



افزایش سختی سطح آلومینیوم خالص با استفاده از آلیاژمونل 400 به وسیله فرآیند آلیاژسازی تخلیه الکتریکی (EDA)

هادی عیوضی باقری¹، حمید گرجی^{2*}، محمدرضا شبگرد³، سلمان نوروزی⁴

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

4- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* صندوق پستی 71167-47148، hamidgorji@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 مهر 1396

پذیرش: 13 آذر 1396

ارائه در سایت: 08 دی 1396

کلید واژگان:

مونل

آلومینیوم

تخلیه الکتریکی

میکروسختی

چکیده

مهندسی سطح در بسیاری از صنایع تولید نقش مهمی در بهبود عملکرد محصولات و افزایش زمان کارکرد قطعات دارد. آلومینیوم خالص دارای رسانایی الکتریکی بسیار بالا، مقاومت خوردگی خوب و نسبت استحکام به وزن مناسبی می باشد، با این وجود به علت سختی و مقاومت به سایش بسیار کم کاربرد آن محدود شده است. لذا در این تحقیق امکان بهبود خواص سطحی آلومینیوم خالص با استفاده از عناصر مس و نیکل به عنوان عناصر آلیاژساز با استفاده از فرآیند تخلیه الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. در این فرآیند زمان روشنی پالس و شدت جریان الکتریکی به عنوان پارامترهای ورودی و مقادیر سختی سطح ایجاد شده، بافت و زبری سطح لایه ی آلیاژی به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته شده اند. براساس نتایج میکروسختی به دست آمده در این روش به طور میانگین سختی سطح قطعات آلومینیومی بیش از 8 برابر شده و در برخی از نمونه ها از مقدار اولیه 38.5 تا مقدار 450 ویکرز رسیده است که براساس نتایج آنالیز (XRD) تشکیل ترکیبات بین فلزی Al_3Ni_2 ، $AlCu$ و کاربید آلومینیوم Al_4C_3 در سطح عامل افزایش مقدار سختی سطح می باشد. نتایج نشان می دهد با افزایش زمان روشنی پالس مقادیر سختی سطح افزایش یافته و مقدار زبری سطح نیز بیشتر می شود. همچنین با افزایش شدت جریان الکتریکی تغییرات زبری سطح روندی صعودی دارد.

Increasing the surface hardness of pure aluminum using Monel 400 by Electrical Discharge Alloying (EDA)

Hadi Eivazi bagheri¹, Hamid Gorji^{1*}, Mohammad Reza Shabgard², Salman Nourouzi¹

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

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

*P.O.B. 47148 -71167, Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 26 September 2017

Accepted 04 December 2017

Available Online 29 December 2017

Keywords:

Monel

Aluminum

Electrical Discharge

Microhardness

ABSTRACT

Surface engineering in many manufacturing industries plays an important role in improving product performance and increasing the operating time of parts. Pure aluminum has a very high electrical conductivity, good corrosion resistance and strength to weight ratio. However, due to very low hardness and wear resistance, its application is limited. Therefore, this paper is studied may improve the surface properties of pure aluminum using copper and nickel as alloying elements using electric discharge process. The pulse on time and pulse current as input parameters and surface hardness, alloyed layer texture and surface roughness as output parameters have been considered. According to the microhardness testing results, in this alloying method, the average hardness of the aluminum parts is about more than 8 times and in some parts of the 38.5 Vickers reached up to 450 Vickers. Based on the results of XRD analysis, the formation of intermetallic compounds Al_3Ni_2 , $AlCu$, and Al_4C_3 increased surface hardness. The results show that by increasing the pulse on time surface hardness increased and surface roughness becomes greater. Also, Increasing pulse current the surface roughness increasing trend.

1- مقدمه

فولاد، بارزترین نقاط ضعف آلومینیوم، سختی کم، مقاومت به سایش ضعیف و خواص مکانیکی پایین می باشد. لذا با توجه به خواص تربیولوژیکی و مکانیکی پایین، قابلیت استفاده از آلیاژهای آلومینیوم علی رغم مزایای بیان شده، دچار محدودیت هایی می باشد. اما یک خاصیت بارز آلومینیوم تشکیل ترکیبات بین فلزی با سایر عناصر مانند: مس، تیتانیوم، کروم، کبالت، نیکل و آهن می باشد،

آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل قابلیت های آن ها دارای کاربرد وسیعی در صنایع اتومبیل و هوافضا می باشند. از جمله ویژگی های آلومینیوم می توان شکل پذیری خوب، رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا و وزن کم را نام برد. آلومینیوم به راحتی قابلیت فورج، نورد و اکستروژن دارد. اما در مقایسه با

Please cite this article using:

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), Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 01, pp. 69-74, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

که در پژوهش‌های اخیر ایجاد ترکیبات بین‌فلزی آلومینیوم با این عناصر مورد توجه می‌باشد. با توجه به این که شکست و فرسایش اکثر قطعات مهندسی از جمله آلومینیوم به دلیل شدت تنش‌های مکانیکی و محیطی از سطوح آن‌ها آغاز می‌شود، مهندسی سطح روشی است که با ایجاد تغییر در خواص سطحی قطعات، با افزایش دامنه کاربرد، زمان تخریب آن‌ها را نیز به تأخیر می‌اندازد [1-4].

امروزه روش‌های موجود جهت افزایش خواص مکانیکی، فیزیکی و تریبولوژیکی سطح قطعات مانند مقاومت به سایش، خوردگی، اکسیداسیون و غیره شامل روش‌های کربن‌دهی، نیتروژن‌دهی، کروم‌دهی، تکنیک رسوب‌دهی فیزیکی و شیمیایی بخار و پلاسما می‌باشند که اکثر این فرایندها، فرایندهای ثانویه محسوب می‌شوند و انجام آن‌ها نیازمند صرف زمان و هزینه می‌باشد. در مورد قطعاتی که با فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی¹ 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 الکتریکی² سه برابر قطعاتی است که لایه موردنظر را ندارند [5].

لذا با این که 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 لایه‌ی 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 لایه‌ی متأثر از ماشین‌کاری وجود دارد که ترکیب شیمیایی آن تغییر یافته و تغییرات فازی در آن دیده می‌شود [6]. لذا ترکیب لایه‌ی دوباره منجمد شده به‌وسیله 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 [7].

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 [8] را بیان نمود. در تحقیق آن‌ها آلیاژسازی سطحی آلومینیوم خالص با استفاده از پودر مس، منگنز و منیزیم به ترتیب با نسبت 1:1:2 با هدف افزایش سختی سطح به روش لیزر مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس نتایج این تحقیق حداکثر عمق به‌دست آمده از سطح آلیاژسازی شده 0.5 میلی‌متر و مقدار سختی سطح در بیشترین مقدار از 30 ویکرز به 430 ویکرز افزایش یافته است. ژيرو و همکاران [4] آلیاژسازی سطحی آلومینیوم 99% را با استفاده از پودر مس به روش لیزر مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که سختی سطح پس از آلیاژسازی سطحی از مقدار اولیه 60 ویکرز تا مقدار 156 ویکرز افزایش یافته است. مابهای و همکاران [9] آلیاژسازی سطحی آلومینیوم AA1200 با استفاده از پودر نیکل به‌علاوه کاربید سیلیسیوم به روش لیزر را با هدف تولید لایه

کامپوزیت سطحی³ و تشکیل ترکیب بین فلزی آلومینیوم- نیکل مورد مطالعه قرار دادند. براساس نتایج ارائه شده سختی از مقدار اولیه 24 ویکرز در بیشترین مقدار به 120 ویکرز در سطح رسیده است. با توجه به این که 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 به‌طوری‌که معدود پژوهش‌های انجام شده معطوف به مطالعه بر روی فولادهای ابزار می‌باشد. سیمان و همکارانش [5] 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 سختی سطح پس از انجام فرآیند آلیاژسازی نسبت به سختی اولیه (640HK) افزایش یافته و به مقدار 1319HK رسیده است. همچنین میزان ترک‌های سطحی نیز در سطح قطعه‌کار کاهش یافته است. کومار و همکارانش [10] بررسی مقایسه‌ای آلیاژسازی سطحی قطعات فولادهای ابزار گرم کار و سردکار⁴ 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 و خاموشی پالس و شدت جریان به‌عنوان پارامترهای ورودی و پارامتر میکروسختی سطح به‌عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج آنالیز اشعه ایکس⁵ نشان از نفوذ پودر تنگستن به همراه کربن به سطح قطعات آلیاژسازی شده و افزایش سختی سطح تا 100% را برای هر سه نوع جنس فولاد دارد. براساس نتایج این تحقیق تنگستن کاربید در سطح به وجود آمده که نشان از تشکیل آن در داخل کانال پلاسما می‌باشد. جنیدمیر و همکارانش [11] مدل‌سازی زبری سطح در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار گرم کار AISI H11 با روش افزودن پودر (آلومینیوم) به مایع دی‌الکتریک 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 قطعه‌کار می‌باشند. خدکار و همکارانش [12] 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 قطعه‌کار از مقدار اولیه 506 ویکرز به مقدار 1090 ویکرز را دارد.

بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی در زمینه بهبود و افزایش خواص سطحی آلومینیوم و آلیاژهای آن به روش تخلیه الکتریکی و با استفاده از عناصر مس یا نیکل به روش افزودن پودر به داخل مایع دی‌الکتریک و یا استفاده از الکتروود متالورژی پودر انجام نشده است. لذا این پژوهش قصد دارد بهبود خواص سطحی آلومینیوم خالص را از طریق آلیاژسازی سطحی با استفاده از عناصر مس و نیکل به‌طور همزمان (آلیاژ دوفازی مومل 400) به روش تخلیه الکتریکی با در نظر گرفتن پارامترهای

³ Metal Matrix Composite (MMC)⁴ AISI D2 AISI H13, OHNS⁵ XRD¹ EDM² Electrical Discharge Alloying (EDA)

حالت ایزوپالس به مدت 20 دقیقه تحت عملیات تخلیه الکتریکی قرار گرفتند. جهت ایجاد شرایط یکسان شستشو در تمام آزمایش‌ها، از روش شستشوی غوطه‌وری استفاده گردیده است. "شکل 2" نحوه‌ی بستن الکترودها قبل از شروع عملیات آلیاژسازی تخلیه الکتریکی و جدول 3 پارامترهای ورودی و شرایط انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهند.

پس از فرآیند آلیاژسازی به روش تخلیه الکتریکی، زبری سطح قطعات آلومینیومی با استفاده از دستگاه زبری‌سنج دیجیتالی اندازه‌گیری و مورد ارزیابی قرار گرفت. "شکل 3" تصویر دستگاه اندازه‌گیری و روش کار را نشان می‌دهد.



Fig. 2 Setting the electrode to electrical discharge process

شکل 2 نحوه‌ی بستن الکترودها قبل از شروع عملیات تخلیه الکتریکی

جدول 3 پارامترهای ورودی و شرایط انجام آزمایش‌ها

Table 3 Input parameters and Tests condition

متغیرهای ورودی	سطوح تغییرات
مایع دی الکتریک	نفت سفید
زمان روشنی پالس (μs)	50,100,200,400
ولتاژ (V)	160
ولتاژ مرجع (V)	70
شدت جریان (A)	12,16,24,32
قطبیت الکترود مونل	-
زمان خاموشی پالس (μs)	800



Fig. 3 Surface roughness Measurement after discharge operations

شکل 3 اندازه‌گیری زبری سطح پس از عملیات تخلیه الکتریکی

ورودی زمان روشنی پالس و شدت جریان الکتریکی بر روی مقادیر سختی و زبری سطح آلومینیوم خالص مورد بررسی قرار دهد.

2- مواد و روش تست‌های تجربی

در این پژوهش جهت بهبود خواص سطحی آلومینیوم خالص (99%) به‌طور همزمان با استفاده از عناصر مس و نیکل، از الکترود آلیاژساز مونل 400 که آلیاژی دوفازی از مس و نیکل می‌باشد استفاده شده است. قبل از شروع فرآیند جهت اطمینان از ترکیب شیمیایی قطعه کار و الکترود آلیاژساز، آنالیز نمونه‌ها به روش طیف‌سنجی نشری مشخص گردیده است. جدول 1 ترکیب شیمیایی قطعه کار مورد استفاده (آلومینیوم خالص) و جدول 2 ترکیب شیمیایی الکترود آلیاژساز (مونل 400) را نشان می‌دهند.

جهت آماده‌سازی قطعه کار آلومینیومی بر روی میلگرد تهیه شده عملیات برش اولیه، تراش کاری و سنگ‌زنی انجام شد و تعداد 16 عدد نمونه استوانه‌ای آلومینیومی با قطر 12mm و ارتفاع 14mm میلی‌متر آماده گردید. همچنین برای آماده‌سازی 16 عدد الکترود مونل 400 نیز عملیات برش کاری، ماشین کاری و پرداخت کاری انجام گردید و الکترودهای استوانه شکل با قطر 18mm و ارتفاع 20mm آماده شدند. "شکل 1" قطعه کار آلومینیومی و الکترود مونل را نشان می‌دهد.

در این آزمایش‌ها، زمان روشن پالس و شدت جریان الکتریکی هر یک در چهار سطح به‌عنوان متغیرهای ورودی مستقل در نظر گرفته شدند که براساس طراحی آزمایش کامل، تعداد 16 آزمایش انجام شد. 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 400 و قطب مثبت به آلومینیوم (قطعه کار) اختصاص داده شده است. تمامی نمونه‌ها توسط دستگاه اسپارک شارمیلز¹ در

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلومینیوم خالص (درصد وزنی)

Table 1 Chemical composition of pure Aluminum ((%wt))

Al	Mn	Fe	Ni	Si	Mg	Cr
99.80	0.003	0.118	0.006	0.04	0.003	0.004

جدول 2 ترکیب شیمیایی مونل 400 (درصد وزنی)

Table 2 Chemical composition of Monel 400 ((%wt))

Ni	Cu	Fe	Cr	Al	Zr	Ti
66.64	28.09	1.65	0.095	0.14	0.035	0.032



Fig. 1 Monel Electrode and workpiece

شکل 1 الکترود مونل و قطعه کار آلومینیومی

¹ CNC-EDM

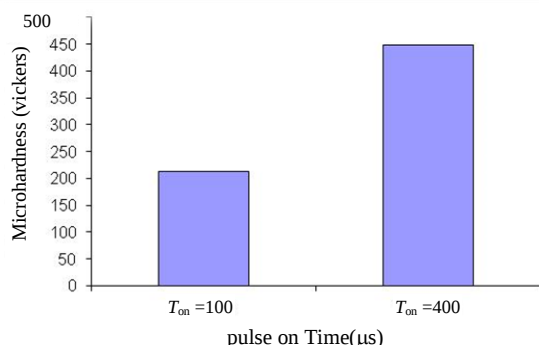


Fig. 5 Effect of pulse on time on the surface hardness ($I=24A$)

شکل 5 تأثیر زمان روشنی پالس بر روی سختی سطح قطعه کار ($I=24A$)

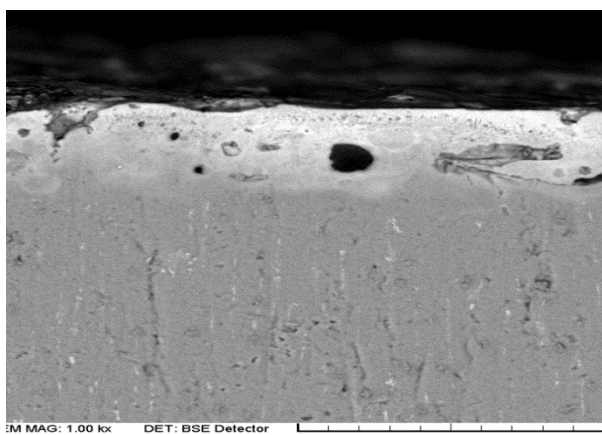


Fig. 6 SEM micrograph showing cross-section of EDAed piece (1000X)

شکل 6 تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع جانبی سطح آلیاژسازی شده (1000X) ($Ti=400, I=16A$)

گردند [14,13]. مطابق نتایج آنالیز اشعه ایکس از سطح قطعه‌ی آلیاژسازی شده (شکل 7)، در اثر مکانیزم این فرآیند، عناصر مس و نیکل از آلیاژ مومل و کربن از طریق مایع دی‌الکتریک وارد سطح قطعه آلومینیومی شده و ترکیبات بین فلزی Al_3Ni_2 ، $AlCu$ و کاربید آلومینیوم Al_4C_3 در سطح نمونه تشکیل شده است.

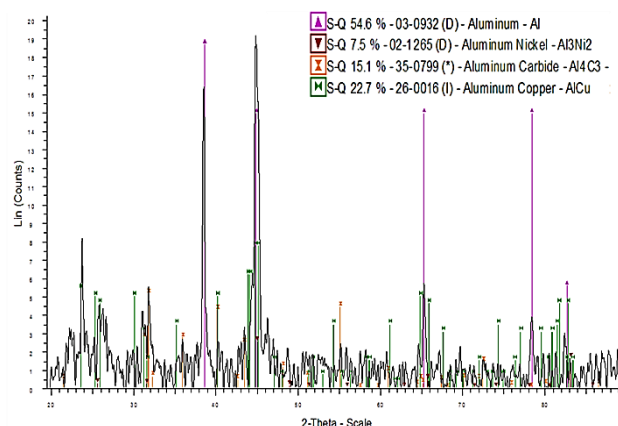


Fig. 7 XRD pattern of the alloyed layer after Electrical discharge Alloying

شکل 7 آنالیز اشعه ایکس از سطح قطعه‌ی آلیاژسازی شده پس از عملیات تخلیه الکتریکی

پس از زبری‌سنجی جهت مطالعه‌ی سختی سطح و تصویربرداری میکروسکوپی، نمونه‌ها مانت‌گیری شده و پس از انجام عملیات متالوگرافی از مقطع جانبی و پولیش نهایی، عملیات میکروسختی‌سنجی توسط دستگاه المپیوس (LM700) از لایه سطحی ایجاد شده در نزدیک‌ترین نقاط به سطح انجام شد. تصاویر میکروسکوپی از سطح آلیاژسازی شده توسط میکروسکوپ الکترونی¹ تهیه گردید. همچنین جهت تعیین فازهای تشکیل شده در سطح، از دستگاه اشعه ایکس زیرمنس (D5000) استفاده شده است.

3- نتایج و بحث

در این تحقیق پارامترهای ورودی مورد مطالعه زمان روشنی پالس (T_{on})، شدت جریان الکتریکی (I) می‌باشند، در ادامه تأثیر هر یک از آن‌ها بر روی پارامترهای خروجی مذکور به طور جداگانه بررسی خواهد شد.

3-1- تأثیر شدت جریان الکتریکی و زمان روشنی پالس بر روی

سختی سطح ایجاد شده

"شکل‌های 4 و 5" تأثیر مقدار زمان روشنی پالس بر روی مقدار سختی سطح قطعه‌کار آلومینیومی بعد از عملیات تخلیه الکتریکی توسط الکتروود مومل 400 را نشان می‌دهند. همچنین در "شکل 6" تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع جانبی لایه‌ی بهبود یافته سطحی نشان داده شده است. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود با افزایش زمان روشنی پالس، مقادیر سختی در سطح قطعه‌کار بسیار افزایش یافته و با توجه به سختی اولیه قطعات آلومینیومی 38.5 ویکرز مقدار سختی سطح به‌طور متوسط بیش از 8 برابر شده است. مکانیزم بهبود خواص سطح در این روش افزایش سختی از طریق تشکیل ترکیبات بین فلزی بین فلز زمینه و عناصر آلیاژساز، تشکیل کاربید و سخت شدن در اثر آلیاژسازی محلول جامد می‌باشد. 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 پلاسما و انجام تخلیه الکتریکی، پدیده ذوب و تبخیر و همچنین پدیده جوشش حجمی² در محل اتصال کانال پلاسما 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 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 قطعه‌کار نفوذ می‌کنند و با تشکیل ترکیب با فاز زمینه، موجب آلیاژسازی در سطح نمونه‌ها

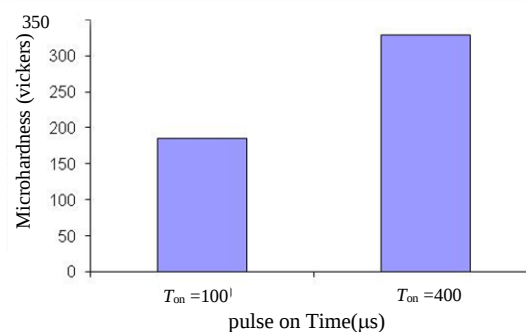


Fig. 4 Effect of pulse on time on the surface hardness ($I=16A$)

شکل 4 تأثیر زمان روشنی پالس بر روی سختی سطح قطعه کار ($I=16A$)

¹ Cam Scan MV23003

² Bulk boiling

"شکل های 10 و 11" به ترتیب تغییرات زبری سطح قطعات بعد از بهبود سختی سطح را نسبت به تغییرات زمان روشنی پالس و شدت جریان نشان می دهند. همان طور که ملاحظه می گردد با افزایش زمان روشن پالس و شدت جریان، مقدار زبری میانگین سطح (R_a) افزایش می یابد. دلیل این مسأله را این طور می توان توضیح داد که با افزایش زمان روشن پالس طول زمان ماشین کاری و انرژی جرقه ها بیشتر شده و شعاع کانال پلاسما افزایش می یابد و در نتیجه چاله های مذاب بزرگتری در سطح تشکیل می شود که منجر به افزایش زبری سطح می گردد. همچنین افزایش شدت جریان الکتریکی، شدت برخورد جرقه ها به سطح را افزایش داده و به دلیل افزایش عمق متأثر از جرقه ها، چاله های مذاب عمیق تر و بزرگتری در روی سطح به وجود می آیند که باعث افزایش زبری سطح قطعه کار آلومینیومی می گردد [19,18].

4- نتیجه گیری

در این تحقیق بهبود خواص سطحی آلومینیوم خالص با استفاده از آلایز مومل 400 به روش نوین آلایز سازی تخلیه الکتریکی با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای ورودی (زمان روشن پالس و شدت جریان) بر روی پارامترهای خروجی (تغییرات سختی سطح و مقادیر زبری) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مهم زیر به دست آمد:

- با افزایش زمان روشن پالس، مقادیر سختی ایجاد شده در سطح افزایش می یابد.
- استفاده از مومل 400 جهت آلایز سازی سطحی آلومینیوم خالص به روش تخلیه الکتریکی با ایجاد ترکیبات بین فلزی در سطح، سبب افزایش سختی سطح می گردد.
- با افزایش زمان روشن پالس و شدت جریان الکتریکی، مقادیر زبری متوسط سطح (R_a) بیشتر می شود.

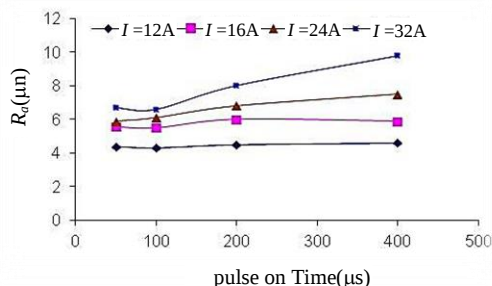


Fig. 10 Effect of pulse on time on the surface roughness
شکل 10 تأثیر زمان روشن پالس بر روی زبری سطح ایجاد شده

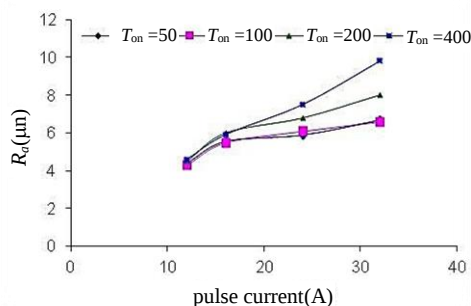


Fig. 11 Effect of pulse current on the surface roughness
شکل 11 تأثیر شدت جریان بر روی زبری سطح ایجاد شده

با توجه به این که مطابق رابطه (1) پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر روی انرژی جرقه ها در فرآیند تخلیه الکتریکی زمان روشن پالس (T)، شدت جریان ورودی (I) و ولتاژ (U) می باشند، لذا با افزایش زمان روشن پالس تا یک حد بهینه، به دلیل افزایش انرژی جرقه ها، نرخ ذوب و تبخیر افزایش یافته و میزان ذوب الکترود آلایز ساز بیشتر می شود. همچنین با توجه به این که یکی از عوامل مؤثر بر پدیده نفوذ اتمی پارامتر زمان می باشد افزایش زمان روشن پالس باعث افزایش طول زمان فرآیند تخلیه الکتریکی و در نتیجه افزایش سختی سطح می گردد [15,3].

$$\int_0^{T_{on}} U(I_i)I(T_i)dT_i \quad (1)$$

"شکل های 8 و 9" تأثیر مقدار شدت جریان الکتریکی بر روی مقدار سختی سطح قطعه کار آلومینیومی بعد از عملیات تخلیه الکتریکی توسط الکترود مومل 400 را نشان می دهند. همان طور که مشاهده می گردد با افزایش شدت جریان الکتریکی، مقادیر سختی سطح افزایش می یابد. با توجه به این که مطابق رابطه (1) پارامتر دیگر مؤثر بر روی انرژی جرقه ها شدت جریان ورودی می باشد، لذا با افزایش شدت جریان ورودی، افزایش انرژی ورودی باعث افزایش ذوب الکترود آلایز ساز شده و به دلیل افزایش دمای سطح، حجم بیشتری از ذرات و عناصر آلایز ساز را وارد چاله های مذاب ایجاد شده در سطح آلومینیوم می کند. ضمن این که پارامتر مؤثر دیگر بر پدیده نفوذ اتمی، دما می باشد لذا افزایش دمای سطح به دلیل افزایش چگالی جریان الکتریکی، باعث افزایش نفوذ عناصر آلایز ساز به سطح و در نتیجه افزایش سختی می شود [17,16].

3-2- تأثیر شدت جریان الکتریکی و زمان روشن پالس بر روی زبری سطح ایجاد شده

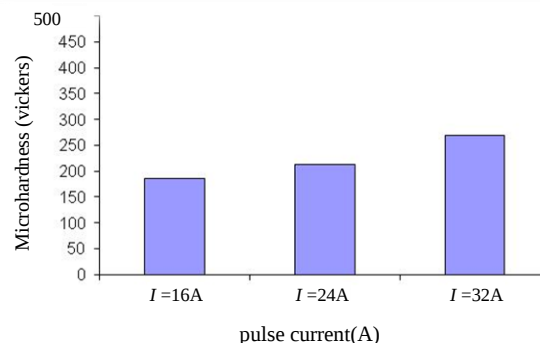


Fig. 8 Effect of pulse current on the surface hardness ($T_{on}=100\mu s$)
شکل 8 تأثیر شدت جریان الکتریکی بر روی سختی سطح قطعه کار ($T_{on}=100\mu s$)

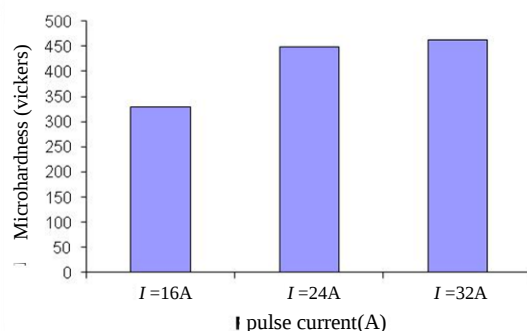


Fig. 9 Effect of pulse current on the surface hardness ($T_{on}=400\mu s$)
شکل 9 تأثیر شدت جریان الکتریکی بر روی سختی سطح قطعه کار ($T_{on}=400\mu s$)

- electrical discharge machining: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, pp. 3675-3687, 2009.
- [7] Ph. Bleyss, J. P. Kruth, B. Lauwers, B. Schacht, Surface and sub-surface quality of steel after EDM, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8, No. 1, pp.15-25, 2006.
- [8] 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.
- [9] L. A. Mabahali, S. L. Pitiyana, N. Sacks, Laser surface alloying of Aluminum with Ni and SiC powders, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, No. 12, pp. 1397-1403, 2010.
- [10] S. Kumar, U. Batra, Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, No. 1, pp. 35-40, 2012.
- [11] M. J. Mir, Kh. Sheikh, B. Singh, N. Malhotra, Modeling and analysis of machining parameters for surface roughness in powder mixed EDM using RSM approach, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 45-52, 2012.
- [12] 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*, Vol. 9, No. 1, pp. 161-166, 2014.
- [13] Ph. T. Eubank, M. R. Patel, M. A. Barrufet, Theoretical models of the electrical discharge machining process, I. A simple cathode erosion model, *Journal of Applied Physics*, Vol. 66, No. 9, pp. 4095-4103, 1989.
- [14] M. R. Shabgard, H. Eivazi Bagheri, A. Afsari, R. Rhamani, The study of the input parameters on the depth of heat affected zone (HAZ) of AISI H13 steel in electrical discharge machining process (EDM), *Journal of New Materials*, Vol. 2, No. 1, pp. 23-34, 2011. (in Persian فارسی)
- [15] D. Pradhan, S. C. Jayswal, Behaviour of copper and aluminium electrodes on EDM of EN-8 alloy steel, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 3, No. 7, pp. 5492-5499, 2011.
- [16] A. Descoeudres, *Characterization of Electrical Discharge Machining Plasmas*, PhD Thesis, University of Lausanne, India, 2006.
- [17] B. H. Yan, Y. Ch. Lin, F. Y. Huang, Ch. Wang, Surface modification of SKD 61 during EDM with metal powder in dielectric, *Materials Transactions*, Vol. 42, No. 12, pp. 2597-2604, 2011.
- [18] H. T. Lee, F. Ch. Hsu, T. Y. Tai, Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode, *Material Science and Engineering*, Vol. 364, No. 1, pp. 346-356, 2004.
- [19] J. P. Davim, *Surface Integrity In Machining*, Springer, pp. 55-56, 2010.

- شیب نمودارهای زبری به دست آمد نشان می دهد تأثیر شدت جریان الکتریکی بر روی زبری سطح بیشتر از پارامتر زمان روشنی پالس می باشد.
- بیشترین مقدار سختی سطح به ازای زمان روشنی پالس 400 میکروثانیه و شدت جریان 32 آمپر حاصل شده است.

5- تقدیر و تشکر

با توجه به این که این پژوهش با حمایت مالی سازمان صنایع کوچک و شهرک های صنعتی ایران انجام شده است، لذا نویسندگان مقاله از آن سازمان به جهت حمایت انجام شده تقدیر و تشکر می نمایند.

6- مراجع

- [1] Y. Ab. 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*, Vol. B 1, No. 1, pp. 200-205, 2011.
- [2] A. P. I. Popoola, S. L. Pityana, T. Fedotova, O. M. Popoola, Quantitative study of the hardness property of laser surface alloyed aluminium AA1200, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 111, No. 1, pp. 335-344, 2011.
- [3] T. G. Rambau, A. P. I. 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*, Vol. 8, No. 1, pp. 5515-5528, 2013.
- [4] W. G. Jiru, M. R. Sankar, U. S. Dixit, Surface alloying of aluminum with copper using Co₂ laser, *Proceedings of The 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, India, December 12-14, 2014.
- [5] 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*, Vol. 43, No. 2, pp. 121-128, 2003.
- [6] S. Kumar, R. Singh, T. P. Singh, B. L. Sethi, Surface modification by