



Semnan University

Applied Chemistry Today

Journal homepage: <https://chemistry.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2981-2437



Research Article

Diffusion Effect of Brass Electrode Tool in Electrical Discharge Machining on the Electrochemical and Structural Characteristics of Carbon Steel Workpiece

Mozhgan Karimi, Ahmad Soleymanpour*^{ORCID}, Seyyed Ahmad Nabavi Amri
 School of Chemistry, Damghan University, Damghan, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 27/Nov/2022

Revised: 11/June/2023

Accepted: 02/Jul/2023

Keywords:

Electrical discharge machining, Carbon steel, Copper diffusion, Carbon diffusion, Electrochemical corrosion.

ABSTRACT

In the electric discharge machining process, the material is separated from the surface of the work piece by an electric spark, and in the presence of the dielectric material and tool electrode, changes are made on the surface of the work piece. In this project, we investigated the effect of dielectric material and brass tool electrode diffusion on the surface of carbon steel workpiece by means of quantmetric analysis, X-ray diffraction and electrochemical impedance spectroscopy. The effect of the parameters such as electric current intensity (I), pulse on time (ton), pulse off time (toff) and machining time (τ) on the composition of work peace, microstructure and electrochemical corrosion of machined work peace, were investigated. The results of quantmetric analysis showed that with the increase of machining parameters, the amount of diffused copper (from brass tool electrode) and carbon (from pyrolysis of flashing dielectric material) on the surface of machined carbon steel was increased. X-ray diffraction results confirmed that the formation of different phases such as Fe_{1.92}C_{0.08}, Cu₄, Cu₂ and Fe₂ on the surface of workpiece, which was accordance with the quantmetric results. Electrochemical studies showed that during the EDM process, the electrochemical corrosion resistance was increased.

DOI: <https://doi.org/10.22075/CHEM.2023.29119.2124>

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

*.Corresponding author: Associate Professor of Analytical Chemistry. E-mail address: soleymanpour@du.ac.ir

How to cite this article: Karimi, M., Soleymanpour, A., & Nabavi Amri, S. A. (2024). Diffusion effect of brass electrode tool in electrical discharge machining on the electrochemical and structural characteristics of carbon steel workpiece. *Applied Chemistry Today*, 19(70), 261-274. (in Persian)

اثر میزان نفوذ الکتروود ابزار برنج در ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر خصوصیات

الکتروشیمیایی و ساختاری قطعه کار فولاد کربنی

مژگان کریمی، احمد سلیمان پور*، سید احمد نبوی امری

دانشکده شیمی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶	در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، مواد از سطح قطعه کار توسط جرقه الکتریکی جدا شده و در حضور ماده دی الکتریک و الکتروود ابزار، بر سطح قطعه کار تغییراتی ایجاد می شود. در این پروژه، به بررسی اثر پدیده نفوذ مواد حاصل از دی الکتریک و الکتروود ابزار برنج بر سطح قطعه کار فولاد کربنی به وسیله روش های آنالیز کوانتومتری، پراش پرتو X و طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی پرداخته می شود. اثر پارامترهایی نظیر شدت جریان الکتریکی (I)، زمان پالس روشن (t _{on})، زمان پالس خاموش (t _{off}) و زمان ماشینکاری (τ) بر ترکیب، میکروساختار و خوردگی الکتروشیمیایی قطعه کار ماشینکاری شده مطالعه شد. نتایج آنالیز کوانتومتری نشان داد که با افزایش پارامترهای ماشینکاری، میزان نفوذ مس (از الکتروود ابزار برنج) و کربن (از پیرولیز ماده دی الکتریک)، بر سطح فولاد کربنی ماشینکاری شده، افزایش می یابند. نتایج پراش پرتو X، حاکی از تشکیل فازهای مختلف نظیر Fe _{۱/۲} C، Fe _۲ C، Cu _۲ و Fe _۲ در سطح قطعه کار می باشد که در تطابق با نتایج کوانتومتری بود. مطالعات الکتروشیمیایی نشان داد که در حین EDM مقاومت خوردگی الکتروشیمیایی افزایش می یابد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱	
کلمات کلیدی:	
ماشینکاری تخلیه الکتریکی (EDM)، فولاد کربنی، نفوذ مس، نفوذ کربن، خوردگی الکتروشیمیایی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/CHEM.2023.29119.2124>

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

۱- مقدمه

مطالعه خوردگی یک تقاضای بسیار جدی و اجتناب ناپذیر برای بیشتر صنایع است. خوردگی حفره‌ای پدیده‌ای است که از طریق واکنش الکتروشیمیایی از سطح فلز شروع می شود. بنابراین مطالعه سطح فلز پس از ساخت و تولید آن، لازم و ضروری است [۱]. در صنعت ساخت و تولید از روش های متفاوتی برای براده برداری و شکل دهی قطعات استفاده می شود. در بحث تغییر ابعاد، از جمله می توان از ریخته گری [۲]، لایه نشانی (شیمیایی، الکتروشیمیایی و پاشش مذاب تحت پلاسما) [۳-۵]، گرد تراشی (دو بعدی متقارن و نامتقارن) [۶]، CNC (سه بعدی یا بیشتر) [۷]، ماشینکاری شیمیایی و الکتروشیمیایی [۸] و بسیاری روش های دیگر نام برد [۹]. روش ماشینکاری تخلیه الکتریکی (EDM) بدلیل توانایی آن در ساخت و تولید دقیق و با کیفیت قطعات با هندسه ساده و یا پیچیده و با هر درجه از استحکام و سختی و با آستانه تحمل در حد میکرون، دارای مزیت بیشتری نسبت به سایر روش های ماشینکاری است. در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ابتدا با اعمال ولتاژ، یک میدان الکتریکی در فضای بین الکتروود ابزار و قطعه کار، که با ماده سیال دی الکتریک احاطه شده اند، ایجاد می گردد. زمانی که مقاومت الکتریکی دی الکتریک

شکسته شد به طور ناگهانی جریان افزایش می‌یابد، دی‌الکتریک تبخیر می‌شود و کانالی با درجه حرارت بالا (بیش از 10000°C) که به کانال پلاسما معروف است، تشکیل می‌شود و به طور موضعی باعث گرم شدن و ذوب مواد قطعه کار و همچنین الکتروود می‌شود [۱۰]. این افزایش دما بر سطح قطعه کار، گرادپان دمایی ایجاد می‌کند و ترکیب درصد وزنی [۱۱] و خواص مکانیکی [۱۲، ۱۳]، ساختاری [۱۴] و الکتروشیمیایی [۱۵] قطعه کار را تغییر می‌دهد. این تغییرات با پارامترهای ماشینکاری نظیر شدت جریان الکتریکی (I)، زمان روشن (t_{on})، زمان خاموش (t_{off})، زمان ماشینکاری کل (τ) و ولتاژ مدوله شده اعمالی (V)، جنس الکتروود براده برداری و قطعه کار مرتبط است [۱۶]. موری و همکارانش [۱۷] آثاری از مارتنزیت در ماتریکس آستنیت و تشکیل فاز کاربیدی در لایه سطحی قطعه کار فولاد آستنیتی ماشینکاری شده با الکتروود ابزار گرافیتی یافته و گزارش کرده‌اند که علت حضور کربن، ناشی از پیرولیز ماده دی‌الکتریک و الکتروود ابزار است. شبرگردی و همکارانش [۱۸] به مطالعات ساختاری قطعه کار γ -AlTi ماشینکاری شده پرداختند که نتایج پراش پرتو X نشان از حضور کربن و اکسیژن و تشکیل فازهای Ti_3Al و TiC در سطح قطعه کار را داشت. مطالعات کمی راجع به رفتار خوردگی بر نمونه‌های تحت EDM انجام شده است که نشان می‌دهند الکتروودهای ابزار نقش مهمی بر میزان خوردگی قطعه کار دارند. تسای و همکارانش به مطالعه اثر نفوذ کروم موجود در الکتروود ابزار مس ۸۰٪-کروم ۲۰٪ بر سطح قطعه کار فولاد (AISI 1045) ماشینکاری شده پرداختند [۱۹]. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان مقاومت خوردگی فولاد با توجه به انتقال کروم به سطح قطعه کار بهبود یافته است. از طرفی نتانسی و همکارانش [۲۰] نشان دادند که ماشینکاری مواد دندانپزشکی با الکتروود کروم-کبالت، مقاومت در برابر خوردگی سطح قطعه کار را کاهش می‌دهد. ساراوانان و همکارانش [۲۱] ماشینکاری آلیاژهای مختلف آلومینیوم شامل Al 2024-T351 ، 5083-H116 ، 6061-T6 و 7075-T6 با الکتروود مس-روی (برنج) را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نفوذ موضعی مس از الکتروود ابزار بر سطح قطعه کارهای ماشینکاری شده و تشکیل فاز حاوی مس، آن‌ها را دچار خوردگی می‌کند. ساید هام و همکارانش [۲۲] قطعه کار استیل زنگ‌زن ماشینکاری شده با الکتروود گرافیت را در شدت جریان‌های الکتریکی متفاوت ماشینکاری مورد مطالعه قرار دادند. بر طبق تحقیق آن‌ها، با افزایش شدت جریان، میزان نفوذ کربن افزایش یافته و با استیل زنگ‌زن وارد واکنش شده و سه فاز آستنیت (γ)، کاربید M_7C_3 و کاربید M_3C ($M = \text{Fe, Cr}$) بر سطح قطعه کار تشکیل داده و سرعت خوردگی قطعه کار افزایش می‌یابد. بنا بر این می‌توان گفت که با تغییر در ساختار و ترکیب درصد وزنی عناصر، ماهیت قطعه کار تغییر خواهد کرد و در نتیجه، رفتار خوردگی قطعه کار در محیط‌های خورنده نیز متفاوت خواهد شد. مطالعه و بررسی تغییرات ناشی از حرارت ایجاد شده از جرقه الکتریکی بر سطح قطعه کار و بررسی میزان خوردگی این قطعه کار بدلیل اهمیت خوردگی آن در صنعت، حائز اهمیت است.

در این پروژه، به مطالعه خواص الکتروشیمیایی و مکانیکی قطعه کار فولاد کربنی ماشینکاری شده با الکتروود برنج پرداخته شده و تاثیر پارامترهای EDM از جمله شدت جریان ثابت (I)، زمان روشن (t_{on})، زمان خاموشی (t_{off}) و زمان براده برداری (τ) بر این خواص را با کمک آزمایش‌های آنالیز کوانتومتری، پراش پرتو X و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و شرایط ماشینکاری

این مطالعه بر روی فولاد کربنی (بدلیل کثرت استفاده صنعتی، هزینه پایین تولید و خواص مکانیکی خوب [۲۳]) به شکل مکعب مستطیل در ابعاد $30 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ ، الکتروود ابزار برنج با مقطع دایره‌ای با قطر ۱۰ میلی‌متر و مایع دی‌الکتریک پارافین صورت گرفت. در هنگام انجام فرآیند EDM، شدت جریان ثابت است و ولتاژ و فاصله الکتروود ابزار با قطعه کار را دستگاه به طور خودکار تنظیم می‌کند تا در حین براده برداری و قطع اسپارک عملکرد دستگاه یکنواخت بماند و براده برداری به طور موثر انجام گیرد. این توضیحات به بخش ۲-۱ اضافه شد. درصد وزنی ترکیب الکتروود ابزار با استفاده از دستگاه کوانتومتری Foundry Master اندازه‌گیری شد و در جدول ۱ گزارش شده است. ماشینکاری تخلیه الکتریکی با دستگاه Chmer مدل A6040L انجام شد.

جدول ۱- درصد ترکیب وزنی الکتروود ابزار برنج

Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si
۶۲/۴۰۰	۳۳/۷۰۰	۲/۷۲۰	۰/۲۳۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۵	۰/۲۷۸	۰/۳۶۰	۰/۰۰۵
Mg	Cr	Al	S	As	Be	Ag	Co	
<۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۱۸	۰/۰۲۰	۰/۰۰۵	۰/۲۱۶	۰/۰۲۱	

به منظور کاهش هزینه و زمان انجام پروژه از روش طرح آزمایش تاگوچی L_{25} ؛ با کنترل پارامترهای ورودی از قبیل I ، t_{on} ، t_{off} و τ در پنج سطح تغییر؛ (جدول ۲) به مطالعه اثر شدت جریان (۲۵ A و ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵)، زمان روشن ($150 \mu s$ و 125 ، 100 ، 75 ، $50 \mu s$)، زمان خاموش ($25 \mu s$ و 20 ، 15 ، 10 ، 5) و زمان ماشینکاری (16 min و 1 ، 2 ، 4 ، 8) بر میزان تغییر ترکیب درصد وزنی، میکروساختار و مقاومت خوردگی الکتروشیمیایی قطعه کارهای ماشینکاری شده پرداخته شد. در این مقاله، بدلیل حجم بسیار بالای نتایج، صرفاً شرایط بهینه ماشینکاری و بررسی‌های مختلف مربوط به آن گزارش شده است.

۲-۲- تعیین تغییرات سطح

تغییرات سطح ناشی از فرآیند ماشینکاری تحت شرایط EDM و فعل و انفعالات مواد توسط تکنیک‌های آزمایشگاهی مناسب به صورت زیر مشخص شد:

آنالیز کوانتومتری برای تعیین درصد وزنی عناصر قبل و بعد از EDM با استفاده از دستگاه Foundry Master انجام شد. اطلاعات پراش پرتو X مربوط به فاز ترکیبات در قطعات ماشینکاری شده با دستگاه مدل Bruker D8 advance مجهز به کولیماتور Cu α_1 با طول موج 0.15406 nm ، جمع‌آوری شد و با استفاده از نرم‌افزار Highscore Plus آنالیز شد.

جدول ۲- طرح آزمایش تاگوچی با استفاده از آرایه‌های متعامد L۲۵

پارامترهای ورودی				
شماره قطعه کار	شدت جریان (A)	زمان روشن (μ S)	زمان خاموش (μ S)	زمان ماشینکاری (min)
۱	۵	۵۰	۵	۱
۲	۵	۷۵	۱۰	۲
۳	۵	۱۰۰	۱۵	۴
۴	۵	۱۲۵	۲۰	۸
۵	۵	۱۵۰	۲۵	۱۶
۶	۱۰	۵۰	۱۰	۴
۷	۱۰	۷۵	۱۵	۸
۸	۱۰	۱۰۰	۲۰	۱۶
۹	۱۰	۱۲۵	۲۵	۱
۱۰	۱۰	۱۵۰	۵	۲
۱۱	۱۵	۵۰	۱۵	۱۶
۱۲	۱۵	۷۵	۲۰	۱
۱۳	۱۵	۱۰۰	۲۵	۲
۱۴	۱۵	۱۲۵	۵	۴
۱۵	۱۵	۱۵۰	۱۰	۸
۱۶	۲۰	۵۰	۲۰	۲
۱۷	۲۰	۷۵	۲۵	۴
۱۸	۲۰	۱۰۰	۵	۸
۱۹	۲۰	۱۲۵	۱۰	۱۶
۲۰	۲۰	۱۵۰	۱۵	۱
۲۱	۲۵	۵۰	۲۵	۸
۲۲	۲۵	۷۵	۵	۱۶
۲۳	۲۵	۱۰۰	۱۰	۱
۲۴	۲۵	۱۲۵	۱۵	۲
۲۵	۲۵	۱۵۰	۲۰	۴

۲-۳- آزمون خوردگی

آزمایش الکتروشیمیایی قطعه کار فولاد کربنی ماشینکاری شده با روش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) با استفاده از دستگاه پتانسیواستات-گالوانواستات اتولب (Potentiostat/Galvanostat Autolab PGSTAT 30) با پیکربندی سه الکترودی به روش پتانسیل مدار باز (OCP) در پتانسیل تعادلی ۰/۴۴۴۳ ولت انجام شد. میله پلاتین به عنوان الکتروود کمکی، الکتروود کالومل اشباع (SCE) به عنوان الکتروود مرجع و قطعه کار فولاد کربنی ماشینکاری شده به عنوان الکتروود کار استفاده شد. تمام آزمایش‌ها در محلول آبی NaCl (w/w) ۰/۳٪ و در دمای محیط انجام شد. برای اندازه‌گیری EIS، با استفاده از شابلون، 0.64 cm^2 از سطح ماشینکاری شده در معرض محلول الکتروولیت قرار گرفت. اندازه‌گیری EIS با استفاده از یک سیگنال اختلال mV AC ۵ در محدوده ۸ دهک فرکانس از ۰/۰۱ HZ تا ۱ MHz انجام شد و طیف‌های حاصل با استفاده از نرم افزار FRA آنالیز شد.

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- تغییرات شیمیایی

درصد وزنی ترکیبات لایه سطحی قطعه کارهای فولاد کربنی قبل و بعد از ماشینکاری به روش آنالیز کوانتومتری مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۳ نتیجه آنالیز قبل از ماشینکاری و جدول ۴، نتیجه آنالیز بعد از ماشینکاری را نشان می‌دهد.

جدول ۳- درصد ترکیب وزنی قطعه کار فولاد کربنی قبل از ماشینکاری تخلیه الکتریکی

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
۹۸/۷۴۰	۰/۰۹۹	۰/۲۵۲	۰/۷۰۷	۰/۰۳۷	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷
Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	
۰/۰۴۵	<۰/۰۰۱	۰/۰۴۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵	۰/۰۲۵	

به منظور بررسی نقش شدت جریان بر فرآیند ماشینکاری، مقادیر متوسط کربن (ناشی از پیرولیز ماده دی‌الکتریک) و مس (ناشی از الکتروود ابزار برنج) نفوذ کرده در سطح فولاد کربنی، حاصل از آنالیز کوانتومتری محاسبه و در جدول ۵ آورده شده است.

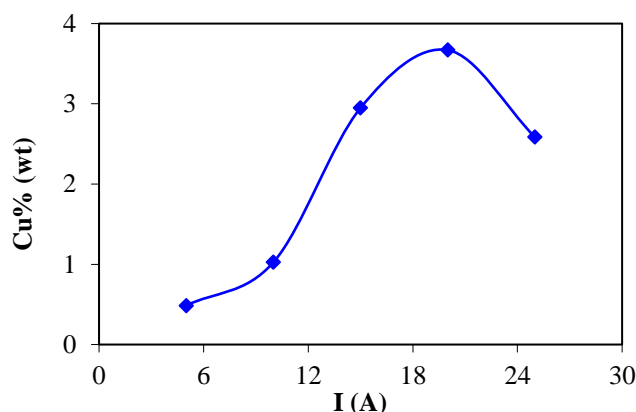
جدول ۴- متوسط میزان کربن و مس در قطعه کار فولاد کربنی در شدت جریان‌های مختلف ماشینکاری

شدت جریان (A)	درصد متوسط کربن	درصد متوسط مس
۵	۰/۶۱۲۴	۰/۴۶۷۲
۱۰	۰/۸۰۱۵	۱/۰۲۵۰
۱۵	۱/۱۹۰۰	۲/۹۴۹۰
۲۰	۱/۰۵۰۴	۳/۶۶۹۰
۲۵	۱/۴۷۴۶	۲/۵۸۵۸

متوسط میزان مس نفوذ کرده در سطح قطعه کار در جریان‌های مختلف (جدول ۴)، در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که میزان نفوذ در سطح با افزایش جریان، روند افزایشی دارد. در شرایط ملایم (مقادیر پائین شدت جریان الکتریکی (I)، زمان روشن (ton)، زمان خاموش (toff) و زمان ماشینکاری (t)) میزان نفوذ مس برابر ۰/۴۶۷۲٪ و در شرایط ماشینکاری سخت (مقادیر بالای شدت جریان الکتریکی (I)، زمان روشن (ton)، زمان خاموش (toff) و زمان ماشینکاری (t)) میزان نفوذ مس برابر ۲/۵۸٪ است. این میزان افزایش مس در سطح قطعه کار، بدلیل نفوذ ماده الکتروود ابزار برنج در حرارت بالای ایجاد شده توسط جرقه الکتریکی می‌باشد [۲۱] بیشترین میزان نفوذ مس در جریان $I=20\text{ A}$ برابر ۳/۶۶۹٪ مشاهده شده است. به نظر می‌رسد که فلز روی موجود در برنج به دلیل نقطه جوش پائین (907°C) [۲۴] تبخیر شده و نتوانسته در قطعه کار بماند. به منظور بررسی نقش شدت جریان بر فرآیند ماشینکاری، مقادیر متوسط کربن (ناشی از پیرولیز ماده دی‌الکتریک) و مس (ناشی از الکتروود ابزار برنج) نفوذ کرده در سطح فولاد کربنی، حاصل از آنالیز کوانتومتری محاسبه و در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- درصد ترکیب وزنی قطعه کارهای فولاد کربنی بعد از ماشینکاری تخلیه الکتریکی با الکتروود برنج

S.N.	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
1	97.929	0.460	0.260	0.680	0.051	0.019	0.009	0.005	0.044	0.040	<0.001	0.455	0.003	0.002	0.003	0.015	0.025
2	97.330	0.870	0.193	0.674	0.047	0.058	0.006	0.005	0.077	0.030	<0.001	0.603	0.002	0.002	0.002	0.060	0.041
3	97.858	0.580	0.260	0.680	0.047	0.020	0.009	0.005	0.057	0.040	<0.001	0.398	0.002	0.002	0.002	0.015	0.025
4	97.145	0.540	0.250	0.690	0.050	0.021	0.009	0.005	0.052	0.393	<0.001	0.487	0.002	0.002	0.002	0.150	0.202
5	97.719	0.600	0.280	0.690	0.058	0.031	0.010	0.005	0.114	0.044	0.001	0.393	0.002	0.003	0.003	0.015	0.032
6	97.786	0.520	0.220	0.570	0.065	0.046	0.007	0.005	0.119	0.035	<0.001	0.549	0.002	0.002	0.002	0.019	0.053
7	96.775	1.400	0.172	0.611	0.084	0.094	0.010	0.010	0.152	0.044	0.010	0.539	0.005	<0.001	0.005	0.039	0.050
8	94.663	1.520	0.210	0.640	0.088	0.094	0.013	0.010	0.026	0.042	0.010	2.480	0.010	0.004	0.005	0.135	0.050
9	97.928	0.380	0.250	0.690	0.051	0.018	0.009	0.005	0.052	0.041	<0.001	0.529	0.002	0.002	0.003	0.015	0.025
10	97.263	0.790	0.220	0.600	0.053	0.042	0.006	0.005	0.083	0.034	<0.001	0.800	0.002	0.002	0.015	0.045	0.040
11	94.240	1.830	0.160	0.650	0.292	0.150	0.014	0.010	0.019	0.053	0.010	2.380	0.010	0.003	0.005	0.104	0.070
12	97.468	0.540	0.240	0.680	0.052	0.038	0.009	0.005	0.056	0.039	<0.001	0.800	0.002	0.002	0.003	0.015	0.051
13	97.447	0.460	0.240	0.680	0.066	0.046	0.009	0.005	0.106	0.039	<0.001	0.799	0.002	0.002	0.015	0.047	0.037
14	96.696	1.060	0.240	0.690	0.087	0.094	0.009	0.005	0.144	0.042	<0.001	0.800	0.003	0.004	0.005	0.045	0.076
15	89.425	2.060	0.220	0.510	0.687	0.150	0.028	0.039	0.028	0.056	0.288	5.670	0.040	0.017	0.005	0.576	0.201
16	97.883	0.200	0.230	0.660	0.056	0.029	0.009	0.005	0.072	0.041	<0.001	0.769	0.002	0.002	0.002	0.015	0.025
17	95.215	1.420	0.190	0.600	0.103	0.137	0.010	0.010	0.010	0.046	0.010	2.040	0.005	0.002	0.005	0.147	0.050
18	86.556	0.830	1.250	0.770	0.800	0.150	0.167	0.003	0.170	0.060	0.972	7.740	0.025	0.011	0.014	0.143	0.339
19	91.817	2.180	0.140	0.630	0.391	0.150	0.017	0.010	0.034	0.065	0.010	4.130	0.015	0.004	0.005	0.282	0.120
20	97.734	0.440	0.230	0.470	0.038	0.029	0.008	0.005	0.081	0.035	<0.001	0.800	0.003	0.003	0.002	0.015	0.107
21	90.217	2.080	0.230	0.520	0.218	0.150	0.010	0.010	0.062	0.057	0.010	6.010	0.005	0.008	0.005	0.202	0.206
22	95.964	1.320	0.190	0.690	0.103	0.128	0.016	0.010	0.012	0.118	0.010	1.260	0.008	0.005	0.005	0.111	0.050
23	97.147	0.780	0.240	0.660	0.052	0.047	0.008	0.005	0.078	0.036	<0.001	0.800	0.002	0.002	0.003	0.015	0.125
24	93.498	2.700	0.170	0.620	0.084	0.098	0.013	0.010	0.020	0.057	0.010	2.550	0.008	0.004	0.005	0.103	0.050
25	97.713	0.490	0.240	0.670	0.064	0.050	0.009	0.005	0.110	0.039	<0.001	0.523	0.002	0.003	0.002	0.015	0.065



شکل ۱- متوسط میزان نفوذ مس در جریان‌های متفاوت ماشینکاری

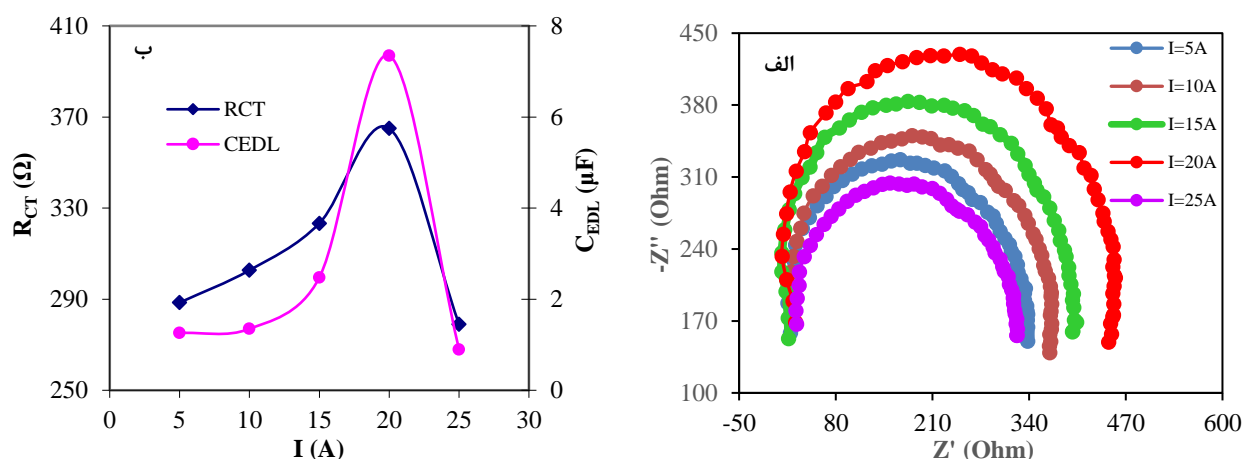
نتایج جدول ۵ نشان می‌دهند که در فرایند ماشینکاری علاوه بر نفوذ مس، تغییر در درصد ترکیب عناصر دیگر، از جمله نفوذ کربن مشاهده می‌شود. میزان کربن از ۰/۰۹۹٪ در نمونه قبل از ماشینکاری (جدول ۳) به مقدار متوسط ۱/۴۷۴۶٪ در شرایط سخت ماشینکاری (جدول ۵) افزایش یافت. این افزایش درصد کربن ناشی از پیرولیز ماده دی‌الکتریک در زمان پاشش می‌باشد [۱۷].

۳-۲- تغییرات میکروساختاری

نتایج حاصل از پراش پرتو X قطعه‌کارهای ماشینکاری شده نشان از حضور مس و کربن بر سطح قطعه‌کار ماشینکاری شده می‌دهند. شکل ۲ طیف‌های پراش پرتو X قبل و بعد از ماشینکاری در شرایط سخت و ملایم را نشان می‌دهد. در شرایط ماشینکاری ملایم، تغییرات ناچیزی بر سطح قطعه‌کار، بدلیل کاهش حرارت ایجاد شده در اثر جرقه الکتریکی، ایجاد شده‌است. در شرایط ماشینکاری سخت، میزان کربن بر سطح قطعه‌کار افزایش یافته و در این وضعیت آهن با کربن واکنش داده و فاز $Fe_{1/92}C_{1/8}$ با ساختار تتراگونال تشکیل شده است. نفوذ کربن از پیرولیز ماده دی‌الکتریک و تشکیل فاز مارتنزیت توسط کوسانیل و همکارانش [۱۲] برای فولاد فریتی ماشینکاری شده، و سایدهوم و همکارانش [۲۱] برای استیل زنگ‌زن ماشینکاری شده گزارش شده است. این نتایج حاکی از آن است که در نمونه‌های ماشینکاری شده، ترکیبی از روی مشاهده نمی‌شود. می‌توان استنتاج کرد که بدلیل افزایش دمای ماشینکاری و نقطه جوش پائین ($907^{\circ}C$) این عنصر، فلز روی تبخیر شده و از محیط خارج می‌شود که این نتیجه در تطابق با نتایج کوانتومتری است. با مطالعه طیف پراش پرتو X (شکل ۲-ج)، نفوذ مس در سطح قطعه‌کار در شدت جریان $I=20$ A می‌شود. علاوه بر این، بررسی طیف پراش پرتو X نمونه‌های ماشینکاری شده در این شدت جریان نشان‌دهنده وجود فاز متشکل از مس (Cu_2)، آهن (Fe_2 و Fe_4) با ساختارهای مکعبی است.

۳-۳- خوردگی الکتروشیمیایی

برای تعیین مقادیر مقاومت انتقال بار (R_{CT}) و ظرفیت خازنی لایه دوگانه الکتریکی (C_{EDL}) از روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. نمودارهای نایکوئیست بدست آمده در شکل ۳-الف نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود با افزایش شدت جریان، متوسط مقاومت انتقال بار خوردگی الکتروشیمیایی و ظرفیت خازنی لایه دوگانه الکتریکی (C_{EDL}) قطعه‌کار در شرایط ماشینکاری مختلف (شدت جریان تا ۲۰ A)، روندی افزایشی دارد (شکل ۳-ب). بیشترین مقاومت انتقال بار خوردگی الکتروشیمیایی در جریان ۲۰ A با مقدار $R_{CT}=365 \Omega$ مشاهده شده است. کمترین میزان مقاومت خوردگی الکتروشیمیایی در شرایط سخت ماشینکاری (شدت جریان ۲۵ A)، با مقدار $R_{CT}=279 \Omega$ مشاهده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، به نظر می‌رسد از نظر مقاومت خوردگی الکتروشیمیایی، شدت جریان الکتریکی ($I=20 \text{ A}$)، زمان روشن ($t_{on}=100 \mu\text{s}$)، زمان خاموش ($t_{off}=5 \mu\text{s}$) و زمان ماشینکاری ($\tau=8 \text{ min}$) شرایط بهینه عملیات باشند.



شکل ۳-الف) نمودار نایکوئیست نمونه‌های فولاد کربنی پس از ماشین‌کاری در شدت جریان‌های مختلف، و (ب) متوسط میزان مقاومت انتقال بار و ظرفیت خازنی لایه دوگانه الکتریکی در جریان‌های مختلف

در شدت جریان‌های تا $I=20 \text{ A}$ ، مس به عنوان یک عنصر تقویت کننده در ایجاد مقاومت در برابر خوردگی فولاد کربنی در محلول آبی NaCl (۳/۵ (w/w) عمل می‌کند [۲۵]. بر طبق مطالعات قبلی مکانیسم افزایش مقاومت خوردگی در اثر افزایش مس در سطح قطعه‌کار را به صورت زیر می‌توان بیان کرد [۲۶-۲۸]:

• مس موجود در الکتروود ابزار (برنج) با نفوذ در قطعه‌کار (جدول ۴ و شکل ۱) و تشکیل لایه اکسید مس بر سطح آن، مانع از خوردگی در محلول آبی NaCl (۳/۵ (wt/wt) می‌شود. مس با محلول الکتروولیت وارد واکنش می‌شود (واکنش ۱ و ۲) و اکسید مس تولید می‌شود و میزان خوردگی قطعه‌کار کاهش می‌یابد. میزان حفاظت لایه با ظرفیت خازنی لایه دوگانه الکتریکی فلز/محلول الکتروولیت مرتبط است. نتایج حاصل از ظرفیت خازنی لایه دوگانه الکتریکی (C_{EDL})، نشان از تشکیل لایه اکسیدی Cu_2O و $\text{Cu}(\text{OH})_2$ بر سطح این قطعه‌کار دارد [۲۹].





• یونیزاسیون مس و تولید Cu(II) مطابق واکنش (۳) انجام شده و سپس محلول الکتروولیت با یون مس وارد واکنش می‌شود. در واقع، با ازدیاد مقدار یون مس در سطح فولاد کربنی، مطابق اصل لوشاتلیه، واکنش (۴) در جهت عکس انجام شده و بدین ترتیب یون مس در سطح فولاد کربنی، با یون کلرید واکنش داده و کمپلکس CuCl_2^- را در سطح آن تشکیل می‌دهد. این لایه منجر به کاهش سرعت خوردگی فولاد کربنی در محلول کلریدی می‌شود [۲۸,۳۰].



بدین ترتیب، ظرفیت خازنی لایه دوگانه الکتریکی از مقدار $C_{EDL}=1/257 \mu\text{F}$ در شدت جریان $I=5 \text{ A}$ به $C_{EDL}=7/348 \mu\text{F}$ در شدت جریان $I=20 \text{ A}$ افزایش یافته است. کاهش مقاومت خوردگی الکتروشیمیایی در شرایط سخت ماشینکاری، بدلیل افزایش نفوذ کربن ناشی از پیرولیز و واکنش آن با آهن قطعه کار و تشکیل فاز سخت مارتنزیت می‌باشد. تشکیل این فاز مارتنزیتی از طریق نتایج مطالعه طیف پراش پرتو X تأیید شده و با نتایج گزارش شده توسط کوسانیل [۱۲] و فولر [۳۱] همخوانی دارد.

۴- نتیجه گیری

در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی تبدیل شده و حرارت ایجاد شده منجر به تغییر ترکیب درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده قطعه کار فولاد کربنی شده است. این تغییرات بسته به پارامترهای ماشینکاری از قبیل I ، t_{on} ، t_{off} و τ متفاوت بوده است. نتایج بدست آمده از آنالیز کوانتومتری نشان می‌دهند که با افزایش پارامترهای ماشینکاری، میزان نفوذ فلز مس موجود در الکتروود ابزار برنج و کربن ناشی از پیرولیز ماده دی‌الکتریک بر سطح فولاد کربنی ماشینکاری شده، افزایش می‌یابند، بطوریکه میزان مس از 0.4672% تا 2.5885% و کربن از 0.099% تا 1.128% بر سطح قطعه کار تغییر کرده است. مطالعه نتایج حاصله از پراش پرتو X، تشکیل فاز مس (Cu_τ) و مارتنزیت ($\text{Fe}_{1.93}\text{C}_{0.108}$) با ساختار مکعبی را در سطح قطعه کار نمایان کرد که این نتایج در تطابق با نتایج کوانتومتری بود. مطالعات الکتروشیمیایی حاکی از آن بود که در شرایط سخت ماشینکاری با افزایش کربن در سطح قطعه کار و تشکیل فاز مارتنزیت، مقاومت خوردگی الکتروشیمیایی قطعه کار کاهش می‌یابد. بیشترین مقاومت خوردگی الکتروشیمیایی، بدلیل نفوذ مس موجود در الکتروود برنج در سطح فولاد کربنی، در جریان $I=20 \text{ A}$ مشاهده شد. در این شرایط مقاومت انتقال بار خوردگی الکتروشیمیایی برابر با $R_{CT}=365 \Omega$ و ظرفیت خازنی لایه الکتریکی دوگانه برابر با $C_{EDL}=7/348 \mu\text{F}$ بود که نشان از تشکیل لایه اکسیدی (اکسید مس) بر سطح قطعه کار فولاد کربنی می‌باشد. نفوذ و تاثیر الکتروود ابزار در قطعه کار و بهینه کردن پارامترهای ماشینکاری تولید قطعه‌ای با مقاومت خوردگی بالاتر را امکان‌پذیر می‌سازد. شرایط بهینه برای ساخت و تولید قطعه کار ماشینکاری شده با الکتروود برنج با بیشترین مقاومت خوردگی الکتروشیمیایی نمونه با شرایط ماشینکاری $I=20 \text{ A}$ و $t_{on}=100 \mu\text{s}$ ، $t_{off}=5 \mu\text{s}$ ، $\tau=8 \text{ min}$ انتخاب شد.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه دامغان برای فراهم کردن امکانات مربوط به این کار تحقیقاتی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- فهرست منابع و مآخذ

- [1] Hassiotis, N., Liaropoulos, I., Petropoulos, G., Koutsomichalis, A., & Vaxevanidis, N. (2008). Corrosion behaviour of EDMed surfaces of a tool steel. *Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering*, 175-184.
- [2] Chemezov, D., Smirnova, L., & Bogomolova, E. (2018). Metal mold casting of cast iron and aluminium pistons. *Theoretical & Applied Science*, 61(05), 132-141.
- [3] Alimohammady, M., & Jahangiri, M. (2017). Synthesis of MnO₂ nanowires adsorbent for gold recovery from electroplating wastewater using Taguchi method. *Applied Chemistry*, 11(41), 75-82.
- [4] Steffens, H. D., & Mack, M. (1990). Plasma spraying as an advanced tool in surface engineering. *Pure and Applied Chemistry*, 62(9), 1801-1808.
- [5] Zolfaghari, M., Arab, A., & Asghari, A. (2019). On the morphology and corrosion behavior of Ni nanostructures electrodeposited in the presence of different surfactants. *Applied Chemistry*, 13(49) (2019) 37-44.
- [6] Shihab, S. K., A. Khan, Z. A., Mohammad, A., & Siddiquee, A. N. (2014). A review of turning of hard steels used in bearing and automotive applications. *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 24-49.
- [7] Park, K. S., & Kim, S. H. (1998). Artificial intelligence approaches to determination of CNC machining parameters in manufacturing: a review. *Artificial Intelligence in Engineering*, 12(1-2), 127-134.
- [8] Sharma, R. D., Singh, R., & Singh, M. (2012). Study of electro-chemical machining process for drilling hole. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 1(10), (2012) 1-5.
- [9] Kuo, C. G., Hsu, C. Y., Chen, J. H., & Lee, P. W. (2017). Discharge current effect on machining characteristics and mechanical properties of aluminum alloy 6061 workpiece produced by electric discharging machining process. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(11), 1-8.
- [10] McGeough, J. A. (1988). *Advanced Methods of Machining*, Springer Science & Business Media (1988).
- [11] Yan, X., Zhang, S., Li, J., & Wang, G. (2015). Electrochemical corrosion resistance of AISI H13 steel machined by electro discharge machining. *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 1, 8-12.
- [12] Cusanelli, G., Hessler-Wyser, A., Bobard, F., Demellayer, R., Perez, R., & Flükiger, R. (2004). *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1-3), 289-795.

- [13] Hajiyanpour, F., Rajabi Jaafarabadi, M., Behpour, & M. Jafari. Y. (2019). Investigation of corrosion protection performance of epoxy coatings modified by ZnO-Cr₂O₃ nanocomposites on mild steel surfaces. *Journal of Applied Chemistry*, 13(49) 45-52.
- [14] Tai, T., & Lu, S. (2009). Improving the fatigue life of electro-discharge-machined SDK11 tool steel via the suppression of surface cracks. *International Journal of Fatigue*, 31(3), 433-438.
- [15] Hasçalık, A., & Çaydaş, U. (2007). Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V) *Applied Surface Science*. 253(22), 9007-9016.
- [16] Arooj, S., Shah, M., Sadiq, S., Jaffery, S. H. I., & Khushnood, S. (2014). Effect of current in the EDM machining of aluminum 6061 T6 and its effect on the surface morphology. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 4187-4199.
- [17] Murray, J., Walker, J., & Clare, A. (2014). Nanostructures in austenitic steel after EDM and pulsed electron beam irradiation. *Surface and Coatings Technology*, 259(C), 465-472.
- [18] Syed, K. H., & Palaniyandi, K. (2012). Performance of electrical discharge machining using aluminum Powder suspended distilled water. *Turk. J. Eng. Environ. Sci.*, 36 (3), 195–207.
- [19] Tsai, H. C., Yan, B. H., & Huang, F. Y. (2003). EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(3), 245-252.
- [20] A. Ntasi, W. D. Mueller, G. Eliades, & S. Zinelis, (2010). The effect of Electro discharge machining (EDM) on the corrosion resistance of dental alloys. *Dental Materials*, 26(12), e237-e245.
- [21] Arunachalam, S. R., Dorman, S. E. G., Buckley, R. T., Conrad, N. A., & Fawaz, S. A. (2018). Effect of electrical discharge machining on corrosion and corrosion fatigue behavior of aluminum alloys. *International Journal of Fatigue*, 111, 44-53.
- [22] Sidhom, H., Ghanem, F., Amadou, T., Gonzalez, G., & Braham, C. (2013). Effect of electro discharge machining (EDM) on the AISI316L SS white layer microstructure and corrosion resistance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 141-153.
- [23] Tang, J., Li, J., Wang, H., Wang, Y., & Chen, G. (2019). In-situ monitoring and analysis of the pitting corrosion of carbon steel by acoustic emission. *Applied Sciences*, 9(4), 706-724.
- [24] Gaikwad, A., Tiwari, A., Kumar, A., & Singh, D. (2014). Effect of EDM parameters in obtaining maximum MRR and minimum EWR by machining SS 316 using copper electrode. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 5(6), 101-109.
- [25] Oguzie, E. E., Li, J., Liu, Y., Chen, D., Li, Y., Yang, K., & Wang, F. (2010). Electrochemical corrosion behavior of novel Cu-containing antimicrobial austenitic and ferritic stainless steels in chloride media. *Journal of Materials Science*, 45, 5902-5909.
- [26] Ujiro, T., Satoh, S., Staehle, R. W., & Smyrl, W. H. (2001). Effect of alloying Cu on the corrosion resistance of stainless steels in chloride media. *Corrosion Science*, 43(11), 2185-2200.
- [27] Sourisseau, T., Chauveau, E., & Baroux, B. (2005). Mechanism of copper action on pitting phenomena observed on stainless steels in chloride media. *Corrosion Science*, 47(5), 1097-1117.

-
- [28] E. Lizlovs, (1966). Effects of Mo, Cu, Si and P on anodic behavior of 17Cr Steels. *Corrosion Science*, 22(11), 297-308.
- [29] Jang, Y.-W., Hong, J.-H., & Kim, J.-G. (2009). Effects of copper on the corrosion properties of low-alloy steel in an acid-chloride environment. *Metals and Materials International*, 15, 623-629.
- [30] Fontana, M. G., Greene, N. D. (2018). *Corrosion Engineering*, 2nd ed., McGraw-hill.
- [31] Fuller, J. E. (1991). *The EDM Surface: Topography, Chemistry, and Metallurgy*, EG and G Rocky Flats, Inc., Golden, CO (United States).