵٪ وزنی و NaOH ۳۵٪ وزنی دیده شد.

در نهایت شیارهای تولید شده توسط الکترولیت ۲۵٪ وزنی NaOH در ولتاژ ۳۲ ولت، شرایط مطلوب مورد نظر را دارا می‌باشند.



شکل ۸ عمق شیارهای ماشین‌کاری شده در ولتاژ ۳۲ ولت و سرعت پیشروی ابزار ۱۰ μm/s با استفاده از دو نوع الکترولیت NaOH و KOH با غلظت‌های وزنی مختلف

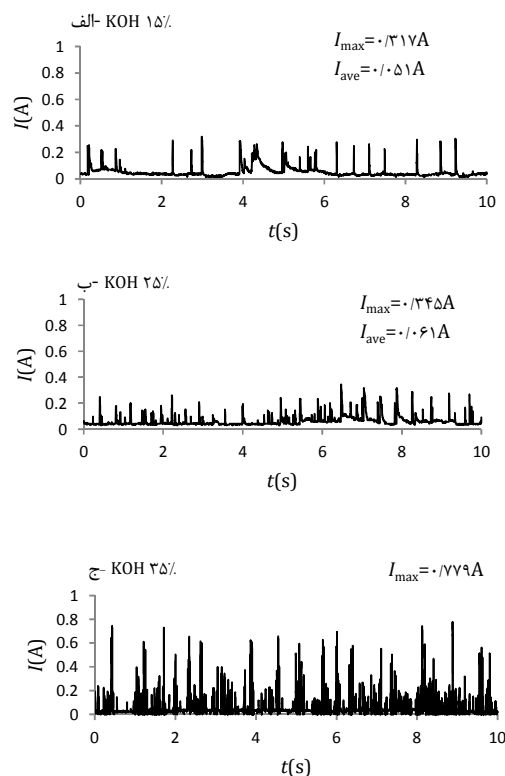


شکل ۶ عمق شیارهای مینیاتوری تولید شده با غلظت‌های وزنی مختلف دو الکترولیت NaOH و KOH (۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪)

بودن قدرت خوردگی محلول KOH نسبت به NaOH است. لازم به ذکر است مقادیر گزارش شده مربوط به ۳ بار تکرار در هر آزمایش می‌باشد.

با افزایش غلظت، عمق شیار نیز افزایش می‌یابد. عمق شیار ماشین‌کاری شده به میزان خوردگی ناشی از اج شیمیایی و مقدار انرژی حرارتی ناشی از تخلیه الکتروشیمیایی وابسته است. همان‌طور که اشاره شد با افزایش غلظت یون‌های داخل الکترولیت، اج شیمیایی تشدید شده و نرخ براده‌برداری و میزان خوردگی افزایش می‌یابد.

همچنین با افزایش غلظت، انرژی حرارتی ناشی از تخلیه الکتروشیمیایی افزایش می‌یابد. این مقدار انرژی با جریان رابطه مستقیم دارد و با افزایش جریان، افزایش می‌یابد [۱۱]. همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، با افزایش غلظت الکترولیت تا ۲۵٪ وزنی، مقدار جریان ماکزیمم و جریان متوسط افزایش می‌یابد. در نتیجه میزان انرژی حرارتی و عمق نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷ سیگنال‌های جریان تخلیه الکتروشیمیایی در غلظت‌های وزنی مختلف الکترولیت KOH (۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪)

۶- فهرست علائم

I	شدت جریان (A)
T	دما (C)

زیرنویس‌ها

max	مقدار بیشینه
Ave	مقدار متوسط

۷- مراجع

- [1] R. Wüthrich, L. Hof, A. Lal, K. Fujisaki, H. Bleuler, P. Mandin, G. Picard, Physical principles and miniaturization of spark assisted chemical engraving (SACE), *Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 10, pp. S268, 2005.
- [2] H. Kurafuji, *Electrical Discharge Drilling of Glass I, Ann. CIRP*, Vol. 16, pp. 415-419, 1968.
- [3] M. Kubota, in *Proceedings of the International Conference on Production Engineering*, pp. 51, 1974.
- [4] S. Tandon, V. Jain, P. Kumar, K. Rajurkar, Investigations into machining of composites, *Precision engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 227-238, 1990.
- [5] H. Lange, V. Fascio, R. Wüthrich, D. Viquerat, Three-Dimensional Structuring of Pyrex Glass Devices-Trajectory Control, in *Proceeding of International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN)*, pp. 435-438, 2002.
- [6] K. Allesu, A. Ghosh, M. Muju, A preliminary qualitative approach of a proposed mechanism of material removal in electrical machining of glass, *mechanical engineering*, Vol. 36, No. 3, pp. 201-207, 1991.
- [7] N. Cook, G. Foote, P. Jordan, B. Kalyani, Experimental studies in electro-machining, *Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 95, No. 4, pp. 945-950, 1973.
- [8] S. K. Jui, A. B. Kamaraj, M. M. Sundaram, High aspect ratio micromachining of glass by electrochemical discharge machining (ECDM), *Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 4, pp. 460-466, 2013.
- [9] J. D. A. Ziki, T. F. Didar, R. Wüthrich, Micro-texturing channel surfaces on glass with spark assisted chemical engraving, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 57, pp. 66-72, 2012.
- [10] T. F. Didar, *Micro-fabrication with Spark Assisted Chemical Engraving (SACE) Technology*, Thesis, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, 2008.
- [11] R. Wüthrich, *Micromachining using electrochemical discharge phenomenon: fundamentals and applications of spark assisted chemical engraving*: William Andrew, 2009.
- [12] I. Basak, *Electrochemical discharge machining mechanism and a scheme for enhancing material removal capacity*, Thesis, Dissertation Thesis, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 1991.
- [13] A. A. Alexandrov, The equations for thermophysical properties of aqueous solutions of sodium hydroxide, in *Proceeding of the 14th International Conference on the Properties of Water and Steam*, pp. 86-90, 2005.