



A Comparative Study on the Effect of Ultrasonic Vibration on Aluminum Surface Properties in Electrical Discharge Alloying

H. Eivazi bagheri¹, H. Gorji^{1*}, M. R. Shabgard², S. Nourouzi²

¹Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

²Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT: In this paper, considering the importance of surface integrity, effect of ultrasonic vibration of the Monel 400 electrode with a frequency of 20 kHz on the output parameters of the aluminum surface properties (surface hardness and wear resistance, thickness of the surface layer, the depth of copper and nickel diffusion to the aluminum surface and surface roughness) by the method of electrical discharge surface alloying has been studied. Based on the results of the scanning electron microscope images, the surface layer thickness in the combination of ultrasonic vibration with the electrical discharge alloying process is more than the non-vibration mode. Therefore, increasing the thickness of this layer increases the surface wear resistance. Also, the micro hardness test results show that surface hardness of the aluminum has increased to 450 Vickers after the combination of ultrasonic vibration with the alloying process. According to the results of energy dispersive X-ray analysis, the diffusion depth of alloying elements (copper and nickel) is higher in ultrasonic electrical discharge alloying. So that the surface layer thickness is up to 50 microns. Also, based on the results of surface roughness measuring, ultrasonic vibrations reduce the aluminum surface roughness after surface alloying.

Review History:

Received: 1/15/2018

Revised: 3/8/2018

Accepted: 4/29/2018

Available Online: 5/2/2018

Keywords:

Surface alloying

Electrical discharge

Ultrasonic vibration

Aluminum, Monel 400

1- Introduction

The advancement of technology has made the need for metal materials with better surface properties. Therefore with the development of materials science, materials with new structures and special functions have been considered by researchers. Aluminum alloys due to their unique properties such as high strength to weight ratio, good weld ability, excellent formability, fairly well corrosion resistance, are used in a variety of structures, aerospace and marine industries, electronic equipments, etc [1,2]. Compared with other metals such as steel, the most noticeable weaknesses of aluminum are low hardness, low wear resistance. Therefore, considering the low physical and mechanical properties, the ability to use aluminum alloys despite the stated benefits also has some limitations. But a significant characteristic of aluminum is the formation of intermetallic compounds with other elements such as Fe, Ni, Co, Cr, Ti and Cu. Therefore, in recent research, the creation of intermetallic aluminum compounds with these elements is interest [3-6].

Although, the method of electrical discharge is a material removal process, but tried to use this method for surface operations. Research results show that the surface layer after a machining operation is a high-speed cooled, which the depth of this layer depends on the energy and the pulses of duration. Below this layer, there is a layer affected by machining, with its chemical composition has been changed and phase changes can be seen. Therefore, the composition of the recast layer by materials in the dielectric or electrodes is an effective way to improve the surface quality. Electrical Discharge

*Corresponding author's email: hamidgorji@nit.ac.ir

Alloying (EDA) is performed by selecting suitable materials with the aim of increasing the surface hardness, increasing wear resistance, increasing the corrosion resistance [7, 8].

2- Methodology

In experiments, aluminum was selected as workpiece materials with the purity of 99.98% and the tool material was selected of Monel 400. In order to prepare the aluminum specimens, the cutting, turning and grinding were carried out on the raw material and 32 cylindrical aluminum with the dimensions of 12×14mm². Also, in order to prepare 32 cylindrical electrodes, cutting, machining and grinding were done on Monel 400. Fig. 1 shows the aluminum workpiece and the Monel electrode.

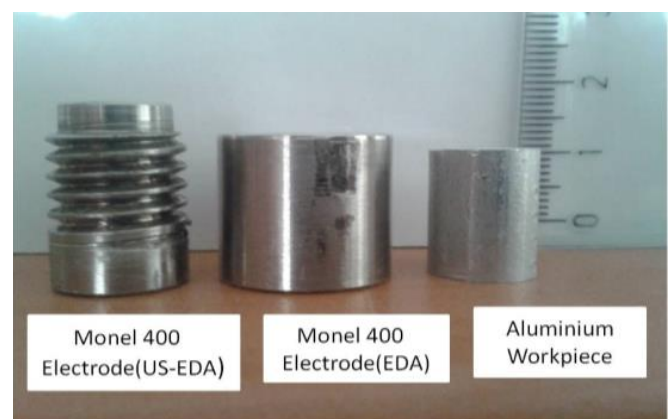


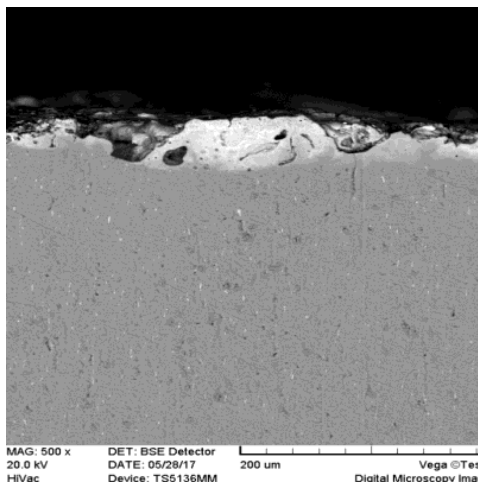
Fig. 1. Monel electrode and aluminum workpiece



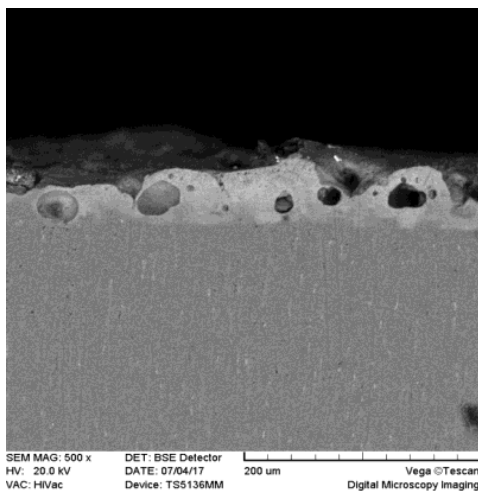
Table 1. Experimental test conditions

Parameters	Conditions
Dielectric fluid	Kerosene oil
Pulse on-time, μ s	50,100,200,400
Voltage, V	160
Pulse current, A	12,16,24,32
Pulse of time, μ s	800
Tool Polarity	Negative

All samples were machined by the use of die sinking Electrical Discharge Machining (EDM) machine (CNC-Charmilles Roboform 200) with an iso-pulse generator. Each test was performed for 20 minutes. In order to create the same conditions for flushing during all experiments, the normal submerged flushing method was used. Table 1 provides input parameters and test conditions.



(a)



(b)

Fig. 2. Scanning electron microscope micrograph showing cross-section of EDA-ed workpiece

a) Without ultrasonic vibration, b) With ultrasonic vibration

3- Results and Discussion

3-1- The effect of ultrasonic vibration on the surface layer thickness

Fig. 2 shows the created layers after the surface alloying through EDA process. According to this Fig., with adding ultrasonic vibration, the average thickness of the alloyed layer increases.

3-2- The effect of ultrasonic vibration on the surface hardness

Fig. 3 shows the effect of ultrasonic vibration, on the aluminum surface hardness. According to these Fig., the aluminum surface hardness in the combined mode of the electric discharge and ultrasonic vibration is 30% higher than the average value.

3-3- The effect of ultrasonic vibration on the surface wear resistance

Fig. 4 shows the effect of ultrasonic vibration, on the aluminum surface wear resistance. As it is seen, with improvement of surface properties by electric discharge method, the weight loss of the aluminum sample is much lower compared to the base metal, and the application of ultrasonic vibrations improves the surface wear resistance.

4- Conclusions

1. Ultrasonic vibration with increasing material removal rate from the Monel 400 electrode increases the diffusion depth of copper and nickel to the aluminum surface.
2. Aluminum surface hardness is higher in ultrasonic

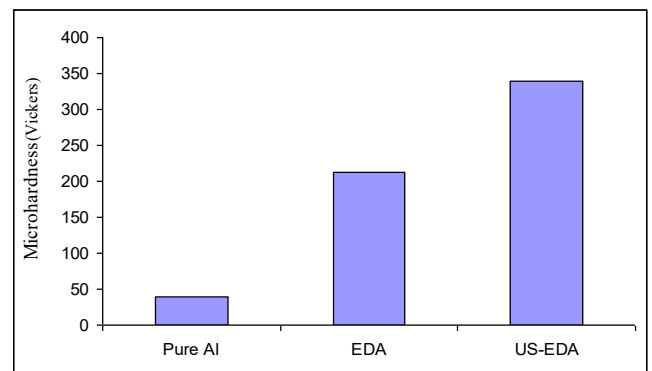


Fig. 3. Effects of ultrasonic vibrations on surface hardness

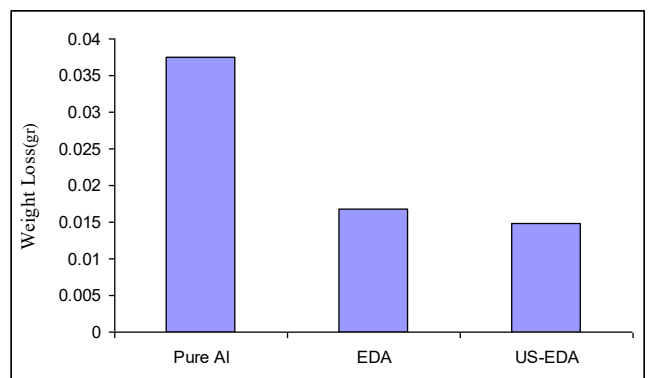


Fig. 4. Effects of ultrasonic vibrations on surface wear resistance

vibration mode, in which case the hardness of the surface has reached more than 450 V.

3. Ultrasonic vibration of the Monel electrode reduces the surface roughness of the aluminum in EDA process.

4. In using the US-EDA method, the surface wear resistance of the aluminum is more than EDA method.

References

- [1] Fazell, M., Garsivaz jazi, M. R., Bahramzadeh, S., Bakhshi, S., 2014. "Influence of Gr and MoS₂ Particles on High Temperature Tribological Properties of Ni-SiC Composite Coating". *Journal of Advance Materials Engineering (Esteghlal)*, 34(1), pp. 105-121 (in persian).
- [2] Azimi Abarghoui, S., Saatchi, A., Ebrahimi Kahrizsangi, R., 2013. "A New Method to Investigate Localized Corrosion on 2024, 7075 and 6061 Aluminium Alloys in the Sea-Like Atmosphere Environments". *New Material*, 4(13), pp.69-82 (in persian).
- [3] Alwafi, Y., Bidin, N., Hussin, R., Shkhawat, M., Gustiono, D., 2011. "Microhardness Evaluation of Pure Aluminum Substrate after Laser Surface Alloying with Iron and Copper". *Journal of Materials Science Engineering*, B(1), pp. 200-205.
- [4] Popoola, A., Pityana, S., Fedotova, T., Popoola O., 2011. "Quantitative study of the hardness property of laser surface alloyed aluminium AA1200". *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 111, pp.335-344.
- [5] Rambau, T. G., Popoola, A. P., Loto, C.A., Mathebula, T., Theron, M., 2013. "Tribological and Corrosion Characterization of Al/(Stellite-6+Zirconium) Laser Alloyed Composites". *International Journal of Electrochemical Science*, 8, pp. 5515-552.
- [6] Jiru, W., Sankar, M. R., Dixit, U. S., 2015. "Surface Alloying of Aluminum with Copper using Co₂ Laser". *Laser based Manufacturing*, pp.107-116.
- [7] Kumar, S., Singh, R., Singh, T. P., Sethi, B. L., 2009. "Surface modification by electrical discharge machining: A review". *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), pp. 3675-3687.
- [8] Bleys, Ph., Kruth, J. P., Lauwers, B., Schacht, B., 2006. "Surface and sub-surface quality of steel after EDM". *Advanced Engineering Materials*, 8 (1), pp.15-25.



بررسی مقایسه‌ای تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی خواص سطحی آلومینیوم در آلیاژسازی سطحی به روش تخلیه الکتریکی

هادی عیوضی باقری^۱، حمید گرجی^{۱*}، محمدرضا شبگرد^۲، سلمان نوروزی^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶-۱۰-۲۵

بازنگری: ۱۳۹۶-۱۲-۱۷

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۲-۰۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۲-۱۲

کلمات کلیدی:

آلیاژسازی سطحی

تخلیه الکتریکی

ارتعاشات التراسونیک

آلومینیوم

موندل ۴۰۰

خلاصه: در این مقاله به دلیل اهمیت کیفیت سطح قطعات تولیدی، تأثیر ارتعاشات التراسونیک الکتروآلیاژسازی (موندل ۴۰۰) با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز بر روی پارامترهای خروجی ارزیابی خواص سطح (سختی و مقاومت به سایش سطح، ضخامت لایه تشکیل شده، عمق نفوذ عناصر مس و نیکل به سطح و زبری سطح آلومینیوم) در فرآیند آلیاژسازی سطحی به روش تخلیه الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی، ضخامت لایه تشکیل شده سطحی در حالت تلفیق ارتعاشات التراسونیک با فرآیند آلیاژسازی تخلیه الکتریکی، بیشتر از حالت بدون ارتعاش می باشد، لذا افزایش ضخامت این لایه مقاومت به سایش سطح را افزایش می دهد. همچنین نتایج میکروسختی سطحی نشان می دهد سختی سطح آلومینیوم پس از تلفیق ارتعاشات التراسونیک با فرآیند آلیاژسازی تا ۴۵۰ ویکرز افزایش یافته است. مطابق نتایج آنالیز انرژی پراکنش گرای اشعه X عمق و درصد نفوذ عناصر آلیاژی (مس و نیکل) به سطح در حالت استفاده از امواج التراسونیک بیشتر شده است بطوریکه ضخامت لایه سطحی به ۵۰ میکرون رسیده است. همچنین براساس نتایج زبری سطحی سطح، ارتعاشات التراسونیک باعث کاهش زبری سطح آلومینیوم بعد از آلیاژسازی سطحی شده است.

۱- مقدمه

با سایر عناصر مانند: Fe, Ni, Co, Cr, Ti, Cu می باشد. لذا در پژوهش‌های اخیر، ایجاد ترکیبات بین فلزی آلومینیوم با این عناصر مورد توجه می باشد. [۳-۶].

فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی^۲ یک روش ترموالکتریکی^۳ است، یعنی پدیده‌های حرارتی و الکتریکی بیشترین نقش را در مکانیزم آن ایفا می کنند. لذا برخلاف فرآیندهای سنتی که در آنها استحکام نهایی، حد تسلیم و همچنین خواصی نظیر مدول الاستیسیته و سختی مواد، در نرخ براده برداری و شیوه ماشینکاری قطعات تأثیرگذار هستند، این فرآیند بیشتر با خواص ترمودینامیکی و فیزیکی مواد نظیر نقطه جوش، گرمای نهان ذوب، ضریب انتقال حرارت و غیره در ارتباط است [۷].

امروزه روش‌های موجود جهت افزایش خواص مکانیکی، فیزیکی و تریبولوژیکی سطح قطعات مانند مقاومت به سایش، خوردگی، اکسیداسیون و غیره شامل روش‌های کربن‌دهی، نیتروژن‌دهی،

پیشرفت فناوری موجب شده است که نیاز به مواد فلزی با خواص سطحی بهتر به گونه روزافزونی احساس شود. از این رو با گسترش علم مواد، مواد مهندسی با ساختارهای جدید و کارکردهای ویژه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل داشتن خواص منحصر به فردی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، جوش پذیری خوب، شکل پذیری عالی و مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب، به گونه گسترده در انواع سازه‌ها، صنایع هوایی و دریایی، تجهیزات الکترونیک و غیره. استفاده می شوند [۱ و ۲]. در مقایسه با سایر فلزات از جمله فولاد، بارزترین نقاط ضعف آلومینیوم، سختی کم، مقاومت به سایش ضعیف و خواص مکانیکی پایین می باشد. لذا با توجه به خواص تریبولوژیکی^۱ و مکانیکی پایین، قابلیت استفاده از آلیاژهای آلومینیوم علیرغم مزایای بیان شده، دچار محدودیت‌هایی می باشد. اما یک خاصیت بارز آلومینیوم تشکیل ترکیبات بین فلزی

2 . Electrical Discharge Machining (EDM)

3 . Thermoelectric

1 . Tribology

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hamidgorji@nit.ac.ir



عمق لایه سخت شده ۲۵ میکرون بوده و سختی سطح پس از انجام فرآیند آلیاژسازی نسبت به سختی اولیه (۶۴۰ HK) افزایش یافته و به مقدار HK ۱۳۱۹ رسیده است. همچنین میزان ترک‌های سطحی نیز در سطح قطعه کار کاهش یافته است. کومار و همکاران [۱۱] بررسی مقایسه‌ای آلیاژسازی سطحی قطعات فولادهای ابزار گرم کار و سردکار^۲ از طریق افزودن پودر تنگستن به مایع دی‌الکتریک را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در تحقیق آن‌ها برای طراحی آزمایش‌ها از روش تاگوچی استفاده شده و پارامترهای زمان روشنی^۳ و خاموشی پالس و شدت جریان^۴ به‌عنوان پارامترهای ورودی و پارامتر میکروسختی سطح به‌عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج آنالیز اشعه ایکس^۵ نشان از نفوذ پودر تنگستن به همراه کربن به سطح قطعات آلیاژسازی شده و افزایش سختی سطح تا ۱۰۰٪ را برای هر سه نوع جنس فولاد دارد. براساس نتایج این تحقیق تنگستن کاربرد در سطح به وجود آمده که نشان از تشکیل آن در داخل کانال پلازما می‌باشد. جنیدمیر و همکاران [۱۲] مدل‌سازی زبری سطح در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار گرم کار AISI H۱۱ با روش افزودن پودر (آلومینیوم) به مایع دی‌الکتریک را مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیق آن‌ها پارامترهای زمان روشنی پالس، شدت جریان و غلظت پودر آلومینیوم افزوده شده به مایع دی‌الکتریک به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده و از روش رویه پاسخ جهت بهینه‌سازی پارامترها استفاده شده است. براساس نتایج این تحقیق، روش رویه پاسخ یک روش مناسب برای مدل‌سازی فرآیند تخلیه الکتریکی بوده و از بین پارامترهای ورودی انتخاب شده، پارامترهای شدت جریان و غلظت پودر مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر روی زبری سطح قطعه کار می‌باشند. خدکار و همکاران [۱۳] آلیاژسازی و بهبود کیفیت سطح فولاد ابزار سردکار OHNS را با استفاده از افزودن پودر تنگستن به داخل مایع دی‌الکتریک مورد آزمایش قرار دادند. شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس به‌عنوان پارامترهای ورودی و سختی سطح به‌عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده است. نتایج سختی‌سنجی حکایت از افزایش سختی سطح قطعه کار از مقدار اولیه ۵۰۶ ویکرز به مقدار

کروم‌دهی، تکنیک رسوب‌دهی فیزیکی و شیمیایی بخار و پلازما می‌باشند که اکثر این فرآیندها، فرآیندهای ثانویه محسوب می‌شوند و انجام آن‌ها نیازمند صرف زمان و هزینه می‌باشد. در مورد قطعاتی که با فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی تولید می‌شوند برای انجام عملیات سخت‌کاری و پوشش‌دهی ابتدا بایستی لایه دوباره منجمد شده سطحی (که دارای خواص مکانیکی پایینی است) برداشته شده و سپس عملیات پوشش ثانویه بر روی سطح انجام شود. اما راه‌حل جایگزین، پیش‌بینی بهینه‌سازی سطح یا آلیاژسازی سطحی همزمان با ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است که نیاز به عملیات ثانویه برای انجام عملیات سطحی را رفع می‌کند. این روش دارای انعطاف‌پذیری بسیار زیاد و هزینه پایین است. به‌طوری‌که نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهند مقاومت به سایش قطعات بهبود یافته سطحی یا آلیاژ سطحی شده به روش آلیاژسازی تخلیه الکتریکی^۱ سه برابر قطعاتی است که لایه موردنظر را ندارند [۸].

لذا با این‌که فرآیند تخلیه الکتریکی یک فرآیند براده‌برداری است؛ اما سعی می‌شود از این روش برای عملیات سطحی نیز استفاده شود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که بالاترین لایه سطحی بعد از عملیات ماشین‌کاری یک لایه خنک شده با سرعت بالا است که عمق این لایه به انرژی و مدت زمان پالس‌ها بستگی دارد. در زیر این لایه، یک لایه متأثر از ماشین‌کاری وجود دارد که ترکیب شیمیایی آن تغییر یافته و تغییرات فازی در آن دیده می‌شود. لذا تغییر ترکیب لایه دوباره منجمد شده به وسیله مواد موجود در الکتروود یا مایع دی‌الکتریک یک روش مؤثر برای بهبود کیفیت سطح می‌باشد. این نوع آلیاژسازی سطحی در لایه دوباره منجمد شده با انتخاب مواد مناسب و با اهداف افزایش سختی سطح، افزایش مقاومت به سایش، افزایش مقاومت به خوردگی انجام می‌شود [۹ و ۱۰].

بهبود کیفیت سطح با استفاده فرآیند تخلیه الکتریکی از جدیدترین زمینه‌های پژوهشی در این حوزه از مهندسی ساخت و تولید می‌باشد و تحقیقات کمی در این خصوص انجام شده به طوری‌که معدود پژوهش‌های انجام شده، معطوف به مطالعه بر روی فولادهای ابزار می‌باشد. سیمائو و همکاران [۸] آلیاژسازی سطحی فولاد ابزار H₁₃ با استفاده از الکتروود کامپوزیتی تنگستن کارباید-کبالت در داخل سیال هیدروکربنی مورد آزمایش قرار داده‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده

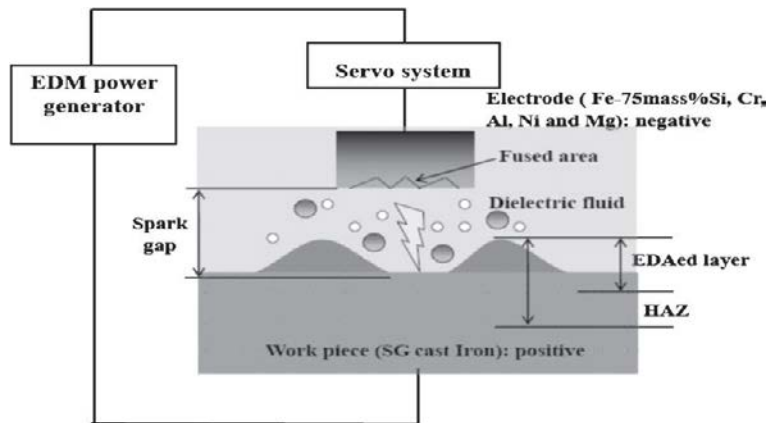
2 AISI D2, AISI H13, OHNS

3 . Pulse on time

4 .Pulse current

5 X-Ray Diffraction (XRD)

1 Electrical Discharge Alloying (EDA)



شکل ۱: نمای شماتیک آلیاژسازی به روش تخلیه الکتریکی [۱۵]

فشار و در اثر پدیده نفوذ اتمی عناصر موجود در ترکیب شیمیایی الکتروود ابتدا وارد لایه دوباره منجمد شده گشته و سپس به لایه‌های سطحی قطعه کار نفوذ کنند و با تشکیل ترکیب با فاز زمینه، موجب آلیاژسازی در سطح نمونه‌ها گردند [۱۶].

یکی از روش‌های جدید جهت افزایش راندمان فرآیندهای تولید، ایجاد روش‌های هیبریدی مانند تلفیق ارتعاشات التراسونیک با فرآیند تخلیه الکتریکی است. شبگرد و همکاران [۱۷] تأثیر ارتعاشات التراسونیک قطعه کار از جنس آلیاژ تیتانیوم بر روی تنش‌های پسماند و تغییرات سختی سطح قطعه کار پس از انجام عملیات ماشینکاری تخلیه الکتریکی مورد مطالعه قرار داده‌اند. بر اساس نتایج تحقیق آنها اعمال ارتعاشات التراسونیک ابزار مسی باعث کاهش تنش‌های پسماند به مقدار ۱۷ درصد در سطح قطعه کار شده و به دلیل افزایش میزان نفوذ کربن تجزیه شده از مایع دی الکتریک به سطح، باعث افزایش سختی سطح به میزان ۱۳ درصد شده است.

اکثر تحقیقات انجام شده در مورد بهبود خواص سطحی آلومینیوم با استفاده از روش لیزر انجام شده است. از جمله می‌توان تحقیق ژيرو و همکاران [۱۸] را بیان نمود. در تحقیق آنها آلیاژسازی سطحی آلومینیوم خالص با استفاده از پودر مس، منگنز و منیزیم به ترتیب با نسبت ۲:۱:۱ با هدف افزایش سختی سطح به روش لیزر مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس نتایج این تحقیق حداکثر عمق بدست آمده از سطح آلیاژسازی شده ۰/۵ میلی متر و مقدار سختی سطح در بیشترین مقدار از ۳۰ ویکرز به ۴۳۰ ویکرز افزایش یافته است. ژيرو و همکاران [۶] آلیاژسازی سطحی آلومینیوم ۹۹٪ را با استفاده از پودر مس به روش لیزر

۱۰۹۰ ویکرز را دارد. چاوان و همکاران [۱۴] در یک مقاله مروری پارامترها و ویژگی‌های فرآیند تخلیه الکتریکی همراه با افزودن پودر فلزات در مایع دی الکتریک را مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس نتایج تحقیق آنها، پودر فلزات با قرارگیری در فضای گپ باعث افزایش تعداد جرقه‌ها شده و نرخ برداشت ماده را افزایش می‌دهند. همچنین پودر فلز افزوده شده باعث ایجاد یک کانال پلاسمای بزرگتر شده و باعث توزیع یکسان جرقه‌ها می‌گردد.

لین و همکاران [۱۵] از این فرآیند جهت بهبود خواص سطحی قطعات چدن ریختگی با گرافیت کروی با استفاده از الکترودهای متالورژی پودر حاوی ۷۵٪ وزنی آهن به همراه سیلیسیم، آلومینیوم، نیکل، منیزیم و کروم استفاده نموده‌اند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که الکتروود منیزیم باعث ایجاد لایه ضخیم‌تر و الکتروود کروم نازک‌ترین لایه سطحی را ایجاد می‌کنند. همچنین بر اساس نتایج سختی‌سنجی، لایه آلیاژسازی شده با کروم دارای بیشترین میزان سختی بوده که علت آن تشکیل کاربید کروم می‌باشد. شکل ۱ نمای شماتیک این فرآیند را نشان می‌دهد.

به‌طور کلی مکانیزم فرآیند بهبود خواص سطحی یا آلیاژسازی سطحی به روش تخلیه الکتریکی را بدین صورت می‌توان بیان نمود که بعد از تشکیل کانال پلاسمای و انجام تخلیه الکتریکی، پدیده ذوب، تبخیر و همچنین پدیده جوشش حجمی^۱ در محل اتصال کانال پلاسمای به الکتروودها حادث می‌گردد، که البته میزان ذوب و تبخیر قطب منفی بسیار بیشتر از قطب مثبت خواهد بود. ذوب و تبخیر الکتروود آلیاژساز موجب می‌شود، در بستری مناسب به لحاظ دما و

1 Bulk boiling

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلومینیوم خالص (درصد وزنی)

Al	Mn	Fe	Ni	Si	Mg	Cr
99/8	0/003	0/118	0/006	0/04	0/003	0/004

جدول ۲: ترکیب شیمیایی مونل ۴۰۰ (درصد وزنی)

Ni	Cu	Fe	Cr	Al	Zr	Ti
66/64	28/09	1/65	0/095	0/14	0/035	0/032

۲- مواد و روش انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش جهت بهبود خواص سطحی آلومینیوم خالص (۹۹٪) از مونل ۴۰۰ که آلیاژی دوفازی از مس و نیکل می‌باشد به عنوان الکتروُد استفاده شده است. قبل از شروع فرآیند جهت اطمینان از ترکیب شیمیایی قطعه کار و الکتروُد آلیاژساز، آنالیز نمونه‌ها به روش اسپکترومتری مشخص گردیده است. جدول ۱ ترکیب شیمیایی قطعه کار مورد استفاده (آلومینیوم خالص) و جدول ۲ ترکیب شیمیایی الکتروُد آلیاژساز (مونل ۴۰۰) را نشان می‌دهند.

جهت آماده سازی قطعه کار آلومینیومی بر روی میلگرد تهیه شده عملیات برش اولیه، تراش کاری و سنگ زنی انجام شد و تعداد ۳۲ عدد نمونه استوانه‌ای آلومینیومی با قطر ۱۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۴ میلی‌متر آماده گردید. همچنین برای آماده سازی ۱۶ عدد الکتروُد مونل ۴۰۰ نیز عملیات برش کاری، ماشینکاری و پرداخت کاری انجام گردید و الکتروُد‌های استوانه شکل با قطر ۱۸ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر آماده شدند. همچنین جهت ایجاد امکان اتصال الکتروُد مونل به کلگی التراسونیک تعداد ۱۶ عدد الکتروُد مونل ۴۰۰ با قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر با انتهای رزوه شده آماده گردید. شکل ۲ قطعه کار آلومینیومی و انواع الکتروُد مونل را نشان می‌دهد.

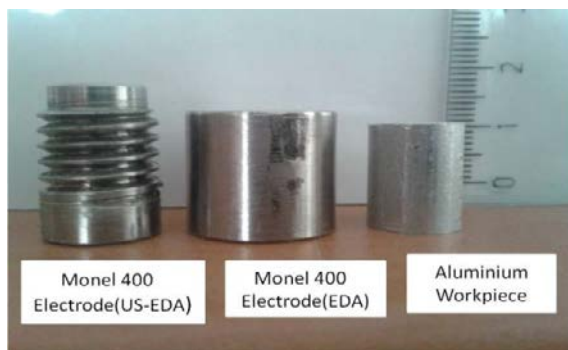
در این آزمایش‌ها، برای اعمال ارتعاشات التراسونیک به الکتروُد مونل با میانگین وزن اولیه ۲۱/۴۱۳۵ گرم از دستگاه مولد فراصوت با توان ۲۰۰ وات و فرکانس ارتعاش ۲۰ kHz با دامنه امواج حداکثر ۱۵ μm استفاده شده است. ضمناً جهت کنترل دامنه ارتعاشات از دستگاه ارتعاش سنج لیزری OMETRON استفاده شده و در طول فرآیند، تأثیر تغییرات وزن الکتروُد مونل در نظر گرفته نشده است. همچنین زمان روشن پالس و شدت جریان الکتریکی هر یک در چهار سطح به‌عنوان متغیرهای ورودی مستقل در نظر گرفته شدند. برخی

مورد ارزیابی قرار داده اند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که سختی سطح پس از آلیاژسازی سطحی از مقدار اولیه ۶۰ ویکرز تا مقدار ۱۵۶ ویکرز افزایش یافته است. مابهای و همکاران [۱۹] آلیاژسازی سطحی آلومینیوم AA۱۲۰۰ با استفاده از پودر Ni+SiC به روش لیزر را با هدف تولید لایه کامپوزیتی سطحی^۱ و تشکیل ترکیب بین فلزی Al-Ni مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج ارائه شده ترکیبات Al_3Ni و Al_4C_3 در سطح تشکیل شده و سختی از مقدار اولیه ۲۴ ویکرز در بیشترین مقدار به ۱۲۰ ویکرز در سطح رسیده است.

در زمینه بهبود خواص سطحی آلومینیوم با استفاده از فرآیند تخلیه الکتریکی می‌توان پژوهش عیوضی و همکاران را ذکر نمود. آنها صرفاً افزایش سختی سطح آلومینیوم با استفاده از آلیاژمونل ۴۰۰ را مورد بررسی قرار داده و تشکیل ترکیبات بین فلزی را عامل افزایش سختی سطح بیان نموده اند. بر اساس نتایج تحقیق آنها ترکیبات Al_3Ni_2 , AlCu و Al_4C_3 در سطح آلومینیوم تشکیل شده و سختی سطح آلومینیوم در برخی از نمونه‌ها بیش از ۸ برابر شده است [۱۶].

بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی در زمینه بهبود و افزایش خواص سطحی آلومینیوم و آلیاژهای آن به روش تخلیه الکتریکی همراه با ارتعاشات التراسونیک (US-EDA) انجام نشده است. لذا نوآوری این پژوهش بررسی مقایسه‌ای تأثیر ارتعاشات التراسونیک الکتروُد آلیاژساز با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی زمان روشنی پالس و شدت جریان الکتریکی بر روی مقادیر سختی سطح، زبری سطح، مقاومت به سایش سطح، اندازه‌گیری عمق و درصد نفوذ عناصر به سطح آلومینیوم می‌باشد.

1 . Metal Matrix Composite (MMC)



شکل ۲: الکترود مونل و قطعه کار آلومینیومی



(ب) آزمایش سایش



(الف) عملیات زبری سنجی سطح

شکل ۳: نحوه بستن الکترودها و کلگی التراسونیک و قطعه کار قبل از شروع عملیات تخلیه الکتریکی

پراکنش‌گرای اشعه X^2 از لایه‌های نزدیک سطح ماشینکاری شده توسط میکروسکوپ الکترونی Cam Scan MV2300 انجام گردید. پس از فرآیند آلیاژسازی به روش تخلیه الکتریکی، جهت اندازه‌گیری زبری سطح قطعات آلومینیومی، از دستگاه زبری‌سنج دیجیتالی مهر^۳ که دارای محدوده طول ارزیابی ۲۵ میلی‌متر می‌باشد، استفاده شد. در این آزمایش‌ها طول ارزیابی بر روی ۱۰ میلی‌متر تنظیم و پارامتر زبری میانگین سطح، R_a مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای محاسبه مقاومت به سایش از روش پین روی دیسک در حالت خشک با سرعت خطی ۱۰ cm/s و مسافت لغزشی ۵۰۰ متر از دستگاه تست سایش ساخت شرکت آراین مدرن صنعت^۴ استفاده شده است. همچنین جهت محاسبه مقدار کاهش وزن، نمونه‌ها قبل و بعد از تست سایش ابتدا با محلول استون شستشو و سپس با ترازویی با دقت ۰/۱ میلی گرم توزین شدند. شکل ۳ عملیات زبری‌سنجی و تست سایش را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۴ نحوه بستن الکترودها و کلگی

از آزمایش‌ها بطور تصادفی یکبار تکرار شده‌اند ولی با توجه به مطابقت پارامترهای مورد ارزیابی، از تکرار سایر آزمایش‌ها صرف نظر شده است. با توجه به اینکه این پژوهش با هدف بهبود خواص سطحی آلومینیوم انجام شده است لذا جهت کاهش فرسایش قطعه کار آلومینیومی و افزایش فرسایش الکترود آلیاژساز قطب منفی به مونل ۴۰۰ و قطب مثبت به آلومینیوم (قطعه کار) اختصاص داده شده است. تمامی نمونه‌ها توسط دستگاه اسپارک شارمیلز^۱ در حالت ایزوپالس به مدت ۲۰ دقیقه تحت عملیات تخلیه الکتریکی در حالت دو صفحه موازی با سطح یکسان قرار گرفتند. جهت ایجاد شرایط یکسان، در تمام آزمایش‌ها، از روش شستشوی غوطه‌وری استفاده گردید. برای تعیین میزان برداشت ماده از الکترود مونل نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات تخلیه الکتریکی با ترازویی با دقت ۰/۱ میلی گرم توزین شدند. پس از انجام عملیات تخلیه الکتریکی توسط دستگاه میکروسختی‌سنجی OLYMPUS-LM700 از لایه‌های نزدیک به سطح ماشینکاری شده آزمون میکروسختی‌سنجی به عمل آمد. همچنین آنالیز انرژی

2 . Energy Dispersive X-ray (EDX)

3 Mahr

4 . AMI CO.

1 CNC-Charmilles Roboform 200



ب) EDA



الف) US-EDA

شکل ۴: نحوه بستن الکترودها و کلگی التراسونیک و قطعه کار قبل از شروع عملیات تخلیه الکتریکی

افزایش تعداد جرقه‌ها از طریق ایجاد چاله‌های مذاب بیشتر و عمیق‌تر در سطح، باعث افزایش ضخامت لایه سطحی می‌گردد [۱۷]. از طرفی مطابق شکل‌های ۷ و ۸ عمق نفوذ عناصر مس و نیکل به سطح آلومینیوم در حالت اعمال ارتعاشات التراسونیک بیشتر می‌باشد که این امر باعث ایجاد لایه عمیق‌تری شده است. با توجه به اینکه پدیده نفوذ تابع دو پارامتر اصلی زمان و دما می‌باشد، لذا افزایش تعداد جرقه‌ها از طریق افزایش زمان فرآیند و همچنین دمای سطح، باعث تجزیه بیشتر مونل ۴۰۰ می‌شود و از طرف دیگر وجود چاله‌های مذاب عمیق‌تر در سطح قطعه کار باعث افزایش عمق نفوذ مس و نیکل به سطح آلومینیوم می‌گردد.

جدول ۳: پارامترهای ورودی و شرایط انجام آزمایش‌ها

متغیرهای ورودی	سطوح تغییرات
مایع دی الکتریک	نفت سفید
زمان روشنی پالس، μs	50, 100, 200, 400
ولتاژ، V	160
شدت جریان، A	12, 16, 24, 32
قطبیت الکترود مونل	-
زمان خاموشی پالس، μs	800

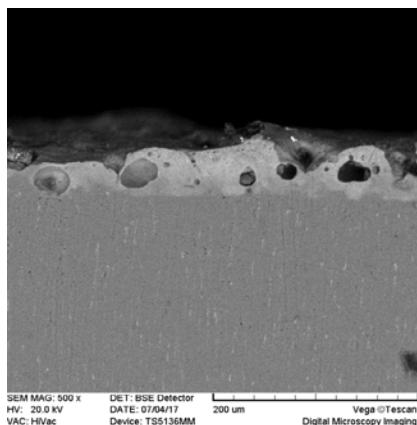
التراسونیک نشان داده شده و در جدول ۳ پارامترهای ورودی و شرایط انجام آزمایش‌ها آورده شده است.

۳-۲ تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی سختی سطح

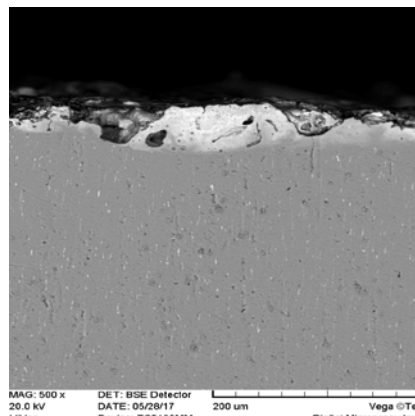
شکل‌های ۹ و ۱۰ تأثیر ارتعاشات التراسونیک الکترود مونل بر روی سختی سطح ایجاد شده را نشان می‌دهند. مطابق این شکل‌ها سختی سطح آلومینیوم در حالت ترکیبی فرآیند تخلیه الکتریکی و موج التراسونیک به طور متوسط ۳۰٪ بیشتر است. با توجه به اینکه عامل افزایش سختی سطح نفوذ عناصر مس و نیکل به سطح می‌باشد، بطوری‌که هرچه درصد نفوذ عناصر به سطح بیشتر شود سختی سطح افزایش می‌یابد [۱۶]. شکل ۱۱ نشان می‌دهد ارتعاشات التراسونیک مونل ۴۰۰ علاوه بر افزایش عمق نفوذ باعث افزایش درصد نفوذ این عناصر به سطح آلومینیوم نیز می‌گردد. دلیل این امر را می‌توان به کاهش پالس‌های مدار باز و اتصال کوتاه پس از اعمال ارتعاشات التراسونیک به این فرآیند مرتبط دانست و اینگونه بیان نمود که افزایش جرقه‌های مفید (جرقه اسپارک) با اعمال امواج التراسونیک

۳- نتایج و بحث

۳-۱ تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی ضخامت لایه‌ای تشکیل شده شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از لایه سطحی ایجاد شده و شکل ۶ عمق لایه سطحی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶ با اعمال ارتعاشات التراسونیک بر الکترود مونل، متوسط ضخامت لایه سطحی ایجاد شده بر روی آلومینیوم بیشتر شده است. بطوریکه عمق لایه سطحی بطور متوسط در حالت ساده ۳۵ میکرومتر و پس از اعمال ارتعاشات التراسونیک به ۵۰ میکرون رسیده است. دلیل افزایش عمق لایه ایجاد شده در سطح پس از اعمال ارتعاشات التراسونیک را این طور می‌توان تشریح نمود که اعمال انرژی فراصوتی به کانال پلاسما باعث افزایش ذرات باردار شده و در نتیجه شکست دی‌الکتریک و شروع تخلیه‌های الکتریکی با سرعت بیشتری رخ می‌دهد که این امر به دلیل کاهش زمان اتلاف شده باعث افزایش تعداد جرقه‌ها می‌گردد.



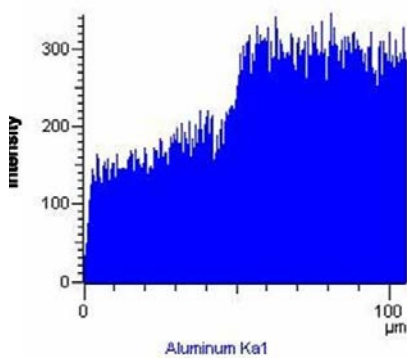
(ب)



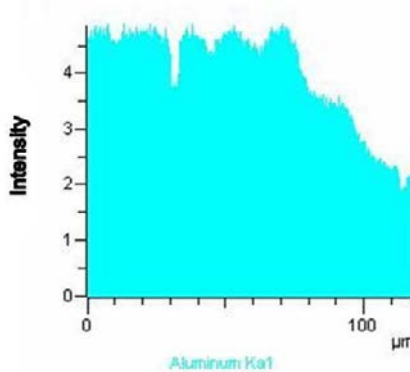
(الف)

شکل ۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی از لایه سطحی ایجاد شده ($Ti= 400\mu S, I=16 A$)

الف) تخلیه الکتریکی بدون ارتعاشات التراسونیک، ب) تخلیه الکتریکی همراه با ارتعاشات التراسونیک



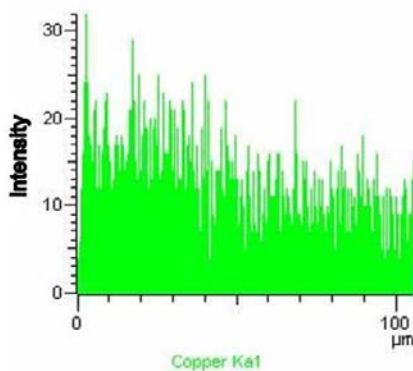
(ب)



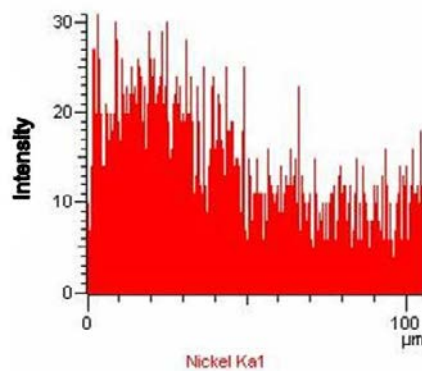
(الف)

شکل ۶: آنالیز خطی میکروسکوپ الکترونی از لایه سطحی ایجاد شده ($Ti= 400\mu S, I=16 A$)

الف) تخلیه الکتریکی بدون ارتعاشات التراسونیک، ب) تخلیه الکتریکی همراه با ارتعاشات التراسونیک



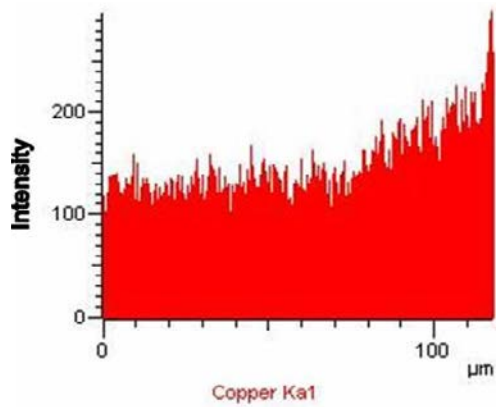
(ب)



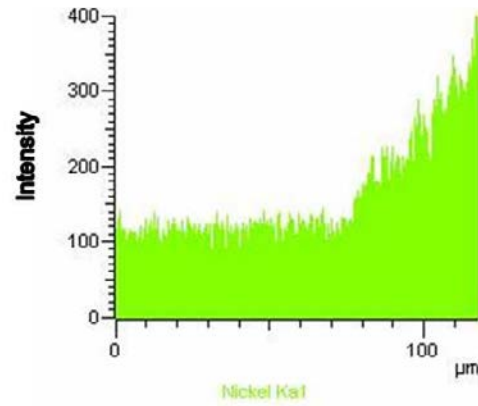
(الف)

شکل ۷: آنالیز خطی میکروسکوپ الکترونی از لایه سطحی ایجاد شده همزمان با ارتعاشات التراسونیک ($Ti= 400\mu S, I=16 A$)

الف) عمق نفوذ نیکل ب، ب) عمق نفوذ مس

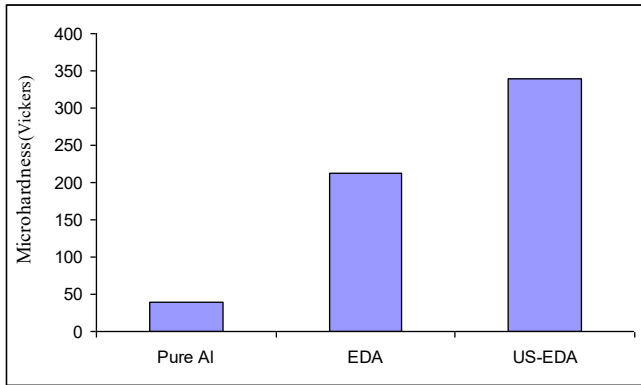


(ب)

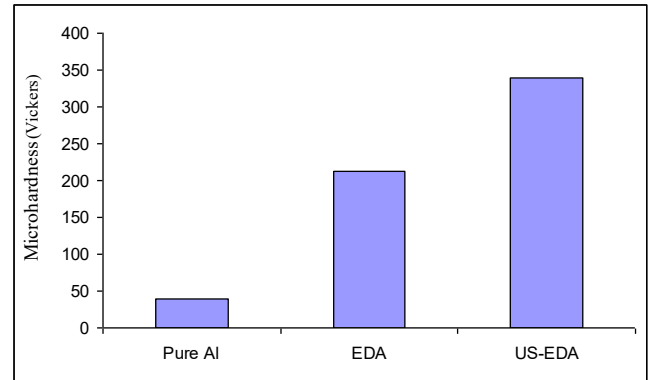


(الف)

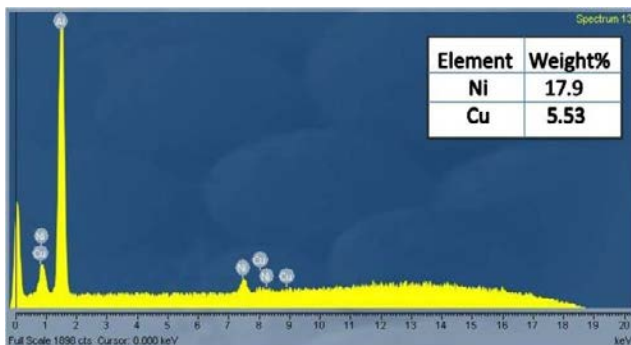
شکل ۸: آنالیز خطی میکروسکوپ الکترونی از لایه سطحی ایجاد شده بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک ($Ti= 400\mu S, I=16 A$)
 الف) عمق نفوذ نیکل، ب) عمق نفوذ مس



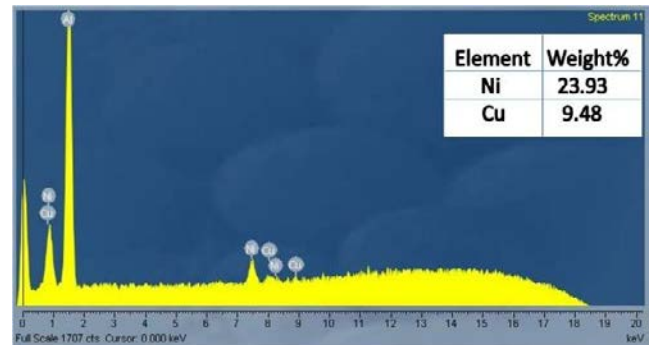
شکل ۱۰: مقایسه سختی لایه سطحی ایجاد شده پس از فرآیند آلیاژسازی سطحی ($Ti= 400\mu S, I=22 A$)



شکل ۹: مقایسه سختی لایه سطحی ایجاد شده پس از فرآیند آلیاژسازی سطحی ($Ti= 100\mu S, I=24 A$)

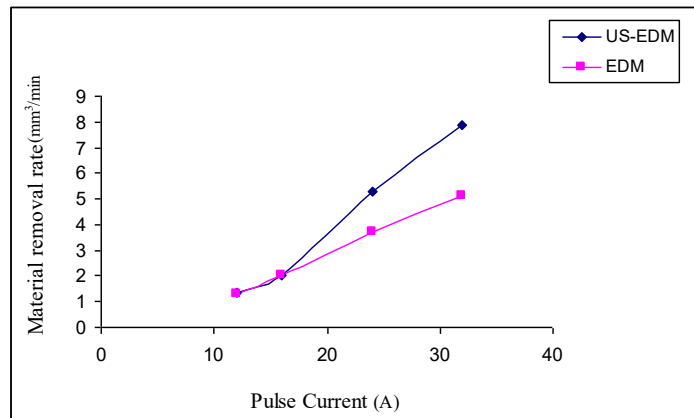


(ب)



(الف)

شکل ۱۱: آنالیز EDX از سطح و مقایسه میزان نفوذ عناصر مس و نیکل به سطح آلومینیوم ($Ti= 100\mu S, I=22 A$)
 الف) تخلیه الکتریکی همراه با ارتعاشات التراسونیک، ب) تخلیه الکتریکی بدون اعمال ارتعاشات التراسونیک



شکل ۱۲: تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی نرخ برداشت ماده از سطح مونل ($Ti= 100\mu S$)

در گپ نقش پودر فلز افزوده شده به مایع دی الکتریک را ایفا می‌کند. قرارگیری یکنواخت پودر مونل در فضای گپ باعث تجزیه راحت‌تر مایع دی الکتریک شده و لذا جرقه‌های کوچک‌تر با تعداد بیشتری اتفاق می‌افتد، توزیع و قرارگیری یکنواخت ذرات مونل در فضای گپ باعث تجزیه جرقه‌های بزرگ به چند جرقه کوچک می‌شود بطوریکه توزیع جرقه‌ها را یکنواخت کرده و صافی سطح را افزایش می‌دهد [۲۱].

۴-۳ تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی مقاومت به سایش سطح

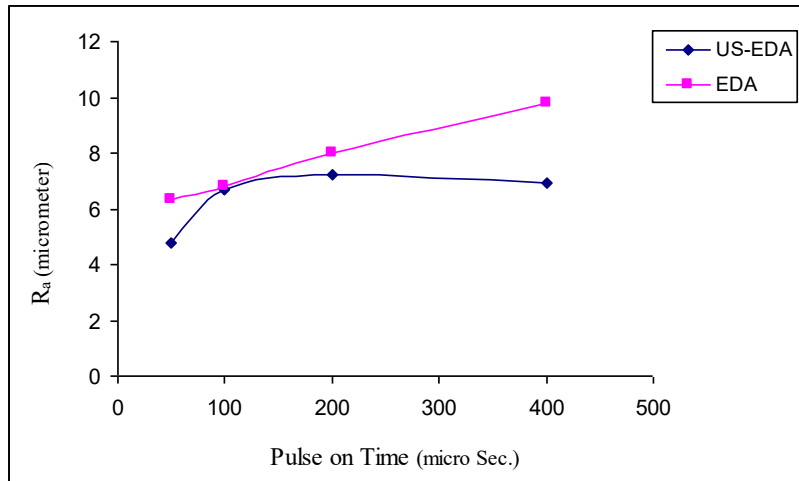
شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تأثیر عملیات آلیاژسازی سطحی به روش تخلیه الکتریکی همراه با ارتعاشات التراسونیک را بر روی مقاومت به سایش قطعات آلومینیومی نشان می‌دهند. همانطوری که ملاحظه می‌شود با انجام عملیات بهبود خواص سطحی به روش تخلیه الکتریکی مقدار کاهش وزن نمونه آلومینیومی در مقایسه با فلز پایه بسیار کاهش یافته و این حالت پس از اعمال ارتعاشات التراسونیک نیز باعث بهبود بیشتر مقاومت به سایش سطح شده است. با توجه به اینکه عامل افزایش مقاومت به سایش سطح نفوذ عناصر آلیاژی به سطح آلومینیوم و افزایش سختی سطح می‌باشد، لذا همانطوری که در بخش‌های قبلی به تشریح بیان شد ارتعاشات التراسونیک الکتروود مونل ۴۰۰ اولاً باعث افزایش عمق نفوذ عناصر آلیاژی به سطح شده و ثانیاً درصد نفوذ این عناصر به سطح را افزایش می‌دهد، لذا افزایش ضخامت لایه ایجاد شده و افزایش بیشتر سختی در این حالت عامل افزایش مقاومت به سایش سطح می‌باشد.

باعث افزایش دما و زمان فرآیند شده و در نتیجه درصد نفوذ عناصر آلیاژی به سطح افزایش می‌یابد [۱۷].

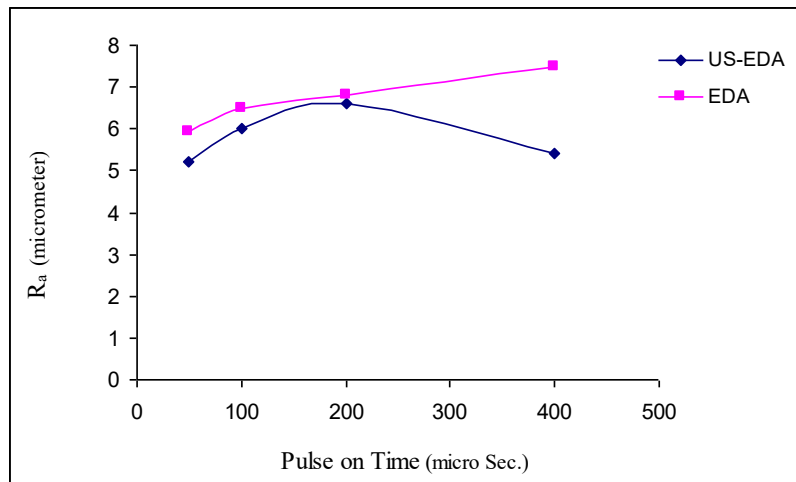
همچنین شکل ۱۲ نرخ برداشت ماده از سطح الکتروود مونل ۴۰۰ را نشان می‌دهد. همانطوری که شکل ۱۲ نشان می‌دهد در حالت اعمال ارتعاشات التراسونیک، نرخ برداشت ماده از سطح الکتروود مونل ۴۰۰ بیشتر است. در این حالت با توجه به افزایش فاصله گپ همزمان با افزایش شدت جریان ورودی، امواج التراسونیک تأثیر خود را بیشتر نشان داده و برداشت ماده از سطح مونل بیشتر می‌شود. در واقع ارتعاشات التراسونیک با افزایش نرخ برداشت ماده از سطح مونل ۴۰۰ غلظت عناصر تجزیه شده (مس و نیکل) را در فضای گپ افزایش می‌دهد که این مسأله نیز به افزایش میزان نفوذ عناصر مس و نیکل کمک می‌کند.

۳-۳ تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی زبری سطح

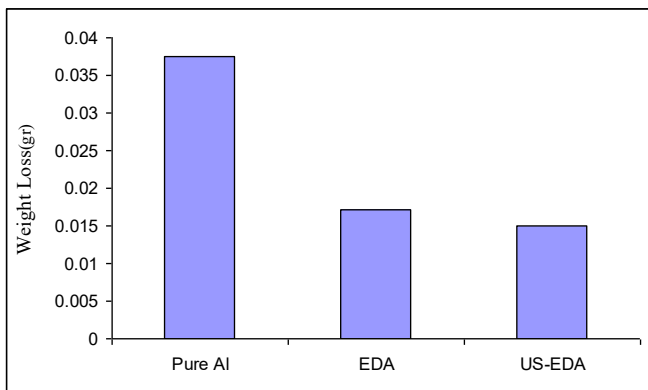
شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نتایج زبری سنجی از سطح آلومینیوم در حالت استفاده از امواج التراسونیک و حالت تخلیه الکتریکی بدون امواج التراسونیک را نشان می‌دهند. همانطوری که ملاحظه می‌شود زبری سطح آلومینیوم بعد از اعمال ارتعاشات التراسونیک کاهش یافته است. همانطوری که در بخش قبلی بیان شد مطابق شکل ۱۲ اعمال ارتعاشات التراسونیک به الکتروود مونل ۴۰۰ باعث افزایش نرخ برداشت ماده از آن می‌گردد. لذا امواج التراسونیک علاوه بر جدایش بیشتر این ذرات باعث پراکندگی یکنواخت ذرات جدا شده در فضای گپ می‌گردد [۲۰]. در واقع افزایش غلظت ذرات مونل با توزیع یکنواخت



شکل ۱۳: تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی زبری سطح آلومینیوم ($I = 32 \text{ A}$)

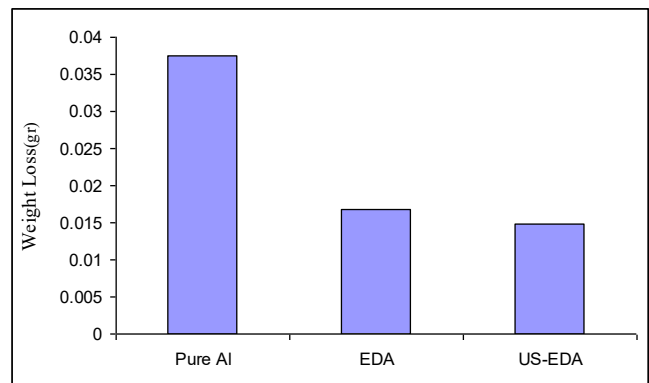


شکل ۱۴: تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی زبری سطح آلومینیوم ($I = 16 \text{ A}$)



شکل ۱۶: تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی مقاومت به سایش سطح

($T_i = 50 \mu\text{S}$)



شکل ۱۵: تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی مقاومت به سایش سطح

($T_i = 100 \mu\text{S}$)

Material, 4(13) (2013) 69-82(in persian).

- [3] Y. Alwafi, N. Bidin, R. Hussin, M. Shkhawat, D. Gustiono, Microhardness Evaluation of Pure Aluminum Substrate after Laser Surface Alloying with Iron and Copper, Journal of Materials Science Engineering, B(1) (2011) 200-205.
- [4] A. Popoola, S. Pityana, T. Fedotova, O. Popoola, Quantitative study of the hardness property of laser surface alloyed aluminium AA1200, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 111 (2011) 335-344.
- [5] T. G. Rambau, A. P. Popoola, C.A. Loto, T. Mathebula, M. Theron, Tribological and Corrosion Characterization of Al/(Stellite- 6+Zirconium) Laser Alloyed Composites”, International Journal of Electrochemical Science, 8 (2013) 5515-552.
- [6] W. Jiru, M. R. Sankar, U. S. Dixit, Surface Alloying of Aluminum with Copper using Co2 Laser, Laser based Manufacturing, (2015) 107-116.
- [7] M. R. Shabgard, H. Eivazi Bagheri, R. Rahmani, A. Afsari, A study on the effect of input parameters on the surface integrity of AISI H13 tool steel in Electrical discharge machining, Iranian Journal of surface and Engineering, 16 (2013) 87-97(in persian).
- [8] J. Simao, H. G. Lee, D. K. Aspinwall, R. C. Dewes, E. M. Aspinwall, Workpiece surface modification using electrical discharge machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(2) (2003) 121-128.
- [9] S. Kumar, R. Singh, T. P. Singh, B. L. Sethi, Surface modification by electrical discharge machining: A review, Journal of Materials Processing Technology, 209(8) (2009) 3675-3687.
- [10] Ph. Bleys, J. P. Kruth, B. Lauwers, B. Schacht, Surface and sub-surface quality of steel after EDM, Advanced Engineering Materials, 8 (1) (2006)15-25.
- [11] S. Kumar, U. Batra, Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric, Journal of Manufacturing Processes, 14(1) (2012) 35-40.
- [12] M. J. Mir, Kh. Sheikh, B. Singh, N. Malhotra,

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش بررسی مقایسه‌ای تأثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی خواص سطحی آلومینیوم در فرآیند بهبود خواص سطحی به روش تخلیه الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطوری که در این مقاله نشان داده شد بهبود خواص سطحی به روش تخلیه الکتریکی یک فرآیند مفید جهت افزایش خواص مکانیکی سطح بوده و اعمال ارتعاشات التراسونیک به الکتروود آلیاژساز کلیه پارامترهای خروجی آن را تحت تأثیر قرار داده و باعث بهینه‌سازی فرآیند می‌شود. لذا بطور خلاصه مهمترین نتایج بدست آمد از این پژوهش عبارتند از :

۱- براساس نتایج آنالیز انرژی پراکنش گرای اشعه X عمق لایه سطحی ایجاد شده در حالت ساده ۳۵ میکرومتر و پس از اعمال ارتعاشات التراسونیک به ۵۰ میکرون رسیده است.

۲- ارتعاشات التراسونیک با افزایش نرخ برداشت ماده از سطح الکتروود موند ۴۰۰ باعث افزایش عمق و درصد نفوذ مس و نیکل به سطح آلومینیوم می‌گردد.

۳- سختی سطح آلومینیوم در حالت اعمال ارتعاشات التراسونیک بیشتر بوده بطوری که در این شرایط مقادیر سختی سطح به بیش از ۴۵۰ ویکرز رسیده است.

۴- ارتعاشات التراسونیک الکتروود موند باعث کاهش زبری سطح قطعه کار آلومینیومی می‌گردد.

۵- مقاومت به سایش سطح آلومینیوم در حالت بهبود خواص سطحی با استفاده از روش تلفیقی التراسونیک آلیاژسازی تخلیه الکتریکی (US-EDA) به دلیل افزایش ضخامت و سختی لایه ایجاد شده بیشتر از حالت آلیاژسازی تخلیه الکتریکی می‌باشد.

منابع

- [1] M. Fazell, M. R. Garsivaz jazi1, S. Bahramzadeh, S. Bakhshi, Influence of Gr and MoS2 Particles on High Temperature Tribological Properties of Ni-SiC Composite Coating, Journal of Advance Materials Engineering (Esteghlal), 34(1) (2014) 105-121(in persian).
- [2] S. Azimi Abarghoui, A. Saatchi, R. Ebrahimi Kahrizsangi, A New Method to Investigate Localized Corrosion on 2024, 7075 and 6061 Aluminium Alloys in the Sea-Like Atmosphere Environments, New

- of ultrasonic assisted electrical discharge machining process on residual stress and hardness of Ti-6Al-4V alloy, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, 16(8)(2017)169-176(in persian).
- [18] W. Jiru, M. R. Sankar, U. S. Dixit, Laser Surface alloying of copper, manganese and magnesium with pure aluminum substrate, *Journal of Materials Engineering and performance*, DOI:10.1007/s1166-016-1922-x, (2016).
- [19] L. A. Mabahali, S. L. Pitiyana, N. Sacks, Laser surface alloying of Aluminum with Ni and SiC powders, *Materials and Manufacturing Processes*, 25(12) (2010) 1397-1403.
- [20] B. Khosrozadeh, M. R Shabgard, Investigating the effect of simultaneous ultrasonic vibration of tool and addition of SiO₂ nanoparticles into the dielectric on machining characteristics of titanium alloy Ti-6Al-4V in EDM process, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, 15(13) (2016) 311-317(in persian).
- [21] S. Singh, C.S. Kalra, Experimental Study of PMEDM on EN 24 Steel with Tungsten Powder in Dielectric, *International Journal on Emerging Technologies*, 5(1) (2014) 153-160.
- Modeling and analysis of machining parameters for surface roughness in powder mixed EDM using RSM approach, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 4 (3) (2012) 45-52.
- [13] N. K. Khedkar, T. P. Singh, V. S. Jatti, Material migration and surface improvement of OHNS die steel material by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric, *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 9(1) (2014) 161-166.
- [14] J. Chavan, M. Mhamunkar, Literature review on optimization of Powder Mix Electrical Discharge Machining, *International Journal on Mechanical Engineering and Robotics*, 4 (1) (2016) 93-96.
- [15] H. M. Lin, T. Sh. Lui, Microstructural Characteristics of electric discharge alloyed layers on spherical graphite cast iron with different electrode materials, *Materials Transactions*, 53(6) (2012) 1184-1190.
- [16] H. Eivazi Bagheri, H. Gorji, M. R Shabgard, S. Nourouzi, Increasing the surface hardness of pure aluminum using Monel 400 by Electrical Discharge Alloying (EDA), *Journal of Modares Mechanical Engineering*, 18(1) (2017)69-74(in persian).
- [17] M. R Shabgard, B. Khosrozadeh, Study on the effect