



تأثیر شدت جریان و نرخ پیشروی بر زبری سطح و عمر خستگی قطعه کار در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات

حسین دهستانی¹، محمد مهدی ابوترابی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

* یزد، صندوق پستی 741-89195، abootorabi@yazd.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 2 اسفند 1398

داوری اولیه 28 اسفند 1398

پذیرش: 27 فروردین 1399

کلیدواژگان:

تراش کاری

تراش کاری به کمک وایرکات

زبری سطح

عمر خستگی

سطح پاسخ

تراش کاری به کمک وایرکات (WEDT) یکی از زمینه‌های تحقیقاتی نسبتاً جدید در ماشین کاری است. دلیل اصلی استفاده از وایرکات در تراش کاری، عدم تماس ابزار و قطعه کار حین فرایند برش است که باعث می‌شود سختی و تردی قطعه کار عامل محدود کننده‌ای برای برش نباشند. برای تراش کاری به کمک وایرکات لازم است یک مکانیزم چرخان به دستگاه وایرکات اضافه شود تا ضمن نگه داشتن قطعه کار موجب دوران آن شود. در این مقاله، تأثیر پارامترهای شدت جریان برق و پیشروی میز روی صافی سطح و عمر خستگی قطعه کار از جنس Mo40 با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ بررسی و میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی با استفاده از آنالیز واریانس مشخص شده است. طبق نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی، با افزایش میزان پیشروی میز و شدت جریان، صافی سطح و عمر خستگی قطعه کار کاهش می‌یابد. پیشروی به ترتیب با 87 و 75 درصد تأثیر بر زبری سطح و عمر خستگی، پارامتر تعیین کننده است. کمترین زبری سطح به میزان 1/63 میکرومتر و بیشترین عمر خستگی به میزان 85613 دور، با استفاده از مقادیر 1 آمپر برای جریان و 0/4 میلی‌متر بر دقیقه برای نرخ پیشروی در فرایند WEDT به دست آمده است، اما در سایر آزمایش‌های فرایند WEDT زبری سطح، بیشتر و عمر خستگی، کمتر از فرایند تراش کاری معمولی است. متوسط زبری سطح در فرایند WEDT نسبت به تراش کاری معمولی، 52% بیشتر و متوسط عمر خستگی قطعه کار در فرایند WEDT نسبت به تراش کاری معمولی 16/8% کمتر شده است.

The effect of current intensity and feed rate on surface roughness and fatigue life of work piece in wire electrical discharge turning (WEDT) process

Hossein Dehestani, Mohammad Mahdi Abootorabi*

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

* P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, abootorabi@yazd.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 20 February 2020

First Decision: 18 March 2020

Accepted: 15 April 2020

Keywords:

Turning

Wire electrical discharge turning

Surface roughness

Fatigue life

Response surface

Abstract

Wire electrical discharge turning (WEDT) is one of the relatively new areas of research in machining. The main reason for using WEDT is the lack of contact between the tool and the workpiece during the cutting process, which makes the workpiece hardness and brittleness not a limiting factor for cutting. For WEDT it is necessary to add a rotating mechanism to the wire cut device to rotate the workpiece while holding it. In this paper, the effect of current intensity and feed rate on surface roughness and fatigue life of workpiece Mo40 is investigated using design of experiments with response surface method and the effect of each input parameters is determined using analysis of variance. According to the results of the experimental experiments, with increasing table feed and current intensity, surface finish and fatigue life of the workpiece decrease. Feed rate with 87 and 75% effect on surface roughness and fatigue life, respectively, is the determining parameter. The lowest surface roughness (1.63 μm) and the highest fatigue life (85613 rev) were obtained using values of 1 ampere for current and 0.4 mm/min for feed rate in the WEDT process, but in other experiments of the WEDT process, the surface roughness is higher and the fatigue life is less than that of the conventional turning. The average surface roughness in the WEDT process is 52% higher than that of conventional turning, and the average fatigue life of the workpiece in the WEDT process is 16.8% lower than that of conventional tuning.

1- مقدمه

روش‌های سنتی ماشین کاری مقرون به صرفه نیست زیرا این روش‌ها باعث سایش شدید ابزار، صافی سطح نامناسب قطعه کار، تلرانس‌های هندسی زیاد و به طور کلی، شرایط نامطلوب برش می‌شوند. برای کاهش این مشکلات و انجام فرایندهای برش

با توسعه مواد مهندسی جدید و پیشرفت صنایع، نیاز به روش‌های نوین و پیشرفته ماشین کاری بیشتر احساس شد. برخی مواقع با توجه به شرایط و جنس قطعه کار، استفاده از

Please cite this article using:

H. Dehestani, M. M. Abootorabi, The effect of current intensity and feed rate on surface roughness and fatigue life of work piece in wire electrical discharge turning (WEDT) process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 8, pp. 36- 44, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در دانشگاه توکیو ارائه شد که هدف، ساخت شافت و پین‌های با قطر کوچک بود. پین‌های استوانه‌ای با قطر 5 میکرون که به عنوان ابزار برای میکرو ماشین‌کاری کاربرد دارند، توسط تراش کاری به کمک وایرکات¹ (WEDT) قابل تولید هستند [5]. طرح کلی ماشین‌کاری وایرکات و تراش کاری استوانه‌ای به کمک وایرکات در شکل 1 نشان داده شده است. در فرایند WEDT یک محور دورانی به ماشین وایرکات اضافه می‌شود تا توانایی تولید شکل‌های استوانه‌ای را داشته باشد. سیم به وسیله راهنمایی در دو جهت کنترل می‌شود تا از قطعه کار براده‌برداری کرده و فرم استوانه‌ای خواسته شده را روی آن ایجاد کند.

محمدی و همکاران [7] در سال 2008 به بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری فرایند WEDT از جمله متوسط جریان، زمان خاموشی پالس، ولتاژ و سرعت دورانی روی صافی سطح و دایره‌ای بودن سطح مقطع قطعه کار پرداختند. جنس انتخابی آن‌ها فولاد سخت 1/7131 بود و طراحی آزمایش بر اساس روش تاگوچی صورت گرفت. طبق نتایج حاصل شده، متوسط جریان بر روی صافی سطح تأثیر دارد و اثر بقیه پارامترهای ذکر شده قابل چشم‌پوشی است.

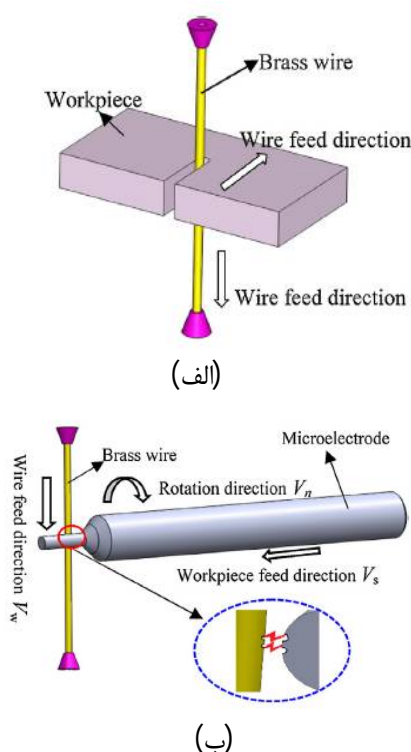


Fig. 1 a) Wire cut machining and b) Cylindrical wire electrical discharge turning [6]

شکل 1 الف) تراش کاری وایرکات و ب) تراش کاری استوانه‌ای به کمک وایرکات [6]

خاص، روش‌های ماشین‌کاری نوین یا غیر سنتی ابداع شدند. از مزایای این روش‌ها می‌توان به عدم تماس ابزار و قطعه کار اشاره کرد که لزوم استفاده از ماده سخت‌تر برای ابزار را از بین می‌برد و همچنین سختی یا تردی قطعه کار عامل محدود کننده‌ای به حساب نمی‌آید. از دیگر مزایای این روش‌ها می‌توان به صافی سطح بهتر و امکان ایجاد شکل‌های پیچیده روی قطعه کار اشاره کرد [1]. یکی از این روش‌های غیر سنتی ماشین‌کاری، استفاده از تخلیه الکتریکی است. در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ولتاژ پالسی و منقطع بین دو الکترود به نام‌های ابزار و قطعه کار که در سیالی بنام دی‌الکتریک غوطه‌ور هستند برقرار شده و موجب ایجاد جرقه بین ابزار و قطعه کار می‌شود. جرقه‌ها در نزدیکترین نقطه یا نقاط بین ابزار و قطعه کار زده می‌شوند و هر جرقه جزء کوچکی از ماده را از سطح قطعه کار جدا و یا ذوب می‌کند [2، 3]. در زمان روشن شدن پالس، میدان الکتریکی در نقاطی که ذرات بیشتری بین ابزار و قطعه کار وجود دارد یا دو الکترود به هم نزدیک‌ترند به حداکثر خود می‌رسد. متمرکز شدن جریان در نقاطی که شدت میدان بالاتر است باعث تبخیر موضعی و تشکیل حباب‌های ریز بخار دی‌الکتریک می‌شود. تکمیل یونیزاسیون باعث هجوم بارهای الکتریکی قوی به سمت الکترودها و تولید حرارت در سطح الکترودها و ذوب و تبخیر آنها می‌شود. با تشکیل کانال پلاسما در دی‌الکتریک، جریان الکتریکی افزایش و مقاومت و ولتاژ کاهش می‌یابد. عبور جریان زیاد سبب نرخ افزایش دمایی در حدود 10^9 تا 10^{10} درجه سانتی‌گراد بر ثانیه و بخار شدن سطوح الکترود و قطعه کار می‌شود. با خاموش شدن ژنراتور، پالس پایان یافته و کانال پلاسما به سرعت دی‌یونیزه می‌گردد. تراکم براده‌ها در ناحیه تخلیه قبلی کماکان مقداری رسانایی در دی‌الکتریک باقی می‌گذارد که وجود یک زمان خاموشی بین پالس‌ها را الزامی می‌کند. این زمان حداقل باید 5-15 μs باشد تا دی‌یونیزاسیون، کامل و مقداری از ذرات جامد معلق در گپ توسط سیال دی‌الکتریک پراکنده و گپ برای جرقه بعدی آماده شود [4]. فرایند وایرکات، نوعی خاص از ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است که در آن از یک سیم به عنوان الکترود ابزار استفاده می‌شود. عمل برش در وایرکات به واسطه تغذیه پیوسته سیم حامل جریان و حرکت آن در مسیر برنامه‌نویسی شده صورت می‌گیرد.

ایده اولیه استفاده از وایرکات در تراش کاری قطعات استوانه‌ای، در سال 1986 توسط ماسوزاوا و گروه تحقیقاتی‌اش

¹ Wire Cut Electrical Discharge Turning

از: 1- سرعت دورانی 2- عمق برش شعاعی 3- نرخ پیشروی میز 4- میزان طول بیرون از اسپیندل قطعه‌کار (طول آزاد) و 5- جهت چرخش اسپیندل. طبق مطالعات آن‌ها مهمترین پارامتر مؤثر بر صافی سطح، نرخ پیشروی میز و پس از آن، میزان طول آزاد قطعه کار و جهت چرخش اسپیندل است. در مورد MRR، عمق برش شعاعی تأثیرگذارترین مؤلفه است. برای ماکزیمم کردن نرخ باربرداری باید از حداکثر مقادیر مجاز در عمق برش شعاعی، پیشروی میز و طول آزاد قطعه‌کار استفاده شود. برای کاهش زبری سطح باید میزان پیشروی میز و طول آزاد قطعه‌کار را کاهش داد و از جهت چرخش پادساعتگرد استفاده کرد. سرعت دورانی به صورت مستقل تأثیر چندانی بر هیچ کدام از دو پارامتر استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک به مدل سازی تأثیر پارامترهای زمان روشنی و خاموشی پالس و سرعت دورانی بر زبری سطح در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات روی جنس اینکونل 825 پرداختند. نتایج این پژوهش نشان دهنده تاثیر مثبت استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی پارامترهای ماشین کاری بود و دقت مدل سازی در حدود 96 درصد بیان شد. در این مقاله، تأثیر پارامترهای شدت جریان و پیشروی میز روی زبری سطح و عمر خستگی قطعه‌کار در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات بررسی و نتایج به دست آمده با روش تراش کاری معمولی مقایسه شده است. عمر خستگی قطعه‌کار در فرایند WEDT برای نخستین بار در این تحقیق بررسی شده است. علاوه بر این، استفاده از فولاد Mo40 به عنوان قطعه‌کار در فرایند WEDT نیز برای نخستین بار در این مقاله انجام شده است.

2- آماده سازی فرایند و انجام آزمایش‌ها

فولاد Mo40 یکی از فولادهای پرکاربرد در ساخت قطعات مختلف است؛ بنابراین، فولاد Mo40 به عنوان جنس قطعه‌کار مورد بررسی در این تحقیق انتخاب شد. برای اینکه بتوان به کمک وایرکات تراش کاری کرد، باید یک مکانیزم چرخان به دستگاه وایرکات اضافه نمود. یک مکانیزم چرخان شامل موتور، چوک یا اسپیندل و سیستم انتقال قدرت است. برای انجام آزمایش‌های تجربی، از تسمه برای انتقال قدرت و از مینی چوک برای گرفتن قطعه‌کار استفاده شده است. با توجه به یکسان بودن قطر پولی‌های متصل به موتور و اسپیندل، نسبت تبدیل دور یک به یک و تعداد دوران قطعه‌کار در دقیقه برابر با تعداد دوران نامی موتور است. شکل 2 دستگاه وایرکات و اسپیندل، موتور و

همچنین هیچ کدام از این پارامترها تأثیر معناداری روی دایره‌ای بودن قطعه کار نداشتند. حداد و همکاران [8، 9] در سال 2009 به بررسی تراش کاری استوانه‌ای به کمک وایرکات با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی و آنالیز واریانس پرداختند. آن‌ها از فولاد ابزار AISI D3 استفاده و اثر پارامترهای جریان، ولتاژ، زمان خاموشی پالس و سرعت دورانی بر حداکثر نرخ برداشت ماده (MRR)، زبری سطح (R_a) و دایره‌ای بودن را بررسی کردند. طبق نتایج به دست آمده، تمامی پارامترهای مورد آزمایش بر R_a تأثیر دارند اما تأثیر ولتاژ و جریان بر آن بیشتر است. تمامی پارامترها به جز سرعت دورانی بر MRR تأثیرگذارند و تنها زمان خاموشی پالس و سرعت دورانی، دایره‌ای بودن را تحت تأثیر قرار داده‌اند. بالامورالی و همکاران [2] در سال 2015 با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی در فرایند تراش کاری با وایرکات، تأثیر پارامترهای سرعت دورانی، زمان خاموشی و روشنی پالس، سرعت تغذیه سیم و فاصله‌ی گپ حین زدن جرقه‌ها را روی بیشترین نرخ برداشت ماده و صافی سطح بررسی کردند. قطعه‌کار مورد استفاده در این تحقیق از جنس فولاد ضدزنگ SS316 بود. طبق تحقیقات آن‌ها مهمترین فاکتور مؤثر روی بیشترین نرخ برداشت ماده، سرعت دورانی و کم اثرترین فاکتور، زمان روشنی پالس است. برخلاف نرخ برداشت ماده، صافی سطح بیشتر تحت تأثیر زمان روشنی پالس است و کمترین تأثیر را از سرعت دورانی می‌پذیرد. گوئیل و پیوری [4] در سال 2016 با استفاده از آنالیز آماری و طراحی آزمایش به روش تاگوچی در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات به بررسی تأثیر پارامترهای زمان روشنی پالس، حداکثر جریان، ولتاژ، سرعت دورانی و فشار پاشش دی‌الکتریک بر روی MRR و صافی سطح پرداختند. قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه از جنس Ti6Al4V و الکتروود به کار رفته به شکل باریکه‌ای از مس به جای سیم بود. طبق مشاهدات آنها بیش از 90 درصد تأثیرپذیری نرخ برداشت ماده مربوط به سه پارامتر حداکثر جریان، زمان روشنی پالس و ولتاژ است که مهمترین آن‌ها حداکثر جریان با 63% تأثیرگذاری است. حداکثر جریان با 44% سهم، تأثیرگذارترین پارامتر روی صافی سطح نیز بود و پس از آن، زمان روشنی پالس با 38% تأثیر در رتبه دوم قرار داشت. لازم به ذکر است ولتاژ و سرعت دورانی قطعه‌کار روی R_a تأثیر چندانی نداشتند. ایزامشاه و همکاران [10] در سال 2017 با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ به بررسی عملکرد سیستم چرخان در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات پرداختند. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق عبارت بودند

تجربی، پارامترهای جنس و قطر سیم و ولتاژ، غیر قابل تغییر و تنها در مقادیر ذکر شده در جدول 1 قابل استفاده بوده است. دی الکتریک مرسوم در ماشین کاری تخلیه الکتریکی آب صابون است که در اینجا نیز به همین علت انتخاب شده است. مقادیر زمان روشنی و خاموشی پالس با بررسی آزمایش‌های انجام گرفته توسط سایر پژوهشگران [4, 11] و انجام آزمون‌های اولیه انتخاب شده است. در پژوهش‌های گذشته معمولاً از موتورهایی با تعداد دور در دقیقه (سرعت دورانی) پایین استفاده شده است. در این مطالعه، برای بررسی امکان انجام تراش کاری به کمک وایرکات در دورهای بالاتر، از موتوری با سرعت 900 دور بر دقیقه استفاده شد.

صافی سطح نمونه‌ها توسط دستگاه زبری سنج مدل TR200 ساخت شرکت Time اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمون خستگی، از دستگاه آزمایش خستگی شرکت Hi-Tech مدل 203 مطابق با استاندارد ISO 1143 استفاده شد. نیروی اعمال شده به قطعه‌کارها در آزمون عمر خستگی معادل با 30 نیوتن در نظر گرفته شد. برای عکس‌برداری از سطح قطعه‌کارهای ماشین‌کاری‌شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل TESCAN VEGA3 استفاده شد.

برای مقایسه زبری سطح و عمر خستگی قطعه کار در فرایندهای تراش کاری به کمک وایرکات و تراش کاری معمولی، با نظر گرفتن سرعت برشی 75 متر بر دقیقه، پیشروی 0/1 میلی‌متر بر دور و عمق برش 0/4 میلی‌متر، قطعه‌کاری با استفاده از ابزار کاربایدی بدون پوشش روی دستگاه تراش معمولی تراشیده شد. این پارامترهای برشی که منجر به کیفیت سطح مناسبی برای قطعه کار می‌شود، با سعی و خطا انتخاب شد.

با در نظر گرفتن پارامتر جریان بین 1 و 3 آمپر و پارامتر پیشروی بین 0/4 و 1 میلی‌متر بر دقیقه به عنوان متغیرهای ورودی در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات، طراحی آزمایش به روش مرکب مرکزی که یکی از انواع طراحی آزمایش به شیوه سطح پاسخ است انجام شد. مقادیر شدت جریان و نرخ پیشروی با در نظر گرفتن محدوده قابل تنظیم پارامترهای دستگاه وایرکات، ابعاد قطعه کار و تجربه اپراتور دستگاه انتخاب شده است. مقادیر بیشتر از حد پارامترهای جریان و پیشروی موجب پارگی سیم و مقادیر کمتر از حد این پارامترها باعث عدم باربرداری و افزایش قابل توجه زمان انجام آزمایش می‌شود. استفاده از روش‌های طراحی آزمایش، با حفظ دقت مدل‌سازی منجر به کاهش تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه کاهش زمان و هزینه انجام تست‌های تجربی می‌شود. با تعیین دو پارامتر به عنوان

سیستم انتقال قدرت اضافه شده به آن را نشان می‌دهد. قطعات دمبلی شکل با آفست یک میلی‌متر نسبت به نقشه ذکر شده در شکل 3 که نمونه استاندارد تست خستگی است با دستگاه تراش CNC تراشیده شدند و یک میلی‌متر باقی‌مانده، با روش تراش کاری به کمک وایرکات باربرداری شد.

در آزمایش‌های تجربی، جریان و پیشروی به عنوان متغیرهای ورودی و زبری سطح و عمر خستگی قطعه کار به عنوان پاسخ‌های خروجی فرایند تراش کاری به کمک وایرکات تعیین شدند. سایر پارامترها در آزمایش‌های تجربی ثابت در نظر گرفته شدند. این پارامترهای ثابت در جدول 1 ذکر شده‌اند.

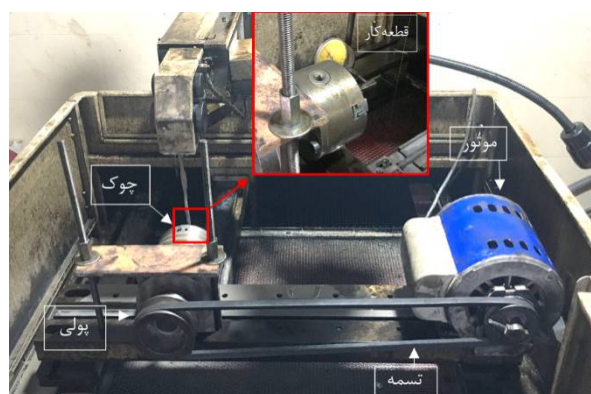


Fig. 2 Wire cut device and rotary mechanism added to it for tests

شکل 2 دستگاه وایرکات و مکانیزم چرخان اضافه شده به آن جهت انجام تست‌ها

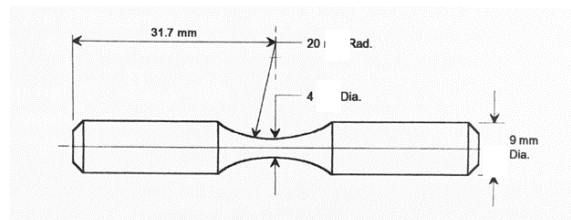


Fig. 3 Drawing of the work piece

شکل 3 نقشه قطعه کار نمونه

جدول 1 پارامترهای ثابت آزمایش‌های تجربی

Table 1 Constant parameters of experimental tests

سیم برنجی (63Cu-37Zn)	جنس سیم
0/25 میلی‌متر	قطر سیم
آب صابون	دی الکتریک
900 دور بر دقیقه	دور اسپیندل
120 ولت	ولتاژ
8 میکرو ثانیه	زمان روشنی پالس
15 میکرو ثانیه	زمان خاموشی پالس

با توجه به نوع دستگاه وایرکات استفاده شده در آزمایش‌های

جنس و هندسه ابزار، میزان ارتعاشات دستگاه، سرعت برشی، نرخ پیشروی و چندین عامل دیگر بر زبری سطح اثر می‌گذارند. همچنین خستگی به عنوان یکی از مهمترین عوامل شکست قطعه‌کار، یکی از پارامترهای مهم هنگام طراحی محسوب می‌شود که بسیار به کیفیت سطح وابسته است. از دیگر پارامترهای مؤثر بر عمر خستگی، مقادیر تنش پسماند کششی در سطح قطعه‌کار است [12] که با توجه به ماهیت غیر تماسی ماشین‌کاری در روش WEDT، تفاوت عمده‌ای با تراش کاری معمولی دارد. همچنین به علت گردش قطعه‌کار در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات در مقایسه با ماشین‌کاری وایرکات، قطعه‌کار توزیع دمایی یکنواخت‌تری دارد که موجب ایجاد تنش‌های پسماند حرارتی کمتری می‌شود [1]. نتایج حاصل از آزمایش زبری سنجی و تعیین عمر خستگی نمونه‌های ماشین‌کاری شده با روش تراش کاری به کمک وایرکات در جدول 3 نمایش داده شده است. جهت بررسی میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر زبری سطح و عمر خستگی قطعه‌کار به آنالیز آماری نیاز است. در ادامه، آنالیز آماری توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام و تابع رگرسیون که نشان دهنده رابطه میان ورودی‌ها و خروجی‌ها است، ارائه شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های 2، 7، 8 و 11 که با پارامترهای ورودی یکسان انجام شده‌اند، نشان دهنده تکرارپذیری نسبتاً زیاد نتایج تجربی است.

جدول 3 مقادیر زبری سطح و عمر خستگی در آزمایش‌های تجربی

شماره آزمایش	جریان (A)	پیشروی (mm/min)	زبری سطح (μm)	عمر خستگی (rev)
1	1	0/4	1/63	85613
2	2	0/7	2/86	69557
3	2	1/15	4/17	45012
4	3/5	0/7	3/06	56318
5	0/5	0/7	2/55	79578
6	1	1	3/24	54877
7	2	0/7	2/78	75414
8	2	0/7	2/61	77112
9	2	0/25	1/87	83745
10	3	0/4	2/33	80456
11	2	0/7	2/81	74471
12	3	1	3/40	52147

3-1-3- زبری سطح

کمترین زبری سطح به میزان 1/63 میکرومتر در فرایند

ورودی، مطابق با رابطه (1) نیاز به انجام 12 آزمایش است که 1 عدد از این آزمایش‌ها برای بالا بردن دقت مدل‌سازی در مرکز مکعب 3 مرتبه تکرار می‌شود.

$$A=2f+(2 \times f+1)+r \quad (1)$$

در رابطه (1)، f تعداد فاکتورهای مورد بررسی و r تعداد تکرارهای آزمایش در مرکز مکعب است. با توجه به استانداردهای طراحی آزمایش مقدار r برابر با 3 انتخاب شده است.

به دلیل داشتن 2 متغیر، باید آلفا را که مشخص کننده محل قرارگیری نقاط محوری در طراحی آزمایش است مطابق با رابطه (2)، 1/41 در نظر گرفت، اما در این مطالعه به دلیل امکان تنظیم دقیق‌تر متغیرهای ورودی، آلفا معادل با 1/5 در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن آلفا به میزان 1/5، پارامتر جریان در نقاط 0/5 و 3/5 آمپر و پارامتر پیشروی در نقاط 0/25 و 1/15 میلی‌متر که خارج از محدوده انتخابی اولیه هستند نیز بررسی می‌شود و این کار به افزایش دقت مدل‌سازی کمک می‌کند. تغییر مقدار آلفا به میزان ذکر شده بلامانع است و منجر به خطا نمی‌شود. جدول 2 طراحی آزمایش به روش مرکب مرکزی که با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شده است را نشان می‌دهد. ترتیب انجام آزمایش‌ها به صورت تصادفی بوده است.

$$\alpha = \pm \sqrt[4]{2^f} \quad (2)$$

جدول 2 طراحی آزمایش به روش مرکب مرکزی

Table 2 Central composite design (CCD) of experiments

حالت	شماره آزمایش	جریان (A)	پیشروی (mm/min)
1	1	1	0/4
2	10	3	0/4
3	6	1	1
4	12	3	1
5	5	0/5	0/7
6	4	3/5	0/7
7	9	2	0/25
8	3	2	1/15
9	8	2	0/7
9	11	2	0/7
9	2	2	0/7
9	7	2	0/7

3- نتایج و بحث

زبری سطح یکی از پارامترهای اصلی در بررسی قابلیت ماشین‌کاری است. در فرایندهای ماشین‌کاری، جنس قطعه‌کار،

همکاران [10] مشابه با نتیجه به دست آمده از این پژوهش، مهمترین عامل تأثیرگذار بر صافی سطح در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات را نرخ پیشروی معرفی کردند.

جدول 4 آنالیز واریانس برای زبری سطح

Table 4 Analysis of variance (ANOVA) for surface roughness

Source	Sum of Squares	Mean Square	F-value	P-value
Model	1/37	0/2732	31/28	0/0003
A: Current	0/0935	0/0935	10/71	0/017
B: Feed	1/24	1/24	141/89	<0/0001
AB	0/0269	0/0269	3/09	0/1295
A ²	0/002	0/002	0/2284	0/6496
B ²	0/0028	0/0028	0/3226	0/5907
Residual	0/0524	0/0087		
Lack of Fit	0/0424	0/0141	4/27	0/1322
Pure Error	0/0099	0/0033		
Cor Total	1/42			

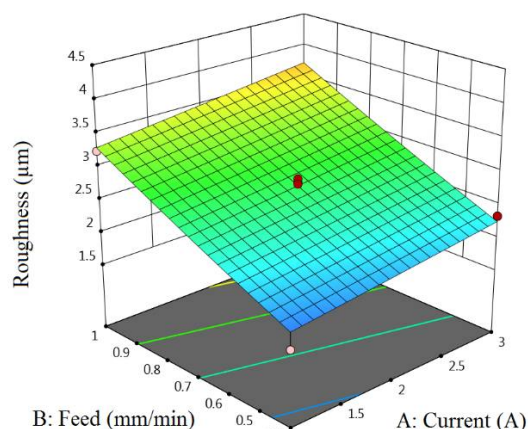


Fig. 4 Three-dimensional (3D) plot of the effect of input factors on surface roughness in WEDT process

شکل 4 نمودار سه بعدی اثر فاکتورهای ورودی بر زبری سطح در فرایند WEDT

3-2- عمر خستگی

بیشترین عمر خستگی به میزان 85613 دور در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات با استفاده از مقادیر 1 آمپر برای جریان و 0/4 میلی متر بر دقیقه برای پیشروی به دست آمده که بیشتر از عمر خستگی قطعه کار تراشیده شده با فرایند تراش کاری معمولی یعنی 81239 دور است. در این مقادیر پارامترهای ورودی، کمترین زبری سطح نیز ثبت شده بود. با افزایش جریان پالس، معمولاً طول ترکها بر روی سطح ماشینکاری شده بیشتر می شود [13] در نتیجه عمر خستگی قطعه کار کاهش می یابد. شکل 5 نمودار سه بعدی اثر فاکتورهای

تراش کاری به کمک وایرکات با استفاده از مقادیر 1 آمپر برای جریان و 0/4 میلی متر بر دقیقه برای پیشروی به دست آمده است که در مقایسه با زبری سطح به دست آمده در تراش کاری معمولی یعنی 1/82 میکرومتر، سطح صافتری است؛ ولی باید توجه نمود که بقیه 11 آزمایش انجام شده با روش WEDT نسبت به تراش کاری معمولی زبری سطح بیشتری دارند. متوسط زبری سطح در آزمایشهای حالت WEDT، 2/77 میکرومتر است که نسبت به تراش کاری معمولی، 52% افزایش را نشان می دهد. جدول 4 آنالیز واریانس پارامترهای مؤثر بر زبری سطح را نشان می دهد. باید توجه داشت که برای تأثیرگذار بودن هر یک از پارامترهایی که در جدول 4 ذکر شده اند، لازم است که مقدار P-value کمتر از 0/050 باشد؛ بنابراین نتیجه می شود که توان دوم پارامترهای ورودی و تعامل دوتایی آنها بر زبری سطح تأثیرگذار نیستند. جهت ساده تر شدن مدل، این فاکتورهای بی تأثیر از مدل سازی حذف و مدل به صورت خطی ارائه شده است. انجام مجدد آنالیز واریانس برای زبری سطح پس از حذف پارامترهای غیر مؤثر با توجه به مقادیر پارامترهای R^2 و R^2_{adj} که به ترتیب 0/93 و 0/87 هستند، نشان دهنده افزایش دقت مدل سازی است.

شکل 4 نمودار سه بعدی اثر فاکتورها بر زبری سطح را نشان می دهد. افزایش پیشروی و جریان باعث افزایش R_a و در نتیجه کاهش کیفیت سطح می شود. این نتایج در تطابق با پژوهش حداد و همکاران [9] است و نتیجه به دست آمده توسط آنها مبنی بر کاهش کیفیت سطح با افزایش جریان را تأیید می کند. با افزایش جریان، انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر می شود و باعث به وجود آمدن حفره های بزرگتر روی سطح و در نتیجه کاهش صافی سطح می گردد [13]. افزایش سرعت پیشروی نیز موجب ارتعاش بیشتر سیم و عدم وجود زمان کافی برای باربرداری ناحیه متأثر از جرقه های ایجاد شده توسط تخلیه الکتریکی می شود. به این دلایل، افزایش نرخ پیشروی باعث عدم یکپارچگی سطح ماشین کاری شده و در نتیجه کاهش صافی سطح شده است.

طبق نتایج حاصل از آنالیز واریانس، جریان کمتر از 7 درصد و نرخ پیشروی بیشتر از 87 درصد بر زبری سطح تأثیرگذار بوده است. برای رسیدن به کمترین میزان ممکن زبری سطح برای قطعه لازم است که در کنار مینیمم نرخ پیشروی، از مقادیر کم برای جریان نیز استفاده شود. استفاده از مقادیر کم پیشروی و جریان با وجود بهبود زبری سطح، باعث افزایش چشمگیر زمان ماشین کاری و در نتیجه افزایش هزینه ها می شود. ایزامشاه و

جدول 5 آنالیز واریانس برای عمر خستگی

Table 5 Analysis of variance (ANOVA) for fatigue life

Source	Sum of Squares	Mean Square	F-value	P-value
Model	3/517e+29	7/034e+28	16/78	0/0018
A: Current	4/495e+28	4/495e+28	10/72	0/0169
B: Feed	2/957e+29	2/957e+29	70/54	0/0002
AB	1/732e+27	1/732e+27	0/4132	0/5441
A ²	5/604e+27	5/604e+27	1/34	0/2916
B ²	5/981e+27	5/981e+27	1/43	0/2774
Residual	2/515e+28	4/192e+27		
Lack of Fit	1/704e+28	5/679e+27	2/10	0/2791
Pure Error	8/117e+27	2/706e+27		
Cor Total	3/768e+29			

3-3- تابع رگرسیون

با استفاده از تابع رگرسیون می‌توان رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی را تعیین و از آن برای مقایسه و بهینه‌سازی اثر پارامترهای ورودی بر خروجی فرایند استفاده کرد. تابع رگرسیون برای صافی سطح و عمر خستگی به صورت رابطه‌های (3) و (4) به دست آمده است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، توان دوم پارامترهای ورودی و تعامل دوتایی آن‌ها بر زبری سطح و عمر خستگی قطعه کار مؤثر نیستند.

$$Roughness^{0.71} = +0.952010 + 0.104900 \times Current + 1.27265 \times Feed \quad (3)$$

$$(Fatigue_Life)^3 = +9.51780E147.27216E13 \times Current - 6.21739E14 \times Feed \quad (4)$$

با توجه به رابطه (3) و تأثیر مستقیم پارامترهای جریان و پیشروی بر زبری سطح، برای دستیابی به کمترین زبری سطح ممکن باید از حداقل پیشروی و جریان استفاده کرد؛ هرچند پیشروی به خاطر ضریب 12 برابری خود نسبت به جریان، پارامتر مؤثرتری است. استفاده از مقادیر مختلفی از جریان و پیشروی می‌تواند به پاسخ‌های یکسانی برای زبری سطح منتهی شود.

هر دو پارامتر پیشروی و جریان نسبت معکوس با عمر خستگی دارند و افزایش این دو پارامتر سبب کاهش عمر خستگی می‌شود. همانند زبری سطح، پیشروی با تأثیر 8/5 برابری خود نسبت به جریان، پارامتر مؤثرتری بر عمر خستگی است. برای دستیابی به بیشترین مقادیر ممکن برای عمر خستگی لازم است پارامترهای پیشروی و جریان تا حد ممکن کوچک انتخاب شوند که این کار باعث افزایش زمان و هزینه تولید می‌گردد. تعیین مقادیر بهینه پارامترهای ورودی برای

ورودی در آزمایش‌های تجربی بر عمر خستگی قطعه کار را نشان می‌دهد. افزایش هر یک از پارامترهای جریان یا پیشروی باعث کاهش عمر خستگی قطعه کار شده است.

با توجه به جدول 3، از 12 آزمایش انجام شده، فقط در یکی از آن‌ها که مشخصات آن قبلاً ذکر شد، عمر خستگی قطعه کار در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات بیشتر از فرایند تراش کاری است. در 11 آزمایش دیگر، عمر خستگی قطعه کار ماشین کاری شده در روش WEDT کمتر از تراش کاری معمولی است. عمر خستگی قطعه در فرایند تراش کاری معمولی 16/8% بیشتر از متوسط عمر خستگی در روش تراش کاری به کمک وایرکات است که مهمترین دلیل آن، صافی سطح نامطلوب قطعه کار در روش WEDT است.

با انجام آنالیز واریانس برای عمر خستگی (جدول 5)، مشاهده می‌شود که به دلیل بیشتر بودن مقدار پارامتر P-value از 0/050، توان‌های دوم ورودی‌ها و تعامل دوتایی آنها بر عمر خستگی نیز تأثیرگذار نیستند؛ بنابراین با حذف این فاکتورها، مدل سازی به شیوه خطی انجام شده است. مقادیر پارامترهای R^2 و R^2_{adj} برای مدل سازی خطی عمر خستگی به ترتیب 0/88 و 0/82 هستند. آنالیز واریانس برای عمر خستگی، نشان دهنده تأثیر 75 درصدی نرخ پیشروی بر عمر خستگی است و همانند زبری سطح، پارامتر تعیین کننده مؤثر بر عمر خستگی، نرخ پیشروی معرفی می‌شود. با افزایش نرخ پیشروی و شدت جریان، زبری سطح قطعه کار افزایش پیدا می‌کند و به دلیل تأثیر معکوس زبری سطح بر عمر خستگی به عنوان یکی از تأثیرگذارترین پارامترها، عمر خستگی قطعه کاهش می‌یابد.

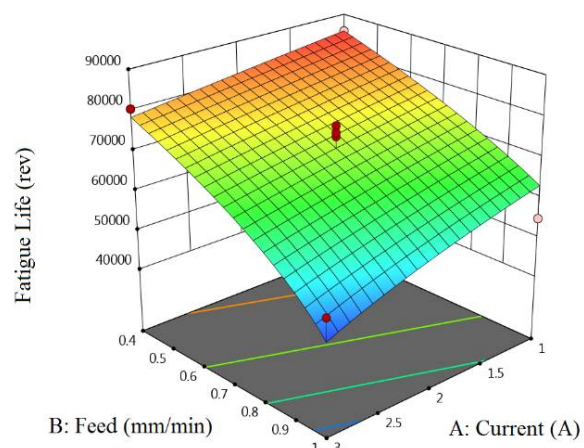


Fig. 5 Three-dimensional (3D) plot of the effect of input factors on fatigue life in WEDT process

شکل 5 نمودار سه بعدی اثر فاکتورهای ورودی بر عمر خستگی در فرایند WEDT

حباب‌هایی ریز در سطح قطعه کار به وجود آمده است که همانطور که قبلاً اشاره شد به علت به هم پیوستن ذرات مذاب سطحی به یکدیگر ایجاد شده‌اند؛ در حالی که در شکل 7 که مربوط به تراش کاری معمولی است، اثری از این حباب‌ها وجود ندارد و بجای آن‌ها، اثرات پیشروی ابزار روی سطح قطعه کار دیده می‌شود.

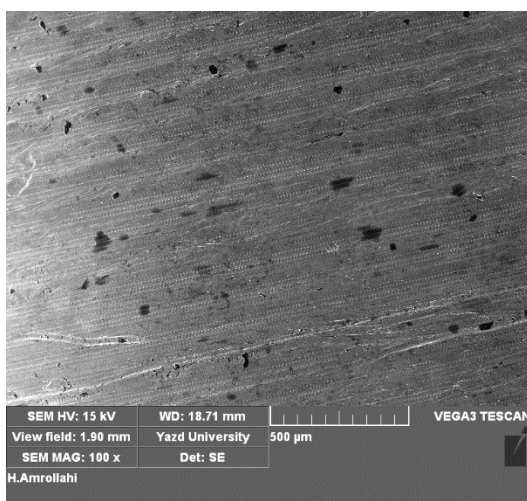


Fig. 7 Workpiece surface turned with conventional turning process
شکل 7 سطح تراش کاری شده با فرایند تراش کاری معمولی

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر نرخ پیشروی و جریان بر صافی سطح و عمر خستگی قطعه کار از جنس فولاد Mo40 در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات (WEDT) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

- کمترین زبری سطح و بیشترین عمر خستگی با استفاده از مقادیر 1 آمپر برای جریان و 0/4 میلی‌متر بر دقیقه برای پیشروی در فرایند WEDT به دست آمد. برای این پارامترهای ورودی، زبری سطح و عمر خستگی قطعه کار تراشیده شده به وسیله وایرکات در مقایسه با قطعه کار تراش کاری شده به روش معمولی به ترتیب کمتر و بیشتر بود. در 11 آزمایش دیگر، زبری سطح قطعه کار در تراش کاری معمولی کمتر از روش WEDT و عمر خستگی قطعه کار در تراش کاری معمولی بیشتر از روش WEDT بود.

- متوسط زبری سطح در آزمایش‌های WEDT نسبت به تراش کاری معمولی 52% افزایش را نشان می‌دهد. عمر خستگی قطعه کار در فرایند تراش کاری معمولی 16/8% بیشتر از متوسط مقادیر عمر خستگی قطعه کار در 12 آزمایش انجام شده به روش WEDT است.

اینکه ضمن دستیابی به کیفیت سطح و عمر خستگی مناسب برای قطعه کار، فرایند WEDT از نظر زمان و هزینه نیز بهینه باشد می‌تواند موضوع یک پژوهش جذاب و کاربردی در ادامه این مطالعه باشد.

3-4- بررسی ساختار سطح

پس از عملیات تراش کاری با وایرکات، قطعه تراشیده شده با جریان 1 آمپر و پیشروی 0/4 میلی‌متر بر دقیقه که دارای کمترین زبری سطح در مقایسه با سایر قطعات تراشیده شده به کمک وایرکات بود و قطعه تراش کاری شده در فرایند تراش کاری معمولی، برای مشاهده و مقایسه حالت سطح، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد عکس‌برداری قرار گرفتند. با افزایش انرژی جرقه در فرایند تراش کاری به کمک وایرکات، سیالیت مذاب سطحی بیشتر می‌شود؛ در نتیجه فرصت کافی جهت بهم پیوستن و بزرگتر شدن قطرات مذاب برای کاهش بیشتر انرژی سطحی وجود دارد و ذرات بصورت کره‌هایی درشت‌تر در سطح تشکیل می‌شوند. با کاهش انرژی حرارتی در مقادیر کمتر شدت جریان و ولتاژ، سیالیت مذاب کمتر شده و امکان تشکیل کره‌های بزرگ مذاب وجود ندارد. این موضوع باعث پیوستگی هرچه بیشتر سطح و در نتیجه کاهش زبری سطح می‌شود. شکل‌های 6 و 7 به ترتیب سطح تراش کاری شده توسط فرایندهای WEDT و تراش کاری معمولی با بزرگنمایی 100 برابر را نشان می‌دهد.

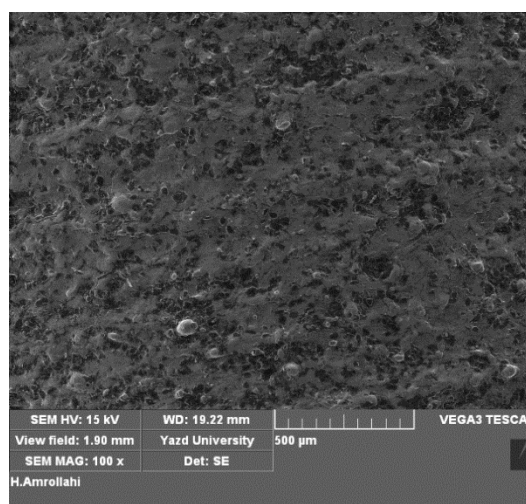


Fig. 6 Workpiece surface turned with WEDT process
شکل 6 سطح تراش کاری شده با فرایند تراش کاری به کمک وایرکات

در شکل‌های 6 و 7، تفاوت در روش ماشین کاری برای شکل دادن قطعه کارها به خوبی قابل مشاهده است. در شکل 6

- speed wire electrical discharge turning. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 964-977, 2017.
- [7] A. Mohammadi, A.F. Tehrani, E. Emanian, A new approach to surface roughness and roundness improvement in wire electrical discharge turning based on statistical analyses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, No. 2, pp. 64-73, 2008.
- [8] M.J. Haddad, M. Tajik, A.F. Tehrani, A. Mohammadi, An experimental investigation of cylindrical wire electrical discharge turning process using Taguchi approach. *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, No. 3, pp. 167-179, 2009.
- [9] M.J. Haddad, F. Alihoseini, M. Hadi, An experimental investigation of cylindrical wire electrical discharge turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, No.12, pp. 1119-1132, 2010.
- [10] R. Izamshah, M. Akmal, M.A. Ali, Performance evaluation of rotary mechanism characteristics by response surface methodology in cylindrical wire electrical discharge turning. *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 4, No. 2, pp. 281-295, 2018.
- [11] J. George, G.R. Chandan, R. Manu J. Mathew, Modeling of Areal Surface Roughness Using Soft-Computing-Based ANN and GA to Estimate Optimal Process Parameters During Wire Electrical Discharge Turning of Inconel 825, *Advances in Unconventional Machining and Composites*, pp. 621-629, 2020.
- [12] N.A. Smyth, M.B. Toparli, M.E. Fitzpatrick, P.E. Irving, Recovery of fatigue life using laser peening on 2024-T351 aluminium sheet containing scratch damage: The role of residual stress. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 42, No. 5, pp. 1161-1174, 2019.
- [13] B. Jabbaripour, M. Motallebpouralishahi, Experimental study of material removal rate, surface roughness and topography in electrical discharge machining of Titanium Aluminide intermetallic compound, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 29-39, 2016 (in فارسی)
- با توجه به مدل سازی‌های انجام گرفته برای زبری سطح و عمر خستگی در فرایند WEDT، تنها اثر پارامترهای جریان و نرخ پیشروی بر پارامترهای خروجی تأثیرگذار است و توان دوم پارامترها یا تعامل دوتایی آن‌ها بر مدل تأثیری ندارد. با افزایش نرخ پیشروی یا جریان، زبری سطح قطعه‌کار افزایش و عمر خستگی آن کاهش یافته است.
- پارامتر تعیین کننده مؤثر بر هر دو پاسخ خروجی زبری سطح و عمر خستگی، نرخ پیشروی است. با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح قطعه‌کار افزایش پیدا می‌کند و به دلیل تأثیر معکوس زبری سطح بر عمر خستگی به عنوان یکی از تأثیرگذارترین پارامترها، عمر خستگی قطعه‌کار کاهش می‌یابد.

6- مراجع

- [1] V. Gohil, Y. Puri, Turning by electrical discharge machining: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 231, No. 2, pp. 195-208, 2017.
- [2] D. Balamurali, K. Manigandan, V. Sridhar, Analysis of the effects of machining parameters on wire electrical discharge turning of stainless steel. *J. Adv Eng Res*, No. 2, pp. 34-41, 2015.
- [3] T. Muthuramalingam, Measuring the influence of discharge energy on white layer thickness in electrical discharge machining process. *Measurement*, Vol. 131, pp. 694-700, 2019.
- [4] V. Gohil, Y. Puri, Statistical analysis of material removal rate and surface roughness in electrical discharge turning of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 232, No. 9, pp. 1603-1614, 2018.
- [5] T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi, T. Suzuki, Study on Micro-Hole Drilling by EDM (Electro-Discharge Machining). Automatic Electrode Forming With Travelling Wire. *Bull. Jpn. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 20, No. 2, pp. 117-120, 1986.
- [6] Y. Sun, Y. Gong, Y. Liu, Q. Li, Y. Zhou, Experimental study on surface characteristics and improvement of microelectrode machined by low