



بررسی تأثیر ریزدانه کردن ابزار مسی بر روی نرخ براده برداری در فرایند اسپارک

شاهرخ روحی زاده^۱، پیام سرارئیان^{۲*}، کامران امینی^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

۳- دانشیار، واحد تیران، دانشگاه آزاد اسلامی، تیران، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی ۸۵۱۴۱۴۳۱۳۱، p_saraeian@iau-tnb.ac.ir

کلیدواژگان

ماشین کاری با تخلیه الکتریکی

نرخ براده برداری

اکستروژن کردن در کانال‌های زاویه دار با

مقاطع یکسان

اندازه دانه مس خالص

پراش الکترون‌های برگشتی

چکیده

ماشین کاری با تخلیه الکتریکی یا همان اسپارک، یکی از روش‌های ماشین کاری مدرن است که در سال‌های اخیر و با پیشرفت صنعت، تحقیق‌های مختلفی برای بهبود پارامترهای این فرایند از جمله نرخ براده برداری، انجام شده است. در پژوهش‌های پیشین، تغییر خواص و مشخصات ابزار ماشین کاری، به عنوان راهکاری برای بهبود نرخ براده برداری مطرح بوده است. یک روش نوین و کارآمد برای تغییر در ریزساختار و خواص ماده، فرایند اکستروژن کردن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان است که روشی مناسب برای تولید مواد ریز دانه با استحکام بالا و خواص مطلوب می‌باشد. در این تحقیق، ماده مس خالص طی چهار و هشت مرحله تحت عملیات اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان قرار گرفته و سپس تأثیر استفاده از آن به عنوان ابزار فرایند اسپارک، بر روی نرخ براده برداری، در شدت جریان جرقه و زمان‌های روشنی مختلف مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. میکروساختار نمونه‌ها پس از عملیات اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان، توسط روش پراش الکترون‌های برگشتی بررسی و میانگین اندازه دانه‌ها برای آنها، با استفاده از این روش اندازه گیری شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که اکستروژن کردن ابزار مسی تا چهار مرحله، باعث افزایش نرخ براده برداری تا ۱۳/۲ درصد می‌شود. علاوه بر این با افزایش تعداد مراحل اکستروژن نمودن مس از چهار به هشت مرحله، نرخ براده برداری به میزان ۵/۵ درصد افزوده می‌شود.

Investigation on the effect of copper tool's grain refinement on material removal rate in EDM processing

Shahrokh Rouhizadeh¹, Payam Saraeian^{1*}, Kamran Amini²

1- Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tiran Branch, Islamic Azad University, Tiran, Iran

* P.O.B. 8514143131, Isfahan, Iran, p_saraeian@iau-tnb.ac.ir

Keywords

Electrical Discharge Machining
Material Removal Rate
Equal Channel Angular Pressing
Pure copper grain size
Electron Back Scatter Diffraction

Abstract

Electrical discharge machining (EDM) is a modern machining method which in pace with industrial developments, various studies are aimed at improving this process's parameters including material removal rate. In previous researches, changes in machining tool's properties and specifications have been investigated as the solution to improve the material removal rate. A novel and efficient process to change material microstructure and properties is equal channel angular pressing (ECAP) that is appropriate method to produce fine grains materials with high strength and adequate properties. In this study, the pure copper material was processed through 4 and 8 passes of ECAP and its effect as a tool for EDM process, on material removal rate, with different discharge current and pulse on-time was examined. Microstructure of the specimens were analyzed after ECAP operation using electron back scatter diffraction method (EBSD), and the average diameter of grains for specimens were measured using this technique. The results of the experiments indicated that processing the copper tool with ECAP through 4 passes, increases the material removal rate up to 13.2 percent. Moreover, increasing the number of passes of ECAP from 4 to 8 improved the effectiveness of this process on increasing the material removal rate up to 5.5 percent.

۱- مقدمه

ماشین کاری مدرن می‌باشد. در ماشین کاری با تخلیه الکتریکی، ابزار و قطعه کار که هر دو رسانای جریان الکتریکی می‌باشند، درون یک ماده دی الکتریک با فاصله مشخصی از یکدیگر قرار گرفته و در بین آنها جرقه زده می‌شود. به این ترتیب با تبدیل شدن انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی، ذره ای از قطعه کار به

ماشین کاری با تخلیه الکتریکی^۱ یا اسپارک، که اولین بار در سال ۱۹۴۳ به شکلی کارآمد توسط لازارنکوها ابداع شد، از روش‌های

¹ Electrical Discharge Machining (EDM)

Please cite this article using:

Sh. Rouhizadeh, P. Saraeian, K. Amini, Investigation on the effect of copper tool's grain refinement on material removal rate in EDM processing, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 1-10, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

میکرومتر که دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مختلفی نیز هستند، در ماشین‌کاری اسپارک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق این افراد نشان می‌دهد که بهترین نتیجه برای پارامترهای نرخ براده‌برداری، صافی سطح و سایش ابزار، در شرایط استفاده از ابزار با اندازه دانه ده میکرومتر می‌باشد [۹]. در طی فرایندهای تغییر فرم پلاستیکی شدید^۱، کرنش‌های شدیدی بدون تغییر در ابعاد کلی، به ماده وارد شده و این امکان فراهم می‌شود تا مواد با ساختار بسیار ریزدانه تولید شوند. در بین روش‌های موجود برای تغییر فرم پلاستیکی شدید، فرایند اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان^۲ در دهه‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده و پیشرفت‌های زیادی داشته است. این روش فرایندی مناسب برای تولید یک ماده با ساختار بسیار ریز، استحکام بالا و خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب از جمله استحکام خستگی، مقاومت به خوردگی، هدایت الکتریکی و هدایت گرمایی می‌باشد. شکل ۱ نمایی از یک قالب اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان را نمایش می‌دهد. اساساً طراحی این قالب به گونه‌ای است که دارای دو کانال با سطح مقطع یکسان می‌باشد که تحت زاویه برخورد Φ و زاویه انحنای خارجی ψ به یکدیگر متصل شده‌اند. در هنگام عبور ماده از قالب و فشرده شدن آن به سمت داخل، در محل تقاطع دو کانال، تغییر شکل برشی شدیدی در ماده روی می‌دهد. با ثابت ماندن سطح مقطع نمونه در هر مرحله و ذخیره شدن کرنش‌ها در ماده، مرزبندی دانه‌ها تغییر نموده و منجر به کوچک شدن شبکه بندی دانه‌ها و تغییر ساختار نمونه می‌شود [۱۰-۱۵].

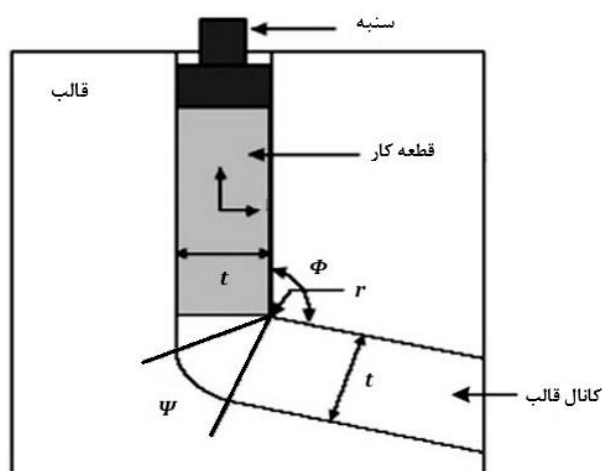


Fig.1 Equal channel angular Die

شکل ۱ قالب اکستروژن با کانال‌های هم مقطع زاویه دار [۱۲]

صورت نسبی ذوب و تبخیر گشته و براده‌برداری انجام می‌گردد. با ادامه فرایند، نهایتاً تصویری از شکل پیشانی ابزار بر روی قطعه کار ایجاد می‌شود. امروزه نیز این فرایند به علت ویژگی‌های منحصر به فرد خود از جمله عدم وابستگی به سختی قطعه، امکان تولید اشکال پیچیده با دقت بالا و عدم اعمال نیروی مکانیکی برای براده‌برداری در عرصه‌های مختلف صنعتی از جمله قالب سازی، کاربرد فراوانی دارد [۱-۵].

در ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی، نرخ براده‌برداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به طوری که بهبود آن می‌تواند شرایط استفاده از این روش براده‌برداری را، ارتقا بخشد. شواد و همکارانش از پنج نوع ابزار گرافیتی با خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت برای ماشین‌کاری اسپارک استفاده کرده و تأثیر آن را بر روی تغییرات نرخ براده‌برداری در شرایط خشن تراشی، بررسی نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با تغییر ابزار گرافیتی، افزایش ۴۷ درصدی در نرخ براده‌برداری به وجود می‌آید. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که هدایت الکتریکی ابزار گرافیتی به علت تغییر میزان انرژی هدر رفته در ابزار، اساسی ترین تأثیر را بر روی میزان براده‌برداری دارد [۶]. بررسی تأثیر پنج نوع دی الکتریک مختلف بر نرخ براده‌برداری توسط ژانگ و همکارانش انجام گرفته است. این محققان نتیجه گرفتند که نرخ براده‌برداری در دی الکتریک‌های مایع، بیشتر از دی الکتریک‌های گازی بوده و همچنین فشار بیشتر دی الکتریک در بالای نقطه‌ی تخلیه الکتریکی نیز موجب افزایش نرخ براده‌برداری می‌شود. علاوه بر این نتایج آنها نشان داد که با کاهش زمان روشنی پالس نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد [۳]. پرادهان با استفاده از یک روش بهینه‌سازی در سال ۲۰۱۳، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری بر روی نرخ براده‌برداری پرداخت. نتایج نشان دادند که شدت جریان و زمان روشنی پالس، بیشترین تأثیر را بر روی نرخ براده‌برداری دارند؛ به این ترتیب که با افزایش شدت جریان، نرخ برداشت ماده افزایش یافته و با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ براده‌برداری قطعه‌کار کاهش می‌یابد [۷]. بارمان و همکارانش صافی سطح و نرخ براده‌برداری را در فرایند اسپارک با ابزار مسی خالص، در شرایطی که شدت جریان، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و ولتاژ را به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته بودند، بهینه‌سازی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که شدت جریان، بیشترین تأثیر را بر روی نرخ براده‌برداری دارد [۸]. در تحقیقی دیگر که توسط آموریوم و همکارانش در سال ۲۰۱۴ انجام شد، نحوه عملکرد سه نوع ابزار گرافیتی با اندازه دانه سه، ده و پانزده

¹ Sever Plastic Deformation (SPD)

² Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

در تحقیقی که گریگر و همکارانش بر روی میکروساختار ماده مس پس از فرایند اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان انجام داده اند، مشاهده شد که متوسط اندازه دانه مس پس از هشت مرحله اکستروژن شدن، از اندازه ۵۰ میکرومتر به مقدار ۵ میکرومتر رسیده است [۱۶]. الیور و همکارش آلیازی از فلز مس را تا دوازده مرحله تحت عملیات اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان قرار داده و نشان دادند که با افزایش تعداد مراحل اکستروژن، از دو به دوازده مرحله، اندازه متوسط دانه‌های ماده از ۸۰ میکرومتر به ۲۳ میکرومتر می‌رسید [۱۳].

یکی از مزیت‌های مهم و خوب این فرایند، خارج شدن قطعه از قالب بدون تغییر در ابعاد سطح مقطع آن است؛ بنابراین این امکان وجود دارد تا به راحتی قطعه را دوباره در داخل قالب قرار داده و عملیات را طی مرحله ای دیگر تکرار نمود. به این ترتیب می‌توان کرنش اعمال شده بر قطعه را افزایش داده و قطعاتی ریزدانه تر با استحکام بالا و ویژگی‌های خاص، ایجاد کرد [۱۵، ۱۲، ۱۱].

بر اساس موارد بیان شده، می‌توان با استفاده از روش اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان، اندازه دانه ابزار مسی را کاهش داده و تأثیر آن را بر روی نرخ براده‌برداری در فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی بررسی نمود.

در این تحقیق، مس خالص به عنوان ابزار فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی، طی چهار و هشت مرحله تحت عملیات اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان قرار گرفته و پس از تعیین اندازه دانه نمونه‌ها توسط روش پراش الکترون‌های برگشتی^۱، تأثیر استفاده از آنها به عنوان جایگزین ابزار مس خالص ساده بر روی نرخ براده‌برداری فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی، طی مجموعه ای از آزمایش‌های تعریف شده بررسی می‌گردد. نوع ابزار (ساده و اکستروژن شده)، شدت جریان جرقه و زمان روشنی پارامترهای متغیر آزمایش‌ها تعیین شده اند که هر کدام در سه سطح مختلف، مورد بررسی قرار گرفتند.

در این تحقیق، مس خالص به عنوان ابزار فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی، طی چهار و هشت مرحله تحت عملیات اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان قرار گرفته و پس از تعیین اندازه دانه نمونه‌ها توسط روش پراش الکترون‌های برگشتی^۱، تأثیر استفاده از آنها به عنوان جایگزین ابزار مس خالص ساده بر روی نرخ براده‌برداری فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی، طی مجموعه ای از آزمایش‌های تعریف شده بررسی می‌گردد. نوع ابزار (ساده و اکستروژن شده)، شدت جریان جرقه و زمان روشنی پارامترهای متغیر آزمایش‌ها تعیین شده اند که هر کدام در سه سطح مختلف، مورد بررسی قرار گرفتند.

۲- آزمایش‌ها

۲-۱- مواد

فلز مس به علت هدایت الکتریکی و حرارتی مناسب، جزء پرکاربردترین مواد برای تهیه ابزار اسپارک می‌باشد. از اینرو در این تحقیق، فلز مس خالص به عنوان ابزار ماشین‌کاری انتخاب گردید. برای انجام آزمایش‌ها، میلگردهای مسی خالص به قطر ده میلیمتر تهیه شدند. به منظور تعیین خلوص دقیق ماده مس

قطعه مورد آزمایش از جنس فولاد Mo40 (DIN 1.7225) که یکی از آلیاژهای پرکاربرد و عملیات حرارتی پذیر بوده و در زمینه‌های مختلف صنعتی کاربرد فراوانی دارد، انتخاب شد. در نهایت قطعه‌کارها با ابعاد نهایی ۲×۲×۱ سانتی متر، با استفاده از دستگاه وایرکات چارمیلز^۴ بریده شدند.

قالب اکستروژن مورد استفاده از فولاد ابزار سردکار X 153 Cr Mo V12 بر اساس استاندارد DIN 1.2379 تهیه و ساخته شده است. زاویه برخورد قالب ۱۲۰ درجه و زاویه انحنای خارجی آن ۲۰ درجه می‌باشد و دارای کانالی با سطح مقطع دایره ای به قطر ۱۰ میلی متر و همچنین طول ۱۶۰ میلی متر است. طول کانال عمودی قالب نیز ۱۰ سانتی متر می‌باشد. در شکل ۲ نقشه قالب استفاده شده در این تحقیق، نمایش داده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی مس مورد آزمایش

Table 1 Chemical composition of copper tested				
عنصر	Cu	Pb	Sn	Fe
درصد وزنی	۹۹/۹۷۶	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۴۳
عنصر	Zn	Ni	S	سایر
درصد وزنی	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۱۲	<۰/۰۰۰۱

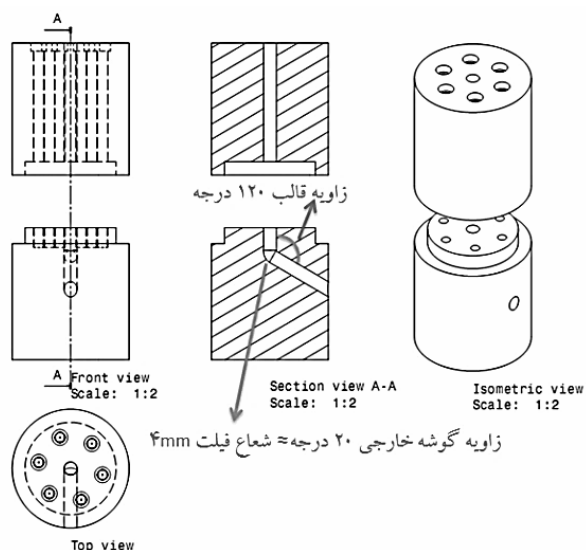


Fig.2 A schematic of used die

شکل ۲ نقشه قالب استفاده شده

² Spark Emission Spectrometer

³ Spectrolab

⁴ Charmilles

¹ Electron Back Scatter Diffraction (EBSD)

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

میلگردهای مسی تهیه شده ابتدا برش خورده و سپس با توجه به ابعاد قالب طول و قطر آنها توسط دستگاه تراش به ترتیب ۵/۳ و ۱ سانتی‌متر شد.

میلگردهای اولیه مس، توسط فرایند تغییر فرم سرد تولید شده اند؛ بنابراین کار سرد و عملیات کشش صورت گرفته، باعث تجمع تنش‌های پسماند در آنها شده است. این تنش‌ها باعث تغییر در ساختار کریستالی، استحکام و خواص مس می‌شود؛ به طوری که استحکام آنها نسبت به ساختار ساده مس بیشتر است. درحالی که عملیات اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان، در طی هر مرحله کار مکانیکی شدیدی را بر نمونه وارد می‌سازد و در صورتی که نمونه اولیه دارای استحکام زیادی باشد، با افزایش تعداد مراحل فرایند احتمال صدمه رسیدن به قالب بسیار زیاد می‌شود. بنابراین برای از بین بردن تنش‌های پسماند ذخیره شده در مس، لازم است تا نمونه‌ها تحت فرایند آنیلینگ، عملیات حرارتی شوند. برای دستیابی به نرم‌ترین و درشت‌دانه‌ترین ساختار مس خالص، نمونه‌ها در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۳۰ دقیقه عملیات حرارتی شده و سپس در همان فضای کوره سرد می‌شوند [۱۸].

به منظور افزایش دقت و به حداقل رساندن تأثیر عناصر خارجی در نتایج، فرایند عملیات حرارتی با استفاده از کوره خلاء ساخت شرکت وس^۱ انگلیس با امکان تولید خلاء تا 10^{-2} تور، انجام شد. برای افزایش خلوص اتمسفر کوره نیز ابتدا گاز آرگون به داخل آن دمیده شده و سپس عملیات خلاء کردن انجام می‌شود. این کار دو مرتبه انجام شده و سپس فرایند آنیلینگ آغاز می‌گردد.

پس از فرایند آنیلینگ، آزمایش کشش از نمونه‌ها انجام شد. این آزمایش طبق استاندارد ASTM E8/E8M-13a و DIN 50125 و با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال ساخت شرکت شینک تریبل^۲ آلمان با حداکثر نیروی اعمالی ۲۴۰ کیلو نیوتن، انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمایش کشش، مشاهده می‌شود که استحکام نمونه آنیل شده کاهش یافته است.

۲-۲-۱- آزمایش متالوگرافی

برای اندازه‌گیری میانگین اندازه دانه نمونه‌های نهایی، آزمایش متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری نئوفات^۳ ساخت

کشور آلمان، انجام شد. آماده‌سازی نمونه و فرایند حکاکی (اچ کردن^۴)، به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM E3-11 و ASTM E407-07 صورت گرفته و اندازه‌گیری میانگین اندازه دانه نیز مطابق استاندارد ASTM E112-12 انجام پذیرفته است. تصاویر و نتایج به دست آمده بیانگر این هستند که اکثر دانه‌ها، دارای قطر متوسطی بین ۳۱/۸ تا ۸۹/۸ میکرومتر می‌باشند. به این ترتیب میانگین اندازه قطر دانه برای مس، ۶۰/۸ میکرومتر اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۳، تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه آنیل شده را نمایش می‌دهد.

۲-۳- فرایند اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان

در این مرحله از تحقیق ابتدا پنج نمونه مسی طی دو، چهار، شش، هشت و ده مرحله تحت فرایند اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان قرار گرفته تا پس از بررسی ساختار کریستالی و اندازه دانه آن‌ها، تعداد مراحل اعمال فرایند اکستروژن بر روی نمونه‌های اصلی به منظور انجام آزمایش ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی، مشخص گردد. در نهایت پس از آزمایش پراش الکترون‌های برگشتی و تعیین تعداد مراحل اکستروژن نمودن مس، فرایند اکستروژن نهایی با تعداد مراحل مشخص شده، بر روی نمونه‌ها انجام می‌شود.

جدول ۲ نتایج آزمایش کشش نمونه آنیل شده

Table 2 Tensile test results of the annealed samples				
قطر اولیه (mm)	طول گیج (mm)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)
۵/۰۴	۲۵	۹۰	۲۲۵	۴۵/۶



Fig. 3 Optical microscope image of the sample annealed

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه آنیل شده ساده

⁴ Etching

¹ Vas

² Schenck Trebel

³ Neophot 32

شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب پراکندگی اندازه قطر دانه‌های نمونه چهار و هشت مرحله اکستروژن شده را نشان می‌دهند. اندازه قطر دانه‌های نمونه چهار مرحله اکستروژن شده، بین پنج تا پانزده میکرومتر است که البته غالب دانه‌ها (حدود ۷۶ درصد آنها) دارای قطر بین هفت تا یازده میکرومتر می‌باشند. میانگین اندازه قطر دانه‌ها نیز تقریباً $9/8$ میکرومتر است. پراکندگی اندازه قطر دانه‌ها برای نمونه هشت مرحله اکستروژن شده، بین یک تا ده میکرومتر است. اغلب دانه‌ها نیز (حدود ۶۰ درصد آنها) دارای قطری بین سه تا شش میکرومتر هستند و میانگین اندازه قطر دانه‌ها تقریباً $5/4$ میکرومتر می‌باشد.

در نهایت با توجه به مقادیر به دست آمده برای اندازه قطر دانه مس نمونه‌های چهار مرحله و هشت مرحله اکستروژن شده، برای انجام آزمایش ماشین کاری با تخلیه الکتریکی انتخاب شد.

۲-۵- آزمایش هدایت الکتریکی

ضریب هدایت الکتریکی ابزار، یکی از پارامترهای تأثیرگذار در فرایند اسپارک می‌باشد؛ به طوری که مقادیر آن نقش بسزایی در تعیین میزان انرژی منتقل شده به قطعه کار در شرایط ماشین کاری یکسان دارد.

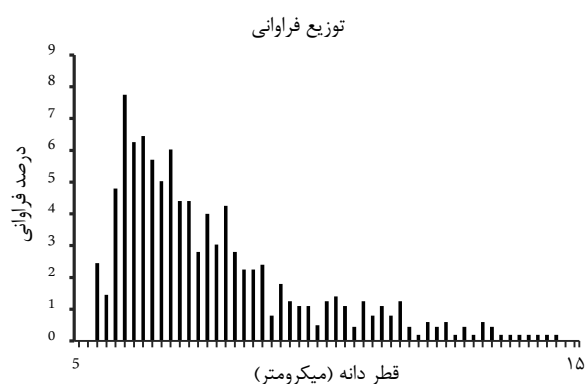


Fig. 4 Distribution of grains in sample with four extruded steps
شکل ۴ پراکندگی اندازه دانه‌های در نمونه با چهار مرحله اکستروژن

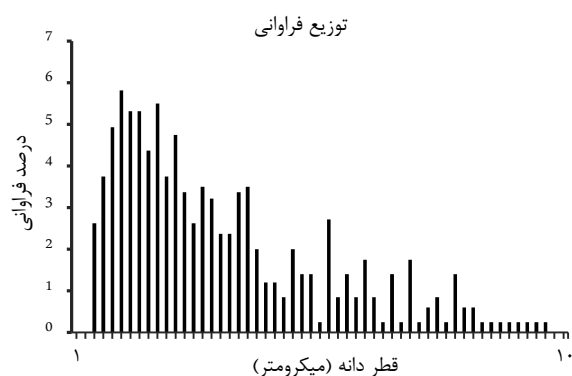


Fig. 5 Distribution of grain size in sample with eight extruded steps
شکل ۵ پراکندگی اندازه دانه‌های نمونه‌ی هشت مرحله اکستروژن شده

برای پرس کردن نمونه‌ها داخل قالب اکسترودر، از دستگاه پرس هیدرولیک صد تن در دمای محیط استفاده شده است. برای کاهش اصطکاک بین دیواره قالب و نمونه‌ها، از ترکیب پودر دی سولفید مولیبدن در روغن روانکار با نسبت مخلوط یک به چهار، استفاده شد.

در نهایت عملیات اکستروژن بر روی پنج نمونه، با تعداد مراحل مشخص شده، انجام گردید. در طی فرایند نیز قطعات بعد از هر مرتبه خروج از قالب، ۹۰ درجه در جهت ثابت حول محور طولی خود چرخانده شده و سپس مجدداً در قالب پرس شد. تحقیقات پیشین نشان داده است که این چرخش نود درجه ای نمونه باعث می‌گردد تا ساختار و دانه بندی ماده در سریع ترین حالت ممکن ریزدانه گردد. برخی از مراجع نشان داده اند که اکستروژن نمودن طی شرایط ذکر شده، دانه بندی یکسان و ریزی می‌دهد [۱۴، ۱۱].

۲-۴- بررسی ساختار نمونه‌ها توسط روش پراش الکترون‌های برگشتی

در روش پراش الکترون‌های برگشتی، یک تشخیص دهنده یا آشکارساز بر روی دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ نصب می‌گردد. پس از برخورد پرتوی الکترونی با سطح نمونه، الکترون‌های برگشتی به یک صفحه فسفری فلوروسنت برخورد کرده و الگویی روی صفحه ظاهر می‌شود. به این الگو، الگوی پراش می‌گویند که ظاهر آن مرتبط با ساختار کریستالی نقطه مورد بررسی می‌باشد. این روش برای به دست آوردن میانگین اندازه دانه نمونه‌هایی که کار مکانیکی بر روی آنها انجام شده است نیز مناسب می‌باشد.

قبل از آزمایش پراش الکترون‌های برگشتی، نمونه باید الکتروپولیش^۲ شود. برای فرایند الکتروپولیش، نمونه ابتدا سنباده زنی شده و سپس با محلول $0/3$ میکرومتر آلومینا پولیش می‌شود. در مرحله بعد، نمونه به عنوان آند و فلز روی خالص به عنوان کاتد، در محلول الکترولیت ۲۵ درصد اسید سولفوریک، ۲۵ درصد اتانول و ۵۰ درصد آب مقطر با دمای یازده درجه سانتی گراد قرار گرفته و با ولتاژ هشت ولت، الکتروپولیش شد.

آزمایش پراش الکترون‌های برگشتی، در مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی شرکت زیس^۳ که به تشخیص دهنده مخصوص مجهز گردیده، انجام شده است.

¹ Scanning Electron Microscope

² Electro polishing

³ Zeiss

منظور زدودن آلودگی‌ها و ناخالصی‌های روی سطح قطعات، کلیه قطعه‌ها شست و شو داده می‌شوند تا عملیات توزین آن‌ها با بیشترین دقت و کمترین تأثیر عناصر خارجی، انجام گیرد. ابتدا قطعات توسط دستگاه فشرده ساز هوا باد گرفته می‌شوند تا ذرات قرار گرفته بر روی آن‌ها، از سطحشان جدا شوند. سپس قطعات در ظرفی حاوی الکل قرار داده شده و پس از بیرون آوردن آن‌ها از ظرف، توسط فرچه نرم و دستمال همراه با الکل، سطحشان تمیز می‌گردد. در مرحله بعد با هدف به حداقل رساندن تأثیر پذیری فرایند توزین قطعه‌کارها از حضور هر گونه ماده خارجی و آلودگی، قطعات توسط دستگاه الما^۱ (ساخت کشور آلمان) همراه با مایع مخصوص دستگاه و بنزین سفید (بدون روغن)، شسته می‌شوند. در نهایت پس از زدودن آلودگی-ها، قطعه‌کارها توسط ترازوی شیمادزو^۲ مدل AEL-40SM ساخت ژاپن، توزین شده‌اند. این ترازو دارای دقت صد هزارم گرم می‌باشد.

آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، با استفاده از دستگاه اسپارک مدل دوپست و چهار شرکت تهران اکرام و بر اساس طراحی آزمایش، در طی ۲۷ مرحله انجام می‌شود. مدار قدرت تنظیم شده برای دستگاه، مدار ایزوپالس بوده که دارای مزیت‌هایی از جمله افزایش میزان براده‌برداری نسبت به مدار ایزوفراکانس است [۱]. شرایط ماشین‌کاری، خشن کاری در نظر گرفته شده و در کلیه آزمایش‌ها پلارینه ثابت بوده، به طوری که ابزار قطب مثبت و قطعه‌کار قطب منفی می‌باشد. زمان خاموشی نیز ده میکروثانیه و ولتاژ هشتماد ولت بوده است. از روغن استاندارد و مخصوص اسپارک، به عنوان سیال دی‌الکتریک استفاده شده و ماشین‌کاری به صورت غوطه‌وری انجام شد. در هر مرحله از آزمایش، ابزار پنج میلی‌متر از قطعه‌کار را در راستای ضخامت آن (ضخامت یک سانتی‌متر) ماشین‌کاری می‌نماید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تغییرات اندازه دانه

نتایج آزمایش متالوگرافی نشان دادند که اندازه میانگین قطر دانه‌ها برای نمونه ساده بین ۳۱/۸ تا ۸۹/۸ میکرومتر می‌باشد. پس از انجام عملیات اکستروژن بر روی نمونه‌ها، آزمایش پراش الکترون‌های برگشتی، پراکندگی اندازه قطر دانه‌ها برای نمونه چهار مرحله و هشت مرحله اکستروژن شده را به ترتیب بین ۵ تا ۱۵ میکرومتر و ۱ تا ۱۰ میکرومتر نشان داد. به این ترتیب

بر این اساس، آزمایش سنجش هدایت الکتریکی مطابق استاندارد ASTM E1004 و توسط آزمون جریان گردابی بر روی ابزار مس خالص ساده، چهار مرحله و هشت مرحله اکستروژن شده، انجام شده است.

۲-۶- طراحی آزمایش

بررسی تحقیق‌های پیشین در ارتباط با نرخ براده‌برداری در فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی، نشان می‌دهد که شدت جریان جرچه و مدت زمان روشنی (زمان روشنی برابر زمان جرچه در مدار ایزوپالس است)، بیشترین تأثیر را بر روی میزان براده‌برداری دارند. به این ترتیب این دو پارامتر، به عنوان پارامترهای متغیر دستگاه در نظر گرفته شدند. برای تعیین سطوح این دو پارامتر نیز پس از بررسی تعدادی از سوابق، مجموعه‌ای از آزمایش‌های اولیه با استفاده از دستگاه اسپارک مورد نظر انجام شده و مناسب‌ترین مقادیر برای پارامترها انتخاب شده‌اند [۳، ۶-۸].

به این ترتیب در نهایت نوع ابزار، شدت جریان جرچه و زمان روشنی که به عنوان پارامترهای متغیر آزمایش انتخاب شده‌اند، هر کدام در سه سطح تغییر می‌نمایند (جدول ۳).

۲-۷- آزمایش ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی

در این تحقیق نرخ براده‌برداری با استفاده از روش اختلاف وزن (اختلاف وزن قطعه‌کار قبل و بعد از ماشین‌کاری تقسیم بر زمان ماشین‌کاری) و مطابق رابطه (۱)، به دست می‌آید. در این رابطه MRR نرخ براده‌برداری بر حسب گرم بر دقیقه، W_P وزن قطعه‌کار قبل از ماشین‌کاری بر حسب گرم، W_U وزن قطعه‌کار بعد از ماشین‌کاری بر حسب گرم و T مدت زمان ماشین‌کاری بر حسب دقیقه می‌باشند.

$$MRR = \frac{W_P - W_U}{T} \quad (1)$$

جدول ۳ پارامترهای متغیر آزمایش

Table3 Variable parameters tested			
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
نوع ابزار	ساده	چهار مرحله	هشت مرحله
شدت جریان جرچه (آمپر)	۷	۱۱	۱۵
زمان روشنی (میکروثانیه)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰

به این ترتیب برای محاسبه نرخ براده‌برداری لازم است تا قطعه‌کارها قبل و بعد از آزمایش ماشین‌کاری، وزن شوند. به

¹ Elma

² Shimadzu

جدول ۴ نتایج آزمایش هدایت الکتریکی

نوع نمونه	مس ساده	مس چهار مرحله	مس هشت مرحله
هدایت الکتریکی (S/m)	$5/783 \times 10^7$	$5/940 \times 10^7$	$5/963 \times 10^7$

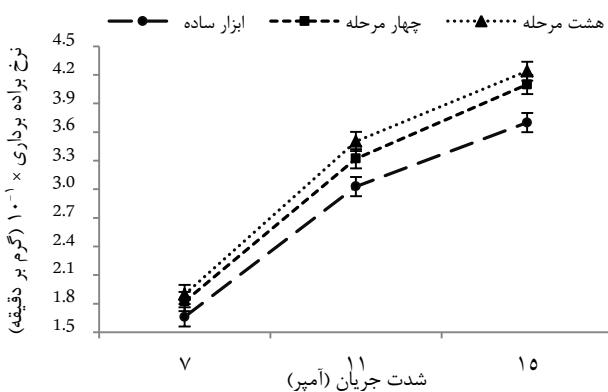


Fig. 6 Chart Material Removal Rate – Current (Time on pulse: 100 μs)
 شکل ۶ نرخ براده‌برداری - شدت جریان (زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه)

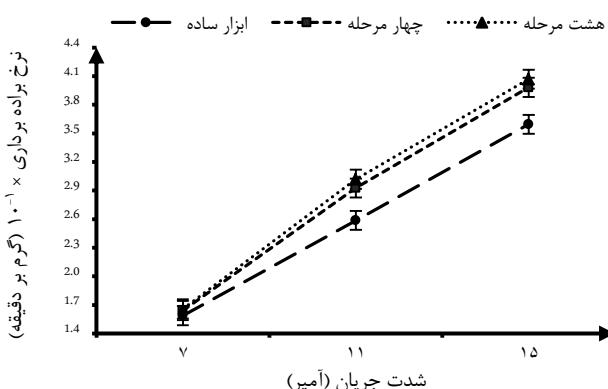


Fig. 7 Chart Material Removal Rate – Current (Time on pulse: 200 μs)
 شکل ۷ نرخ براده‌برداری - شدت جریان (زمان روشنی پالس ۲۰۰ میکروثانیه)

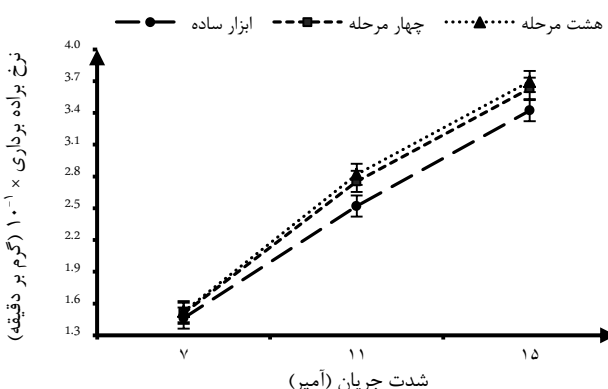


Fig. 8 Chart Material Removal Rate – Current (Time on pulse: 300 μs)
 شکل ۸ نرخ براده‌برداری - شدت جریان (زمان روشنی پالس ۳۰۰ میکروثانیه)

نتیجه می‌شود که در فرایند اکستروژن در کانال‌های زاویه دار با مقاطع یکسان به علت تغییر شکل برشی شدیدی که در قالب به نمونه وارد می‌شود، با ثابت ماندن سطح مقطع نمونه در هر مرحله و ذخیره شدن کرنش‌ها در آن، دانه‌بندی ماده شکسته شده و ریزتر می‌گردد [۱۵-۱۰] از سوی دیگر نتایج نشان می‌دهند که با ادامه اکستروژن نمودن ماده مس از چهار مرحله به هشت مرحله، از شدت کاهش اندازه دانه کاسته شده است؛ به عبارت دیگر در چهار مرحله اول فرایند، میزان ریزدانه شدن ماده بیشتر از چهار مرحله دوم می‌باشد. این امر نشان دهنده کاهش تأثیرپذیری ریزساختار ماده مس از فرایند اکستروژن، با افزایش تعداد مراحل آن از چهار به هشت مرحله می‌باشد. البته لازم به ذکر است که با تغییر مشخصات قالب و شرایط انجام فرایند، مانند زاویه قالب و دمای انجام فرایند، شیب کاهش اندازه دانه ماده برای مراحل مختلف اکستروژن می‌تواند متغیر باشد.

۳-۲- نتایج آزمایش هدایت الکتریکی

نتایج آزمایش هدایت الکتریکی بر روی سه نوع ابزار مسی (ساده، چهار مرحله اکستروژن شده و هشت مرحله اکستروژن شده)، در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر به دست آمده نشان می‌دهند که با چهار مرحله اکستروژن نمودن مس خالص، هدایت الکتریکی آن حدود ۲/۷ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این با ادامه فرایند اکستروژن نمودن مس تا هشت مرحله، مجدداً میزان ۰/۴ درصد بر هدایت الکتریکی افزوده می‌شود. بنابراین همان‌طور که در ارتباط با کاهش اندازه دانه نیز مشاهده شد، به علت کاهش تأثیر فرایند اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار با مقاطع یکسان پس از چهار مرحله، از میزان افزایش ضریب هدایت الکتریکی نیز کاسته شده است.

۳-۳- بررسی تغییرات نرخ براده‌برداری

برای بررسی تغییرات نرخ براده‌برداری، در شکل‌های ۶ تا ۸ نمودار نرخ براده‌برداری نسبت به شدت جریان به ترتیب در زمان‌های روشنی ثابت صد، دویست و سیصد میکروثانیه در شرایط استفاده از هر سه نوع ابزار، نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود استفاده از ابزار چهار مرحله اکستروژن شده به جای ابزار ساده، باعث شده است که نرخ براده‌برداری تا میزان حداکثر ۱۳/۲ درصد افزایش پیدا کند. نرخ براده‌برداری در ابزار هشت مرحله اکستروژن شده نسبت به ابزار چهار مرحله اکستروژن شده، اندکی افزایش داشته؛ به طوری که حداکثر افزایش نرخ براده‌برداری، به ۱۶ درصد رسیده است.

آمپر (مخصوصاً در زمان روشنی دوپست و سیصد میکروثانیه) بیان نمود؛ به طوری که به علت پایین بودن انرژی جرقه نسبت به شدت جریان یازده و پانزده آمپر، نسبت تأثیر استفاده از ابزار اکستروژن شده نیز کاهش می‌یابد.

نمودارها نشان می‌دهند که نرخ براده‌برداری با افزایش شدت جریان جرقه از هفت به یازده آمپر و سپس از یازده به پانزده آمپر، در شرایط مختلف آزمایش بین ۱۲۲ الی ۱۴۵ درصد افزایش داشته است. شدت جریان جرقه از مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ براده‌برداری می‌باشد که با افزایش شدت آن، میزان انرژی انتقال یافته از ابزار به قطعه کار افزایش یافته و در پی آن میزان ماده جدا شده از سطح قطعه کار در هر بار جرقه زدن، افزایش می‌یابد [۶-۸].

در شدت جریان‌های جرقه ثابت نیز مشاهده می‌شود که با افزایش مدت زمان روشنی از صد به سیصد میکروثانیه، با وجود بیشتر شدن مدت زمان ماشین‌کاری، نرخ براده‌برداری در شرایط مختلف بین ۷ تا ۲۰ درصد کاهش یافته است. در شکل ۹، نمودار نرخ براده‌برداری نسبت به زمان روشنی در شدت جریان یازده آمپر نمایش داده شده است. دلیل این اتفاق حضور و دخالت پارامترهای مختلف فیزیکی در مدت زمان‌های طولانی‌تر جرقه و تبعیت نرخ براده‌برداری از آن‌ها می‌باشد. مشخصات کانال پلاسمای تشکیل شده یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین این پارامترها می‌باشد. با افزایش مدت زمان روشنی، کانال پلاسمای منبسط شده و قطر آن افزایش پیدا می‌کند. حال انبساط کانال پلاسمای پس از مدتی باعث می‌شود تا بخشی از انرژی، به ماده دی‌الکتریک منتقل شده و هدر برود. علاوه بر این با افزایش آلودگی‌ها در محل ماشین‌کاری طی زمان‌های روشنی بزرگتر، جرقه در محل تمرکز این آلودگی‌ها زودتر رخ داده و باعث می‌شود تا بخش اعظمی از انرژی صرف ذوب شدن آلودگی‌ها شود.

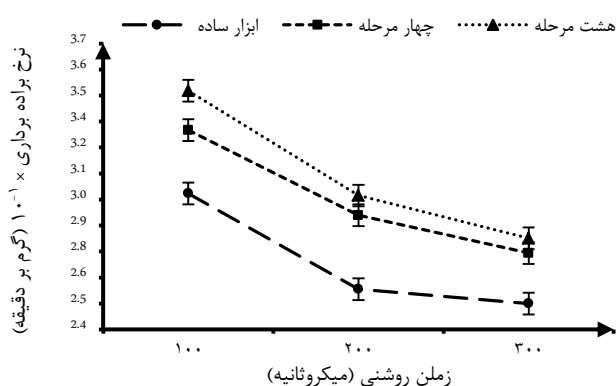


Fig. 9 Chart Material Removal Rate - Time on pulse (Current: 11A)

شکل ۹ نرخ براده‌برداری - زمان روشنی پالس (شدت جریان ۱۱ آمپر)

علت افزایش نرخ براده‌برداری در آزمایش‌هایی که از ابزار ریزدانه شده استفاده گردیده است، تغییر در میکروساختار و خصوصیات ماده مس ابزار در اثر فرایند اکستروژن می‌باشد [۱۰، ۱۳، ۱۶، ۱۷]. با انجام فرایند اکستروژن، همزمان با ریز شدن و یکدست شدن ساختار دانه‌بندی ماده مس، برخی دیگر از خواص آن از جمله هدایت الکتریکی که مورد سنجش قرار گرفت، تغییر می‌نماید که این تغییرات باعث گردیده تا سهم انرژی انتقالی به قطعه کار در یک شرایط ماشین‌کاری ثابت، با افزایش همراه شود. به این ترتیب نرخ براده‌برداری ماشین‌کاری نیز افزایش یافته است. علاوه بر این تغییرات خواص ماده مس می‌تواند شرایط را به گونه‌ای تغییر دهد که ولتاژ تولید شده برای شکست دی‌الکتریک در پی آن افزایش یافته و در اثر کاهش زمان شکست دی‌الکتریک نیز نرخ براده‌برداری افزایش یابد. نتایج نشان می‌دهند که با تغییر نوع ابزار از مس با میانگین اندازه دانه ۹/۸ میکرومتر به مس با میانگین اندازه دانه ۵/۴ میکرومتر، تنها مقدار اندکی به میزان نرخ براده‌برداری افزوده می‌شود. به عبارت دیگر با تغییر ابزار ماشین‌کاری از مس چهار مرحله به مس هشت مرحله اکستروژن شده، از شیب افزایش نرخ براده‌برداری کاسته می‌شود؛ به طوری که در این حالت، نرخ براده‌برداری بین ۱ تا ۵/۵ درصد افزایش داشته، در صورتی که در حالت تغییر ابزار ساده با چهار مرحله اکستروژن شده (جایگزین نمودن ابزار مسی با میانگین اندازه دانه ۹/۸ میکرومتر به جای ابزار مسی با میانگین اندازه دانه ۶۰/۸ میکرومتر)، افزایش نرخ براده‌برداری بین ۳/۲ تا ۱۳/۲ درصد بوده است. این موضوع نشان‌دهنده کاهش تأثیر تعداد مراحل اکستروژن نمودن ابزار، بعد از چهار مرحله می‌باشد. در نتایج آزمایش هدایت الکتریکی نیز مشاهده شد که چهار مرحله اکستروژن کردن ابزار مسی، میزان هدایت الکتریکی آن را در حدود ۲/۷ درصد افزایش می‌دهد؛ در صورتی که پس از آن با اکستروژن کردن ابزار مسی تا هشت مرحله، تنها ۰/۴ درصد بر میزان هدایت الکتریکی آن افزوده می‌شود که این موضوع بیانگر علت کاهش شدت افزایش نرخ براده‌برداری با تعویض ابزار از مس چهار مرحله به مس هشت مرحله اکستروژن شده است.

نکته دیگری که در نتایج مشهود است، کاهش تأثیر نوع ابزار بر روی نرخ براده‌برداری در شدت جریان جرقه هفت آمپر می‌باشد. به عبارتی دیگر در شرایطی که شدت جریان جرقه هفت آمپر بوده، فرایند اکستروژن نمودن ابزار نقش کم رنگتری را در افزایش نرخ براده‌برداری ایفا نموده است. دلیل این موضوع را می‌توان در میزان کم نرخ براده‌برداری در شدت جریان هفت

- [2] J. A. Mc Geough, *Advanced Methods of Machining*, pp. 128-152, Tehran: Tarah, 2009. (in Persian فارسی)
- [3] Y. Zhang, Y. Liu, Y. Shen, R. Ji, Z. Li, C. Zheng, Investigation on the influence of the dielectrics on the material removal characteristics of EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, Issue 5, pp. 1052-1061, 2014.
- [4] M. Kiyak, O. Cakir, Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, Issue 1-3, pp. 141-144, 2007.
- [5] V. K. Jain, *Advanced Machining Processes*, pp. 152-186, Tehran: Azadeh, 2012. (in Persian فارسی)
- [6] F. Klocke, M. Schwade, A. Klink, D. Veselovac, Analysis of material removal rate and electrode wear in sinking EDM roughing strategies using different graphite grades, in *Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Procedia CIRP*, Vol. 6, pp. 163-167, 2013.
- [7] M. K. Pradhan, Estimating the effect of process parameters on MRR, TWR and radial overcut of EDMed AISI D2 tool steel by RSM and GRA coupled with PCA, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, Issue 1-4, pp. 591-605, 2013.
- [8] M. K. Das, K. Kumar, T. K. Barman, P. Sahoo, Optimization of surface roughness and MRR in EDM using WPCA, *Procedia Engineering*, Vol. 64, pp. 446-455, 2013.
- [9] F. L. Amorim, L. J. Stedile, R. D. Torres, P. C. Soares, C. A. Henning Laurindo, Performance and surface integrity of Ti6Al4V after sinking EDM with special graphite electrodes, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, Issue 4, pp. 1480-1488, 2013.
- [10] A. T. Vijayashakthivel, T. N. S. Dath, R. Krishnamurthy, Response of copper to equal channel angular pressing with different processing temperature, *Procedia Engineering*, Vol. 97, pp. 56-63, 2014.
- [11] K. O. Sanusi, O. D. Makinde, G. J. Oliver, Equal channel angular pressing technique for the formation of ultra-fine grained structures, *South African Journal of Science*, Vol. 108, No. 9-10, 2012.
- [12] E. Zeynali, H. Bisadi, Comparing plastic deformations produced by HPT and ECAP processes using the finite element analysis method, *International Journal of Mechanics and Applications*, Vol. 2(1), pp. 20-24, 2012.
- [13] K. O. Sanusi, G. J. Oliver, Effects of grain size on mechanical properties of nanostructured copper alloy by severe plastic deformation (SPD) process, *Journal of Engineering/Design and Technology*, Vol.

به این ترتیب با وجود افزایش زمان ماشین‌کاری، میزان انرژی منتقل شده از ابزار به قطعه‌کار کاهش یافته و در نتیجه آن نرخ براده‌برداری نیز نسبت به قبل کاهش می‌یابد [۱، ۳، ۵-۷].

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر ریز دانه کردن ابزار مسی بر روی نرخ براده‌برداری در فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی ابتدا مس خالص، چهار و هشت مرحله تحت فرایند اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار با مقاطع یکسان قرار گرفته و سپس بعد از اندازه‌گیری میانگین اندازه دانه نمونه‌ها، جایگزین ابزار مس خالص ساده در فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی شده و نهایتاً نتایج زیر حاصل گردیده است.

میانگین اندازه قطر دانه‌ها برای مس خالص ساده، بین ۳۱/۸ تا ۸۹/۸ میکرومتر بوده است. در حالی که با چهار مرحله اکستروژن کردن آن، ساختار ماده حدود ۸۳/۸۸ درصد ریزتر گشته؛ به طوری که میانگین اندازه قطر دانه آن ۹/۸ میکرومتر می‌باشد. با ادامه‌ی فرایند اکستروژن تا هشت مرحله نیز دانه بندی ماده حدود ۴۴/۹ درصد ریزتر شده و میانگین اندازه قطر دانه‌ها به ۵/۴ میکرومتر رسیده است.

بررسی نتایج نشان دادند که اکستروژن کردن ابزار مسی خالص، باعث افزایش نرخ براده‌برداری فرایند می‌شود؛ به طوری که تعویض نوع ابزار از مس خالص با میانگین اندازه دانه ۶۰/۸ میکرومتر به مس خالص با میانگین اندازه دانه ۹/۸ میکرومتر، می‌تواند میزان نرخ براده‌برداری ماشین‌کاری را تا حداکثر حدود ۱۳/۲ درصد افزایش دهد. علاوه بر این مشخص گردید که با تعویض ابزار از مس خالص با میانگین اندازه دانه ۹/۸ میکرومتر به مس خالص با میانگین اندازه دانه ۵/۴ میکرومتر، پارامتر نرخ براده‌برداری نسبت به شرایط قبل، حداکثر ۵/۵ درصد افزایش داشته است.

با افزایش شدت جریان جرقه از هفت تا پانزده آمپر، مشاهده می‌شود که به علت افزایش انرژی انتقال یافته به قطعه‌کار، میزان براده‌برداری افزایش پیدا می‌کند. از سوی دیگر در یک شدت جریان ثابت، با افزایش مدت زمان روشنی از مقدار صد به سیصد آمپر، به علت دخالت پارامترهای مختلف فیزیکی در زمان‌های طولانی‌تر جرقه، نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد.

۵- مراجع

- [1] R. A. Mahdavinezhad, *Non Conventional Manufacturing Process*, pp. 13-62, Tehran: Daneshgah Tehran, 2009. (in Persian فارسی)

- 7, No. 3, pp. 335-341, 2009.
- [14] Sh. R. Bahadori, K. Dehghani, F. Bakhshandeh, Microstructure, texture and mechanical properties of pure copper processed by ECAP and subsequent cold rolling, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 583, pp. 36-42, 2013.
- [15] 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.
- [16] M. Greger, J. Valicek, P. Hlavacek, Microstructure and hardness of copper after pressing by ECAP, in *13th International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, Hammamet, Tunisia, pp. 749-752, 2009.
- [17] F. Al-Mufadi, F. Djavanroodi, Effect of equal channel angular pressing process on impact property of pure copper, *International Journal of Chemical/Nuclear/Materials and Metallurgical Engineering*, Vol. 8, No. 1, 2014.
- [18] F. A. Matoofi, *Copper Heat Treatment And Its Alloy Standards*, Tehran: Fadak Isatis, 2006. (in Persian فارسی)