



Is it possible to improve the surface properties by controlling the machining process at the same time as the parts are made? An empirical study of the effect of speed and flow rate variables of the wire cut machine on the surface properties of CK45 steel

Sayyed Mohammad Reza Sedehi ^{a*}, Mohammad Reza Maraki^b, Sayyed Hashem Yazdi^c, Ali Jalali^b, Hadi Ezadi^b, Mohammad Khosravi^d

^a Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

^b Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

^c Nano Part Aseman Company, Gonabad, Iran

^d Department of Mechanical Engineering, Gonabad University, Gonabad, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Sedehi S M R, Maraki M R, Yazdi S H, Jalali A, Ezadi H, Khosravi M. Is it possible to improve the surface properties by controlling the machining process at the same time as the parts are made? An empirical study of the effect of speed and flow rate variables of the wire cut machine on the surface properties of CK45 steel. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(3):497-512.

doi <https://10.61186/masm.4.3.497>

KEYWORDS

CK45 steel,
Wire EDM,
Hardness,
Corrosion,
Wear,
Roughness.

ABSTRACT

Considering the importance and high application of CK45 steel in today's industries and the increasing use of modern machining methods such as wire cut EDM, it is necessary to examine the effects of these methods' variables on the properties of metals. In this study, to enhance surface properties during the manufacturing process, cubic samples made of CK45 steel were fabricated using the wire cut method, and the effects of speed and current intensity variables on changes in surface properties including hardness, roughness, wear, and corrosion were discussed. The hardness and weight loss due to wear in the base sample were 218 HV and 18.51 mg, respectively, while in a sample with a manufacturing speed of 80 and a current intensity of 3 amps, these values reached 247.7 HV and 5.62 mg. The highest roughness was recorded in a sample with a manufacturing speed of 50 and a current intensity of 4 amps, and the best and worst corrosion results were observed at a speed of 50 and a current intensity of 3 amps and a speed of 50 and a current intensity of 4 amps, respectively.

Extended Abstract

1. Introduction

In traditional machining operations based on mechanical principles, a significant amount of energy is expended for material removal [1]. However, a considerable portion of the cutting energy results in undesirable heat, which can lead to issues such as surface cracking and unwanted deformations [2]. Additionally, residual burrs from traditional machining processes require extra operations for finishing [3]. It is important to note that using traditional machining methods for superalloys with excellent strength and wear resistance is challenging [4]. Due to these limitations, unconventional machining methods have emerged that not only offer excellent mechanical and thermal properties but also have the capability to produce components with complex features in superalloy materials [5]. To remain competitive in the global manufacturing industry, producing precise and high-quality products is essential for outpacing competitors. Therefore, several unconventional machining methods have been developed [6], wire EDM plays a leading role in the production of

* Corresponding author. Tel.: +98-9180881303

E-mail address: mrsedehi@ut.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.3.497>

Received: June 19, 2024; Received in revised form: September 24, 2024; Accepted: November 16, 2024.

© Author



complex shapes in all electrically conductive materials. This process was introduced to the industry for the first time in the mid-1960s. As research up to 1975 provided a better understanding of the method and its capabilities, its popularity rapidly increased [7]. The implementation of computer numerical control (CNC) systems in wire EDM in the late 1970s significantly boosted the efficiency of this process. wire EDM is often used for creating prototypes in the aerospace and medical industries, extrusion tools and molds, fixtures, and gauges. Since there is no contact between the workpiece and the tool electrode in this method, hard materials can also be machined easily, and the hardness of the workpiece is not a limitation in this process. The tool in this process is a thin wire with a diameter range of 0.05–0.3 mm [8]. A gap in the range of 0.025–0.05 mm must be continuously maintained between the workpiece and the wire for particle erosion. The used wire is collected after machining and then discarded, as it cannot be reused due to wear and lack of dimensional accuracy [9]. Wire cut EDM technology also eliminates the dimensional changes that occur during traditional machining and can machine high-strength and high-temperature-resistant materials (HSTR). These materials are often used in aircraft, submarines, nuclear energy, and missiles. Therefore, for cutting such materials, electrical discharge machining (EDM) was recognized as a potential technology [10, 11]. Sinha et al. [12] optimized the machining of D3 tool steel to maximize the material removal rate by considering pulse on time, pulse off time, peak current, and servo voltage, finding that pulse on time and input current significantly affected the outcomes compared to the other two parameters. Van Reel et al. [13] conducted an experimental study to improve machining efficiency and precision of finished parts by executing the wire cut process on 316L stainless steel parts and tracked the gap between electrodes along the workpiece's edge to either increase or decrease it. The experiments presented in this paper aim to gain insight into the relationship between wire EDM process parameters and the machined surface, considering machining depth, material removal rate, and surface roughness. Several process optimization strategies are reviewed, taking into account parameters such as feed rate and the number of passes. Experimental results indicate that wire-based machining is a viable process for finishing parts, achieving a removal depth of more than 20 micrometers with surface roughness below 1 micrometer Ra. Shivade et al. [14] studied the impact of pulse on time, pulse off time, peak current, and wire speed on material removal rate, dimensional deviation, gap current, and machining time during the complex machining of D3 tool steel through multi-objective optimization and found that peak current was the most influential parameter on the outputs. Xiao et al. [15] used a wolf pack algorithm to optimize parameters and Taguchi orthogonal array for the experimental design of the wire cut EDM process. By applying the wolf pack algorithm, the roughness performance and material removal rate improved by 12% and 3.99% respectively compared to the Taguchi S/N ratio. Recently, researchers have been using nature-inspired metaheuristic algorithms for machining process optimization by combining regression models [16,17]. Given the increasing demand for materials with high thermal resistance, wire EDM is increasingly used for large materials [18]. Moreover, using environmentally friendly dielectric materials such as purified water can also meet a green approach. Further increasing dimensional accuracy and machining efficiency results from the continuous wire movement and lack of physical contact with the workpiece [19]. However, for lower material removal rates, the surface quality is significantly higher. Conducting the process above a speed of 2.65 mm/min proportionally reduces severe surface degradation with feed rate [20, 21]. To examine the surface characteristics of Ni-Ti shape memory alloy during the wire cut process, including surface damage, shape recovery ability, and hardness, the implementation was carried out. According to the authors, roughness decreased from 2.79 to 0.12 micrometers. To achieve the highest material removal rate and lowest SR value, Taguchi's approach was used for titanium and showed that the two mentioned output features are directly influenced by increasing current. However, relatively limited information is available regarding the simultaneous effect of the manufacturing process and changes in surface properties of steel parts by the wire cut method, but it has been proven that the variables and mechanisms of this method significantly impact the properties of steel, especially surface properties. The aim of this research is to investigate the effect of speed and current intensity variables of the wire cut EDM machine on the surface properties of CK45 steel simultaneously with the fabrication of the part.

Wear

According to the weight reduction results during the wear test listed in Table 3 and Fig.4, it is evident that the wear rate of the sample cut by the wire-cut machine is less than that of the base sample. This indicates the significant impact of this machining method in improving the wear resistance of steel samples. The increase in wear resistance in the samples produced by the wire-cut method can be attributed to various factors such as hardened surface, fine-grained microstructures, surface chemical composition, reduction in residual stresses, and improved surface properties. These factors can be related to the specific characteristics of this method and its effects on the surface of the cut materials. In the wire-cut process, high-frequency electric currents generate significant heat, causing the surface of the material to melt. These materials then rapidly cool down, forming a hard and brittle layer known as the "recast layer" on the surface. This layer can have higher hardness compared to

the base material, thus increasing wear resistance. Additionally, the heat generated in the wire-cut process can cause changes in the microstructure of the material. Specifically, this heat can lead to the formation of fine-grained microstructures, improving the mechanical properties and wear resistance of the material. If the conditions of this process are properly adjusted and optimized, it can produce a smoother final surface with fewer defects, which can enhance the wear resistance of the material since fewer surface defects mean reduced stress concentration points and a lower likelihood of wear. The wear results of the produced samples over 50-meter intervals show that throughout the entire path, the weight reduction of the cut sample compared to the base sample has a significant difference. In the end, the total weight reduction of the base and cut samples was recorded as 18.57 mg and 5.62 mg, respectively. The highest weight reduction for the base sample occurred in the fourth 50 meters, and for the cut sample in the fifth 50 meters. The lowest weight reduction for the base sample was in the third 50 meters, and for the cut sample in the fourth 50 meters. As seen in Fig.4, the initial weight reduction of the first sample due to wear was recorded as 1.79 mg, and during the second, third, and fourth 50 meters, it experienced a noticeable and significant decrease slope, indicating increased wear resistance of the first sample in the subsurface layers. As observed in the SEM images of the wear path, three wear mechanisms, including abrasive, adhesive, and plowing wear, were identified in this test. Plowing wear was only observed in the sample after wire-cutting, indicating the displacement of detached hard particles. These particles are marked with yellow circles in the image. Abrasive wear, characterized by deep, long scratches parallel to the surface, was observed in both samples before and after wire-cutting with different qualities. Abrasive wear can occur through several mechanisms such as scratching, cutting, and erosion. In the scratching mechanism, hard particles penetrate the softer surface and continuously scratch it, displacing material and creating small grooves. These grooves are indicated by yellow arrows in the images. In the erosion mechanism, also referred to as fatigue wear, the repeated application of pressures and movements causes material fatigue, leading to particle fracture and separation from the surface. This is shown by white arrows in the images. Abrasive wear is a significant and common phenomenon in engineering and material science, greatly impacting the lifespan and performance of equipment and components. A precise understanding of abrasive wear mechanisms and influencing factors can help improve designs and select appropriate materials to reduce this type of wear. Adhesive wear, a common wear mechanism, causes parts of one surface to adhere to another. One sign of adhesive wear is local contact and welding, where initially, asperities or small roughness on the surfaces of two materials come into close contact. Due to local pressure and friction-induced heat, these points may weld together locally. This is clearly shown by white circles only in the pre-wire-cut sample with lower hardness. Adhesive wear is crucial in many industrial applications, especially in moving parts and machinery. For example, in combustion engines, gearboxes, and hydraulic components, controlling adhesive wear can significantly increase the service life of equipment and reduce maintenance costs.

2. Conclusion

In this study, CK45 steel samples were produced using the wire cut method under various parameters, and the effects of machine speed and current intensity on surface properties, including hardness, roughness, wear, and corrosion, were examined. The results obtained from the analyses of this research are as follows:

1. The average hardness increased from 218 HV for the base sample to 247 HV in the first sample with a speed of 80 and a current intensity of 3 amps.
2. The mass loss of the first sample due to wear was initially recorded at 1.79 milligrams, and in the second, third, and fourth 50-meter tests, it experienced a significant and noticeable decreasing trend, indicating increased wear resistance in the subsurface layers compared to the surface itself. The total wear increased from 18.51 mg for the base sample to 5.62 mg in the first sample with a speed of 80 and a current intensity of 3 amps.
3. Regarding surface roughness of the produced samples, the first sample with a speed of 80 and a current intensity of 3 amps, which also had the best results in hardness and wear, achieved the best roughness result with a recorded value of 3.39 nm. The fourth sample with a speed of 25 and a current intensity of 2 amps showed the worst roughness result with a recorded value of 5.32 nm.
4. In terms of corrosion, the lower the current density, the higher the corrosion resistance. However, there is an optimal limit for speed because, in the fourth sample with the lowest speed, and in the first and second samples with the highest speeds in the experiments, the corrosion resistance was lower compared to the third sample with a speed of 50.

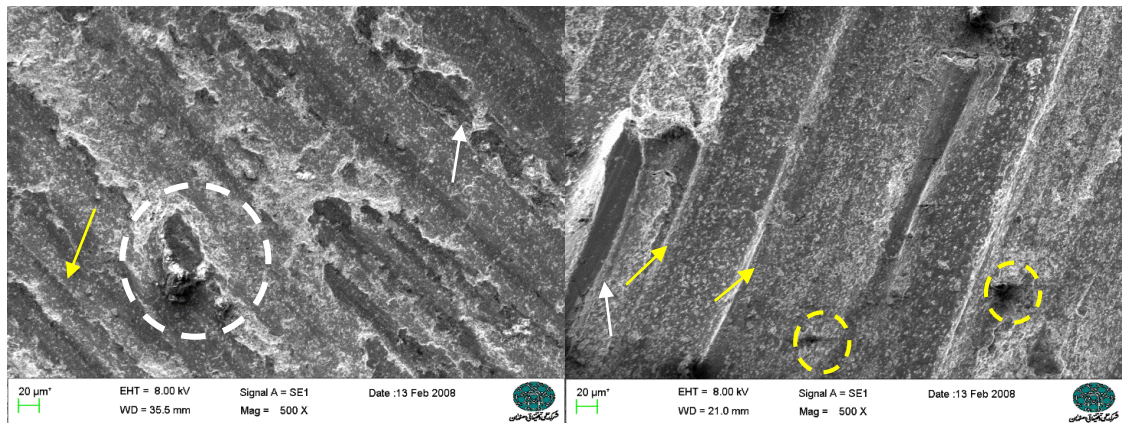
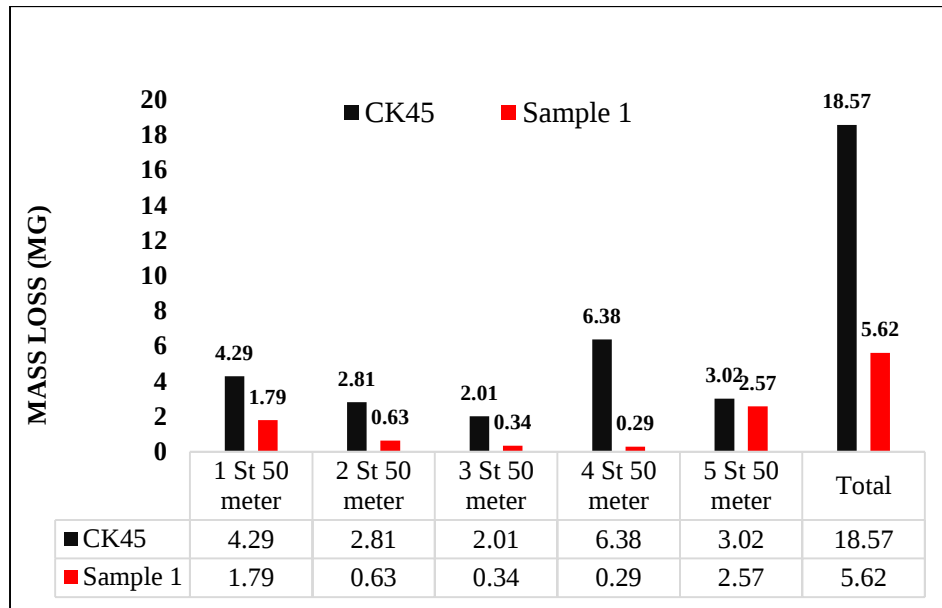


Fig 4. Weight Reduction Results Due to Wear and SEM Images of Samples: a) Before, b) After WireCutt



آیا می‌توان هم‌زمان با ساخت قطعات، از طریق کنترل فرایند ماشین‌کاری، خواص سطحی را نیز ارتقاء بخشید؟ بررسی تجربی تأثیر متغیرهای سرعت و شدت جریان دستگاه وایرکات بر خواص سطحی فولاد CK45

سیدمحمدرضا سدهئی^{الف*}، محمدرضا مرکی^ب، سید هاشم یزدی^پ، علی جلالی^ت، هادی ایزدی^ث، محمد خسروی^ج

^{الف} دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، mrsedehei@ut.ac.ir

^ب استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران، maraki@birjandut.ac.ir

^پ کارشناس IT، شرکت نانو پارت آسمان، گناباد، ایران، hashem.yazdi94@gmail.com

^ت دانش‌آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران، leader121@chmail.ir

^ث دانش‌آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران، hadi455@chmail.ir

^ج دانش‌آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه گناباد، گناباد، ایران، khosravi74@chmail.ir

واژگان کلیدی	چکیده
وایرکات، سختی، خوردگی، سایش، زبری.	با توجه به اهمیت و کاربرد بالای فولاد CK45 در صنایع امروزی و همچنین کاربردی شدن روش‌های نوین براده برداری مانند وایرکات، نیاز است تأثیر متغیرهای این روش‌ها بر خواص فلزات بررسی شود. در این پژوهش به جهت ارتقاء خواص سطحی، هم‌زمان با پروسه ساخت، نمونه‌هایی مکعبی از جنس فولاد CK45 با روش وایرکات ساخته شده و تأثیر متغیرهای سرعت و شدت جریان بر تغییرات خواص سطحی آن شامل سختی، زبری، سایش و خوردگی مورد بحث قرار گرفته است. مقادیر سختی و کاهش وزن بر اثر سایش در نمونه پایه به ترتیب ۲۱۸ ویکرز و ۱۸/۵۱ میلی گرم بوده و در نمونه‌ای با سرعت ساخت ۸۰ و شدت جریان ۳ آمپر این مقادیر به ۲۴۷/۷ ویکرز و ۵/۶۲ میلی گرم رسیده است. بیشترین زبری ایجاد شده در نمونه‌ای با سرعت ساخت ۵۰ و شدت جریان ۴ آمپر ثبت شده و بهترین و بدترین نتیجه خوردگی نیز به ترتیب در مقادیر سرعت ۵۰ و شدت جریان ۳ آمپر و سرعت ۵۰ و شدت جریان ۴ آمپر بوده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶	

۱- مقدمه

در عملیات ماشین‌کاری سنتی مبتنی بر اصول مکانیکی، برای براده‌داری مقدار زیادی انرژی صرف می‌شود [۱]. باین‌حال، مقدار قابل توجهی از انرژی برش منجر به گرمای نامطلوب شده و ممکن است منجر به مشکلاتی همچون ترک خوردگی سطح و تغییر شکل‌های ناخواسته شود [۲]. علاوه بر این، زائده‌های باقی‌مانده در فرآیند ماشین‌کاری سنتی نیاز به عملیات اضافی جهت پرداخت دارند [۳]. توجه به این نکته مهم است که استفاده از روش‌های ماشین‌کاری سنتی مانند برای سوپرآلیاژها با استحکام و مقاومت عالی در برابر سایش چالش برانگیز هستند [۴]. با توجه به این محدودیت، روش‌های ماشین‌کاری نامتعارفی پدید آمده‌اند که علاوه بر ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی عالی، توانایی تولید اجزایی با ویژگی‌های پیچیده در مواد سوپرآلیاژی را دارند [۵]. برای باقی ماندن در عرصه رقابت‌های جهانی صنایع تولیدی، ساخت محصولات دقیق و با کیفیت برای پیشی گرفتن از رقبای

امری ضروری است. به همین منظور، تعدادی از روش‌های ماشین‌کاری غیر متعارف ایجاد شده است [۶]. در طول ساخت اشکال پیچیده، روش وایرکات نقشی پیشرو در تولید در تمام مواد رسانای الکتریکی دارد. این فرایند در اواسط دهه ۱۹۶۰، برای اولین بار به صنعت معرفی شد. همان‌طور که تحقیقات تا سال ۱۹۷۵ درک بهتری از روش و امکانات آن ایجاد کرد، محبوبیت این روش به سرعت افزایش یافت [۷]. پیاده‌سازی سیستم کنترل عددی کامپیوتری در وایرکات در انتهای دهه ۱۹۷۰ تنها عاملی بود که به‌طور قابل‌توجهی باعث جهش کارایی این فرآیند شد. وایرکات اغلب برای ایجاد نمونه‌های اولیه صنایع هوایی و پزشکی، ابزارهای اکستروژن^۱ و قالب‌ها، فیکسچرها^۲ و گیج‌ها استفاده می‌شود. از آنجایی که هیچ تماسی بین قطعه کار و الکتروود ابزار در این روش وجود ندارد، مواد سخت نیز می‌توانند به راحتی ماشین‌کاری شده و سختی قطعه کار محدودیتی در این فرایند محسوب نمی‌شود. در این فرایند، ابزار، یک سیم با قطر کم در محدوده $0.03 - 0.05$ میلی‌متر است [۸]. شکافی در محدوده ابعادی $0.05 - 0.25$ میلی‌متر باید به‌طور مداوم بین قطعه کار و سیم برای فرسایش ذرات نگهداری شود. سیم مورد استفاده پس از ماشین‌کاری جمع آوری شده و سپس دور ریخته می‌شود، زیرا به دلیل سایش و عدم دقت ابعادی نمی‌توان از آن مجدداً استفاده کرد [۹]. فناوری وایرکات، همچنین تغییرات ابعادی را که در حین ماشین‌کاری سنتی اتفاق می‌افتد را حذف کرده و می‌تواند با مواد مستحکم و مقاوم در برابر دمای بالا (HSTR) را ماشین‌کاری کند. این مواد اغلب در بخش هواپیما، زیردریایی، انرژی هسته‌ای و موشک استفاده می‌شوند. بنابراین برای برش چنین موادی، روش تخلیه الکتریکی به‌عنوان یک فناوری بالقوه شناخته شد [۱۰، ۱۱].

سینها و همکاران [۱۲] ماشین‌کاری فولاد ابزار D3 را با هدف به حداکثر رساندن نرخ براده برداری با در نظر گرفتن زمان پالس، زمان خاموش شدن پالس، جریان پیک و ولتاژ سروو^۳ بهینه کرده و دریافتند که زمان روشن بودن پالس و جریان ورودی به میزان زیادی نسبت به دو پارامتر دیگر تأثیر می‌گذارد. وان ریل و همکاران [۱۳] در پژوهشی تجربی، برای بهبود راندمان ماشین‌کاری و دقت قطعات تمام شده، این فرآیند وایرکات را بر روی قطعات ۳۱۶ L stainless steel اجرا و در امتداد دهانه قطعه با یک نقطه شروع برای افزایش یا کاهش شکاف بین الکتروودها را ردیابی کردند. آزمایش‌های ارائه شده در این مقاله با هدف به دست آوردن بینشی در رابطه بین پارامترهای فرآیند وایرکات و سطح ماشین‌کاری شده، با توجه به عمق ماشین‌کاری، نرخ حذف مواد و زبری سطح می‌باشد. تعدادی از استراتژی‌های بهینه‌سازی فرآیند با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند نرخ تغذیه و تعداد پاس‌ها بررسی می‌شوند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که ماشین‌کاری مبتنی بر سیم یک فرآیند قابل دوام برای تکمیل قطعات است که به عمق حذف بیشتر از ۲۰ میکرومتر با زبری سطح زیر ۱ میکرومتر Ra دست می‌یابد. شیواده و همکاران [۱۴] نیز تأثیر زمان روشن شدن پالس، زمان خاموشی پالس، جریان پیک و سرعت سیم بر روی نرخ براده برداری، انحراف ابعادی، جریان شکاف و زمان ماشین‌کاری را در طی ماشین‌کاری پیچیده فولاد ابزار D3 از طریق بهینه‌سازی چند هدفه مطالعه کرده و دریافتند که، جریان اوج مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر خروجی است. شیائو و همکاران [۱۵] از الگوریتم دسته‌گرم برای بهینه‌سازی پارامترها و از آرایه متعامد تاگوچی برای طراحی آزمایشی فرایند وایرکات استفاده کردند. با اعمال الگوریتم دسته‌گرم، عملکرد زبری و نرخ براده برداری در مقایسه با نسبت S/N تاگوچی به ترتیب ۱۲٪ و ۳/۹۹٪ بهبود یافت. اخیراً محققان از الگوریتم‌های الهام گرفته شده طبیعی فرا ابتکاری برای بهینه‌سازی فرایند ماشین‌کاری با ترکیب مدل‌های رگرسیون استفاده می‌کنند [۱۶، ۱۷]. با توجه به افزایش تقاضا برای مواد با مقاومت حرارتی بالا، وایرکات به‌طور فزاینده‌ای برای مواد بزرگ استفاده می‌شود [۱۸]. علاوه بر این، با استفاده از مواد دی‌الکتریک دوستدار محیط‌زیست مانند آب تصفیه شده، یک رویکرد سبز را نیز می‌توان برآورده کرد. افزایش بیشتر دقت ابعادی و راندمان ماشین‌کاری واقعیتی است که از حرکت پیوسته سیم و عدم تماس فیزیکی آن با قطعه ناشی می‌شود [۱۹].

باین‌حال، برای نرخ براده برداری کمتر، کیفیت سطح به‌طور قابل‌توجهی بالاتر است. انجام فرایند بالاتر از سرعت ۲/۶۵ میلی‌متر در دقیقه، سرعت برش نیز به‌طور متناسب با نرخ تغذیه، تخریب شدید سطح قطعه را کاهش می‌دهد [۲۰، ۲۱]. برای بررسی ویژگی‌های سطحی آلیاژ حافظه‌دار شکل Ni-Ti در طول فرایند وایرکات، از جمله آسیب سطح، توانایی بازیابی شکل و سختی، پیاده‌سازی شد. به گفته نویسندگان، زبری از ۲/۷۹ به ۰/۱۲ میکرومتر کاهش یافته است. برای دستیابی به بزرگ‌ترین نرخ باربرداری و کمترین مقدار SR تیتانیوم رویکرد تاگوچی توسط [۲۲] استفاده و نشان دادند دو ویژگی خروجی ذکر شده مستقیماً تحت تأثیر افزایش جریان قرار دارند. باین‌حال، اطلاعات نسبتاً محدودی در مورد تأثیر هم‌زمان فرایند ساخت و تغییرات

^۱ Extrusion^۲ Fixtures^۳ servo voltage

خواص سطحی قطعات فولادی توسط روش وایرکات موجود است، اما ثابت شده است که متغیرها و مکانیزم ساخت این روش، تأثیر به سزایی بر خواص فولاد به ویژه خواص سطحی دارد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر متغیرهای سرعت و شدت جریان دستگاه وایرکات بر خواص سطحی فولاد CK45 همزمان با ساخت قطعه است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد و ساخت نمونه

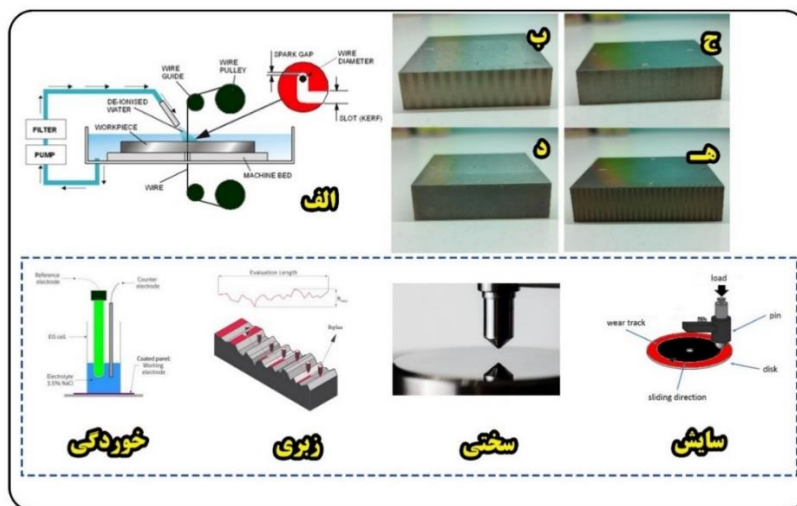
در این پژوهش از فولاد CK45 با ترکیب شیمیایی جدول ۱ و شرایط ساخت در جدول ۲ به عنوان مواد اولیه و تجهیزات، مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین شکل ۱ شماتیک دستگاه و نمونه تولیدی را نشان می دهد. از دستگاه وایرکات سری DK7732 با ابعاد حرکتی $Z=400$ $Y=300$ $X=400$ ، قابلیت برش زاویه $6/80$ درجه و سرعت برش بیش از ۸۰۰۰ میلی متر مربع در ساعت استفاده شده است. قبل از فرایند ماشین کاری، سطحی که باید ماشین کاری شود با استفاده از چرخ ساینده کاربید سیلیکون پرداخت شد تا اطمینان حاصل شود که سطوح قطعه کار تمیز و مسطح هستند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد CK45

material	Impurity content (%)					
Fe	Si	Cr	C	P	Mn	S
(۹۸/۲۵)	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۱	۰/۵۷	۰/۱

جدول ۲- متغیرهای فرایند وایرکات

شماره نمونه	نام گذاری در متن	سرعت میز (step/sec)	شدت جریان (آمپر)	سرعت سیم (m/min)	قطر سیم (mm)
۱	S-1	۸۰	۳	۱۲	۰/۱۸
۲	S-2	۸۰	۴		
۳	S-3	۵۰	۳		
۴	S-4	۵۰	۴		



شکل ۱ شماتیک فرایند و تصاویر نمونه های تولیدی

۲-۲- مشخصه یابی

سختی نمونه ها با استفاده از دستگاه سختی سنج ویکرز مدل KOOPA-UV1 و تحت استاندارد ISO 6507-1 با اعمال بار ۳۰ کیلوگرم و زمان نگه داشتن ۱۰ ثانیه اندازه گیری و برای به دست آوردن میانگین متوسط، برای هر نمونه حداقل ۳ بار تست تکرار

و مقدار سختی ویکرز با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید :

$$HV = 1/8544 \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

که در آن P بار اعمال شده (نیوتن) و d طول مورب تورفتگی (میلی‌متر) است. با توجه به اهمیت موضوع کیفیت صافی سطح در قطعات تولیدی با روش وایرکات، نیاز است این متغیر بر روی قطعات بررسی و آنالیز شود. به همین جهت این آزمون تحت استاندارد ISO 4288، با روش سوزنی و در دمای اتاق انجام پذیرفت. با هدف بررسی بیشتر فازهای موجود در نمونه خالص و نمونه دارای بهترین نتایج سختی و زبری بعد از وایرکات که به ترتیب نمونه اول و دوم نامیده می‌شوند، از پراش اشعه ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه Explorer ساخت شرکت GNR ایتالیا و تحت شرایط $V=40Kv$ و $Current=30mA$ و استاندارد SAE 52100 استفاده شد. آزمون سایش با روش پین روی دیسک و با استفاده از گلوله فولادی از جنس SAE 52100 به قطر ۵ میلی‌متر، قطر اثر مسیر سایش ۴ میلی‌متری در دمای محیط، رطوبت ۲۹٪، تحت نیروی عمود بر سطح ۲ KgF، مسافت سایش ۲۵۰ متر و به صورت آنالیز بازه‌های ۵۰ متری و سرعت خطی ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه انجام پذیرفت. برای بررسی مقاومت به خوردگی نمونه‌های تولیدی از دستگاه Ivium Stat-A و نرم‌افزار Corrview و آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول NaCl ۳/۵٪ و در محدوده ولتاژ ۲۵۰- تا ۲۵۰+ میلی‌ولت، سرعت اسکن ۱ میلی‌ولت و مدت زمان OCP ۱۲۰۰ ثانیه انجام شد. جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی در محدوده ۲۰ mV نسبت به پتانسیل مدار باز با اعمال شیب‌های متقارن بر روی شاخه‌های آندی و کاتدی محاسبه گردیدند. برای خوردگی الکتروشیمیایی، هرچه پتانسیل خوردگی E_{cor} بیشتر و چگالی جریان خوردگی I_{cor} کمتر باشد، خوردگی نمونه کاهش می‌یابد [۲۳].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- XRD

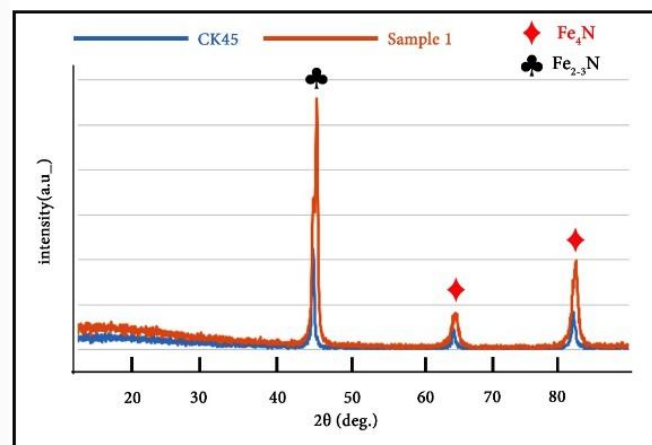
برخی خواص سطحی با افزایش دمای فرایند افزایش می‌یابد و می‌توان گفت این افزایش دمای فرایند، منجر به افزایش اندازه دانه و به طبع آن غالب شدن نفوذ حجمی بر نفوذ مرز دانه می‌شود [۲۴]. فاز با فرمول شیمیایی Fe_4N که فاز نیتريد گاما پرایم نام دارد زمانی تشکیل می‌شود که حلالیت نیتروژن بیش از فاز آلفا (بیش ۰/۱ درصد) باشد. این فاز تا حداکثر ۶٪ نیتروژن پایداری دارد. با در نظر گرفتن این واقعیت که نرخ نفوذ حجمی از نرخ نفوذ مرز دانه‌ای کمتر است، اتم‌های نیتروژنی که از سطح نمونه نفوذ می‌کنند در نواحی نزدیک به سطح انباشته شده و این انباشتگی اتم‌های نیتروژن در سطح، منجر به تشکیل نیتريت آهن با غلظت بالایی از نیتروژن می‌شود (Fe_2-3N به جای Fe_4N تشکیل می‌شود) [۲۵]. همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، میزان شدت پیک فاز Fe_2-3N در نمونه اول نسبت به نمونه خالص به شدت افزایش داشته و می‌توان همین افزایش را عامل ارتقاء خواص سختی و سایش نمونه اول نسبت به نمونه خالص عنوان نمود. از طرفی چون نمونه اول پژوهش حاضر دارای بهترین نتایج مقاومت به سایش و سختی می‌باشد به احتمال زیاد متغیرهای فرایند ساخت این نمونه بالاترین دما را از نظر شرایط کاری فراهم آورده است. Fe_2-3N یا نیتريد آهن ترکیبی است که به دلیل خواص مکانیکی و شیمیایی برجسته‌اش در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته است. این ترکیب می‌تواند به‌طور قابل توجهی خواص سطحی قطعات فلزی را بهبود بخشیده و مقاومت به سایش و خوردگی آن‌ها را افزایش دهد [۲۴]. فرایند نیتروژن‌دهی به‌عنوان روش اصلی تولید این ترکیب، به‌ویژه در صنایع خودروسازی، ابزارهای برش و قالب‌سازی و صنایع نفت و گاز کاربرد گسترده‌ای دارد. این نتیجه در توافق با نتایج حاصل از نتایج XRD است. تحقیق دیگری که توسط آقاجانی و همکارانش [۲۶] نشان داده شده است که با انجام فرایندهای مختلف حرارتی مانند بازپخت، نرمال‌سازی و کوئنچ^۴ می‌توان اندازه دانه را تغییر داد و در نتیجه باعث افزایش و کاهش نفوذ شد.

۳-۲- سختی‌سنجی

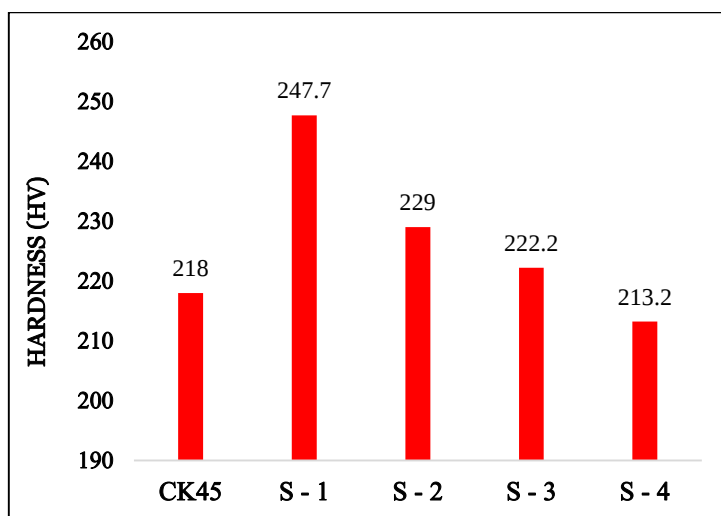
مقایسه نتایج سختی نمونه‌های تولیدی با نمونه پایه نشان می‌دهد، تحت شرایطی خاص در ماشین‌کاری وایرکات، سختی فولاد افزایش می‌یابد. این خاصیت که یکی از مهم‌ترین خواص مواد تلقی می‌شود بنا به نوع کاربرد آن باید حدی بهینه را اتخاذ نماید. فرایند وایرکات می‌تواند یک لایه سطحی نازک و ریز سخت شده روی فولاد ایجاد کند که بر کیفیت کلی سطح تأثیر

⁴ Quench

می‌گذارد. سختی لایه ماشین‌کاری شده بر دوام و عملکرد قطعه تأثیر می‌گذارد. بر طبق آنچه که در شکل ۳ نشان داده شده است، بهترین سختی مربوط به نمونه اول و بدترین نتیجه مربوط به نمونه چهارم می‌باشد که سختی آن نسبت به نمونه پایه، ۵ ویکرز^۵ افت را نشان می‌دهد، درحالی‌که در نمونه اول، حدود ۳۱ ویکرز افزایش سختی را نسبت به نمونه پایه مشاهده می‌کنیم. همچنین از این نتایج می‌توان استنباط کرد که هر دو متغیر سرعت و شدت جریان تا حدی بهینه باعث افزایش میانگین سختی شده، اما با گذر از نقطه بهینه، باعث کاهش سختی می‌شود. همچنین برحسب پژوهش‌های گذشته بر روی مطالعه میکروسختی در فرایند وایرکات، تشکیل لایه ذوب شده روی سطح ماشین‌کاری شده تأیید می‌شود [۲۷].



شکل ۲ نتایج XRD نمونه خالص و نمونه اول



شکل ۳ نتایج آزمون سختی‌سنجی ویکرز

۳-۳- سایش

برحسب نتایج کاهش وزن در حین آزمون سایش درج شده در جدول ۳ و شکل ۴، واضح است که میزان سایش در نمونه برش داده شده توسط دستگاه وایرکات، کمتر از نمونه پایه بوده که این امر نشان‌دهنده تأثیر به سزای این روش براده‌برداری در بهبود مقاومت سایشی نمونه‌های فولادی می‌باشد. افزایش مقاومت به سایش در نمونه‌های تولیدی با روش وایرکات به دلایل مختلفی همچون سطح سخت شده، ریزساختارهای ریزدانه، ترکیب شیمیایی سطح، کاهش تنش‌های باقی‌مانده و بهبود خواص

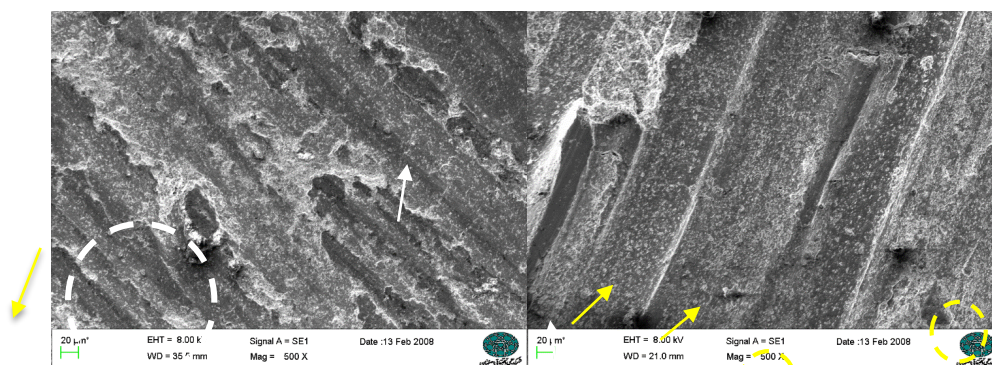
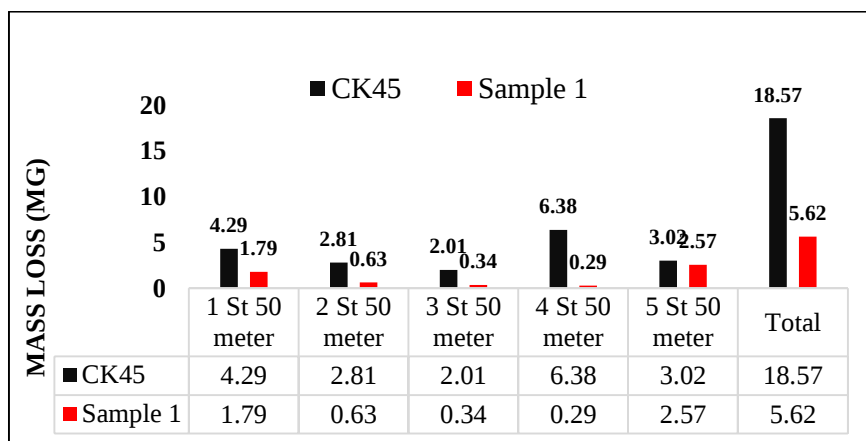
⁵ Vickers

سطحی می تواند اتفاق بیفتد. این دلایل می توانند به ویژگی های خاص این روش و تأثیرات آن بر روی سطح مواد برش داده شده برگردند. به طوری که در فرآیند وایرکات، جریان های الکتریکی با فرکانس بالا باعث تولید حرارت زیاد و ذوب سطح ماده می شوند. سپس این مواد به سرعت سرد می شوند و یک لایه سخت و شکننده به نام "لایه بازپخت" یا لایه مجدد ریخته، روی سطح ماده تشکیل می دهند. این لایه می تواند دارای سختی بالاتری نسبت به ماده پایه باشد و در نتیجه، مقاومت به سایش را افزایش دهد. همچنین حرارت تولید شده در فرآیند وایرکات می تواند باعث تغییرات در ریزساختار ماده شود. به ویژه، این حرارت می تواند منجر به تشکیل ریزساختارهای ریزدانه شود که بهبود خواص مکانیکی و مقاومت به سایش ماده را به دنبال دارد. اگر شرایط این فرآیند به گونه ای تنظیم و بهینه شوند، می تواند سطح نهایی صاف تر و با نقص های کمتری را ایجاد کرده و این تغییرات می تواند مقاومت به سایش ماده را افزایش دهد زیرا نقص های سطحی کمتر به معنای کاهش نقاط تمرکز تنش و کاهش احتمال سایش است. نتایج سایش نمونه های تولیدی در بازه های ۵۰ متری نشان داده است که در تمامی مسیر، کاهش وزن نمونه برش داده شده نسبت به نمونه پایه، اختلاف چشمگیری داشته به طوری که در نهایت، میزان کل کاهش وزن نمونه پایه و برش داده شده به ترتیب ۱۸/۵۷ و ۵/۶۲ میلی گرم ثبت شده است. همچنین بیشترین مقدار کاهش وزن برای نمونه پایه در ۵۰ متر چهارم و برای نمونه برش داده شده در ۵۰ متر پنجم و کمترین مقدار کاهش وزن برای نمونه پایه در ۵۰ متر سوم و برای نمونه برش داده شده در ۵۰ متر چهارم بوده است. آن گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، میزان کاهش جرم نمونه اول بر اثر سایش ابتدا ۱/۷۹ میلی گرم ثبت شده و در ۵۰ متر دوم، سوم و چهارم شیب کاهشی محسوس و معنی داری را تجربه کرده است، که به معنای افزایش مقاومت به سایش نمونه اول در لایه های زیر سطح تلقی می شود. همان طور که در تصاویر SEM مسیر سایش ملاحظه می شود، سه مکانیزم سایش شامل سایش ساینده، چسبنده و شخم زن در این آزمایش دیده شده است. سایش شخم زن تنها در نمونه بعد از وایرکات دیده می شود که حکایت از جابجایی ذرات سخت جدا شده دارند. این ذرات که روی تصویر با دایره های زرد رنگ مشخص شده اند. سایش ساینده که دارای خراش های عمیق و طولانی و موازی با سطح هستند در هر دو نمونه قبل و بعد از وایرکات با کیفیت های متفاوت دیده می شود. سایش ساینده می تواند از طریق چندین مکانیزم مختلف خراشیدن، برش و فرسایش رخ دهد. در مکانیزم خراشیدن، ذرات سخت وارد سطح نرم تر می شوند و به طور مداوم سطح را خراش می دهند، باعث جابجایی ماده و ایجاد شیارهای کوچک می شوند. این شیارها در تصاویر با فلش های زرد رنگ مشخص شده اند. در مکانیزم فرسایش که به آن سایش خستگی نیز اطلاق می شود، تکرار مداوم فشارها و حرکات باعث خستگی ماده شده و منجر به شکست و جداسازی ذرات از سطح می شود. این مورد در تصاویر با فلش های سفید رنگ مشخص شده اند. سایش ساینده یک پدیده مهم و رایج در مهندسی و علم مواد است که تأثیرات زیادی بر عمر و کارایی تجهیزات و قطعات دارد. درک دقیق مکانیزم های سایش ساینده و عوامل مؤثر بر آن می تواند به بهبود طراحی ها و انتخاب مواد مناسب برای کاهش این نوع سایش کمک کند. سایش چسبنده که نوعی متداول از مکانیزم های سایش است باعث چسبیدن بخش هایی از یک سطح به سطح دیگر می شود. یکی از علائم سایش چسبنده تماس و جوش موضعی است که ابتدا، نقاط برجسته یا زبری های کوچک در سطح دو ماده در تماس نزدیک قرار می گیرند. به دلیل فشار و حرارت موضعی ناشی از اصطکاک، این نقاط ممکن است به طور موضعی به هم جوش بخورند. این مورد تنها در نمونه قبل از وایرکات که دارای سختی کمتر است به وضوح با دایره های سفید رنگ نشان داده شده است. سایش چسبنده در بسیاری از کاربردهای صنعتی، به ویژه در قطعات متحرک و ماشین آلات، اهمیت زیادی دارد. به عنوان مثال، در موتورهای احتراقی، گیربکس ها، و قطعات هیدرولیکی، کنترل سایش چسبنده می تواند به طور قابل توجهی عمر مفید تجهیزات را افزایش دهد و هزینه های تعمیر و نگهداری را کاهش دهد.

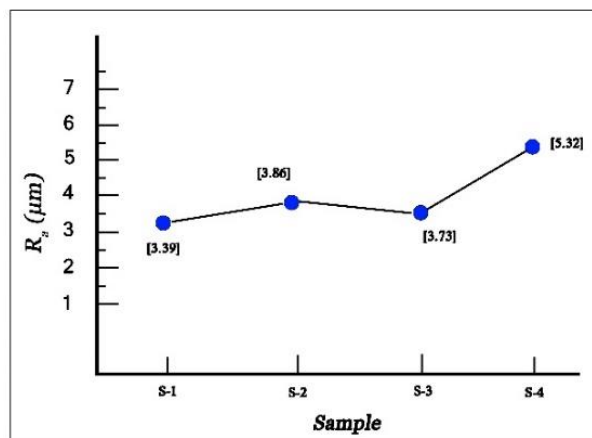
۳-۴- زبری

نتایج زبری، جزئی از مهم ترین نتایج فرایند وایرکات بوده و صنعت همیشه در این روش برای این نتیجه، حساسیت بسیار ویژه ای قائل است. شدت جریان در ماشین کاری با این فرایند به طور قابل توجهی بر زبری سطح نمونه های فولادی تأثیر می گذارد. سطوح جریان بالاتر عموماً انرژی تخلیه بین الکترود و قطعه کار را افزایش داده و منجر به تشکیل دهانه های بزرگ تر و عمیق تر روی سطح ماشین کاری شده و باعث افزایش زبری سطح می شود [۲۸]. نتایج ارائه شده توسط توسان و همکاران [۲۹] نشان داد که سرعت سیم بر زبری سطح برش بسیار تأثیرگذار است. این پدیده همچنین توسط یک مطالعه انجام شده توسط پاتنایک و

همکاران [۳۰] گزارش شده است که بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری وایرکات را با استفاده از روش تاگوچی^۶ مورد بررسی قرار دادند که نتیجه آن این بود که مقدار جریان تأثیر قابل توجهی در افزایش نرخ حذف مواد، به حداقل رساندن زبری داشته و قادر به باریک کردن عرض برش است [۳۰]. تحقیقات گذشته نیز گزارش کرده‌اند که زبری سطح تحت تأثیر تغییرات شدت جریان و سرعت سیم بوده و هرچه سرعت سیم آهسته‌تر باشد، مقدار زبری سطح زیرتر خواهد بود، و اگر سرعت سیم افزایش یابد، سطح صاف‌تری تولید می‌شود [۳۱]. نتایج زبری این پژوهش در شکل ۵ نشان می‌دهد که کمترین میزان زبری مربوط به نمونه اول که دارای بهترین نتایج سختی و سایش می‌باشد بوده و بدترین نتیجه زبری مربوط به نمونه ۴ که دارای ضعیف‌ترین نتیجه سختی است ثبت شده است. بنابراین نتایج این پژوهش شرایطی برای بهینه‌سازی مقادیر سختی، زبری و سایش در حین ساخت قطعات صنعتی با این روش را معرفی نموده است.



شکل ۴ نتایج کاهش وزن بر اثر سایش و تصاویر SEM از نمونه الف) قبل و ب) بعد از وایرکات

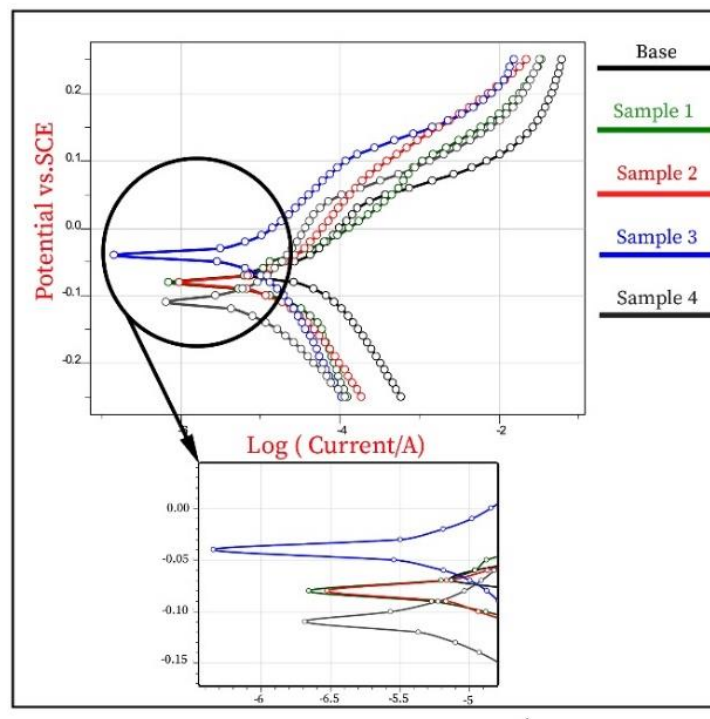


شکل ۵ نتایج آزمون زبری سنجی.

^۶ Taguchi Method

۳-۵- خوردگی

شوفا و همکاران [۳۲] تشکیل لایه دگرگونی پس از تخلیه الکتریکی را نشان داده و آن را برای مقاومت به خوردگی مفید دانسته‌اند. لایه دگرگونی متشکل از ریز ترک‌هایی است که می‌توان با کاهش ولتاژ و جریان در فرایند تخلیه الکتریکی کاهش داد. همچنین تحقیقات گذشته، تأثیر تغییرات خواص سطحی و زیرسطحی پس از فرایند وایرکات را بر زیست‌سازگاری و رفتار خوردگی آلیاژهای منیزیم گزارش کرده‌اند [۳۴،۳۳]. بنابراین اخذ این آزمون، بعد از فرایند وایرکات بسیار حائز اهمیت است. وجود ریز چاله‌ها، ریز ترک‌ها و ریز منافذ، روی سطح، به دلیل تشکیل سلول‌های میکروگالوانیکی سرعت خوردگی را به میزان قابل توجهی تسریع می‌کند. وایرکات یک فرایند فرسایش جرقه‌ای است که یون‌های پلاسما را بر روی سطح کار تحمیل کرده و در نتیجه اصلاح سطح دارای یک لایه اکسید در داخل مواد بازسازی شده است. نتایج آزمون خوردگی نشان دهنده آن است که نمونه اول که دارای بهترین نتایج خواص سختی، ساییش و زبری بوده، نتوانسته است بهترین عملکرد از نظر خوردگی را ثبت کند و این عنوان را به نمونه سوم واگذار کرده است. تحقیقات نشان داده است که پتانسیل خوردگی، تمایل به خوردگی و چگالی جریان خوردگی، نرخ خوردگی را نشان می‌دهد [۱۸]. بر همین اصل نتایج آزمون خوردگی در این پژوهش نشان می‌دهد در نمونه سوم که پتانسیل خوردگی بالاترین حد خود را به ثبت رسانده است سرعت خوردگی کاهش یافته و در نمونه پایه که پتانسیل خوردگی کمترین میزان را دارا می‌باشد، سرعت خوردگی بالاترین حد خود را نشان داده است. همچنین می‌توان از نتایج این گونه نیز استنباط کرد که هرچه شدت جریان پایین‌تر باشد، مقاومت به خوردگی افزایش پیدا می‌کند، اما در رابطه با سرعت حدی بهینه وجود دارد چرا که در نمونه چهارم با پایین‌ترین سرعت و در نمونه‌های اول و دوم که بالاترین سرعت را در آزمایش‌ها داشته‌اند مقاومت به خوردگی نسبت به نمونه سوم با سرعت ۵۰، کمتر بوده است. برای بهبود اقتصادی ماشین‌کاری، سرعت برش (یا سرعت حذف مواد) باید بیشتر باشد که به انرژی تخلیه بیشتر در الکترودها نیاز دارد، اما درعین حال انرژی تخلیه بالا منجر به تراکم و عریض شدن ترک‌های سطحی شده و باعث تضعیف یکپارچگی سطح و افزایش نرخ خوردگی می‌شود. بنابراین، نیاز است پارامترهای وایرکات به گونه‌ای تنظیم شوند تا فلز بتواند به‌طور مؤثری با کاهش هزینه‌ها، کیفیت سطح خوب و نرخ خوردگی کنترل شده ماشین‌کاری شود. با تجمیع نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۶ و جدول ۴ مشخص است که نرخ خوردگی برای نمونه سوم کمترین و به ازای نمونه پایه Ck45 بیشترین مقدار ثبت شده است.



شکل ۶ نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک خوردگی.

جدول ۴ نتایج آزمون خوردگی

متغیر	CK45	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
پتانسیل خوردگی (V vs. Ag/AgCl)	-۰/۰۲۸۷	-۰/۰۵۵۳	-۰/۰۵۰۷	-۰/۰۷۱۸	-۰/۰۲۹۰
دانسیته جریان خوردگی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	$۳/۷ \text{ e}^{-5}$	$۲/۸ \text{ e}^{-5}$	$۱/۵ \text{ e}^{-5}$	$۱/۸ \text{ e}^{-5}$	$۲/۹ \text{ e}^{-5}$
شیب آندی (V/decade)	۰/۰۶۲	۰/۰۹۱	۰/۱۰۳	۰/۱۴۷	۰/۰۸۵
شیب کاتدی (V/decade)	۰/۱۸۲	۰/۳۰۱	۰/۱۸۶	۰/۱۸۵	۰/۲۰۳
مقاومت پلاریزاسیون (ohm.cm^2)	۵۳۷/۸	۱۰۸۴	۱۸۳۴	۱۹۵۹	۸۷۶/۵
سرعت خوردگی ($\mu\text{m}/\text{year}$)	۰/۰۷۷	۰/۰۵۸	۰/۰۳۸	۰/۰۳۲	۰/۰۶۱

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نمونه‌های فولادی از نوع CK45 با روش وایرکات و تحت پارامترهای مختلف تولید و تأثیر سرعت و شدت جریان دستگاه بر روی خواص سطحی شامل سختی، زبری، سایش و خوردگی نمونه‌ها بررسی شد. نتایج زیر حاصل از آنالیزهای این پژوهش می‌باشد:

۱. میانگین سختی از ۲۱۸ ویکرز برای نمونه پایه به ۲۴۷ ویکرز در نمونه اول با سرعت ۸۰ و شدت جریان ۳ آمپر رسیده است.
۲. میزان کاهش جرم نمونه اول بر اثر سایش ابتدا ۱/۷۹ میلی گرم ثبت شده است و در ۵۰ متر دوم، سوم و چهارم شیب کاهش محسوس و معنی‌داری را تجربه کرده است، که به معنای افزایش مقاومت به سایش در لایه‌های زیر سطح نسبت به خود سطح نمونه تلقی می‌شود. میزان سایش کل از ۱۸/۵۱ میلی گرم برای نمونه پایه به ۵/۶۲ میلی گرم در نمونه اول با سرعت ۸۰ و شدت جریان ۳ آمپر رسیده است.
۳. همچنین در بحث زبری سطح نمونه‌های تولیدی، نمونه اول با سرعت ۸۰ و شدت جریان ۳ آمپر که دارای بهترین نتایج سختی و سایش نیز بوده است، دارای بهترین نتیجه با ثبت عدد ۳/۳۹ نانومتر می‌باشد، نمونه چهارم با سرعت ۲۵ و شدت جریان ۲ آمپر بدترین نتیجه زبری را با ثبت عدد ۵/۳۲ نانومتر نشان داده است.
۴. در بحث خوردگی، هر چه دانسیته جریان پایین‌تر باشد، مقاومت به خوردگی افزایش پیدا می‌کند، اما در رابطه با سرعت حدی بهینه وجود دارد چرا که در نمونه چهارم با پایین‌ترین سرعت و در نمونه‌های اول و دوم که بالاترین سرعت را در آزمایش‌ها داشته‌اند مقاومت به خوردگی نسبت به نمونه سوم با سرعت ۵۰، کمتر بوده است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از شرکت نانو پارت آسمان شهرستان گناباد و مجموعه تولیدی برگز (Bargaz.ir) که مقدمات این پژوهش را فراهم آورده است، تقدیر نمایند.

Authorship Contribution Statement

Sayyed Mohammadreza Sedehi



Biography: Ph.D. Student, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Writing – original draft.

Dr. Mohammad Reza Maraki



Biography: Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

Contribution Statement: Formal analysis, Validation, Writing – review & editing.

Sayyed Hashem Yazdi



Biography: IT Engineer, Nano Part Aseman Company, Gonabad, Iran.

Contribution Statement: Methodology, Validation, Writing – original draft

Ali Jalali



Biography: BSc. Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

Contribution Statement: Software, Visualization, Investigation

Hadi Izadi



Biography: BSc. Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

Contribution Statement: Resources, Supervision, Project administration.

Dr. Mohammad Khosravi



Biography: BSc. Department of Mechanical Engineering, Gonabad University, Gonabad, Iran.

Contribution Statement: Investigation, Data curation, Writing – review & editing.

۵- مراجع

- [1] Jebarose Juliyana S, Udaya Prakash J. Optimization of machining parameters for wire EDM of AMCs (LM5/ZrO₂) using Taguchi technique. *INCAS Bulletin*. 2022;14:57–68.
- [2] Naeim N, MonaAbou A E, Ahmed E. Experimental investigation of surface roughness and material removal rate in wire EDM of stainless steel 304. *Materials*. 2023;16:1022.
- [3] Malakizadi A, Mallipeddi D, Dadbakhsh S, M'Saoubi R, Krajnik P. Post-processing of additively manufactured metallic alloys—a review. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2022;179:103908.
- [4] Goigana M, Elkaseer A. Self-flushing in EDM drilling of Ti6Al4V using rotating shaped electrodes. *Materials* 2019;12: 989.
- [5] Pramanik A. Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2014;86:44–61.
- [6] Altin L, Boothroyd G. *Nontraditional manufacturing processes*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2020;363–416.
- [7] Benedict G F. *Electrical discharge machining (EDM), non traditional manufacturing processes*. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc, 1987;231–232.
- [8] Sreenivasa Rao M, Venkaiah N. A modified cuckoo search algorithm to optimize wire-EDM process while machining Inconel-690, *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2017; 39:1647–1661.
- [9] Saravanan M, Thiyagarajan C, Somasundaram S. Parametric optimization of wirecut-electrical discharge machining through cuckoo search algorithm, *Materials Today: Proceedings*. 2020;22:681-687.
- [10] Jahan M P, Rahman M, Wong Y S. A review on the conventional and micro-electro discharge machining of tungsten carbide. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2011;51:837–858.
- [11] Maity K P, Mishra H. ANN modelling and elitist teaching learning approach for multi-objective optimization of μ -EDM. *J. IntellManuf*, 2016;7:1–18.
- [12] Sinha P, Kumar R, Singh G K, Thomas D, Srivastava T. Optimization of wire EDM of AISI D3 tool steel using orthogonal array with principal component analysis, *Mater. Today: Proceedings*. 2015; 2:2512–2521.
- [13] Van Riel T, Qian J, Lauwers B. Exploratory study of wire based ECM finishing of 316L stainless steel, implemented within a hybrid wire EDM-ECM platform. *Procedia CIRP*, 2022;113:465-470.
- [14] Shivade A S, Shinde V D. Multi-objective optimization in WEDM of D3 tool steel using integrated approach of Taguchi method & Grey relational analysis, *J. Ind. Eng. Int.* 2014;10:149–162.
- [15] Xiao Y, Ming W, Shen D, He W, Ma J, Jiao J, Wolf pack algorithm for optimisation of cutting parameters in WEDM using Taguchi method, *Int. J. Internet Manuf. Serv.* 2019;6:139–154.
- [16] Mohamad A, Zain A M, Yusof N M, Najarian F, Alwee R, Hamed H N A, Modeling and optimization of machining parameters using regression and cuckoo search in deep hole drilling process, *Appl. Mech. Mater.* (2019); 892: 177–184.
- [17] Shadab M, Singh R, Rai R N, Multi-objective optimization of wire electric discharge machining process parameters for Al5083/7%B4C composite using metaheuristic techniques, *Arab. J. Sci. Eng.* 2019; 44:591–601.

- [18] Küpper U, Herrig T, Welling D, Bergs T. Process performance of high energy wire EDM. *Procedia CIRP*. 2021;101:230-233.
- [19] Pramanik A A, Basak K, Littlefair G, Debnath S, Prakash C, Singh M A, Marla D, Singh R K. Methods and variables in Electrical discharge machining of titanium alloy – a review. *Heliyon* 6, 2020;12.
- [20] Hou Y, Xu J, Lian Z, Zhai C, Li M, Yang S, Yu H. Research on surface microstructures and properties of NiTi shape memory alloy after wire electrical discharge machining. *Materials Today Communications*. 2022;31:103521.
- [21] VishalSharma S V S, Sharma N, Singh G, Gupta M K, Singh G. Optimization of WEDM parameters while machining biomedical materials using EDAS-PSO. *Materials* 2023;16:114.
- [22] Mathew Paulson D, Saif M, Zishan M. Optimization of wire-EDM process of titanium alloy-grade 5 using Taguchi's method and grey relational analysis. *Mater. Today Proc.* 2022;72:144–153.
- [23] Zhang Y, Chen F, Zhang Y, Du C. Influence of graphene oxide additive on the tribological and electrochemical corrosion properties of a PEO coating prepared on AZ31 magnesium alloy. *Tribology International*. 2020;146:106135.
- [24] Abbasi aval N, farjam K, aghajani H. Effect of grain size on diffusion of nitrogen in heat treated CK45 plain carbon steel. *Journal Of Metallurgical and Materials Engineering*, 2014;25(2):27-36.
- [25] Reed- Hill R E. and Abbaschian R, *Physical Metallurgy Principles*, Pws-Kent Pub, 1992.
- [26] Aghajani, H., Madanipour, H., Soltanieh, M., Mahboubi, F. and Naseredini M., "Effect of Pre-heat treatment on Plasma Nitriding of Hot Work Tool Steel", 17th IFHT SE Congress, Kobe, Japan, 2008.
- [27] Balasubramaniyan C, Esra V. An experimental investigation of F53 super duplex stainless steel using wire cut EDM process. *Materials Today: Proceedings*. 2024.
- [28] Manjaiah M, Laubscher R F, Kumar A, Basavarajappa S. Parametric optimization of MRR and surface roughness in wire electro discharge machining (WEDM) of D2 steel using Taguchi-based utility approach. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2016;11:1-9.
- [29] Tosun N, Cogun C. Inan A. The effect of cutting parameters on workpiece surface roughness in wire EDM. *Machining Science and Technology*. 2003;7(2): 209-219.
- [30] Mahapatra S S, Patnaik A. Optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) process parameters using Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007;34:911-925.
- [31] Nur R, Muas M, Risal S. Effect of current and wire speed on surface roughness in the manufacturing of straight gear using wire-cut EDM process. *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2019; 619:012002.
- [32] Sun S, Di S, Lu P, Wei D, Yu J, Guo Y. Microstructure and properties of metamorphic layer formed on Mg-RE alloy in micro-EDM process. *Acta Metall Sin*. 2013;11:251-6.
- [33] Jangra K, Grover S. Modelling and experimental investigation of process parameters in WEDM of WC-5.3% Co using response surface methodology. *Mechanical Sciences*. 2012;3:63-72.
- [34] Denkena B, Lucas A, Thorey F, Waizy H, Angrisani N, Meyer-Lindenberg A. Biocompatible magnesium alloys as degradable implant materials-Machining induced surface and subsurface properties and implant performance. *Special issues on magnesium alloys*. 2011;12:109-27.