



بررسی عملکرد مس خالص ریزدانه به عنوان الکترود ابزار فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی

محمد امین رنائی^۱، احمد افسری^۲، سید یوسف احمدی بروغنی^۳، محمد محسن مشکسار^{۴*}

۱- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بیرجند، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، بیرجند

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز، شیراز

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۴- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز

*شیراز، صندوق پستی ۷۱۸۶۸۸۵۸۳۸، moshksar@shirazu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۱ مرداد ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۸ مهر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۵ بهمن ۱۳۹۲

کلید واژگان:

ماشین کاری تخلیه الکتریکی

سایش الکترود ابزار

تغییر شکل بسیار زیاد

اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار

مواد با دانه‌بندی بسیار ریز

یکی از معضلات اساسی ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM)، سایش الکترود ابزار طی فرآیند ماشین کاری است. در این تحقیق به منظور بهبود عملکرد و افزایش مقاومت مس خالص در برابر سایش الکتریکی طی فرآیند EDM، از ساختار بسیار ریز (در حد نانو و چند صد نانومتر) استفاده گردید. لذا در ابتدا کوشش شده تا این نوع ساختار در درون ماده ایجاد شود. برای این منظور از روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAP) استفاده گردید. مس خالص طی هشت مرحله تحت فرآیند ECAP قرار گرفت. تاثیر اندازه ساختار کریستالی الکترود، شدت جریان و زمان ماشین کاری بر نرخ براده برداری و سایش الکتریکی الکترودهای مسی طی فرآیند EDM بررسی گردید. علاوه بر این ریزساختار و هدایت الکتریکی الکترودها نیز مطالعه شد. نتایج حاصله نشان دادند که پس از اعمال فرآیند ECAP، اندازه دانه ساختار کریستالی مس به شدت کاهش یافته به طوری که پس از هشت مرحله، ساختار کریستالی نسبتاً همگن با دانه‌های بسیار ریز در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر درون ماده ایجاد گردید. از طرفی با ریز شدن ساختار کریستالی الکترود مسی، سایش الکتریکی آن کاهش یافته اما نرخ برداشت مواد تقریباً ثابت مانده و تغییر چندانی نکرده است.

Investigation on performance of ultra fine grained pure copper as electrode during electrical discharge machining

Mohammad Amin Ranaei¹, Ahmad Afsari², Seyed Yousef Ahmadi Brooghani³,
Mohammad Mohsen Moshksar^{4*}

1- Young Researchers and Elites Club, birjand branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

4- Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

*P.O.B. 7186885838 Shiraz, Iran, moshksar@shirazu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received in Revised Form 23 July 2013
Accepted 30 September 2013
Available Online 25 January 2014

Keywords:

Electrical Discharge Machining
Tool Electrode Wear
Equal Channel Angular Pressing
Ultra Fine Grained Copper

ABSTRACT

One of the fundamental problems of Electrical Discharge Machining (EDM) process is tool electrode wear. In this study, ultra fine grains (UFG) structure of pure copper was used to improve performance and also increase the electrical wear resistance of tool electrode. Equal Channel Angular Pressing (ECAP) was used to reduce the crystal size of pure copper. Samples were processed through ECAP die up to 8 passes, and then used as electrode in EDM process. The effect of electrodes grain size, discharge current, and machining time on the metal removal of the work piece and electrical wear of the electrodes were investigated. In addition, the microstructure, and electrical conductivity of copper tool electrodes were examined. By applying the ECAP on pure copper a fine, approximately 50-200 nm grain size, microstructure was obtained after 8 passes. The results show that for finer crystalline structure of copper electrodes, electrical wear decreases but material removal rate is somehow constant.

۱- مقدمه

برای ایجاد کانال پلاسما را فراهم می‌نماید [۱]. در این فرآیند الکترود و قطعه کار در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر از یکدیگر در یک سیال نارسای الکتریکی غوطه‌ور هستند و از یک منبع جریان مستقیم تغذیه می‌کنند. فاصله موجود بین الکترود و قطعه کار توسط دستگاه خود تنظیم ثابت نگهداشته می‌شود. زمانی که یک سری ولتاژ به صورت پالس با دامنه ۲۰ تا ۱۲۰ ولت و فرکانس با محدوده ۵ کیلو هرتز درحد فاصل میان الکترود و

ماشین کاری تخلیه الکتریکی^۱ (EDM)، که معمولاً به عنوان ماشین کاری اسپارک شناخته شده است، برای برداشت مواد از طریق ایجاد جرقه میان ابزار و قطعه کار رسانای الکتریکی به کار می‌رود. به عبارت دیگر مکانیزم برداشت مواد عبارت است از تبدیل انرژی الکتریکی به حرارتی که منبع حرارت لازم

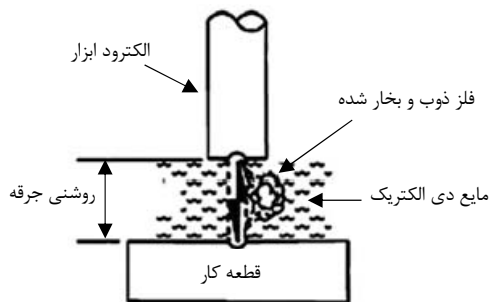
1- Electrical discharge machining

Please cite this article using:

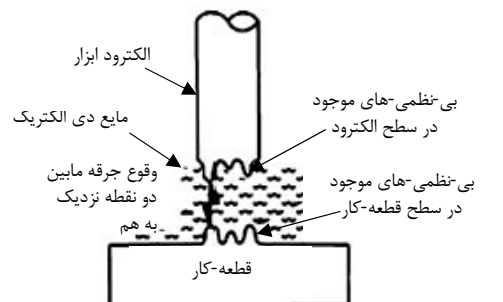
M.A. Ranaei, A. Afsari, S.Y. Ahmadi Brooghani, M.M. Moshksar, Investigation on performance of ultra fine grained pure copper as electrode during electrical discharge machining, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 97-105, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

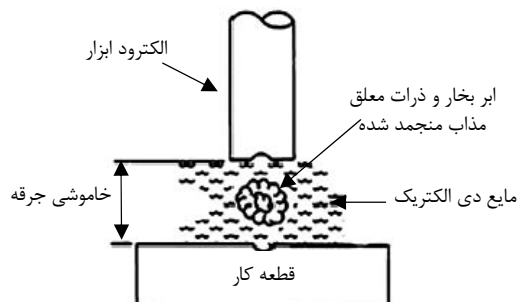
قابلیت استحکام بالا و خواص فیزیکی مطلوب می‌باشد [۱۰-۱۲]. به‌طور کلی قالب ECAP دارای دو کانال با سطح مقطع یکسان می‌باشد (شکل ۲). این دو کانال تحت زاویه برخورد ϕ به هم متصل شده‌اند و ممکن است در گوشه خارجی تقاطع دو کانال نیز انحنایی با زاویه ψ وجود داشته باشد. هنگام فشرده شدن و عبور نمونه از تقاطع دو کانال تغییر شکل برشی شدید در آن اتفاق می‌افتد. با ثابت ماندن سطح مقطع نمونه در هر پاس کرنش‌ها در ماده ذخیره شده و موجب کوچک شدن شبکه دانه‌بندی و تغییر ساختار نمونه می‌شود [۱۳].



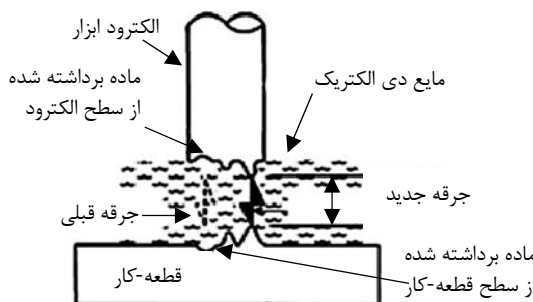
الف) وقوع جرقه در نزدیک‌ترین نقطه بین قطعه کار و الکترود ابزار



ب) ذوب و تبخیر مواد قطعه کار و الکترود ابزار در طول زمان روشن جرقه



ج) ابر بخار از مواد به حالت تعلیق در مایع دی الکتریک



د) حذف فلز مذاب و وقوع جرقه بعدی

شکل ۱ مراحل مختلف ماشین‌کاری اسپارک از شکل‌گیری جرقه تا حذف مواد [۳]

قطعه کار ایجاد گردد، سبب فروریختن مقاومت سیال دی الکتریک شده و در عرض چند میکرو ثانیه جرقه‌هایی در این فاصله ایجاد می‌شود. جرقه حاصل از تخلیه الکتریکی در دو نقطه نزدیک به هم از الکترود ابزار و قطعه کار صورت گرفته و باعث ذوب و تبخیر ماده از این نقاط می‌شود [۲،۳]. مقداری از این مواد مذاب توسط مایع دی الکتریک برداشته شده و مابقی آن روی سطح هر دو الکترود منجمد می‌شود. این مسئله باعث افزایش فاصله میان الکترود ابزار و قطعه کار^۱ شده و جرقه بعدی در نقاط نزدیک به هم دیگر صورت می‌گیرد. نتیجه نهایی ایجاد حفره‌ای به‌شکل نعلبکی در هر دو سطح از قطعه کار و الکترود در هر مرحله از تخلیه الکتریکی می‌باشد. شکل ۱ (الف) تا (د) مراحل مختلف ماشین‌کاری اسپارک را از وقوع جرقه در نزدیک‌ترین نقطه بین قطعه کار و الکترود ابزار تا حذف مواد مذاب به‌خوبی نشان می‌دهد [۳].

یکی از معضلات اساسی فرآیند EDM، سایش الکترود ابزار طی فرآیند ماشین‌کاری می‌باشد. از آنجایی که هزینه زیادی صرف ساخت الکترود ابزار می‌شود، حفظ شکل اولیه آن طی فرآیند EDM نقش تعیین‌کننده‌ای در قیمت تمام شده محصول و دقت ماشین‌کاری دارد [۴]. براین اساس محققان در حوزه EDM، تمرکز خود را بر دستیابی به براده برداری موثر همزمان با کاهش سایش الکترود ابزار و بهبود عملکرد ماشین‌کاری قرار داده‌اند.

یونانگ و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۹ به‌منظور کاهش و ایجاد سایش یکنواخت‌تر الکترود مسی، با استفاده از رسوب‌دهی الکتریکی یک پوشش نازک از ماده مرکب^۲ مس-بورید زیرکونیوم بر سطح آن ایجاد نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که این گونه الکترود نسبت به الکترود مسی معمولی در شرایط آزمایشگاهی یکسان، از خود مقاومت به سایش بهتری را نشان می‌دهد. از طرفی این نوع الکترود می‌توانست قطعات بسیار ریزی که الکترودهای سیلیکونی قادر به ماشین‌کاری آن نبودند را ایجاد کند. اوئل من و روهنر [۶] در سال ۲۰۰۸ تحقیقی را به‌منظور کاهش سایش الکترود ابزار در فرآیند میکرو-EDM انجام دادند. به‌همین منظور مواد جدیدی را با نقطه ذوب و هدایت حرارتی بالا به‌عنوان الکترود به‌کار گرفتند. این مواد عبارت‌اند از الماس تولید شده به روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار که حاوی عنصر بور بوده^۳ و الماس چند بلور^۴. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت سایش الکترود به حجم برداشت مواد برای الکترودهای الماس حاوی عنصر بور، الماس چند بلور، مس، تنگستن-مس و گرافیت به ترتیب ۵، ۷، ۴۳، ۳۶ و ۱۳۰ درصد می‌باشد. فلز مس به‌دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد، پرکاربردترین فلز جهت تهیه الکترود ماشین اسپارک می‌باشد [۷،۸]. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از:

۱- دارا بودن ضریب هدایت الکتریکی و حرارتی بسیار مطلوب ۲- قابلیت شکل‌دهی آسان ۳- قیمت ارزان آن نسبت به سایر الکترودها (تنگستن، تنگستن-مس و مس-گرافیت) ۴- کیفیت بالای سطح ماشین‌کاری شده. در این تحقیق برای اولین بار، به‌منظور بهبود عملکرد و افزایش مقاومت مس خالص در برابر سایش الکتریکی طی فرآیند EDM، از ساختار بسیار ریز درحد نانو و چند صد نانومتر استفاده شد. این نوع ساختارها را می‌توان توسط روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک^۵ تولید نمود [۹-۱۱]. این روش‌ها به‌نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه درحین فرآیند ثابت مانده و تغییر نمی‌کند. از میان روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک، اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار^۶ (ECAP) یک فرآیند موثر جهت تولید مواد با ساختار بسیار ریز با

- 1- Gap
- 2- Composite
- 3- Boron doped CVD-diamond
- 4- Polycrystalline diamond
- 5- Severe plastic deformation
- 6- Equal Channel Angular Pressing

آن جهت ساخت قطعات کار سرد می باشد. قالب در دمای ۸۰۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۸۰ دقیقه تحت عملیات انحلال قرار گرفته و سپس در محیط روغن سرد گردید. عملیات بازپخت نیز در دو دمای ۲۵۰ و ۴۰۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۱۲۰ دقیقه انجام گرفت و سختی حدود ۴۸ را کول C در قالب ایجاد گردید. سنیه از فولاد سرد کار AISI 1.2080 توسط عملیات ماشین کاری تهیه گردید. این فولاد دارای درصد بالایی از کربن و کروم بوده که قابلیت سخت شدن قطعه را تا مغز آن، پس از عملیات حرارتی فراهم می-سازد. سنیه در دمای ۹۶۰ درجه سانتی-گراد به مدت نیم ساعت تحت عملیات انحلال قرار گرفته و سپس در محیط روغن سرد گردید. عملیات بازپخت نیز در دو دمای ۲۱۰ و ۴۲۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۶۰ دقیقه انجام گرفت و سختی حدود ۵۰ را کول C در سنیه ایجاد گردید.

۲-۳- انجام فرآیند ECAP

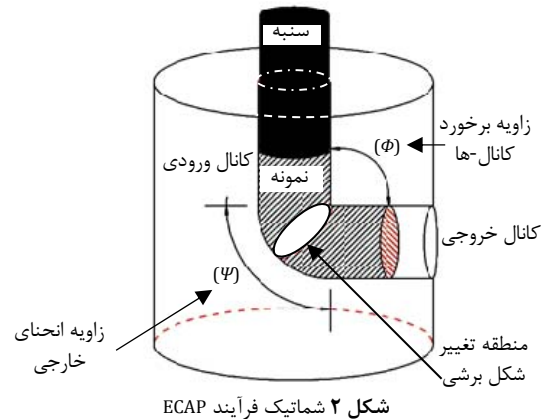
برای انجام فرآیند ECAP، از دستگاه پرس گاتک^۲ مدل GT-7001-LS100 با ظرفیت ۱۰۰ تن استفاده گردید. فرآیند در دمای اتاق، با سرعت ثابت ۱ میلی-متر بر ثانیه انجام شد. پس از هر مرحله اکستروژن، نمونه به اندازه ۹۰ درجه و تنها در جهت عقربه‌های ساعت چرخانده شده و دوباره در کانال ورودی قرار گرفت (روش Bc). به منظور کاهش اثر اصطکاک از یک نوع فوم صابون به عنوان روان کار استفاده گردید.

۲-۴- بررسی ریزساختار و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی الکترودهای مسی

به منظور بررسی ریزساختار الکترودهای مسی توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۳ (FE-SEM)، یک مقطع عرضی از سطح هر نمونه تهیه گردید. پس از عملیات سنباده‌زنی و صیقل کاری^۴، نمونه‌ها در محلول محتوی ۲ گرم دی کرومات پتاسیم، ۴ میلی لیتر محلول اشباع کلرید سدیم و ۸ میلی لیتر اسید سولفوریک حاکاکی^۵ شدند. ریزساختار ماده توسط میکروسکوپ نوری متالوگرافی ساخت شرکت صایران و میکروسکوپ FE-SEM مدل هیتاچی^۶ S4160- بررسی شده و اندازه دانه متوسط به روش برخورد خطی^۷ محاسبه گردید. از دستگاه قابل حمل مدل SMP10 جهت اندازه‌گیری هدایت الکتریکی استفاده شد. این دستگاه هدایت الکتریکی را با استفاده از روش جریان گردابی^۸ با توجه به استاندارد ASTM E1004 اندازه‌گیری می‌کند. اساس کار این روش، ایجاد جریان گردابی در نمونه با استفاده از القای الکترومغناطیس است. این کمیت دو مرتبه در هر نمونه اندازه‌گیری شده و سپس میانگین آن‌ها محاسبه گردید.

۲-۵- ساخت الکترود ابزار و روش انجام آزمایش EDM

به منظور استفاده از قطعات تولید شده در پاس‌های ۴، ۸ و نمونه اولیه به عنوان الکترود ماشین اسپارک، عملیات ماشین کاری بر روی آن‌ها صورت گرفت. الکترودها بعد از عملیات ماشین کاری دارای قطر ۱۵ ± ۰/۵ میلی‌متر و طول تقریبی ۵۰ میلی‌متر بوده که توسط یک دنباله مسی به کلگی دستگاه متصل می‌شوند. بدین منظور در انتهای نمونه‌ها سوراخی به قطر ۸/۵ میلی‌متر ایجاد شده و درون آن با استفاده از قلاویز M10 جهت اتصال به دنباله رزوه ایجاد گردید (شکل ۳). از فولاد هاردوکس^۹ ۴۰۰ به عنوان قطعه کار استفاده



کرنش معادل^۱ (ϵ_N) پس از N مرحله (پاس) از فرآیند ECAP، مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۴].

$$\epsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \csc \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (1)$$

به منظور انجام فرآیند ECAP، یک قالب با مقطع گرد، کانال‌های عمود برهم و انحنای بیرونی ۳۷ درجه همراه با یک سنیه طراحی و ساخته شد. مس خالص طی هشت مرحله تحت فرآیند ECAP قرار گرفت. دو نمونه تولید شده در پاس‌های ۴ و ۸ به عنوان الکترود طی فرآیند EDM به کار گرفته شدند. عملکرد و سایش الکتریکی این الکترودها با انجام یک مجموعه آزمایش طی فرآیند EDM مشخص گردید و با الکترودی که تحت فرآیند ECAP قرار نگرفته (NON-ECAP) مقایسه شد. در این مجموعه آزمایش‌ها اندازه ساختار کریستالی الکترود، شدت جریان و زمان ماشین کاری به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده و تاثیر آن‌ها بر سایش الکتریکی و نرخ براده برداری الکترودها تعیین گردید. علاوه بر این ریز ساختار و هدایت الکتریکی الکترودها نیز بررسی شد.

۲- مواد و روش آزمایش

۲-۱- ماده اولیه

در این تحقیق از مس خالص جهت تهیه الکترود ماشین اسپارک استفاده شد. ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ نشان داده شده است. در ابتدا به منظور تهیه نمونه‌های مناسب جهت انجام فرآیند ECAP، عملیات ماشین کاری در راستای محور اکستروژن بر روی میلگرد اولیه صورت گرفت. نمونه‌هایی با قطر ۱۶ ± ۰/۵ میلی‌متر و طول تقریبی ۶۵ میلی‌متر توسط عملیات ماشین کاری تهیه شدند.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی مس مورد مطالعه

عنصر	Cu	Sb	Sn	Ca	S	Cl	Mg
درصد وزنی	۹۹/۴۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۶	۰/۴۷

۲-۲- تجهیزات فرآیند ECAP

از ساده‌ترین نوع قالب که دارای یک بلوک و دو کانال که با زاویه به هم متصل شده‌اند جهت انجام فرآیند ECAP استفاده شد. مقطع کانال‌های ورودی و خروجی دایروی بوده و قطر آنها برابر با ۱۶ ± ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. زاویه برخورد دو کانال برابر ۹۰ درجه و زاویه انحنای خارجی آن برابر ۳۷ درجه می‌باشد. از فولاد ابزار سرد کار AISI 1.2510 جهت ساخت قالب استفاده گردید. مشخصه بارز این فولاد مقاومت اصطکاکی بسیار بالای

1- Equivalent strain

2- Gotech

3- Field Emission Scanning Electron Microscope

4- Polishing

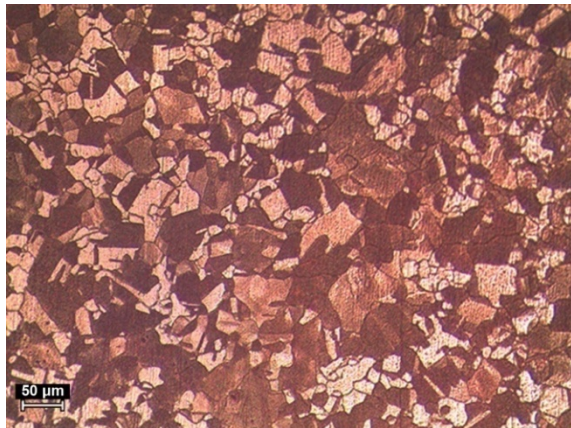
5- Etching

6- Hitachi

7- linear intercept

8- Eddy current

9- HARDOX



شکل ۴ تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ماده الکترود NON-ECAP

متغیرهای پاسخ (خروجی فرایند) اعم از نرخ برداشت مواد^۴ برحسب میلی‌متر مکعب بردقیقه، سایش حجمی الکترود^۵ برحسب میلی‌متر مکعب بردقیقه و نرخ سایش الکترود^۶ به وسیله رابطه‌های (۲) تا (۴) محاسبه گردید [۱۵].

$$MRR = \frac{1000 \times W_w}{\rho_w \times T} \quad (2)$$

$$VEW = \frac{1000 \times W_e}{\rho_e \times T} \quad (3)$$

$$EWR = 100 \times \frac{VEW}{MRR} \quad (4)$$

در این روابط W_w و W_e به ترتیب اختلاف وزن قطعه کار و الکترود برحسب گرم قبل و پس از ماشین کاری، ρ_w و ρ_e به ترتیب چگالی قطعه کار و الکترود برحسب گرم بر سانتیمتر مکعب و T زمان ماشین کاری برحسب دقیقه می‌باشند.

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- نتایج حاصل از بررسی ریزساختار و اندازه گیری هدایت الکتریکی الکترودهای مسی

شکل ۴ تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عرضی نمونه اولیه که الکترود NON-ECAP از آن تهیه شده، را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود یک ساختار کریستالی دانه درشت شامل دانه‌هایی با اندازه متوسط ۲۴ میکرون درون ماده وجود دارد.

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب تصویر FE-SEM گرفته شده از مقطع عرضی نمونه‌های تولید شده در پاس‌های ۴ و ۸ که الکترودهای ECAP4 و ECAP8 از آن تهیه شده‌اند را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از فرایند ECAP به واسطه اعمال کرنش در هر مرحله (تقریباً برابر ۱ در هر پاس) مطابق رابطه ۱، ساختار کریستالی نمونه‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای ریز گردید. پس از اعمال چهار مرحله فرایند ECAP، ساختار دانه درشت نمونه اولیه به ساختار دانه ریز با اندازه دانه متوسط ۳۶۰ نانومتر تبدیل شد. از طرفی با افزایش مراحل ECAP ساختار ماده به شدت ریز شده به طوری که در مرحله هشتم یک نانو ساختار نسبتاً همگن با دانه‌هایی در محدوده ۲۰۰ تا ۵۰ نانومتر درون ماده ایجاد گردید.

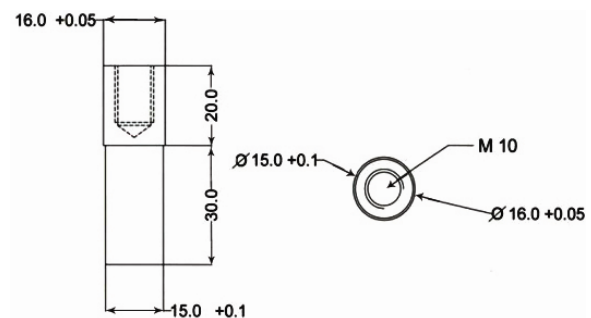
مقادیر هدایت الکتریکی نسبی (نسبت به IACS^۷) نمونه اولیه و دو نمونه تولید شده در پاس‌های ۴ و ۸ در جدول ۳ ارائه شده‌است. همان‌طور که

شد. از ویژگی‌های منحصربه فرد این فولاد می‌توان به سختی اولیه و مقاومت سایشی بالای آن اشاره نمود. به منظور آماده‌سازی قطعه کار، عملیات سنگ زنی توسط دستگاه تخت محور افقی با حرکت رفت و برگشتی بر سطوح ورق فولادی صورت گرفت. در نهایت توسط دستگاه برش سیمی^۱ قطعاتی با ابعاد تقریبی ۶۰×۲۵ میلی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر جهت استفاده به عنوان قطعه کار از ورق جدا گردید.

به منظور انجام آزمایش EDM از دستگاه اسپارک پیش‌رانه مدل ۵۱۱-۸۶۳ با ژنراتور ایزوپالس^۲ و ظرفیت ۶۳ آمپر استفاده شد. از گازوئیل به عنوان دی الکتریک استفاده گردید. قطعه کار و الکترود درون محفظه ماشین کاری دستگاه در عمق ۸ سانتی متری از سطح مایع دی الکتریک غوطه‌ور بوده و از روش شستشوی غوطه‌وری^۳ جهت ایجاد شرایط یکسان شستشو در تمامی آزمایش‌ها استفاده گردید. سایش الکتریکی و نرخ براده برداری الکترودهای تولید شده به روش ECAP4 و ECAP8 (NON-ECAP الکترود) طی فرایند EDM تعیین گردید. برای این منظور، اندازه ساختار کریستالی الکترود، شدت جریان و زمان ماشین کاری به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. شدت جریان در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ آمپر تغییر یافته و بعد از ۶، ۱۲ و ۱۸ دقیقه ماشین کاری مقدار ماده برداشته شده از الکترود و قطعه کار مشخص گردید. این شرایط برای هر سه الکترود مسی ذکر شده تکرار و در نهایت ۲۷ آزمایش برای بررسی رفتار سایشی و نرخ براده برداری الکترودهای مسی طی فرایند EDM انجام گردید. جریئات آزمایش EDM به همراه عوامل و سطوح تغییرات آنها در جدول ۲ آورده شده‌است.

جدول ۲ جریئات آزمایش EDM به همراه عوامل و سطوح تغییرات

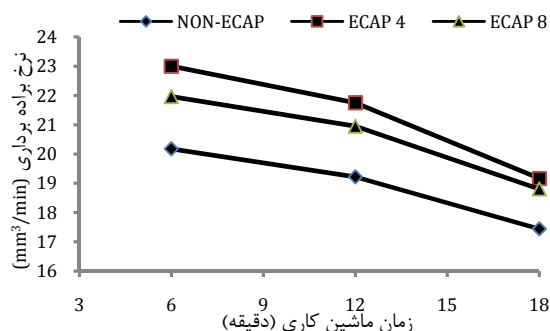
نوع ژنراتور	ایزوپالس
قطعه کار	فولاد هاردوکس ۴۰۰ با چگالی ۷/۸۷ gr/cm ³
الکترود مسی	NON-ECAP, 4PASS ECAP, 8pass ECAP با چگالی ۸/۹ gr/cm ³
قطبیت قطعه کار	منفی
قطبیت الکترود	مثبت
دی الکتریک	گازوئیل
نوع شستشو	شستشوی غوطه‌وری
زمان ماشین کاری (دقیقه)	۱۸، ۱۲، ۶
شدت جریان (آمپر)	۱۵، ۱۰، ۵
زمان روشنی پالس (μs)	۵۰
زمان خاموشی پالس (μs)	۲۵
ولتاژ	متوسط



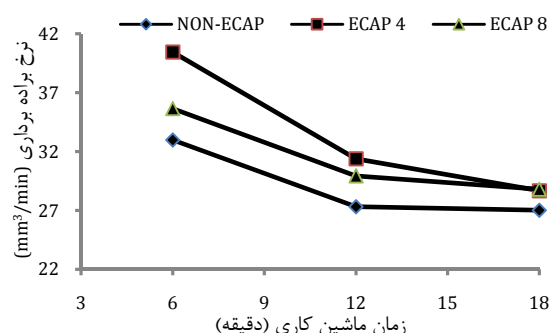
شکل ۳ نقشه الکترودها پس از عملیات ماشین کاری

4- Metal Removal Rate (MRR)
5- Volumetric Electrode Wear (VEW)
6- Electrode Wear Ratio (EWR)
7- International Annealed Copper Standard

1- Wire cutting machine
2- Iso-pulse
3- Immersion washing



شکل ۸ نرخ براده برداری الکترودهای مسی به ازای زمان ماشین کاری در شدت جریان ۱۰ آمپر



شکل ۹ نرخ براده برداری الکترودهای مسی به ازای زمان ماشین کاری در شدت جریان ۱۵ آمپر

همان طور که مشاهده می شود نرخ برداشت مواد توسط الکترودهای ECAP4 و پس از آن ECAP8 نسبت به الکترود دانه درشت افزایش یافته است. از طرفی شدت جریان بیشترین تاثیر را بر نرخ براده برداری داشته، به گونه ای که با افزایش آن از ۵ آمپر به ۱۰ و ۱۵ آمپر نرخ برداشت مواد به ترتیب ۵ تا ۸ برابر برای کلیه موارد افزایش می یابد. ماده الکترود تاثیر به سزایی در شکست دی الکتریک^۱ و به دنبال آن نرخ برداشت مواد دارد [۱۸]. نرخ برداشت مواد به شدت وابسته به تجزیه دی الکتریک می باشد. برای برداشت سریع مواد یا به عبارت بهتر افزایش نرخ براده برداری باید دی الکتریک سریع تر یونیزه^۲ شده یا ولتاژ شکست^۳ آن کاهش یابد. از دیگر علل وابستگی نرخ برداشت مواد می توان به خواص الکتریکی و حرارتی الکترودها اشاره نمود [۱۸]. علت افزایش نرخ براده برداری الکترودهای ریزدانه ممکن است به دلیل بهبود عملکرد الکترودهای ECAP4 و سپس ECAP8 در تولید ولتاژ شکست بالاتر و به دنبال آن یونیزاسیون سریع تر دی الکتریک باشد. علت این مسئله تاثیر مستقیم دگرگونی ساختاری بر خواص مکانیکی و فیزیکی الکترود از جمله کاهش اندک هدایت الکتریکی آن می باشد.

شکل های ۱۰ تا ۱۲ سایش حجمی الکترودهای مسی را به ازای زمان ماشین کاری به ترتیب در شدت جریان های ۵، ۱۰ و ۱۵ آمپر نشان می دهند. به طور کلی با ریز شدن ساختار کریستالی الکترودها، مقاومت در برابر سایش الکتریکی آن ها طی فرآیند EDM افزایش می یابد. از طرفی با افزایش زمان ماشین کاری سایش حجمی الکترودها کاهش یافته، اما یک روند کاملاً متفاوت در شدت جریان ۵ آمپر مشاهده می شود (شکل ۱۰). در ابتدای زمان ماشین کاری، الکترودهای ریز دانه مقاومت قابل توجهی در برابر سایش الکتریکی نسبت به الکترود NON-ECAP از خود نشان داده، اما با افزایش

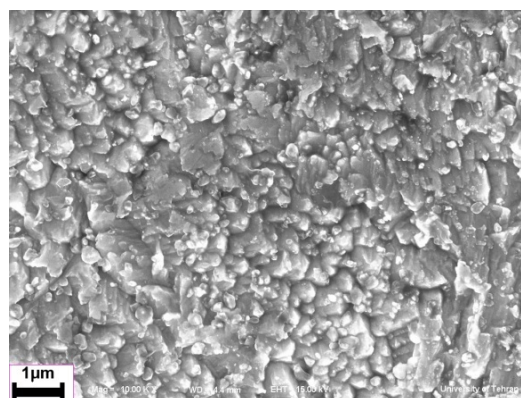
مشاهده می شود پس از فرآیند ECAP هدایت الکتریکی نمونه ها اندکی کاهش می یابد (حدود ۸٪ نمونه اولیه). به نظر می رسد تغییرات ایجاد شده در ساختار کریستالی مس خالص پس از فرآیند ECAP، تاثیر بسیار کمی بر هدایت الکتریکی آن دارد. شایان ذکر است این مسئله در بررسی های صورت گرفته بر رفتار الکتریکی مس خالص تجاری با دانه های بسیار ریز، توسط حسینی و دانش منش [۱۶] و حبیبی و همکارانش [۱۷] گزارش شده است.

جدول ۳ هدایت الکتریکی نسبی مس خالص قبل و پس از اعمال فرآیند ECAP

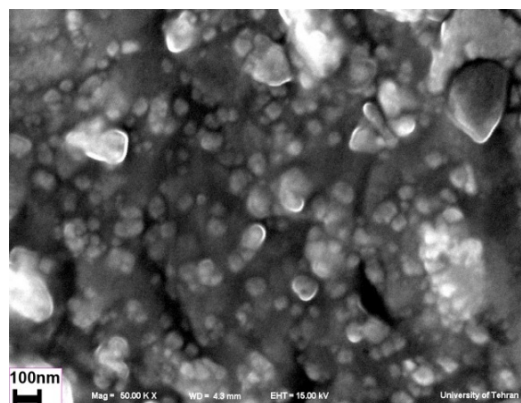
الکترود	NON-ECAP	ECAP4	ECAP8
هدایت الکتریکی نسبی (IACS %)	۹۵/۷۳	۸۷/۳۱	۸۶/۵۵

۳-۲- نرخ براده برداری و سایش حجمی الکترودها

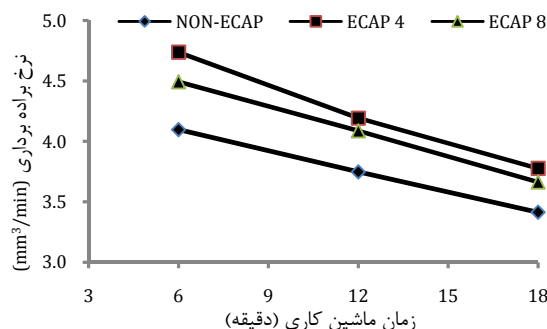
شکل های ۷ تا ۹ نرخ براده برداری الکترودهای ریزدانه تولید شده به روش ECAP و الکترود NON-ECAP را در شرایط مختلف ماشین کاری نشان می دهند.



شکل ۵ تصویر FE-SEM از ریز ساختار ماده الکترود ECAP4

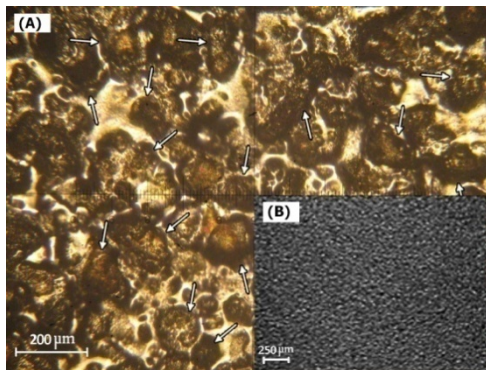


شکل ۶ تصویر FE-SEM از ریز ساختار ماده الکترود ECAP8



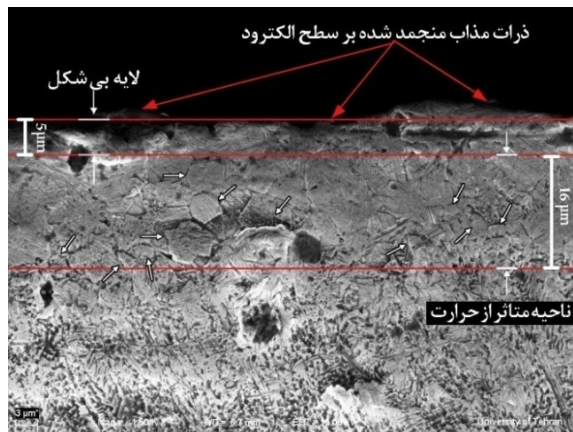
شکل ۷ نرخ براده برداری الکترودهای مسی به ازای زمان ماشین کاری در شدت جریان ۵ آمپر

1- Dielectric breakdown
2- Ionized
3- Breakdown voltage



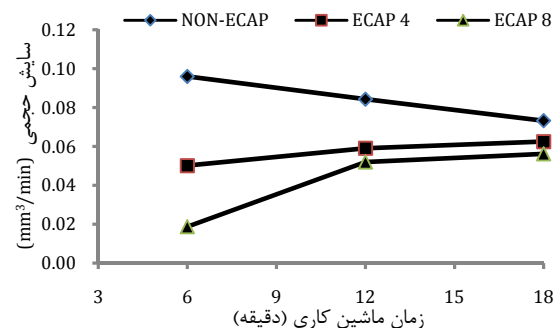
شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپ نوری از بافت سطحی الکترود مسی پس از فرآیند ماشین کاری EDM، (A) بزرگنمایی ۲۰۰ برابر (B) بزرگنمایی ۴۰ برابر

با شکل گیری حفره های مذاب قسمتی از حرارت آن به درون ماده الکترود انتقال یافته و باعث دگرگونی ساختاری درون ماده الکترود می شود. شکل های ۱۴ و ۱۵ ساختار کریستالی سطح برش خورده الکترودهای ECAP4 و ECAP8 را بعد از ۱۸ دقیقه ماشین کاری در شدت جریان ۱۵ آمپر نشان می دهند. همان طور که مشاهده می شود، حرارت حاصله از تخلیه الکتریکی علاوه بر ایجاد تغییرات در سطح الکترود ابزار باعث دگرگونی زیر لایه های سطحی آن نیز می گردد. در اثر سرد شدن بسیار سریع و غیر تعادلی چاله های مذاب درون مایع دی الکتریک، یک لایه نازک بی شکل در زیر سطح ماشین کاری شده به وجود آمده است. در زیر این لایه یک ناحیه متأثر از حرارت (ناحیه آنبیل شده) قرار دارد. حرارت در این منطقه به گونه ای است که باعث ذوب ماده الکترود نشده، اما ساختار کریستالی آن را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد. به طوری که ساختار دانه ریز نزدیک به سطح ماشین کاری شده تحت تأثیر حرارت بالا به ساختار دانه درشت تبدیل می گردد. پیکان ها در ناحیه متأثر از حرارت، برخی از دانه های رشد یافته در اثر حرارت را نشان می دهند. براساس نتایج به دست آمده می توان چنین نتیجه گرفت که تغییرات ساختاری و خواص ایجاد شده در ماده الکترود مسی به واسطه فرآیند ECAP، بر عملکرد و سایش الکتریکی آن طی فرآیند EDM تأثیر به سزایی دارد. شاهد این ادعا مقاومت بسیار بالای الکترودهای ریزدانه در ۶ دقیقه اول ماشین کاری در شدت جریان ۵ آمپر بوده اما با افزایش زمان ماشین کاری حفظ تغییرات ساختاری و خواص ایجاد شده برای الکترودهای ریز دانه مقدور نمی باشد. علت این امر را می توان حرارت بالای تولید شده در اثر تخلیه الکتریکی و روند انتقال آن به درون ماده الکترود بیان نمود.

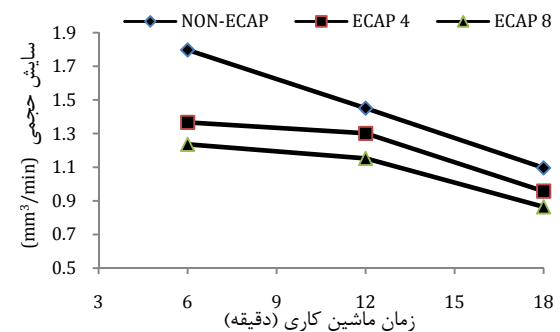


شکل ۱۴ تصویر FE-SEM از سطح برش خورده الکترود ECAP4 پس از ۱۸ دقیقه ماشین کاری در شدت جریان ۱۵ آمپر

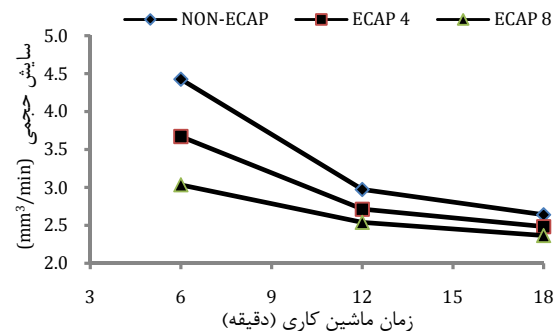
زمان ماشین کاری سایش الکتریکی آن ها افزایش می یابد. این مسئله برای الکترود نانو ساختار ECAP8 بسیار مشهودتر می باشد. مسئله قابل تأمل که در تمامی نمودارها وجود دارد، مقاومت بالای الکترودهای ریز دانه در برابر سایش الکتریکی در ابتدای زمان ماشین کاری می باشد. اما با افزایش زمان ماشین کاری از مقاومت آن ها در برابر سایش الکتریکی کاسته شده و اختلاف سایشی آن ها نیز با الکترود NON-ECAP رفته رفته به حداقل مقدار خود می رسد. همان طور که بیان شد بخشی از حرارت تولید شده توسط تخلیه الکتریکی به الکترود ابزار، انتقال یافته و موجب ذوب و بخار ماده از سطح آن به صورت موضعی می شود. پس از اتمام تخلیه الکتریکی ماده ذوب شده به صورت غیره تعادلی درون مایع دی الکتریک سرد شده و یک حفره مذاب منجمد شده بر روی سطح الکترود باقی می ماند. حفره های مذاب منجمد شده که بر روی سطح الکترود در طول زمان ماشین کاری به وجود آمدند را می توان به وضوح در شکل ۱۳ مشاهده نمود (پیکان ها برخی از حفره های مذاب منجمد شده را نشان می دهند).



شکل ۱۰ سایش حجمی الکترودهای مسی به ازای زمان ماشین کاری در شدت جریان ۵ آمپر



شکل ۱۱ سایش حجمی الکترودهای مسی به ازای زمان ماشین کاری در شدت جریان ۱۰ آمپر



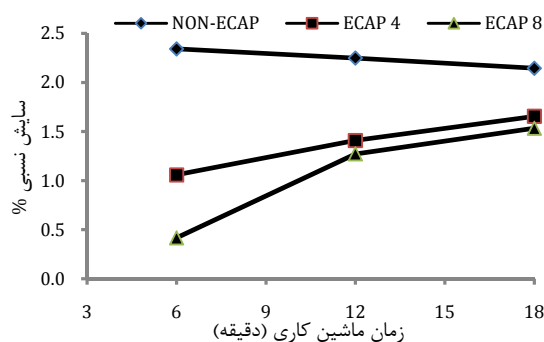
شکل ۱۲ سایش حجمی الکترودهای مسی به ازای زمان ماشین کاری در شدت جریان ۱۵ آمپر

نیروی ضربه‌ای^۳ بزرگ در دهانه جرقه می‌شود [۲۶]. بنابراین با افزایش شدت جریان نرخ برداشت مواد و سایش الکتریکی الکترود افزایش می‌یابد.

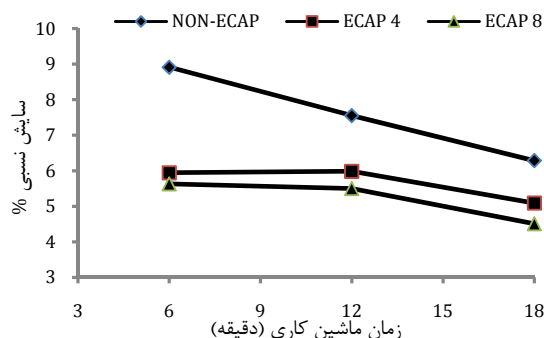
۳-۳- سایش نسبی الکترود ابزار

سایش نسبی الکترود، برحسب نسبت حجم برداشته شده از ماده الکترود به حجم برداشته شده از قطعه کار تعیین می‌شود. تغییرات فرسایش نسبی الکترود و نرخ براده برداری عموماً عکس یکدیگرند به‌طوری که اگر فرآیند پایدار و نرخ براده برداری زیاد باشد، فرسایش نسبی الکترود کم است [۲۷]. از طرفی نرخ برداشت ماده از سطح قطعه کار توسط نوع الکترود تعیین می‌گردد [۱۸]. با توجه به مطالب ذکر شده، میزان حجم براده برداری به طور مستقیم بر سایش الکترود تاثیرگذار است. شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ سایش نسبی الکترودهای مسی را طی فرآیند EDM به ازای زمان ماشین‌کاری در شدت جریان‌های مختلف نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود، سایش نسبی الکترودهای ریز دانه در مقایسه با الکترود NON-ECAP از مقدار کمتری برخوردار است. نکته قابل توجه سایش نسبی بسیار کم الکترودهای ریز دانه (حدود ۰/۴ و ۱ درصد به ترتیب برای الکترود ECAP8 و ECAP4) در شدت جریان ۵ آمپر و ۶ دقیقه ماشین کاری و رفتار سایشی تقریباً یکنواخت این الکترودها در شدت جریان‌های ۱۰ و ۱۵ آمپر می‌باشد.

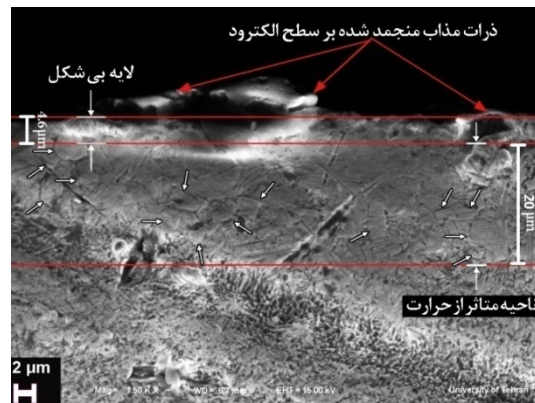
از این تغییرات می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط ماشین‌کاری با شدت جریان‌های کم و زمان‌های کوتاه الکترودهای ریزدانه حالت EDM بدون سایش^۴ را فراهم آورده اما با افزایش شدت جریان این گونه الکترودها یک فرآیند ماشین‌کاری پایدار را ایجاد می‌کنند. این مسئله روشن‌گر بهبود عملکرد الکترودهای مسی دانه ریز نسبت به الکترود دانه درشت طی فرآیند EDM می‌باشد. شایان ذکر است که عبارت EDM بدون سایش به حالتی اطلاق می‌شود که سایش الکترود نسبت به قطعه کار از یک درصد کمتر باشد [۲۸].



شکل ۱۶ فرسایش نسبی الکترودهای مسی به‌ازای زمان ماشین‌کاری در شدت جریان ۵ آمپر



شکل ۱۷ فرسایش نسبی الکترودهای مسی به‌ازای زمان ماشین‌کاری در شدت جریان ۱۰ آمپر



شکل ۱۵ تصویر FE-SEM از سطح برش خورده الکترود ECAP8 پس از ۱۸ دقیقه ماشین‌کاری در شدت جریان ۱۵ آمپر

این مسئله سبب دگرگونی ساختاری شده به‌طوری که ساختار بسیار ریز ایجاد شده درون ماده الکترود به ساختار درشت دانه تبدیل می‌شود. از طرفی با افزایش شدت جریان از مقاومت الکترودها در برابر سایش الکتریکی کاسته شده و نقش مواد ریزدانه در افزایش این کمیت کم رنگ‌تر می‌شود. علت این پدیده افزایش انرژی تخلیه الکتریکی و حرارت به واسطه افزایش شدت جریان می‌باشد. این مسئله سبب تسریع رشد دانه‌ها شده و ساختار دانه ریز را به ساختار دانه درشت تبدیل می‌کند.

از آنجایی که فرآیند EDM طبیعت پیچیده و تصادفی داشته، عوامل و پدیده‌های متعددی دیگری نیز وجود دارند که نرخ براده برداری و سایش الکترود ابزار را طی فرآیند تحت تاثیر قرار می‌دهند. با افزایش زمان ماشین‌کاری، عمق سطح ماشین‌کاری شده افزایش یافته و با توجه به استفاده از روش شستشوی غوطه‌وری شرایط شستشوی دهانه جرقه دشوارتر می‌شود. این مسئله باعث افزایش ذرات مذاب منجمد شده^۱ حاصل از تخلیه الکتریکی که در دی الکتریک موجود ما بین الکترود و قطعه کار معلق‌اند می‌شود. بعضی از این ذرات بوسیله یون‌های مثبت و منفی به سطح الکترود و قطعه کار می‌چسبند. علاوه بر این نیز باعث کاهش پایداری فرآیند ماشین‌کاری شده و عملکرد آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند [۱۹، ۲۰]. از طرفی جرقه ناخواسته نیز به واسطه شرایط شستشوی نامناسب دهانه جرقه ایجاد می‌شود [۲۱، ۲۲]. در واقع فرض بر این است که جرقه ناخواسته زمانی رخ می‌دهد که کانال پلاسمای پالس قبلی کاملاً دی یونیزه^۲ نشده باشد و جریان پالس بعدی در مسیر همان جریان قبلی برقرار گردد [۲۳]. در چنین حالتی، زمانی برای شکل‌گیری مسیر جریان گازی شکل که جرقه جدید در آن شروع می‌گردد، نیاز نخواهد بود. اعتقاد بر این است که فقط در حالت جرقه، عمل براده برداری در شرایط مطلوب صورت می‌گیرد. با توجه به موارد و پدیده‌های ذکر شده می‌توان برای توجیه کاهش نرخ براده برداری و سایش الکترودها با افزایش زمان ماشین‌کاری به این موارد اشاره نمود. ۱- ایجاد تخلیه الکتریکی غیره عادی مانند اتصال کوتاه و جرقه ناخواسته ۲- چسبیدن ذرات مذاب منجمد شده به سطح الکترود ابزار و قطعه کار.

مهم‌ترین مسئله‌ای که سایش الکتریکی الکترودها و نرخ براده برداری را تحت تاثیر قرار می‌دهد تولید حرارت بالا (۸۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) و اتلاف انرژی گرمایی طی فرآیند EDM با افزایش زمان ماشین‌کاری می‌باشد [۲۴، ۲۵]. از طرفی با افزایش شدت جریان، انرژی گرمایی حاصل از تخلیه الکتریکی افزایش یافته و روند ذوب و تبخیر ماده از سطح قطعه کار و الکترود ابزار آسان می‌شود. علاوه بر این نیز باعث ایجاد

3- Impulsive force
4- No- wear EDM

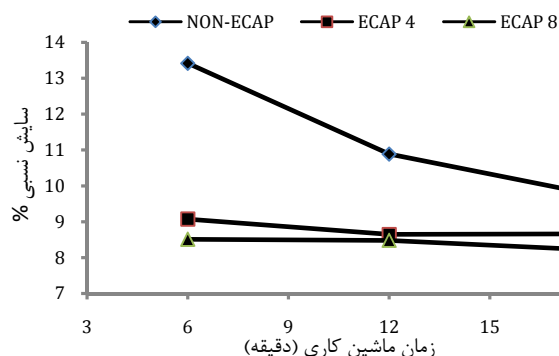
1- Debris particles
2- Deionised

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این پژوهش کمال قدردانی و تشکر از کمک‌های مالی ستاد ویژه توسعه فناوری نانو جهت انجام این طرح را دارند.

۶- مراجع

- [1] Y. C. Lin, L. R. Hwang, C. H. Cheng, P. L. Su, Effects of electrical discharge energy on machining performance and bending strength of cemented tungsten carbides, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 206, No. 1-3, pp. 491-499, 2008.
- [2] S. Kumar, R. Singh, T. P. Singh, B. L. Sethi, Surface modification by electrical discharge machining: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, pp. 3675-3687, 2009.
- [3] M. P. Jahan, M. Rahman, Y. S. Wong, A review on the conventional and micro-electro discharge machining of tungsten carbide, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, No. 12, pp. 837-858, 2011.
- [4] E. Aligiri, S. H. Yeo, P. C. Tan, A new tool wear compensation method based on real-time estimation of material removal volume in micro-EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 15, pp. 2292-2303, 2010.
- [5] W. Yuangang, Z. Fuling, W. Jin, Wear-resist electrodes for micro-EDM, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 22, No. 3, pp. 339-342, 2009.
- [6] E. Uhlmann, M. Roehner, Investigations on reduction of tool electrode wear in micro-EDM using novel electrode materials, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 92-96, 2008.
- [7] H. M. Zaw, J. Y. H. Fuh, A. Y. C. Nee, L. Lu, Formation of a new EDM electrode material using sintering techniques, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89-90, pp. 182-186, 1999.
- [8] M. Monz'ón, A. N. Benítez, M. D. Marrero, N. Hernández, P. Hernández, J. Aisa, Validation of electrical discharge machining electrodes made with rapid tooling technologies, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, No. 1-3, pp. 109-114, 2008.
- [9] L. Ghalandari, M. M. Moshksar, High-strength and high-conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 506, No. 1, pp. 172-178, 2010.
- [10] M. Reihanian, R. Ebrahimi, M. M. Moshksar, D. Terada, N. Tsuji, Microstructure quantification and correlation with flow stress of ultrafine grained commercially pure Al fabricated by Equal Channel Angular Pressing (ECAP), *Materials Characterization*, Vol. 59, No. 9, pp. 1312-1323, 2008.
- [11] M. Reihanian, R. Ebrahimi, N. Tsuji, M. M. Moshksar, Analysis of the mechanical properties and deformation behavior of nanostructured commercially pure Al processed by Equal Channel Angular Pressing (ECAP), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 473, No. 1-2, pp. 189-194, 2008.
- [12] Kun Xia Wei, Wei Wei, Fei Wang, Qing Bo Du, Igor V. Alexandrov, Jing Hu, Microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of industrial Cu-0.5%Cr alloy processed by severe plastic deformation, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 3, pp. 1478-1484, 2011.
- [13] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, The process of grain refinement in equal channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 48, pp. 3317-3331, 1998.
- [14] B. Tolaminejad, K. Dehghani, Microstructural characterization and mechanical properties of nanostructured AA1070 aluminum after equal channel angular extrusion, *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 285-292, 2012.
- [15] S. S. Habib, Study of the parameters in electrical discharge machining through response surface methodology approach, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, No. 12, pp. 4397-4407, 2009.
- [16] S. A. Hosseini, H. Daneshmanesh, High strength, high conductivity ultrafine grains commercial pure copper produced by ARB process, *Materials and Design*, Vol. 30, No. 8, pp. 2911-2918, 2009.
- [17] A. Habibi, M. Ketabchi, M. Eskandarzadeh, Nano-grained pure copper with high-strength and high-conductivity produced by Equal Channel Angular Rolling process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 6, pp. 1085-1090, 2011.
- [18] M. P. Jahan, Y. S. Wong, M. Rahman, A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrode materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, pp. 3956-3967, 2009.
- [19] J. Wang, F. Han, G. Cheng, F. Zhao, Debris and bubble movements during electrical discharge machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 58, pp. 11-18, 2012.



شکل ۱۸ فرسایش نسبی الکترودهای مسی به‌ازای زمان ماشین کاری در شدت جریان ۱۵ آمپر

۴- خلاصه نتایج

در این تحقیق برای اولین بار از ساختار بسیار ریز در حد نانو و چند صد نانومتر به‌منظور بهبود عملکرد الکترود ابزار مسی و افزایش مقاومت در برابر سایش الکتریکی آن طی فرآیند ماشین کاری EDM استفاده گردید. نتایج حاصله در ادامه به اختصار بیان می‌گردد.

با قرار گرفتن مس خالص تحت فرآیند ECAP، اندازه ساختار کریستالی آن به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته به‌طوری که در مرحله چهارم، ساختار دانه ریز با اندازه دانه متوسط ۳۶۰ نانومتر درون ماده ایجاد گردید. از طرفی با افزایش مراحل ECAP تا هشت مرحله، اندازه دانه‌ها بسیار ریز شده و یک نانو ساختار نسبتاً همگن با دانه‌هایی در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر در ماده حاصل شد. علاوه بر این تغییرات ساختاری مس خالص به واسطه اعمال فرآیند ECAP، تاثیر بسیار اندکی بر هدایت الکتریکی آن دارد.

به‌طور کلی، با ریز شدن ساختار کریستالی الکترودهای مسی سایش الکتریکی آن‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی مقاومت در برابر سایش الکتریکی الکترود مسی با شکل‌گیری دانه‌هایی در حد نانو به مقدار قابل ملاحظه افزایش می‌یابد. این مسئله در شرایط ماشین کاری با شدت جریان‌های کم و زمان‌های کوتاه بسیار چشم‌گیر می‌باشد.

با تغییر روش اندازه‌گیری سایش الکتریکی از حجمی به نسبی، نتایج بهتر و دقیق‌تری حاصل شد. به‌طوری که مشخص گردید در شدت جریان‌های کم و زمان‌های ماشین کاری کوتاه، الکترودهای ریز دانه تولید شده به روش ECAP حالت EDM بدون سایش را فراهم آورده و با افزایش شدت جریان یک فرآیند ماشین کاری پایدار را ایجاد می‌کنند.

شدت جریان بیشترین تاثیر را بر سایش الکتریکی و نرخ براده برداری الکترودها داشته به‌طوری که با افزایش آن، این کمیت‌ها به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. دلیل این امر تولید انرژی تخلیه بالاتر در شدت جریان‌های بالا بوده که روند ذوب و تبخیر ماده را از سطح قطعه‌کار و الکترود ابزار آسان می‌سازد.

به‌طور کلی تغییرات ساختاری و خواص ایجاد شده در ماده الکترود مسی به واسطه فرآیند ECAP، بر عملکرد و سایش الکتریکی آن طی فرآیند EDM تاثیر به‌سزایی دارد. اما با افزایش زمان ماشین کاری و شدت جریان حفظ تغییرات ساختاری برای الکترودهای ریز دانه مقدور نمی‌باشد. علت این امر را می‌توان حرارت بالای تولید شده در اثر تخلیه الکتریکی و روند انتقال آن به درون ماده الکترود بیان نمود. این مسئله سبب دگرگونی ساختاری شده به‌طوری که ساختار بسیار ریز ایجاد شده درون ماده الکترود به ساختار درشت دانه تبدیل می‌شود.

- [25] C. H. Che Harbon, B. Md. Deros, A. Ginting, M. Fauziah, investigation on the influence of machining parameters when machining tool steel using EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 116, No. 1, pp. 84–87, 2001.
- [26] Sh. Singh, S. Maheshwari, P. C. Pandey, Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, No. 1-3, pp. 272–277, 2004.
- [27] K .D. Chattopadhyay, S. Vermab, P. S. Satsangi, P. C. Sharma, Development of empirical model for different process parameters during rotary electrical discharge machining of copper-steel (EN-8) system, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 3, pp. 1454–1465, 2009.
- [28] H. A. G. El-Hofi, *Advanced Machining Processes*, McGraw-Hill, pp. 122, 2005.
- [20] R. Teimouri, H. Baseri, Effects of magnetic field and rotary tool on EDM performance, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, No. 3, pp. 316–322, 2012.
- [21] J. Murray, D. Zdebski, A. T. Clare, Workpiece debris deposition on tool electrodes and secondary discharge phenomena in micro-EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 7, pp. 1537–1547, 2012.
- [22] M. Cao, S. Yang, W. Li, Chip-ejection Mechanism and Experimental Study of Water Dispersant Dielectric Fluid on Small-hole EDM, *Advanced Materials Research*, Vol. 97-101, pp. 4111–4115, 2010.
- [23] Y. Jiang, W. Zhao, X. Xi, A study on pulse control for small-hole electrical discharge machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 7, pp. 1463–1471, 2012.
- [24] H. Singh, Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 19-20, pp. 5053–5064, 2012.