



بررسی تجربی تأثیر جنس الکترولیت بر روی مشخصه‌های ماشینکاری فولاد ضد زنگ 304 در فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی (ECM)

محمدرضا شبگرد^{1*} رضا رستمی حشمت آباد²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 5166616471، mrshabgard@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 مهر 1394

پذیرش: 06 بهمن 1394

ارائه در سایت: 08 اسفند 1394

کلید واژگان:

ماشینکاری الکتروشیمیایی (ECM)

الکترولیت

نرخ براده برداری

گپ کناری

زبری سطح

چکیده

جنس الکترولیت، بدلیل ماهیت یون‌های تشکیل دهنده آن، بر سرعت واکنش‌ها، یکنواختی میدان الکتریکی و تشکیل لایه سطحی بر روی سطح قطعه کار در منطقه ماشینکاری در طول فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی تأثیر می‌گذارد و باعث بوجود آمدن رفتارهای انحلالی متفاوت از قطعه کار می‌گردد. از اینرو در این پژوهش تأثیر جنس الکترولیت‌های کلرید سدیم، نیترات سدیم، کلرید پتاسیم و اسید هیدروکلریک در شدت جریان‌های مختلف بر روی مشخصه‌های ماشینکاری الکتروشیمیایی (نرخ براده برداری، گپ کناری و زبری سطح) فولاد ضد زنگ 304 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که تشکیل لایه رویین در مدت زمان ماشینکاری با الکترولیت نیترات سدیم باعث کاهش نرخ براده برداری و کاهش گپ کناری در مقایسه با الکترولیت‌های کلرید سدیم و کلرید پتاسیم می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهند که مقدار زبری سطح در الکترولیت‌های کلرید سدیم و کلرید پتاسیم با افزایش شدت جریان، کاهش و در الکترولیت نیترات سدیم افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند افزودن اسید هیدروکلریک به هر سه الکترولیت (کلرید سدیم، کلرید پتاسیم و نیترات سدیم) موجب افزایش جزئی در مقدار نرخ براده برداری و افزایش در گپ کناری می‌شود و مقدار زبری سطح در الکترولیت‌های ترکیبی کلرید سدیم و کلرید پتاسیم کاهش و در الکترولیت ترکیبی نیترات سدیم افزایش می‌یابد.

Experimental investigation of the electrolyte type effect on the specifications of electrochemical machining (ECM) of the 304 stainless steel

Mohammadreza Shabgard*, Reza Rostami Heshmatabad

Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

* P.O.B. 5166616471 Tabriz, Iran, mrshabgard@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 October 2015
Accepted 26 January 2016
Available Online 27 February 2016

Keywords:
Electrochemical machining
Electrolyte
material removal rate
side gap
surface roughness

ABSTRACT

Electrolyte type, due to the nature of its constituent ions, affects the reaction rate, the uniformity of the electric field and formation of the external layer on the workpiece surface in the machining area during the electrochemical machining process, as well as causing different dissolution behaviors of the workpiece to be created. Therefore, in this study the effect of sodium chloride, sodium nitrate, potassium chloride and hydrochloric acid electrolytes with different currents on the electrochemical machining characteristics of stainless steel 304, including material removal rate, side gap and surface roughness, has been investigated. The results showed that the formation of passive layer during the machining with sodium nitrate electrolyte reduces the material removal rate and side gap compared with sodium chloride and potassium chloride electrolytes. According to the experimental results the surface roughness in the sodium chloride and potassium chloride electrolytes is decreased by increasing the machining current, but increases in the sodium nitrate electrolyte. Also, the material removal rate is slightly increased and side gap increases with sodium chloride, sodium nitrate and potassium chloride when combined with hydrochloric acid. On the other hand, the surface roughness is reduced in combined sodium chloride and potassium chloride electrolytes, but increases in the combined sodium nitrate electrolyte.

1-مقدمه

حرارت ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی را از فاصله گپ دور می‌کند. ماشینکاری الکتروشیمیایی دارای مزایایی از قبیل داشتن راندمان بالا، ایجاد سطح با کیفیت بالا، عدم تولید هرگونه تنش پسماند در قطعه ماشینکاری شده، عدم سایش ابزار و امکان ایجاد شکل‌های پیچیده می‌باشد. این فرآیند در حال حاضر بطور وسیع در صنایع هوا فضا، دفاعی، قالب سازی، خودرو سازی و پزشکی کاربرد دارد [1]. باتوجه به اهمیت بالای دستیابی به شرایط نرخ

ماشینکاری الکتروشیمیایی (ECM) فرآیندی است که براساس اصول انحلال آندی کنترل شده در سطح قطعه کار عمل می‌کند. در این فرآیند، قطعه کار (آند) و ابزار (کاتد) دارای رسانایی الکتریکی می‌باشند و هر دو در داخل یک پیل الکترولیتی قرار می‌گیرند. در فرآیند مذکور سیال هادی (الکترولیت) نقش پل ارتباطی بین دو الکترود را داشته و محصولات واکنش و

Please cite this article using:

M. Shabgard, R. Rostami Heshmatabad, Experimental investigation of the electrolyte type effect on the specifications of electrochemical machining (ECM) of the 304 stainless steel, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 43-54, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

از مواد افزوده شده باعث می‌گردند که انحلال الکتروشیمیایی مخصوصا در مناطقی که چگالی جریان کم می‌باشد به تأخیر بیافتد.

تانی گیولانا و همکاران [7] به بررسی میکروماشینکاری الکتروشیمیایی فولاد ضدزنگ با استفاده از الکترولیت نیترات سدیم اسیدی پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از الکترولیت‌های با ترکیب و غلظت معین شامل $25 \text{ mol/lit NaNO}_3$ و $0.5 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 25 \text{ mol/lit NaNO}_3$ با نرخ جریان الکترولیت 6.7 lit/min ، 4.5 استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که نرخ براده برداری (MRR) و برش اضافی (OC) از نوع الکترولیت اثر قابل توجهی می‌پذیرد. برای الکترولیت نیترات سدیم اسیدی نرخ براده برداری بیشتر، بدلیل تشکیل لجن کم و برش اضافی کمتر بعلمت میکروجرقه‌های کمتر درمقایسه با الکترولیت نیترات سدیم خالص بدست می‌آید.

هوار و همکاران [8] به بررسی تجربی ماشینکاری ECM فولاد نوع 1020 در الکترولیت 1.5 مولار به برمات سدیم (NaBrO_3) پرداختند. آن‌ها دریافتند که بعلمت تشکیل لایه روئین² در بازه وسیعی از پتانسیل اعمالی بر روی سطح قطعه کار، دقت ابعادی و هندسی بدست آمده پایین و همچنین سطح ماشینکاری شده شدیداً حفره حفره می‌گردد.

ماو و هوار [9] در یک مطالعه تجربی به بررسی انحلال آندی فولاد نوع 1020 در محلول‌های الکترولیتی شامل هر دو آنیون NO_3^- و Cl^- با نسبت‌های $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ 0.5، 2، 3، 4 و 7 پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که عامل مؤثر در انحلال لایه‌های آندی در مواد برپایه آهن که توسط یون‌های NO_3^- ایجاد شده‌اند، یون‌های Cl^- می‌باشد. همچنین ملاحظه کردند که یون ClO_4^- باعث انحلال یکنواخت لایه‌های آندی می‌شود.

لابودا و مک‌میلان [10] بین سال‌های 1972 تا 1974 تحقیقات گسترده‌ای به منظور پیدا کردن الکترولیت جایگزین برای کلرید سدیم که به هنگام فرآیند ECM، انحلال ناخواسته ایجاد می‌کند، در آزمایشگاه‌های شرکت جنرالز موتور (GMR) انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که از بین الکترولیت‌های بررسی شده، الکترولیت NaClO_3 بهترین کنترل ابعادی و هندسه‌ای قطعه کار را در نرخ‌های براده برداری بالا و صافی سطح خوب ایجاد می‌کند.

عسگری [11] به بررسی تأثیر ولتاژ اعمالی و الکترولیت در فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی نایتول پرداخت. او در این پژوهش از سه محلول الکترولیتی با پایه نمک طعام اشباع در ولتاژ ماشینکاری 2 ولت تا 30 ولت استفاده کرد. پارامترهای مورد بررسی، سرعت ماشینکاری، شاخصه‌های نمودار جریان برحسب زمان و کیفیت نهایی سطح بوده است. نتایج او با استفاده از فرآیند تصمیم‌گیری چند شاخصه نشان داد که مناسب‌ترین الکترولیت باتوجه به پارامترهای کمی و کیفی، مربوط به الکترولیت $300 \text{ gr/lit NaCl} + 2.4 \text{ gr/lit NaF}$ در محدوده ولتاژ 22 تا 26 ولت می‌باشد. زبری سطح ماشینکاری شده تا حدود زیادی مربوط به ریزساختار نایتول می‌باشد.

براساس تحقیقات مذکور، الکترولیت مناسب، نقش مهمی در دستیابی به مشخصه‌های ماشینکاری مطلوب در فرآیند ECM ایفا می‌کند. در فولادهای آلیاژی مانند فولاد ضدزنگ 304 بعلمت اختلاف در سرعت انحلال عناصر تشکیل دهنده آن، بررسی پارامتر جنس الکترولیت جهت انتخاب صحیح آن اهمیت بسزایی دارد. از اینرو هدف از این پژوهش بررسی تأثیر جنس الکترولیت‌های کلرید سدیم، نیترات سدیم و کلرید پتاسیم در غلظت 1 مولار به ترکیب آن‌ها با 0.1 مولار به اسید هیدروکلریدیک، که باعث

براده برداری بالا، زبری سطح پایین و گپ کناری کم در قطعات ماشینکاری شده توسط فرآیند ECM، مطالعه در این خصوص روز به روز درحال گسترش است. از اینرو پژوهش‌های زیادی در زمینه چگونگی دستیابی به راندمان ماشینکاری و دقت ابعادی بالا و کاهش زبری سطح صورت گرفته است [2].

لین تانگ و همکاران [2] مطالعه‌ای بر روی اثر چگالی جریان الکترولیت در ماشینکاری الکتروشیمیایی فولاد ضدزنگ S-03 در الکترولیت‌های مختلف بر روی مشخصه‌های ماشینکاری انجام داده‌اند. آن‌ها در این تحقیق از الکترولیت‌های کلرید سدیم، نیترات سدیم و ترکیب آن‌ها استفاده کردند. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نشان داد که الکترولیت کلرید سدیم بیشترین راندمان شدت جریان را در بین الکترولیت‌های مورد آزمایش دارد و چگالی شدت جریان در این الکترولیت هیچگونه تأثیری بر روی راندمان شدت جریان ندارد. همچنین آن‌ها دریافتند هنگامی که سرعت تغذیه کاتد افزایش می‌یابد، مقدار زبری سطح کاهش می‌یابد.

جین و مورگان [3] در مطالعه‌ای به بررسی بهبود عملکرد فرآیند ماشینکاری ECM با بکارگیری الکترولیت غنی شده با اکسیژن پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از دو نوع الکترولیت کلرید سدیم و کلرید سدیم غنی شده با اکسیژن در غلظت‌های مختلف استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد هنگامی که اکسیژن به الکترولیت کلرید سدیم افزوده می‌شود، بدلیل افزایش یون‌های هیدروکسید $(\text{OH})^-$ نسبت به الکترولیت کلرید سدیم خالص، نرخ براده برداری (MRR)¹ بصورت چشمگیری افزایش می‌یابد.

لین تانگ و گوا [4] در تحقیقی به بررسی تأثیر الکترولیت‌های کلرات سدیم و نیترات سدیم در مشخصه‌های ماشینکاری الکتروشیمیایی فولاد ضدزنگ S-03 پرداختند. آن‌ها در این تحقیق طراحی آزمایش تاگوچی $L_{16}(4^3)$ را که در برگیرنده فاکتورهای ولتاژ اعمالی، نرخ تغذیه ابزار کاتدی، فشار الکترولیت، نوع الکترولیت و غلظت الکترولیت می‌باشد، در چهار سطح انجام داده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که الکترولیت ترکیبی نیترات سدیم (178 gr/Lit) با کلرات سدیم (41 gr/Lit)، ولتاژ 20V، فشار الکترولیت 0.8 MPa در ماشینکاری ECM فولاد ضدزنگ S-03، پارامترهای بهینه‌ای برای مشخصه‌های ماشینکاری (نرخ براده برداری، گپ کناری و زبری سطح) می‌باشند.

شوبرت و همکاران [5] مطالعه‌ای بر روی ماشینکاری ECM کاربرد سمنتیت (wcc06) با بکارگیری الکترولیت ترکیبی نیترات سدیم و آمونیاک با نسبت $\frac{\text{NH}_3}{\text{NaNO}_3} = \frac{2}{2.9}$ انجام دادند. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که هرکدام از فازهای کبالت و تنگستن کاربرد، رفتارهای انحلال الکتروشیمیایی منحصر به فردی دارند. ایشان توانستند توسط الکترولیت ترکیبی مذکور یک انحلال همگن از فاز سخت و فاز اتصال دهنده (بایندر) بدست آورند. همچنین دریافتند که در این نوع الکترولیت راندمان ماشینکاری به چگالی جریان بستگی دارد.

بانارد [6] در تحقیقی به بررسی تأثیر استفاده از افزودنی‌های فعال‌کننده سطح در الکترولیت‌های ماشینکاری پرداخت. او در این تحقیق از الکترولیت کلرید سدیم 15 درصدی که افزودنی‌های فعال‌کننده سطح به آن افزوده، استفاده نمود. نتایج نشان داد که مواد فعال‌کننده سطحی در این تحقیق، نرخ سیالیت الکترولیت را تا 25% افزایش می‌دهد. همچنین مشاهده گردید که برخی از مواد پلیمری افزوده شده اکتیو به انحلال الکتروشیمیایی قطعه کار کمک کرده و نرخ براده برداری را افزایش می‌دهند. درمقابل برخی

2- Passive layer

1- Material Removal Rate

جدول 3 مشخصه‌های فیزیکی ابزار مسی

Table 3 Physical properties of copper tool

مشخصه	واحد	مقدار
چگالی	gr/cm ³	8.93
نقطه ذوب	°C	1083
نقطه جوش	°C	2580
هدایت حرارتی	W/m.k	380.7
هدایت الکتریکی	Sm/mm ²	59.5
سختی	N/mm ²	HB 45



Fig. 1 Machined workpieces in experiments

شکل 1 قطعه‌های ماشینکاری شده در آزمایش‌ها

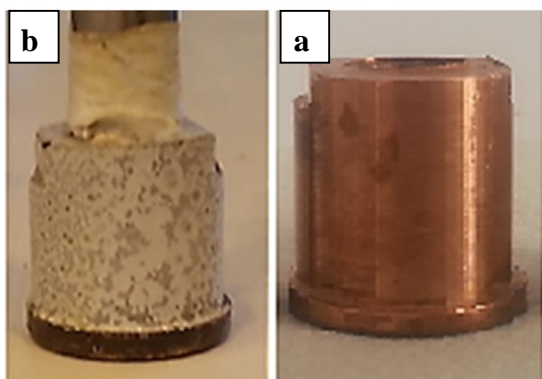


Fig.2 (a) Copper tool before coating (b) Copper tool after coating

شکل 2 (a) ابزار مسی قبل از پوشش دهی و (b) ابزار پس از پوشش دهی

2-2- تجهیزات ماشینکاری الکتروشیمیایی

جهت انجام آزمایش‌ها، دستگاه نشان داده شده در شکل 3 طراحی و ساخته شد. این دستگاه شامل چهار واحد مجزا می‌باشد (منبع تغذیه و کنترل، سیستم پیشروی ابزار، سیستم انتقال و تأمین سیال الکترولیت و سیستم نگهدارنده ابزار و قطعه‌کار). منبع تغذیه این دستگاه دارای ولتاژی در محدوده 0 تا 12 ولت و حداکثر شدت جریان 100A می‌باشد. سیستم کنترل از یک سری مدارهای الکترونیکی تشکیل می‌شود که می‌تواند تغییرهای مربوط به شرایط گپ را طی فرآیند ماشینکاری، سنجش و کنترل کند. واحد پیشروی ابزار، کنترل حرکت ابزار را درحین فرآیند ماشینکاری برعهده دارد. سیستم انتقال و تأمین سیال الکترولیت، وظیفه ذخیره، تغذیه، تصفیه و کنترل دمای الکترولیت را تا درجه‌ای معین برعهده دارد. جهت جلوگیری از ورود مواد ناخالص به منطقه ماشینکاری، به منظور ایجاد الکترولیتی تمیز در فرآیند، از یک فیلتر 5μm استفاده شد. سیستم مبدل حرارتی که از یک گرم‌کننده 1500W، سنسور دمایی PT100، ترمواسارت و رله جریان تشکیل می‌شود، از این مجموعه به منظور کنترل دمای الکترولیت استفاده شد. ماشینکاری در

کاهش نرخ شکل گیری هیدرواکسیدهای فلزی (لجن) در طول فرآیند ماشینکاری نسبت به الکترولیت‌های مذکور می‌گردد، در شدت جریان‌های مختلف بر روی مشخصه‌های ماشینکاری (نرخ براده‌برداری، گپ کناری و زبری سطح) فولاد ضدزنگ 304 می‌باشد.

2- مواد و روش‌های انجام آزمایش‌ها

2-1- آماده سازی نمونه‌ها و ابزار

در این تحقیق از فولاد ضدزنگ 304 تجاری بعنوان قطعه کار استفاده گردید. ترکیب شیمیایی عناصر این فولاد برحسب درصد وزنی با توجه به آزمون کوانتومی در جدول 1 ارائه شده است. فولاد ضدزنگ 304 دارای ساختاری آستنیتی و مقاوم در برابر خوردگی، چقرمگی زیاد و مقاومت خزش بالایی می‌باشد. جدول 2 خواص مکانیکی و فیزیکی فولاد ضدزنگ 304 را نشان می‌دهد. این خواص باعث شده است که این فولاد در گستره وسیعی از کاربردها مانند تجهیزات تولید انرژی، صنایع غذایی، قطعات خودرو، صنایع شیمیایی و هوافضا مورد استفاده قرار گیرد. ماشینکاری این فولاد با روش‌های سنتی بدلیل خاصیت چسبندگی بالای آن و تشکیل لبه انباشته¹ بهنگام ماشینکاری مشکل می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها از یک مفتول با قطر 30 میلی‌متر به ضخامت 10 میلی‌متر بریده شد و سطح مقطع آن‌ها سنگ‌زنی گردید. همچنین جهت انجام تست‌های ماشینکاری از ابزاری از جنس مس به قطر 20 میلی‌متر که برخی از مشخصه‌های فیزیکی آن در جدول 3 ارائه شده است، استفاده گردید. برای کاهش اثر جریان سرگردان² که منجر به کاهش انحلال ناخواسته می‌شود، لبه‌های کناری ابزار توسط پاشش پوشش الکترواستاتیک از جنس اپوکسی عایق‌کاری گردید. شکل 1 و 2 به ترتیب نمونه‌های ماشینکاری شده و ابزار قبل و بعد از پوشش‌دهی را نمایش می‌دهند.

جدول 1 درصد عناصر آلیاژی فولاد ضدزنگ 304

Table 1 Weight percent of alloying elements in the 304 stainless steel

عنصر	درصد وزنی.٪	عنصر	درصد وزنی.٪
Al	0.024	S	0.018
C	0.046	Si	0.372
Cr	17.670	V	0.069
Cu	0.689	W	0.044
Mn	0.886	Fe	71.340
Mo	0.163	Ni	8.679

جدول 2 خواص مکانیکی و فیزیکی فولاد ضدزنگ 304

Table 2 Mechanical and physical properties of the 304 stainless steel

مشخصه	واحد	مقدار
استحکام نهایی	MPa	500-700
مدول الاستیسیه	GPa	200
تنش تسلیم	MPa	190
درصد افزایش طول	%	45
سختی	HV	215 ≥
چگالی (ρ)	kg/m ³	7.9
مقاومت الکتریکی	μ Ω m	0.73
هدایت حرارتی	W/m.k	15

1- But

2- Stray current effect

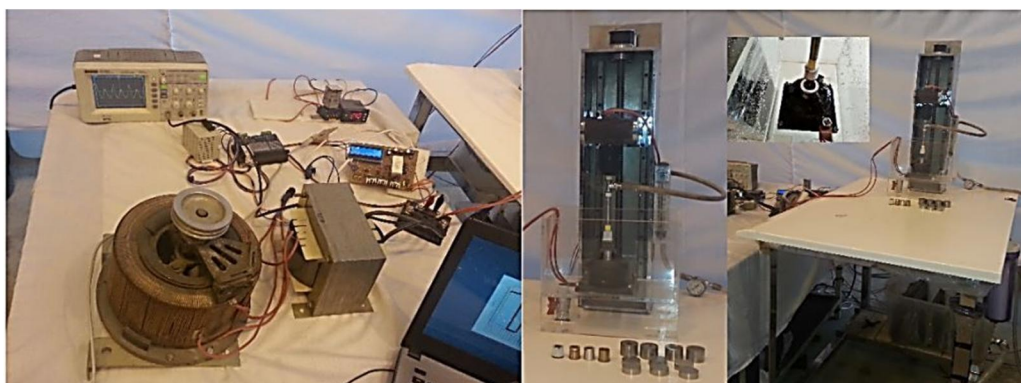


Fig. 3 Equipment for experiments

شکل 3 دستگاه و تجهیزات مربوط به انجام آزمایش‌ها

شده بر روی صفحه نمایشگر دستگاه ایجاد گردید، سپس با معرفی چند نقطه بر روی لبه‌های کناری، میانگین قطر ماشینکاری شده محاسبه شد. مقدار گپ کناری از رابطه (2) محاسبه گردید:

$$\text{Side gap} = \frac{D_p - D_t}{2} \quad (2)$$

که در رابطه (2) D_p قطر قطعه کار ماشینکاری شده (mm) و D_t قطر ابزار (mm) می‌باشد.

جهت اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ها از دستگاه زبری‌سنج ماهرپرومتر³ استفاده گردیده است. بدلیل تفاوت زبری بدست آمده در مناطق مرکزی و کناری سطح قطعه ماشینکاری شده، اندازه‌گیری زبری سطح متوسط (Ra) در سه نقطه مرکزی، میانی و کناری قطعه انجام و مقدار متوسط آن‌ها بعنوان زبری قطعه ماشینکاری شده انتخاب شد.

4-2- طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها بصورت عاملی کامل⁴ بوده و در مجموع 18 آزمایش انجام گرفته است. در این آزمایش‌ها از الکترولیت‌های کلرید سدیم (NaCl)، نیترات-سدیم (NaNO_3)، کلرید پتاسیم (KCl) در غلظت 1 مولار و ترکیب آن‌ها با اسید هیدروکلریک با غلظت 0.1 مولار و در شدت جریان‌های 35، 45 و 55 آمپر استفاده شده است. جدول 4 مشخصه‌های مربوط به الکترولیت‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. شرایط آزمایش‌های تجربی و سطوح پارامترهای تنظیمی پس از یکسری آزمایش‌های اولیه تعیین گردید که بصورت اجمالی در جدول 5 ارائه شده است.

3- نتایج و بحث

3-1- تأثیر جنس الکترولیت بر روی نرخ براده برداری در شدت

جریان‌های مختلف

شکل‌های 5 و 6 مقدار نرخ براده برداری را در الکترولیت‌های مختلف در شدت جریان‌های متفاوت نشان می‌دهند. همانطوریکه مشاهده می‌شود بیشترین مقدار نرخ براده برداری مربوط به الکترولیت کلرید پتاسیم در شدت جریان 55 A و کمترین مقدار نرخ براده برداری مربوط به الکترولیت نیترات سدیم در شدت جریان 35 A می‌باشد و مقدار نرخ براده برداری در الکترولیت نیترات سدیم در تمام حالت‌ها کمتر از الکترولیت‌های کلرید سدیم و کلرید پتاسیم و ترکیب آن‌ها با اسید هیدروکلریک می‌باشد. به نظر می‌رسد علت این پدیده، اختلاف موجود در رفتار انحلالی آنیون‌های Cl^- و NO_3^- در این

محفظه‌ای از جنس پلکسی گلاس که قطعه کار توسط یک کارگیر مخصوص در داخل آن تعبیه شده است، انجام می‌گیرد. در شکل 4 نمودار شماتیک دستگاه ECM و تجهیزات مربوط به انجام آزمایش‌ها نشان داده شده است.

3-2- روش سنجش پارامترهای خروجی

جهت اندازه‌گیری مقدار نرخ براده برداری در آزمایش‌ها از ترازوی مترتولدو¹ با دقت 0.0001 گرم استفاده شده است. در این خصوص نمونه‌های مورد آزمایش قبل و بعد از انجام آزمایش با آب مقطر شسته و کاملاً خشک شده و سپس توزین گردیده‌اند. توسط توزین قطعه‌ها قبل و بعد از آزمایش‌ها نرخ براده برداری با استفاده از رابطه (1) محاسبه گردید.

$$MRR = \frac{M_1 - M_2}{t} \quad (1)$$

که در رابطه (1) MRR مقدار نرخ براده برداری (gr/min)، M_1 جرم قطعه کار قبل از ماشینکاری (gr)، M_2 جرم قطعه کار بعد از آزمایش (gr)، t مدت زمان ماشینکاری (min) است.

برای اندازه‌گیری گپ کناری بوجود آمده در نمونه‌های مورد آزمایش از دستگاه اندازه‌گیری پروفایل پروژکتور استارت اچ اس 1000² استفاده گردید. در این دستگاه ابتدا تصویر بزرگنمایی شده‌ای از نمونه‌های ماشینکاری

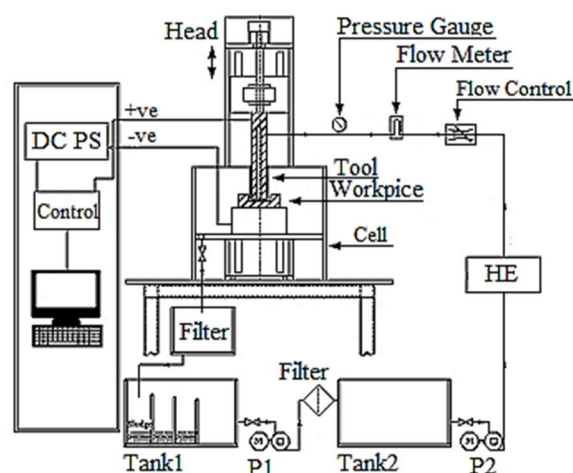


Fig. 4 Schematic diagram of ECM and its equipment

شکل 4 نمودار شماتیک دستگاه ECM و تجهیزات مربوط به آن

3- Mahr Perthometer M2

4- Full factorial

1- METTLER TOLEDO

2- Starret HS1000

جدول 4 مشخصه‌های الکترولیت‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها [12,13]

Table 4 Characteristics of the used electrolytes in experiments [12,13]

ردیف	الکترولیت	فرمول شیمیایی	نوع گروه	فرمول ساختاری	جرم مولی (gr/M)	هدایت مولارحد (20°C) cm^2/Ω	تحرك یونی U در 20°C $\text{cm}^2/\text{v.s}$	حالتی (20°C) g/cm^2	چگالی (20°C) g/cm^2
1	کلرید سدیم	NaCl	نمک	NaCl	58.44	126.45	$U_{\text{Cl}^-} = 7.91 \times 10^{-4}$ $U_{\text{Na}^+} = 5.19 \times 10^{-4}$	359	2.17
2	نیترات سدیم	NaNO ₃	نمک	$\text{Na}^+ \text{NO}_3^-$	84.98	121.56	$U_{\text{NO}_3^-} = 7.4 \times 10^{-4}$ $U_{\text{Na}^+} = 5.19 \times 10^{-4}$	912	2.257
3	کلرید پتاسیم	KCl	نمک	KCl	74.54	149.85	$U_{\text{Cl}^-} = 7.91 \times 10^{-4}$ $U_{\text{K}^+} = 6.1 \times 10^{-4}$	359	1.984
4	اسید کلریدریک	HCl	اسید	H-Cl	36.46	426.16	$U_{\text{Cl}^-} = 7.91 \times 10^{-4}$ $U_{\text{H}^+} = 25.2 \times 10^{-4}$	-	1.18

جدول 5 شرایط و پارامترهای تنظیمی در آزمایش‌ها

Table 5 Conditions and parameters set in experiments

ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
1	ولتاژ	V	10
2	شدت جریان	A	35, 45, 55
3	نرخ جریان الکترولیت	L/min	3 ± 0.5
4	فشار پشت الکترولیت	bar	0.5 ± 0.02
5	دمای الکترولیت	°C	26 ± 1
6	گپ تنظیمی اولیه	mm	0.3
7	مدت زمان ماشینکاری	Min	5
8	جنس الکترولیت	-	NaCl, NaNO ₃ , KCl, HCl
9	غلظت الکترولیت	M	0.1 ± 1 , 1

نوع و غلظت یون‌های موجود باهم یکسان بوده و تنها اختلاف موجود بین کاتیون‌های آن‌ها (Na^+ , K^+) می‌باشد. و از طرفی چون اختلاف ما بین مقدار تحرک یونی این دو کاتیون خیلی کم (جدول 4) است این امر باعث می‌گردد که در طول فرآیند انحلال، مشارکت یون‌ها تقریباً برابر بوده و در نتیجه مقادیر نرخ براده برداری در این الکترولیت‌ها در شرایط یکسان اختلاف جزئی با یکدیگر داشته باشند [2,3,13,15].

همچنین شکل‌های 5 و 6 میزان نرخ براده برداری را نسبت به مقدار شدت جریان در الکترولیت‌های مختلف نشان می‌دهند. همانگونه که مشاهده می‌شود مقدار نرخ براده برداری در الکترولیت‌های مختلف با افزایش شدت جریان، افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان اینگونه بیان کرد که با افزایش شدت جریان، سرعت واکنش‌های اکسایش و کاهش در منطقه ماشینکاری افزایش یافته و باعث می‌گردد که تحرک یون‌ها از سمت قطعه-کار به طرف محلول الکترولیت بیشتر شود. این پدیده موجب افزایش مقدار نرخ براده برداری مطابق با روابط (6) و (7) می‌گردد [16].

جریان و V_a سرعت ماشینکاری می‌باشد.

همچنین شکل‌های 7 تا 9 مقدار نرخ براده برداری ترکیب الکترولیت‌های مذکور را با اسید هیدروکلریدریک نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود اضافه نمودن و ترکیب اسید هیدروکلریدریک با سایر الکترولیت‌ها موجب افزایش جزئی در نرخ براده برداری می‌شود. دلیل این افزایش جزئی را می‌توان اینگونه بیان نمود که با افزودن 0.1 مول اسید هیدروکلریدریک به

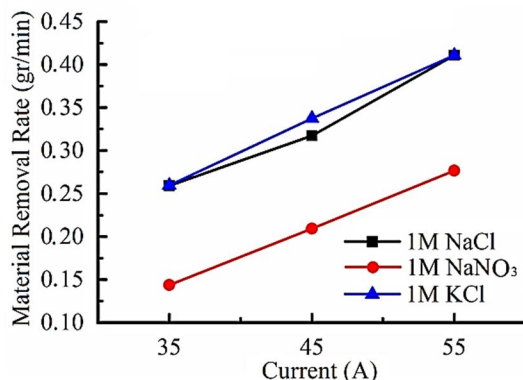
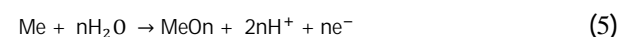


Fig. 5 Material removal rate variations to the change of current in sodium chloride, sodium nitrate and potassium chloride electrolytes at the concentration of 1 Molarity

شکل 5 تغییرات نرخ براده برداری نسبت به شدت جریان در الکترولیت‌های کلریدسدیم، نیترات سدیم و کلرید پتاسیم در غلظت 1 مولاریته

الکترولیت‌ها باشد. در ماشینکاری با الکترولیت نیترات سدیم، بخشی از شدت جریان ماشینکاری براساس واکنش‌های (3) و (4) صرف تکامل گاز اکسیژن و تشکیل لایه روئین (لایه اکسیدی) مطابق با واکنش (5) بر روی سطح قطعه-کار می‌شود. این موضوع باعث کاهش راندمان شدت جریان ماشینکاری و در نتیجه کاهش نرخ براده برداری می‌گردد [2,14].



اما در ماشینکاری با الکترولیت‌های کلرید سدیم و کلرید پتاسیم که دارای آنیون کلر هستند، بعلاوه عدم تکامل گاز اکسیژن و عدم شکل‌گیری لایه روئین، راندمان شدت جریان ماشینکاری بیشینه می‌باشد و این امر باعث بالا بودن نرخ ماشینکاری این الکترولیت‌ها نسبت به الکترولیت نیترات سدیم مطابق با رابطه (6) می‌شود [2,14].

$$\text{MRR} = \eta \frac{AI}{Z.F} \quad (6)$$

که در رابطه (6) I شدت جریان (A)، A جرم اتمی (gr)، Z ظرفیت انحلال، F ثابت فارادی (96500K) و η راندمان شدت جریان ماشینکاری می‌باشد.

همچنین از شکل‌های 5 و 6 مشاهده می‌گردد که مقدار نرخ براده برداری در الکترولیت‌های کلرید سدیم و کلرید پتاسیم خالص و ترکیبی در شرایط آزمایشی یکسان به هم نزدیک هستند. دلیل این امر را می‌توان اینگونه بیان نمود که مشارکت یون‌های موجود در محلول الکترولیت در واکنش‌های الکتروشیمیایی در طول فرآیند انحلال، بر روی نرخ براده برداری تأثیر می‌گذارد. مقدار این مشارکت به نوع و غلظت یون‌های موجود در الکترولیت بستگی دارد. در الکترولیت‌های کلریدسدیم و کلریدپتاسیم خالص و ترکیبی،

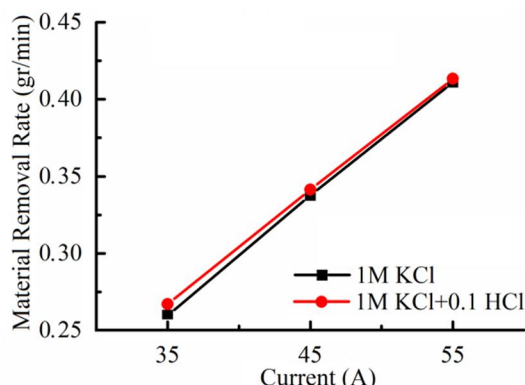


Fig. 9 Material removal rate variations to the change of current in potassium chloride electrolyte and its combined electrolyte with hydrochloric acid

شکل 9 تغییرهای نرخ براده برداری نسبت به شدت جریان در الکترولیت کلرید-پتاسیم و الکترولیت ترکیبی آن با اسید هیدروکلریدریک

صفر کاهش می یابد. در هر سه الکترولیت ترکیبی افزایش جزئی در نرخ براده برداری، حاصل مشارکت بیشتر یون‌ها در فرآیند انحلال و افزایش سرعت واکنش‌ها در منطقه ماشینکاری می باشد. اما بدلیل کاهش یون OH^- مؤثر بر نرخ براده برداری در مقایسه با الکترولیت‌های خالص آن‌ها درصد این افزایش متناسب با مقدار اسید اضافه شده (0.1 مول) نمی باشد [3,7]. همچنین تفاوت در نحوه مشارکت آنیون کلر (Cl^-) در الکترولیت‌های کلریدسديم و کلرید پتاسیم ترکیبی در مقایسه با الکترولیت نیترات سدیم ترکیبی (که در شکست جزئی لایه روئین شرکت می‌کند) می تواند دلیل اختلاف بین درصد افزایش این دو گروه الکترولیت باشد [9].

3-2- بررسی تأثیر جنس الکترولیت بر روی گپ کناری در شدت جریان‌های مختلف

شکل‌های 10 و 11 تأثیر جنس الکترولیت بر روی گپ کناری در شدت جریان‌های متفاوت را نشان می دهند. همانطور که ملاحظه می شود، کمترین مقدار گپ کناری در الکترولیت نیترات سدیم در شدت جریان 55 A و بیشترین مقدار گپ کناری در الکترولیت کلرید پتاسیم در شدت جریان 35 A ایجاد شده است. همچنین همانگونه که مشاهده می‌گردد، مقدار گپ کناری در شدت جریان‌های متفاوت در الکترولیت نیترات سدیم خالص و ترکیبی کمتر از الکترولیت‌های کلریدسديم و کلریدپتاسیم خالص و ترکیبی می باشد. به نظر می رسد علت این امر تشکیل لایه اکسیدی روئین در لبه قطعه کار در ماشینکاری با الکترولیت‌های نیترات سدیم خالص و ترکیبی و در نتیجه کاهش اثر شار شدت جریان سرگردان در ناحیه گپ کناری باشد که این مورد هم سبب کاهش مقدار گپ کناری می‌گردد [4,7,17,18]. بطوریکه در الکترولیت‌های غیرروئین کلرید سدیم و کلریدپتاسیم خالص و ترکیبی، عدم تشکیل لایه اکسیدی روئین در ماشینکاری ECM در لبه قطعه-کار باعث افزایش شار شدت جریان سرگردان در ناحیه گپ کناری شده و بدین طریق منجر به افزایش مقدار گپ کناری می شود.

همچنین همانطوریکه در شکل‌های 10 و 11 مشاهده می‌گردد، در تمامی الکترولیت‌ها، با افزایش شدت جریان مقدار گپ کناری کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می توان اینگونه بیان نمود که با افزایش شدت جریان، سرعت واکنش‌ها در گپ ماشینکاری، افزایش یافته و در نتیجه محصولات حاصل از واکنش‌ها (هیدرواکسیدهای فلزی (لجن) و نمک‌ها فلزی) نیز افزایش می‌یابد

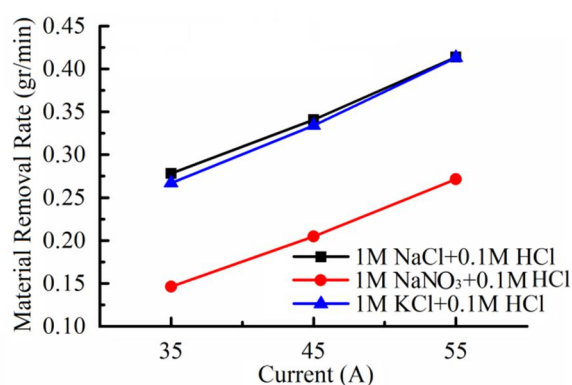


Fig. 6 Material removal rate variations to the change of current in combined sodium chloride, sodium nitrate and potassium chloride electrolytes with hydrochloric acid

شکل 6 تغییرهای نرخ براده برداری نسبت به شدت جریان در الکترولیت‌های ترکیبی کلریدسديم، نیترات سدیم و کلرید پتاسیم با اسید هیدروکلریدریک

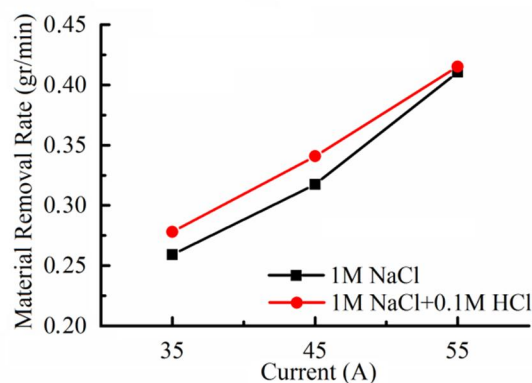


Fig. 7 Material removal rate variations to the change of current in sodium chloride electrolyte and its combined electrolyte with hydrochloric acid

شکل 7 تغییرهای نرخ براده برداری نسبت به شدت جریان در الکترولیت کلریدسديم و الکترولیت ترکیبی آن با اسید هیدروکلریدریک

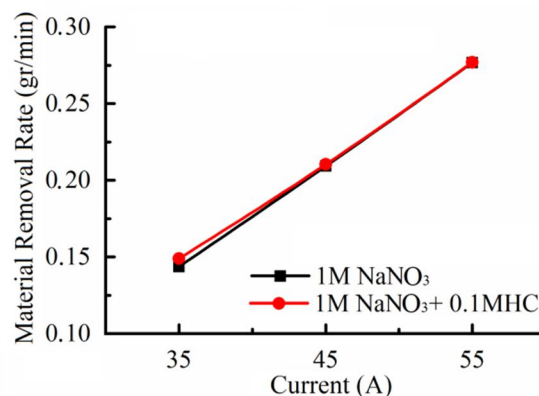


Fig. 8 Material removal rate variations to the change of current in sodium nitrate electrolyte and its combined electrolyte with hydrochloric acid

شکل 8 تغییرهای نرخ براده برداری نسبت به شدت جریان در الکترولیت نیترات-سدیم و الکترولیت ترکیبی آن با اسید هیدروکلریدریک

الکترولیت‌های کلرید سدیم، کلریدپتاسیم و نیترات سدیم 1 مولاریته، غلظت آنیون کلر (Cl^-) 0.1 مول افزایش می‌یابد اما غلظت آنیون هیدروکسیل (OH^-) بدلیل واکنش با کاتیون‌های پروتون (H^+) و تشکیل مولکول آب تا نزدیکی

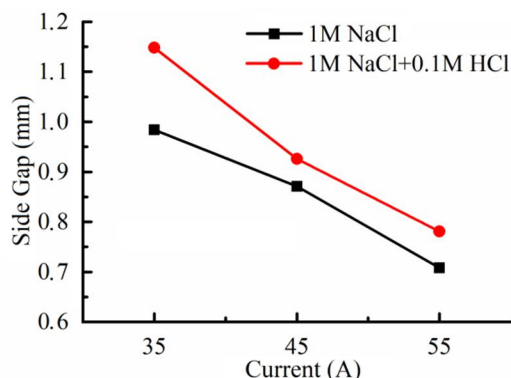


Fig. 12 Side gap variations to the change of current in sodium chloride electrolyte and its combined electrolyte with hydrochloric acid

شکل 12 تغییرهای گپ کناری نسبت به شدت جریان در الکترولیت کلرید سدیم و الکترولیت ترکیبی آن با اسید هیدروکلریدیک

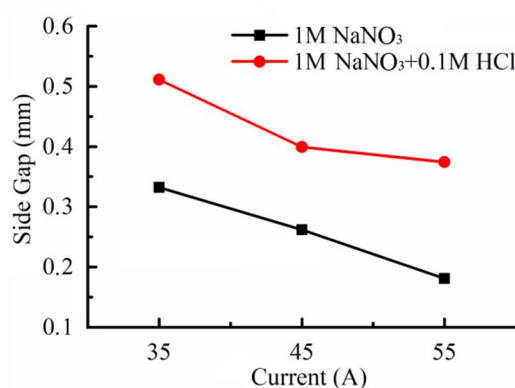


Fig. 13 Side gap variations to the change of current in sodium nitrate electrolyte and its combined electrolyte with hydrochloric acid

شکل 13 تغییرهای گپ کناری نسبت به شدت جریان در الکترولیت نیترات سدیم و الکترولیت ترکیبی آن با اسید هیدروکلریدیک

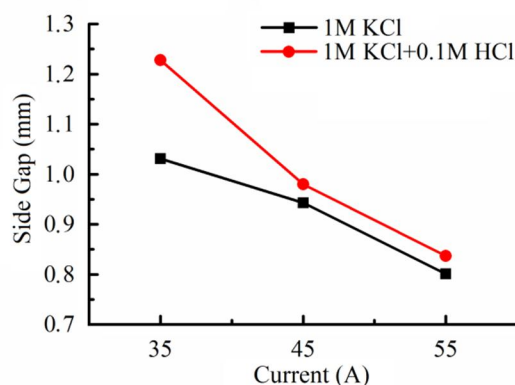


Fig. 14 Side gap variations to the change of current in potassium chloride electrolyte and its combined electrolyte with hydrochloric acid

شکل 14 تغییرهای گپ کناری نسبت به شدت جریان در الکترولیت کلرید پتاسیم و الکترولیت ترکیبی آن با اسید هیدروکلریدیک

ترکیبی دیگر بیشتر است. دلیل این امر را می‌توان چنین بیان نمود که با افزودن 0.1 مولار اسید هیدروکلریدیک به الکترولیت نیترات سدیم، یون-های Cl^- موجود در الکترولیت، بعلت خاصیت تهاجمی که دارند، باعث

[19،16]. افزایش محصولات حاصل از واکنش‌ها در منطقه ماشینکاری باعث می‌گردد که مقدار رسانایی الکترولیت در منطقه گپ کناری بدلیل عدم باردار بودن این محصولات، در مقایسه با شدت جریان پایین‌تر، کاهش یابد. بنابراین پایین بودن مقدار رسانایی الکترولیت در شدت جریان‌های بالا، بدلیل تشکیل بیشتر محصولات حاصل از واکنش نسبت به شدت جریان پایین، در منطقه گپ کناری باعث کاهش مقدار شار شدت جریان سرگردان در منطقه گپ کناری و در نتیجه کاهش مقدار گپ کناری در مقایسه با شدت جریان پایین تر می‌گردد.

شکل‌های 12 تا 14 تأثیر الکترولیت ترکیبی 0.1 مولار اسید هیدروکلریدیک با الکترولیت‌های کلرید سدیم، نیترات سدیم و کلرید پتاسیم در مقایسه با الکترولیت‌های خالص آن‌ها بر روی گپ کناری را نشان می‌دهند. همانطور که ملاحظه می‌گردد، افزودن 0.1 مولار اسید هیدروکلریدیک به الکترولیت‌های مورد مطالعه باعث افزایش مقدار گپ کناری در مقایسه با الکترولیت خالص آن‌ها می‌شود. به نظر می‌رسد که دلیل این امر افزایش رسانایی الکترولیت‌های ترکیبی در مقایسه با الکترولیت‌های خالص باشد. همچنین از شکل‌های 12 تا 14 مشاهده می‌گردد که درصد افزایش مقدار گپ کناری در الکترولیت ترکیبی نیترات سدیم نسبت به دو الکترولیت

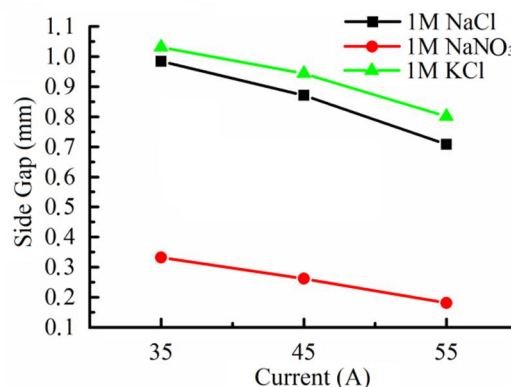


Fig. 10 Side gap variations to the change of current in sodium chloride, sodium nitrate and potassium chloride electrolytes at the concentration of 1 Molarity

شکل 10 تغییرهای گپ کناری نسبت به شدت جریان در الکترولیت‌های کلرید سدیم، نیترات سدیم و کلرید پتاسیم در غلظت 1 مولار

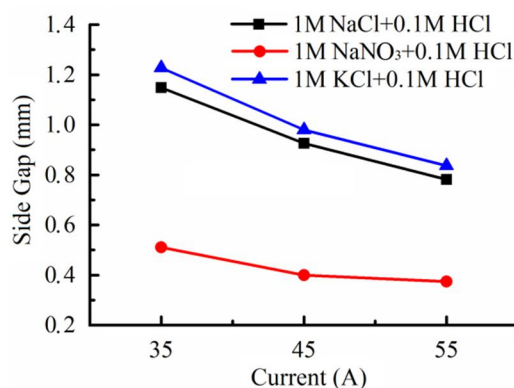


Fig. 11 Side gap variations to the change of current in combined sodium chloride, sodium nitrate and potassium chloride electrolytes with hydrochloric acid

شکل 11 تغییرهای گپ کناری نسبت به شدت جریان در الکترولیت‌های ترکیبی کلرید سدیم، نیترات سدیم و کلرید پتاسیم با اسید هیدروکلریدیک

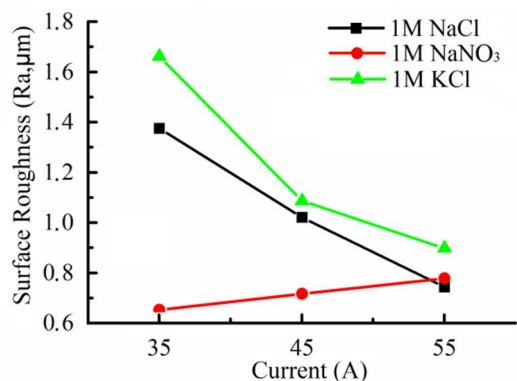


Fig. 15 Surface roughness variations to the change of current in sodium chloride, sodium nitrate and potassium chloride electrolytes at the concentration of 1 Molarity

شکل 15 تغییرهای زبری سطح نسبت به شدت جریان در الکترولیت‌های کلرید سدیم، نیترات سدیم و کلرید پتاسیم در غلظت 1 مولار

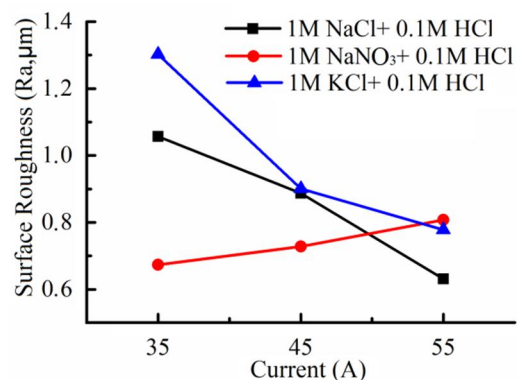


Fig. 16 Surface roughness variations to the change of current in combined sodium chloride, sodium nitrate and potassium chloride electrolytes with hydrochloric acid

شکل 16 تغییرهای زبری سطح نسبت به شدت جریان در الکترولیت‌های ترکیبی کلرید سدیم، نیترات سدیم و کلرید پتاسیم با اسید هیدروکلرید

الکترولیت کلرید سدیم بدلیل رسوب بیشتر محصولات بر روی سطح آند و در نتیجه افزایش مقدار زبری سطح قطعه کار ماشینکاری شده می‌گردد.

شکل 17 نتایج مربوط به مقدار زبری سطح بدست آمده برای الکترولیت‌های نیترات سدیم و ترکیب آن با 0.1 مولار اسید هیدروکلرید را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، مقدار زبری سطح در الکترولیت ترکیبی نسبت به الکترولیت خالص افزایش یافته است. دلیل این پدیده را می‌توان اینگونه بیان نمود که یون‌های Cl^- که بدلیل افزودن 0.1 مولار اسید هیدروکلرید در داخل محلول الکترولیت ترکیبی وجود می‌آیند، به لایه روئینی که بر روی سطح فولاد در حضور یون‌های NO_3^- ایجاد شده، حمله موضعی³ می‌نمایند که این موضوع باعث انحلال موضعی لایه روئین می‌شود. انحلال موضعی این لایه به دلیل حمله غیریکنواخت⁴ یون‌های Cl^- باعث ایجاد شرایط انحلال ناهمگن تر و حفره‌ای شدن سطح قطعه کار نسبت به الکترولیت نیترات سدیم خالص می‌شود، این عامل نیز منجر به افزایش مقدار زبری سطح در الکترولیت ترکیبی می‌گردد [9,20].

شکل‌های 18 و 19 نتایج مربوط به مقدار زبری سطح بدست آمده برای الکترولیت‌های کلرید سدیم و کلرید پتاسیم و الکترولیت ترکیبی آن‌ها با 0.1

شکست موضعی لایه اکسیدی روئین در منطقه گپ کناری می‌شوند. شکست این لایه منجر به افزایش شار شدت جریان سرگردان در این منطقه و در نتیجه افزایش انحلال ناخواسته می‌شود که این موضوع هم باعث افزایش مقدار گپ کناری می‌شود [20,42].

3-3- بررسی تأثیر جنس الکترولیت بر روی زبری سطح در شدت جریان‌های مختلف

شکل‌های 15 و 16 تأثیر جنس الکترولیت‌های مختلف را بر روی زبری سطح در شدت جریان‌های متفاوت نشان می‌دهند. همانگونه که مشاهده می‌شود کمترین مقدار زبری سطح در الکترولیت ترکیبی کلرید سدیم با اسید هیدروکلرید در شدت جریان 55 A و بیشترین مقدار زبری سطح در الکترولیت کلرید پتاسیم در شدت جریان 35 A بدست آمده است.

باتوجه به نتایج بدست آمده، مشاهده می‌شود که مقدار زبری سطح در الکترولیت‌های کلرید سدیم و کلرید پتاسیم و ترکیب آن‌ها با 0.1 مولار اسید هیدروکلرید با افزایش شدت جریان کاهش می‌یابد، این درحالی است که در الکترولیت نیترات سدیم و ترکیب آن با 0.1 مولار اسید هیدروکلرید با افزایش شدت جریان، افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان چنین بیان نمود که در طول ماشینکاری با الکترولیت کلرید سدیم و کلرید پتاسیم و الکترولیت ترکیبی آن‌ها با اسید هیدروکلرید، متناسب با افزایش چگالی جریان، بر روی سطح قطعه کار لایه نمکی شلی¹ شکل می‌گیرد [21,22]. این لایه نمکی در چگالی جریان‌های بالاتر باعث توزیع یکنواخت‌تر جریان ماشینکاری در سطح قطعه کار می‌شود. توزیع یکنواخت جریان ماشینکاری در سطح قطعه کار باعث انحلال همگن و بهبود صافی سطح قطعه کار در چگالی جریان‌های بالاتر می‌شود [21-23]. معادله (8) رابطه بین غلظت و ضخامت لایه نمکی را با چگالی جریان نشان می‌دهد. در الکترولیت‌های نیترات سدیم و ترکیب آن با 0.1 مولار اسید هیدروکلرید در چگالی جریان‌های پایین ($0-5 A/cm^2$) یک لایه روئین بر روی سطح قطعه کار تشکیل می‌شود. این لایه در چگالی جریان‌های $5-35 A/cm^2$ (محدوده فراروئین)، متناسب با چگالی جریان، بصورت منقطع از سطح قطعه کار جدا می‌شود. افزایش مقدار چگالی جریان در این ناحیه باعث یک انحلال ناهمگن و حفره‌ای² شدن سطح ماشینکاری و افزایش مقدار زبری سطح می‌شود [14,2].

$$i = n F D \frac{C_{sat}}{\delta} \quad (8)$$

که در معادله (8)، i چگالی جریان (A/cm^2)، n تعداد الکترون مبادله شده، F ثابت فارادی (96500K)، D ضریب انتشار (cm^2/s)، C_{sat} غلظت نمک در سطح (M) و δ ضخامت لایه نمکی (Cm) می‌باشد.

همچنین شکل‌های 15 و 16 نشان می‌دهند که در تمامی شدت جریان‌ها مقدار زبری سطح بدست آمده برای الکترولیت کلرید پتاسیم بیشتر از الکترولیت کلرید سدیم می‌باشد. به نظر می‌رسد علت این اختلاف، تفاوت هدایت الکتریکی این دو الکترولیت که بدلیل تحرک یونی بالای یون K^+ نسبت به یون Na^+ است، می‌باشد. بالا بودن هدایت الکتریکی الکترولیت باعث افزایش سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی در منطقه ماشینکاری می‌شود که این امر منجر به افزایش محصولات حاصل از واکنش در این ناحیه می‌گردد [19]. بالا بودن حجم محصولات حاصل از واکنش در منطقه ماشینکاری با الکترولیت کلرید پتاسیم باعث انحلال ناهمگن تر نسبت به

3- Localized attack
4- Non-uniform attack

1- Loselly Salt Layer
2- Pitting

قطعه کار در طول فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی و بوجود آمدن شرایط انحلال همگن تر در الکترولیت‌های ترکیبی نسبت به الکترولیت‌های خالص بیان نمود. بطوریکه با افزودن 0.1 مولاریته اسید هیدروکلریدریک به الکترولیت‌های کلرید سدیم و کلرید پتاسیم بر اساس واکنش (9) یون‌های هیدروکسیل با یون‌های H^+ حاصل از افزودن اسید هیدروکلریدریک در داخل محلول الکترولیت وارد واکنش شده و تبدیل به مولکول آب می‌شوند. در این شرایط شکل‌گیری هیدروکسیدهای فلزی کاهش یافته و تنها مربوط به تجزیه الکتروشیمیایی مولکول‌های آب در منطقه ماشینکاری می‌شود.



شکل 20 شماتیک نحوه تغذیه الکترولیت به گپ ماشینکاری و شکل 21 موقعیت‌های زبری سطح اندازه‌گیری شده از مرکز قطعه کار را نشان می‌دهند. همچنین شکل‌های 22 تا 27 تغییرهای زبری سطح قطعه کار را نسبت به فاصله از مرکز قطعه کار، برای الکترولیت‌های مختلف نشان می‌دهند.

همانطور که مشاهده می‌گردد در الکترولیت‌های کلریدسدیم و کلریدپتاسیم خالص و ترکیبی، مقدار زبری سطح با فاصله گرفتن از مرکز قطعه کار به سمت لبه‌های کناری در تمامی شدت جریان‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان اینگونه بیان نمود که در طول فرآیند، الکترولیت تمیز (تصفیه شده) از قسمت میانی قطعه کار وارد منطقه ماشینکاری می‌شود. هرچه الکترولیت از سمت مرکز قطعه کار به سمت لبه کناری آن حرکت می‌کند به همان نسبت حجم محصولات حاصل از واکنش در محلول الکترولیت افزایش می‌یابد. افزایش این محصولات و ته‌نشینی آن‌ها بر روی سطح قطعه کار متناسب با فاصله از مرکز قطعه کار می‌باشد که این موضوع باعث بوجود آمدن شرایط انحلال ناهمگن تر متناسب با فاصله از مجرای تغذیه الکترولیت تمیز می‌گردد. شرایط انحلال ناهمگن تر باعث بوجود آمدن یک ماشینکاری نامنظم و افزایش زبری سطح قطعه کار می‌گردد [19، 24].

همچنین از شکل‌های 22 و 25 مشاهده می‌شود که در الکترولیت‌های نیترات سدیم خالص و ترکیبی مقدار زبری سطح از مرکز قطعه کار به سمت لبه‌های کناری در تمامی شدت جریان‌ها از یک الگوی معینی پیروی نمی‌کند. به نظر می‌رسد دلیل این امر شکست ناهمگن و موضعی لایه روئین در سطح قطعه کار می‌باشد که باعث بوجود آمدن زبری سطح متفاوتی در سطح قطعه کار ماشینکاری شده می‌گردد [14، 22].

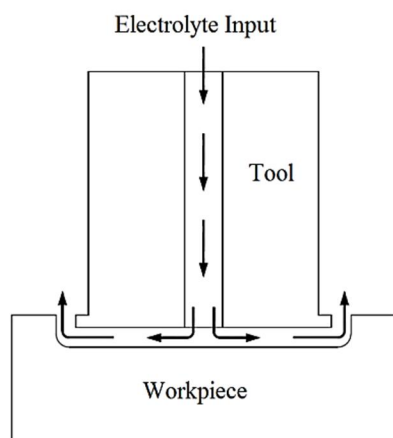


Fig. 20 Schematic fig. of the electrolyte feeding to the machining gap

شکل 20 شماتیک تغذیه الکترولیت به گپ ماشینکاری

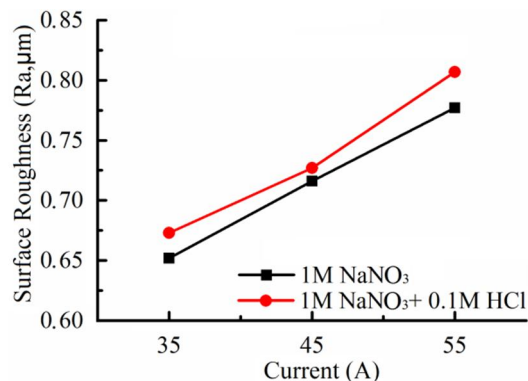


Fig. 17 Surface roughness variations to the change of current in sodium nitrate electrolyte and its combined electrolyte with hydrochloric acid

شکل 17 تغییرهای زبری سطح نسبت به شدت جریان در الکترولیت نیترات سدیم و الکترولیت ترکیبی آن با اسید هیدروکلریدریک

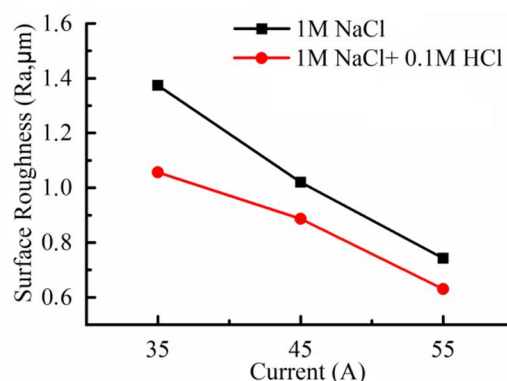


Fig. 18 Surface roughness variations to the change of current in sodium chloride electrolyte and its combined electrolyte with hydrochloric acid

شکل 18 تغییرهای زبری سطح نسبت به شدت جریان در الکترولیت کلریدسدیم و الکترولیت ترکیبی آن با اسید هیدروکلریدریک

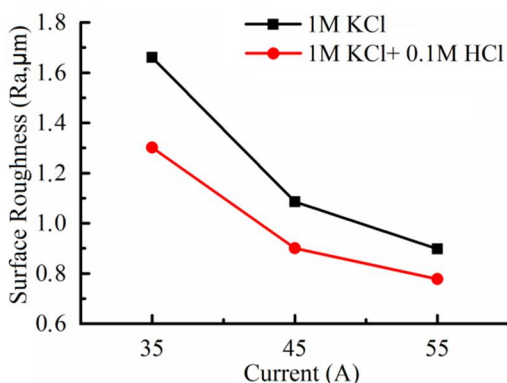


Fig. 19 Surface roughness variations to the change of current in potassium chloride electrolyte and its combined electrolyte with hydrochloric acid

شکل 19 تغییرهای زبری سطح نسبت به شدت جریان در الکترولیت کلرید پتاسیم و الکترولیت ترکیبی آن با اسید هیدروکلریدریک

مولاریته اسید هیدروکلریدریک را نشان می‌دهند. چنانچه مشاهده می‌شود مقدار زبری سطح در الکترولیت‌های ترکیبی کلریدسدیم و کلریدپتاسیم از الکترولیت خالص آن‌ها کمتر می‌باشد. علت این امر را می‌توان کاهش شکل‌گیری هیدرواکسیدهای فلزی (لجن) و ته‌نشینی آن‌ها بر روی سطح

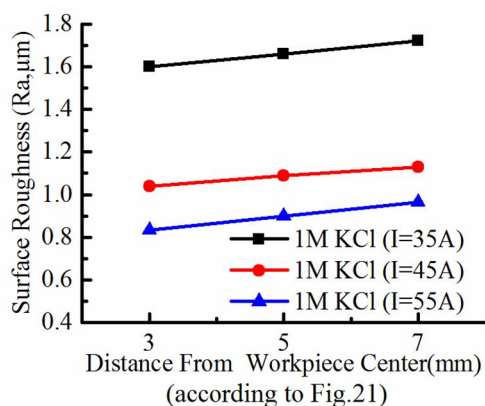


Fig. 24 Surface roughness variations to distance from workpiece center for the 1 Molarity potassium chloride electrolyte in the different currents

شکل 24 تغییرهای زبری سطح نسبت به فاصله از مرکز قطعه کار برای الکترولیت کلرید پتاسیم 1 مولارینه در شدت جریان های مختلف

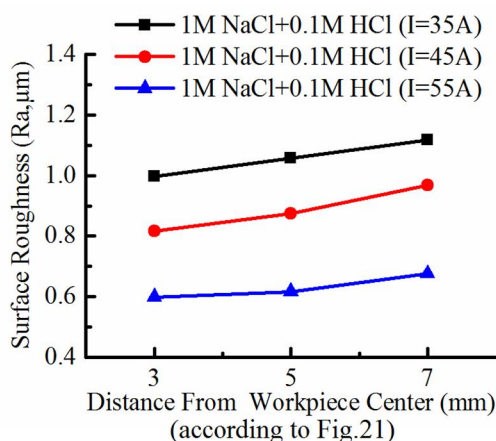


Fig. 25 Surface roughness variations to distance from workpiece center for the combined sodium chloride electrolyte with hydrochloric acid in the different currents

شکل 25 تغییرهای زبری سطح نسبت به فاصله از مرکز قطعه کار برای الکترولیت کلرید سدیم ترکیبی با اسید هیدروکلریک در شدت جریان های مختلف

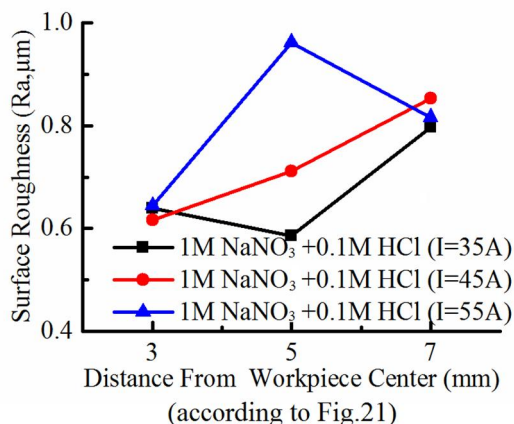


Fig. 26 Surface roughness variations to distance from workpiece center for the combined sodium nitrate electrolyte with hydrochloric acid in the different currents

شکل 26 تغییرهای زبری سطح نسبت به فاصله از مرکز قطعه کار برای الکترولیت نیترات سدیم ترکیبی با اسید هیدروکلریک در شدت جریان های مختلف

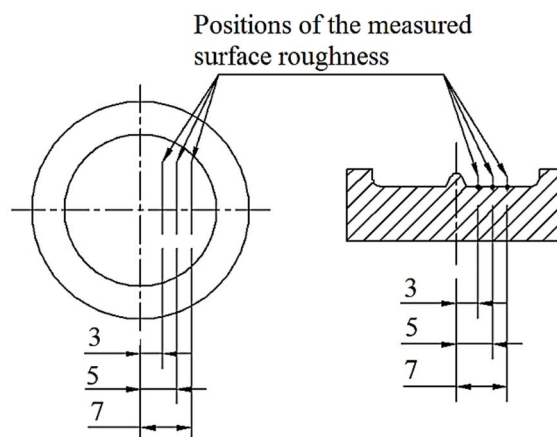


Fig. 21 Positions of the measured surface roughness from the workpiece center

شکل 21 موقعیت های زبری سطح اندازه گیری شده از مرکز قطعه کار

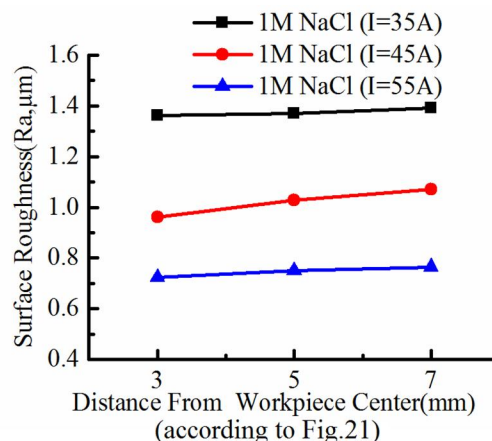


Fig. 22 Surface roughness variations to distance from workpiece center for 1 Molarity sodium chloride electrolyte in the different currents

شکل 22 تغییرهای زبری سطح نسبت به فاصله از مرکز قطعه کار برای الکترولیت کلرید سدیم 1 مولارینه در شدت جریان های مختلف

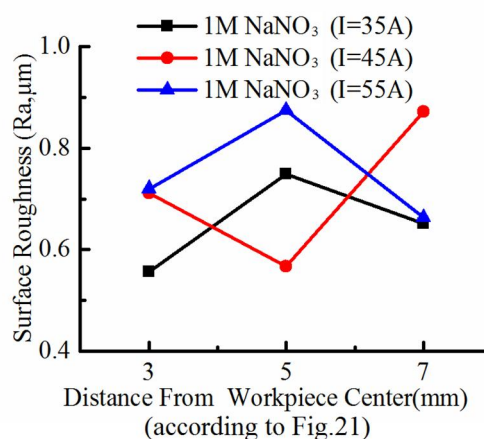


Fig. 23 Surface roughness variations to distance from workpiece center for the 1 Molarity sodium nitrate electrolyte in the different currents

شکل 23 تغییرهای زبری سطح نسبت به فاصله از مرکز قطعه کار برای الکترولیت نیترات سدیم 1 مولارینه در شدت جریان های مختلف

مستقر در پارک علم و فناوری آذربایجان شرقی که ما را در انجام این پژوهش یاری نموده اند، صمیمانه تشکر و سپاسگذاری می‌گردد.

6- مراجع

- [1] S. Ayyappan, K. Sivakumar, Experimental investigation on the performance improvement of electrochemical machining process using oxygen-enriched electrolyte, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, No. 1, pp. 479-487, 2014.
- [2] L. Tang, B. Li, S. Yang, Q. Duan, B. Kang, The effect of electrolyte current density on the electrochemical machining S-03 material, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, No. 9, pp. 1825-1833, 2013.
- [3] V. K. Jain, S. Murugan, Investigations into the effect of cathode material on temperature distribution during electrochemical machining, *International Journal of Production Research*, Vol. 24, No. 2, pp. 439-450, 1986.
- [4] L. Tang, Y.F. Guo, Experimental Study of Special Purpose Stainless Steel on Electrochemical Machining of Electrolyte Composition, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 28, No. 4, pp. 457-462, 2013.
- [5] N. Schubert, M. Schneider, A. Michaelis, Electrochemical Machining of cemented carbides, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 47, No. 1, pp. 54-60, 2014.
- [6] J. Bannard, The use of surface-active additives in electrochemical machining electrolytes, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 4, No. 2, pp. 117-124, 1974.
- [7] R. Thanigaivelana, R. M. Arunachalamb, B. Karthikeyan, P. Loganathan, Electrochemical micromachining of stainless steel with acidified sodium nitrate electrolyte, *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*, Amsterdam: Elsevier, Vol. 6, pp. 351 – 355, 2013.
- [8] J. P. Hoare, K. W. Mao, A. J. Wallace, The electrochemical machining of mild steel in NaBrO₃ solutions, *Corrosion Science*, Vol. 12, No. 7, pp. 571-578, 1972.
- [9] K. W. Mao, J. P. Hoare, The anodic dissolution of mild steel in solutions containing both Cl⁻ and NO₃⁻ ions, *Corrosion Science*, Vol. 13, No. 10, pp. 799 – 803, 1973.
- [10] M. A. Laboda, M. L. Mcmillan, A new electrolyte for electrochemical machining .I. developmental studies, *Electrochemical Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 340- 346, 1967.
- [11] H. R. Asgari Bidhandi, The effect of electrolyte and voltage of electrochemical of the Ni- 50%Ti intermetallic compounds, *New processes in materials engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 69-77, 2012. (in Persian)
- [12] M. Robson Wright, *An Introduction to Aqueous Electrolyte Solutions*, pp. 457-474, England: Wiley, 2007.
- [13] J. Mofidi, *Principles of Electrochemistry*, pp. 67-71, Tehran: Tehran University Press, 2008. (in Persian)
- [14] T. Wagner, *High rate electrochemical dissolution of ironbased alloys in NaCl and NaNO₃ electrolytes*, PhD Thesis, University of Stuttgart, Stuttgart, 2002.
- [15] A. J. Bard, L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods Fundamentals and Applications*, Second Edition, pp. 1-9, New York: Wiley, 2001.
- [16] S. S. Uttarwar, Dr. I. K. Chopde, Study of Influence of Electrochemical Process Parameters on the Material Removal Rate and Surface Roughness of SS AISI 304, *International Journal Of Computational Engineering Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 189-197, 2013.
- [17] W. Wang, D. Zhu, N.S. Qu, S.F. Huang, X.L. Fang, Electrochemical drilling with vacuum extraction of electrolyte, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 2, pp. 238-244, 2010.
- [18] D. Zhu, H. Y. Xu, Improvement of electrochemical machining accuracy by using dual pole tool, *Journal of Material processing Technology*, Vol. 129, No. 1-3, pp. 15-18, 2002.
- [19] S. K. Sorkhel, B. Bhattacharyya, Parametric control for optimal quality of the workpiece surface in ECM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 40, No. 3-4, pp. 271-286, 1994.
- [20] D. L. Pramanik and A. Chattopadhyay, Selection of the optimum electrolyte composition and flow rate for machining a particular

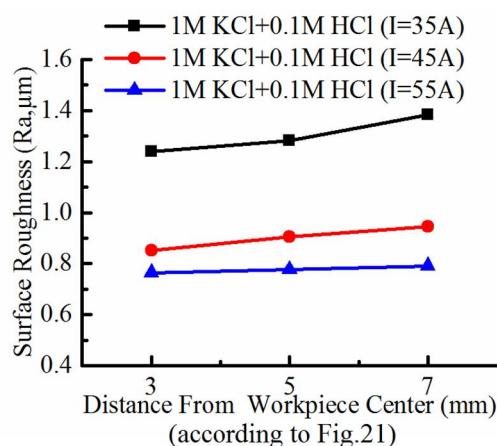


Fig. 27 Surface roughness variations to distance from workpiece center for the combined potassium chloride electrolyte with hydrochloric acid in the different currents

شکل 27 تغییرهای زبری سطح نسبت به فاصله از مرکز قطعه کار برای الکترولیت کلرید پتاسیم ترکیبی با اسید هیدروکلریدریک در شدت جریان های مختلف

4- نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر جنس الکترولیت بر روی مشخصه‌های ماشینکاری، نرخ براده برداری، صافی سطح و گپ کناری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که جنس الکترولیت پارامتری مهم در خروجی فرآیند ECM بوده و انتخاب صحیح آن موجب بهبود مشخصه‌های خروجی فرآیند می‌گردد.

در زیر نتایج حاصل از این تحقیق بطور خلاصه ارائه می‌گردد:

- 1- در فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی نرخ براده‌برداری در الکترولیت‌های کلرید سدیم و کلرید پتاسیم بیشتر از نیترات سدیم در شرایط یکسان می‌باشد.
- 2- گپ کناری در الکترولیت نیترات سدیم کمتر از الکترولیت‌های کلرید-سدیم و کلرید پتاسیم در شرایط یکسان می‌باشد. همچنین در این شرایط، گپ کناری در الکترولیت کلرید پتاسیم بیش از کلرید سدیم می‌باشد.
- 3- در الکترولیت‌های کلرید سدیم و کلرید پتاسیم، زبری سطح با افزایش شدت جریان کاهش می‌یابد، اما در الکترولیت نیترات سدیم مقدار آن با افزایش شدت جریان، افزایش می‌یابد.
- 4- در الکترولیت کلرید سدیم، زبری سطح کمتر از الکترولیت کلرید پتاسیم در شرایط یکسان می‌باشد.

5- افزودن 0.1 مولار اسید هیدروکلریدریک به الکترولیت‌های کلرید سدیم، نیترات سدیم و کلرید پتاسیم باعث افزایش جزئی در نرخ براده برداری و افزایش گپ کناری نسبت به الکترولیت خالص آن‌ها می‌شود. همچنین زبری سطح در الکترولیت‌های ترکیبی کلرید سدیم و کلرید پتاسیم در مقایسه با الکترولیت خالص آن‌ها کاهش می‌یابد، اما در الکترولیت نیترات سدیم ترکیبی در مقایسه با الکترولیت خالص آن افزایش می‌یابد.

6- براساس نتایج این پژوهش، شرایط بهینه فرآیند با ثابت نگهداشتن پارامترهای ورودی فرآیند (شدت جریان 55 آمپر، ولتاژ، نرخ جریان سیال، فشار پشت الکترولیت، دمای الکترولیت و گپ تنظیمی اولیه) مقدار نرخ براده برداری بیشینه، گپ کناری کمینه و زبری سطح حداقل به ترتیب توسط الکترولیت‌های کلرید پتاسیم ترکیبی، نیترات سدیم خالص و کلرید سدیم ترکیبی بدست آمد.

5- تقدیر و تشکر

از همکاری‌های بی‌دریغ مدیریت محترم شرکت نوین اندیش سپند آرام

- Electrochimica Acta*, Vol. 47, No. 1-2, pp. 235-241, 2001.
- [23] M. Datta, Anodic dissolution of metals at high rates, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 37, No. 2, pp. 207-226, 1993.
- [24] S. H. Choi, B. H. Kim, H. S. Shin, D. K. Chung, Ch. N. Chua, Analysis of the electrochemical behaviors of WC-Co alloy for micro ECM, *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 213, No. 4, pp. 621-630, 2013.
- high alloy steel, *Precision Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 44-45, 1982.
- [21] H. A. G. El-Hofy, *Advanced Machining processes*, pp. 93-94, New York: McGraw-Hill, 2005.
- [22] T. Haisch, E. Mittemeijer, J. W. Schultze, Electrochemical machining of the steel 100Cr6 in aqueous NaCl and NaNO₃ solutions: microstructure of surface films formed by carbides,