



بررسی خواص سطحی آلومینیوم در فرآیند بهبود خواص سطحی به روش تخلیه الکتریکی

هادی عیوضی باقری¹، حمیدگرچی^{2*}، محمدبخشی³

1- پژوهشگر پسادکتر، مهندسی ساخت تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشیار، مهندسی ساخت تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استاد، مهندسی ساخت تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* صندوق پستی 484، hamidgorji@nit.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

با توجه به ماهیت ترموالکتریکی فرآیند تخلیه الکتریکی، بررسی خواص سطحی قطعاتی که با این روش آلیاژسازی سطحی می‌شوند، حائز اهمیت می‌باشد. لذا در این پژوهش تأثیر فرآیند آلیاژسازی سطحی آلومینیوم خالص با استفاده از الکترود مونل 400 به روش تخلیه الکتریکی بر روی خواص مکانیکی سطح مورد بررسی قرار گرفته است. برای طراحی آزمایش‌ها پارامترهای زمان روشنی پالس و شدت جریان به عنوان پارامترهای ورودی و پارامترهای تنش‌های پسماند سطحی و عمق فرورونده ویکرز به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شدند. علاوه بر این، وضعیت جذب امواج الکترومغناطیس لایه آلیاژسازی شده سطحی با استفاده از نرم‌افزار کامسول تعیین شد. براساس نتایج بدست آمده، مقدار عمق فرورونده ویکرز کمترین مقدار را در سطح داشته و با افزایش فاصله از سطح، میزان عمق فرورونده افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، با افزایش پارامترهای ورودی زمان روشنی پالس و شدت جریان، به دلیل افزایش میزان ورود عناصر آلیاژی (مس و نیکل) به سطح آلومینیوم و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی، عمق فرورونده کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی وضعیت جذب امواج الکترومغناطیس در لایه سطحی ایجاد شده با استفاده از شبیه‌سازی مشخص شد بیشترین مقدار جذب لایه ایجاد شده در محدوده 10/5-11 گیگاهرتز می‌باشد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 آذر 1399
داوری اولیه: 15 فروردین 1400
پذیرش: 27 فروردین 1400

کلیدواژه‌ها:

آلیاژسازی سطح
تخلیه الکتریکی
فرورونده ویکرز
تنش پسماند

Investigation of aluminum surface properties in surface improvement process by electric discharge method

Hadi Eivazi Bagheri, Hamid Gorji*, Mohammad Bakhshi

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

* P.O.B. 484, Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 8 December 2020
First Decision: 4 April 2021
Accepted: 16 April 2021

Keywords:

Surface alloying
Electrical discharge
Vickers indentation
Residual stress

Abstract

Due to the thermoelectric nature of the electrical discharge process, it is important to study the surface properties of the workpieces that are surface alloyed by this method. In this study, the effect of aluminum surface alloying process using Monell 400 electrode by electric discharge method on the workpiece surface mechanical properties has been investigated. To design the experiments, the pulse on time and pulse current were considered as input parameters and the surface residual stresses and Vickers indentation depth were considered as output parameters. In addition, the electromagnetic wave absorption of the surface alloyed layer was determined using the COMSOL simulation software. According to the obtained results, the Vickers indentation depth has the lowest value at the surface and with increasing distance from the surface, the amount of indentation depth increases. By increasing the pulse on time and pulse current, due to the increase in the amount of alloy elements (copper and nickel) diffusion to aluminum surface and thus improving the surface mechanical properties, the depth of the indentation decreases. Also, by examining the magnetic absorption in the surface layer using the simulation software, it was determined that the maximum amount of absorption of alloyed layer is in the range of 11-10.5 GHz.

1- مقدمه

است این فلز کاربردی عالی دارد. مونل می‌تواند تا دمای 538 درجه سانتی‌گراد در محیط‌های اکسیدکننده و در دماهای بالاتر در یک محیط احیا کننده به کار رود. از جمله موارد مصرف مونل صنایع دریایی، اجزای پمپ و شیرآلات برای فرآیندهای شیمی و پالایشگاهی، سنسور و قطعات الکترونیکی، صنایع هسته‌ای و ... است.

آلیاژ مونل یک آلیاژ نیکل-مس است و استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی عالی از ویژگی‌های آن می‌باشد. مقاومت به خوردگی آلیاژ 400 در محلول‌های کلریدی، اسید سولفوریک و اغلب اسیدهای دیگر و به ویژه همه بازها بالاست. در آب دریا با سرعت‌های زیاد که مقاومت به ساییش و سوراخ شدن خیلی مهم

Please cite this article using:

H. Eivazi Bagheri, H. Gorji, M. Bakhshi, Investigation of aluminum surface properties in surface improvement process by electric discharge method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 1- 8, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

منجمد شده بوسیله مواد موجود در الکتروود یا مایع دی الکتریک 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 [5، 6]

در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی دمای بسیار بالای ناشی از تخلیه انرژی جرقه، سبب ذوب و خروج بخشی از فلز شده و بقیه ماده مذاب دوباره منجمد می‌شود و لایه سفید را تشکیل می‌دهد. این لایه دارای تنش‌های پسماند می‌باشد که این تنش‌های پسماند ایجاد شده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی عمدتاً ناشی از انجماد غیرتعدالی و تغییرات متالورژیکی موضعی است. تنش‌های پسماند اثرات قابل توجهی بر خواص مکانیکی از جمله عمر خستگی، اعوجاج، پایداری ابعادی، مقاومت به خوردگی و شکست ترد مواد مختلف دارد. به علاوه، این تنش‌ها می‌توانند سبب گسترش ترکها، افزایش میزان خوردگی و کاهش عمر مفید قطعات گردند. به همین منظور اندازه‌گیری و کنترل میزان تنش پسماند مخصوصاً در فرآیند تخلیه الکتریکی قطعات در معرض بار خستگی یکی از مباحث مهم است. از اینرو، تحلیل و بررسی تنش‌های پسماند یک مرحله الزامی در طراحی قطعات و اجزای ماشین‌ها برای ارزیابی قابلیت اطمینان آنها در شرایط مختلف کاری است [7].

تحقیقات متعددی که بر اساس تعیین سختی حاصل از فرورونده انجام شده و مقدار سختی بدست آمده را وابسته به تنش‌های پسماند موجود در قطعه کار بیان نموده‌اند، ارتباط مستقیمی بین سختی و تنش پسماند ارائه کرده‌اند، به طوری که در برخی از این تحقیقات رابطه‌ی کاملاً خطی ارائه شده است. اما در این رابطه، یکی از روش‌های نوین ارائه شده، تعیین تنش پسماند از طریق محاسبه اختلاف مقدار سختی نمونه دارای تنش و نمونه بدون تنش می‌باشد. در واقع این روش جدید نیز در جهت روش‌هایی است که ارتباط خطی بین سختی و تنش پسماند ارائه نموده‌اند. بر اساس روش اولیور تنش پسماند (σ_r) در هر نقطه از رابطه (1) تعیین می‌شود [8]:

$$\sigma_r \approx H_0 - H \quad (1)$$

که در آن H_0 مقدار سختی در نمونه بدون تنش و H مقدار سختی در هر نقطه دارای تنش می‌باشد. یکی دیگر از پارامترهایی که در بحث لایه‌های سطحی بویژه در فلزات و آلیاژهای سبک دارای اهمیت می‌باشد، تعیین رفتار لایه‌ی سطحی ایجاد شده در مواجهه با امواج الکترومغناطیس می‌باشد. امروزه استفاده از امواج میکروویو با فرکانس بالا در صنایع

آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل داشتن خواص منحصر به فردی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، جوش پذیری خوب، شکل‌پذیری عالی و مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب، به گونه گسترده در انواع سازه‌ها، صنایع هوایی و دریایی، تجهیزات الکترونیک و ... استفاده می‌شوند. در مقایسه با سایر فلزات از جمله فولاد، بارزترین نقاط ضعف آلومینیوم، سختی کم، مقاومت به سایش ضعیف و خواص مکانیکی پایین می‌باشد. لذا با توجه به خواص سایشی و مکانیکی پایین، قابلیت استفاده از آلیاژهای آلومینیوم علیرغم مزایای بیان شده، دچار محدودیت‌هایی می‌باشد. اما یک خاصیت بارز آلومینیوم تشکیل ترکیبات بین فلزی با سایر عناصر مانند: Fe, Ni, Co, Cr, Ti, Cu می‌باشد. از این رو در پژوهش‌های اخیر ایجاد ترکیبات بین فلزی آلومینیوم با این عناصر مورد توجه قرار گرفته است [1-3].

روش‌های موجود جهت افزایش خواص مکانیکی، فیزیکی و سایشی سطح قطعات مانند مقاومت به سایش، خوردگی، اکسیداسیون و غیره شامل روش‌های کربن دهی، نیتروژن دهی، کروم دهی، تکنیک رسوب دهی فیزیکی و شیمیایی بخار و پلاسما 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 پوشش دهی 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 راه حل جایگزین پیش بینی بهینه سازی سطح یا آلیاژسازی سطحی هم‌زمان با ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی¹ است که نیاز به عملیات ثانویه برای انجام عملیات سطحی را رفع می‌کند. روش آلیاژسازی تخلیه الکتریکی² انعطاف‌پذیری بسیار زیاد و هزینه پایین است [4].

با اینکه فرآیند تخلیه الکتریکی یک فرآیند براده برداری است اما سعی می‌شود از این روش برای عملیات سطحی نیز استفاده شود. نتایج تحقیقات نشان داده است که بالاترین لایه سطحی بعد از عملیات ماشین‌کاری یک لایه خنک شده با سرعت بالا است و عمق این لایه به انرژی و مدت زمان پالس بستگی دارد. در زیر این لایه، یک لایه متأثر از ماشین‌کاری وجود دارد که ترکیب شیمیایی آن تغییر می‌یابد و تغییرات فازی در آن دیده می‌شود. از این رو، ترکیب لایه‌ی دوباره

¹ Electrical Discharge Machining (EDM)

² Electrical Discharge Alloying (EDA)

مرتبط با سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم، شبکه‌های محلی، تجهیزات پزشکی و رادارها بیش از پیش و به صورت بسیار گسترده مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از امواج مایکروویو در کاربردهای نظامی، امکان شناسایی اهداف توسط رادار را فراهم کرده است. باند فرکانسی X دسته ای از پرتوهای مایکروویو امواج الکترو مغناطیس با بازه بسامدی 8-12 گیگاهرتز هستند که در ارتباطات ماهواره ای، راداری، شبکه ای و اینترنتی، فضایی، رادیویی، کنترل ترافیک هوایی، ارتباطات نوبری دریایی و ایستگاههای هواشناسی کاربردهای فراوانی دارند. فاکتورهای مؤثر در جذب امواج الکترومغناطیس شامل اتلاف دی الکتریک، اتلاف مغناطیسی، رسانایی الکتریکی، اثر ابعاد نانو و ساختار ماده می باشند [9].

با توجه به اینکه بهبود کیفیت سطح با استفاده فرآیند تخلیه الکتریکی از جدیدترین زمینه‌های پژوهشی در این حوزه از مهندسی ساخت و تولید می‌باشد، تحقیقات محدودی در این خصوص انجام شده و این پژوهش‌ها معطوف به مطالعه‌ی روش افزودن پودر به مایع دی الکتریک یا ساخت الکترو پودری بوده اند. سیمائو و همکارانش [4] آلیاژسازی سطحی فولاد ابزار H13 با استفاده از الکترو پودری کامپوزیتی WC/Co در داخل سیال هیدروکربنی مورد آزمایش قرار داده اند. بر اساس نتایج بدست آمده سختی سطح پس از انجام فرآیند آلیاژسازی نسبت به سختی اولیه بیش از دو برابر شده است. همچنین میزان ترکهای سطحی نیز در سطح قطعه کار کاهش یافته است. جنیدمیر و همکارانش [10] مدل سازی زبری سطح در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار AISI H11 را با روش افزودن پودر (آلومینیوم) به مایع دی الکتریک مورد بررسی قرار داده اند. در تحقیق آنها پارامترهای زمان روشنی پالس، شدت جریان و غلظت پودر آلومینیوم افزوده شده به مایع دی الکتریک به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده و از روش رویه پاسخ جهت بهینه سازی پارامترها استفاده شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، روش رویه پاسخ یک روش مناسب برای مدل سازی فرآیند EDM بوده و از بین پارامترهای ورودی انتخاب شده، پارامترهای شدت جریان و غلظت پودر مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر روی زبری سطح قطعه کار می‌باشند. جباری پور و همکارانش [11] افزودن پودر آلومینیوم به سیال دی الکتریک در ماشین کاری تخلیه الکتریکی ترکیب تیتانیوم آلومیناد را مورد بررسی قرار داده اند. بر اساس نتایج تحقیق آنها، افزودن پودر به دی الکتریک سبب افزایش فرکانس جرقه زنی می‌گردد. عیوضی و همکارانش [12] مقاومت به سایش سطح آلومینیوم را پس از

با بررسی تحقیقات قبلی مشاهده می‌گردد که طیف وسیعی از خواص و ویژگی‌ها پس از فرآیند بهبود خواص سطحی قطعات به روش تخلیه الکتریکی (آلیاژسازی سطحی) مورد نظر پژوهشگران بوده و بررسی آن‌ها حائز اهمیت می‌باشد. از این رو، در این پژوهش تأثیر فرآیند آلیاژسازی سطحی آلومینیوم به روش تخلیه الکتریکی با استفاده از الکترو پودر 400 بر روی وضعیت تنش‌های پسماند سطحی قطعه کار مورد بررسی قرار گرفته و همچنین تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند تخلیه الکتریکی بر روی عمق فرورونده و پیکرز در لایه سطحی بررسی شده است. علاوه بر این تأثیر لایه سطحی ایجاد شده بر روی میزان جذب امواج الکترومغناطیس باند X مورد ارزیابی قرار گرفته است.

2- مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای آلیاژسازی سطحی آلومینیوم خالص (99%)،

مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد 1400، دوره 8 شماره 3

شده است. تمامی نمونه‌ها توسط دستگاه اسپارک شارمیلز (CNC-EDM) در حالت ایزوپالس به مدت 20 دقیقه تحت عملیات تخلیه الکتریکی قرار گرفتند. برای ایجاد شرایط یکسان شستشو در تمام آزمایش‌ها، از روش شستشوی غوطه‌وری استفاده گردیده است. آنالیز EDX از لایه‌های نزدیک سطح ماشین‌کاری شده توسط میکروسکوپ الکترونی Cam Scan MV2300 انجام گردید. همچنین برای تهیه تصاویر میکروسکوپ نوری از دستگاه میکروسکوپ نوری Olympus PMG3 استفاده شده است. پس از انجام عملیات تخلیه الکتریکی توسط دستگاه میکروسختی سنجی OLYMPUS-LM700 از لایه‌های نزدیک به سطح ماشین‌کاری شده آزمون میکروسختی سنجی به عمل آمد و میانگین قطر سطح اثر ثبت شده است. برای محاسبه‌ی عمق نفوذگر ویکرز در سطح نیز از رابطه‌ی (2) استفاده شده است:

$$h = \frac{d}{2\sqrt{2}\tan\frac{\theta}{2}} \quad (2)$$

که در آن، h عمق نفوذگر در لایه سطحی، d میانگین قطر سطح اثر نفوذ گر، θ زاویه‌ی نفوذگر ویکرز $\theta = 136^\circ$ می‌باشد. برای محاسبه‌ی عمق فرورونده ویکرز در لایه سطحی، پس از میکروسختی سنجی و اندازه‌گیری قطر میانگین فرو رنده، عمق آن با رابطه‌ی (2) تعیین گردید و جدول 3 پارامترهای ورودی و شرایط انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول 3 پارامترهای ورودی و شرایط انجام آزمایش‌ها

Table 3 Input parameters and Tests condition

مایع دی الکتریک	نفت سفید
زمان روشنی پالس (μs)	۵۰،۱۰۰،۲۰۰،۴۰۰
ولتاژ (V)	160
شدت جریان (A)	۱۲،۱۶،۲۴،۳۲
قطبیت الکترود مونل	منفی
زمان خاموشی پالس (μs)	800

برای شناخت نحوه تغییرات نمودار جذب امواج الکترومغناطیس لایه سطحی ایجاد شده، میزان جذب امواج نمونه‌های آلیاژسازی سطحی شده در محدوده‌ی باند X امواج رادیویی توسط نرم‌افزار کامسول¹ با موجبر استاندارد WR-90 شبیه‌سازی شده است. شکل 2 نحوه طراحی لایه سطحی و موج بر را در نرم‌افزار نشان می‌دهد.

از مونل 400 که آلیاژی دوفازی از مس و نیکل می‌باشد به عنوان الکترود آلیاژساز استفاده شده است. قبل از شروع فرآیند جهت اطمینان از ترکیب شیمیایی قطعه‌کار و الکترود آلیاژساز، آنالیز نمونه‌ها به روش اسپکترومتری مشخص گردیده است. جدول 1 ترکیب شیمیایی قطعه‌کار مورد استفاده (آلومینیوم خالص) و جدول 2 ترکیب شیمیایی الکترود آلیاژساز (مونل 400) را نشان می‌دهند.

برای آماده سازی قطعه‌کار آلومینیومی، عملیات برش اولیه و تراش کاری بر روی میلگرد تهیه شده انجام شد و تعداد 16 عدد نمونه استوانه‌ای آلومینیومی با قطر 12mm و ارتفاع 14mm 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 نحوه بستن الکترودها قبل از شروع عملیات EDA را نشان می‌دهد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلومینیوم خالص (درصد وزنی)

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)

Ni	Cu	Fe	Cr	Al	Zr	Ti
66/64	28/0	1/65	0/095	0/14	0/035	0/039

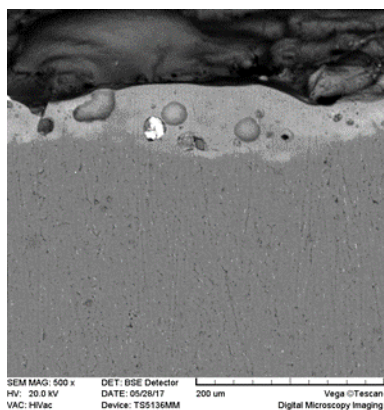


Fig. 1 Setting the electrode to electrical discharge process

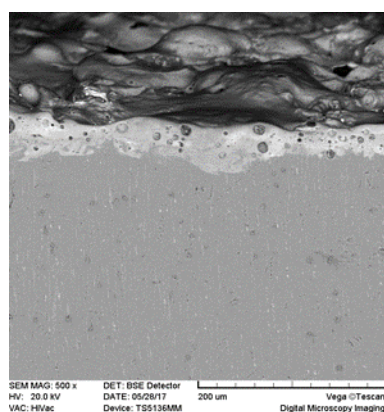
شکل 1 نحوه بستن الکترود و قطعه‌کار جهت آلیاژسازی سطحی

در این آزمایش‌ها، زمان روشنی پالس و شدت جریان الکتریکی هر یک در چهار سطح بعنوان متغیرهای ورودی مستقل در نظر گرفته شدند. جهت کاهش فرسایش قطعه‌کار آلومینیومی و افزایش فرسایش الکترود آلیاژساز، قطب منفی به مونل 400 و قطب مثبت به آلومینیوم (قطعه کار) اختصاص داده

¹ COMSOL 5.3



(الف)



(ب)

Fig. 4 SEM micrograph showing cross-section of EDA surface
 شکل 4 تصویر میکروسکپ الکترونی از لایه‌ی سطحی ایجاد شده، (الف) I=24A T_{on}=100μs و (ب) I=32A T_{on}=400μs

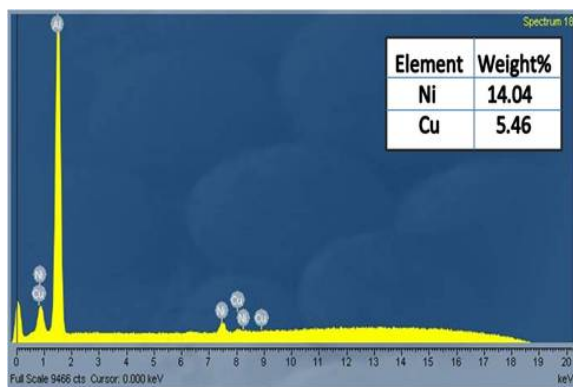


Fig. 5 EDX analysis of surface layer after EDA process
 شکل 5 آنالیز EDX از لایه‌ی سطحی آلومینیوم بعد از عملیات تخلیه الکتریکی (T_{on}=100s, I=16A)

عناصر موجود در ترکیب شیمیایی الکتروود ابتدا وارد چاله‌های مذاب سطحی شده و سپس به لایه‌های سطحی قطعه‌کار انتقال می‌یابند و با تشکیل محلول جامد و تشکیل ترکیبات بین فلزی با فاز زمینه، موجب افزایش خواص مکانیکی در سطح نمونه‌ها می‌گردند [15-17]. لذا با توجه به نفوذ بیشتر عناصر آلیاژی در

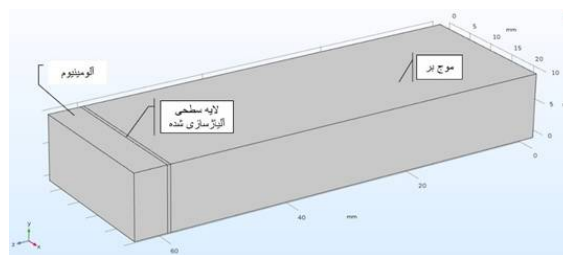


Fig. 2 Wave-based and surface layer design in Comsol software

شکل 2 نحوه طراحی موج بر و لایه سطحی در نرم‌افزار کامسول

3- نتایج و بحث

3-1- عمق فرورونده ویکرز

شکل 3 عمق فرورونده ویکرز را بر حسب پارامترهای ورودی که با استفاده رابطه (2) بصورت تجربی محاسبه شده است، نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود کمترین عمق فرورونده در لایه‌های نزدیک به سطح بوده و با افزایش فاصله از لبه‌ی قطعه‌کار عمق فرورونده ویکرز بیشتر می‌گردد. دلیل این مسئله را می‌توان با توجه به شکل 4 و آنالیز EDX (شکل 5) از لایه سطحی تشریح نمود. با توجه به آنالیز قطعه‌کار قبل از عملیات تخلیه الکتریکی (جدول 1)، درصد خلوص قطعه‌کار مورد استفاده (99/8%) و مقدار عناصر مس و نیکل به ترتیب 0/001% و 0/006% می‌باشند. مطابق شکل 5 عناصر مس و نیکل در اثر مکانیزم فرآیند تخلیه الکتریکی به سطح قطعه‌کار نفوذ نموده‌اند و فرآیند آلیاژسازی سطحی انجام گرفته است. مکانیزم فرآیند بهبود خواص سطحی یا آلیاژسازی سطح به روش تخلیه الکتریکی را بدین صورت می‌توان بیان نمود که بعد از تشکیل کانال پلاسما و انجام تخلیه الکتریکی در اثر انرژی حرارتی ایجاد شده که تا 10^{17} (wm⁻²) تخمین زده شده است، ذوب و تبخیر و همچنین پدیده جوشش حجمی در محل اتصال کانال پلاسما به الکتروود حادث شده و موجب ذوب و تبخیر الکتروود موند می‌شود.

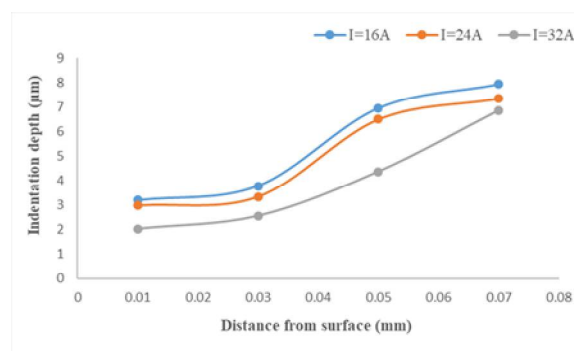


Fig. 3 Vickers indentation profile in surface depth

شکل 3 تغییرات عمق نفوذگر ویکرز محاسبه شده بر حسب پارامترهای ورودی (T_{on}=100μs)

الکتروود مونل 400 در شکل‌های 11 و 12 آورده شده است.

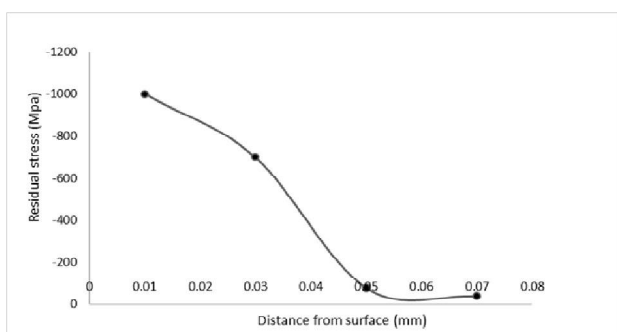


Fig.6 Residual stress profiles in surface depth

شکل 6 تنش پسماند سطحی پس از فرآیند آلیاژسازی سطحی ($T_{on}=100\mu s$, $I=24A$)

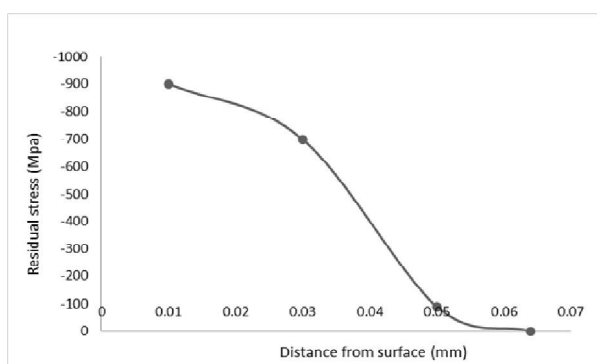


Fig.7 Residual stress profiles in surface depth

شکل 7 تغییرات تنش پسماند سطحی پس از فرآیند آلیاژسازی سطحی ($T_{on}=100\mu s$, $I=16A$)

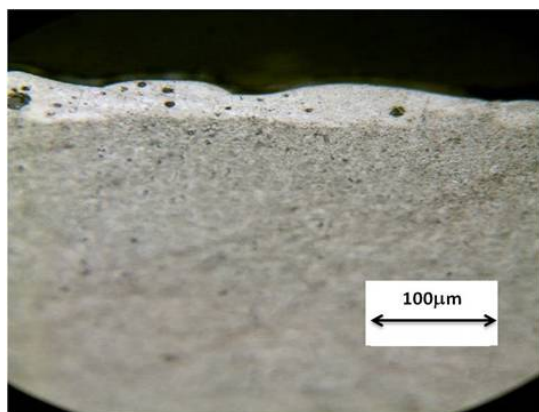


Fig. 8. Optical microscope image of the surface alloyed layer

شکل 8 تصویر میکروسکوپ نوری از لایه‌ی سطحی آلیاژسازی شده ($I=32A$, $T_{on}=100\mu s$)

مطابق شکل 10 آلومینیوم خالص تقریباً هیچ جذبی نداشته و نمودار جذب آن به صورت نوسانی می‌باشد، این درحالیست که لایه سطحی آلیاژسازی شده در محدوده باند X از الگوی یکنواخت جذب پیروی نموده که محدوده آن بین 10/5 - 11 گیگاهرتز می‌باشد. همچنین همان‌طور که ملاحظه می‌شود وجود لایه آلیاژی مونل 400 در سطح باعث افزایش

سطح، عمق فرورونده ویکرز در لبه‌ی قطعه‌کار کمتر بوده و در جهت عمق قطعه‌کار افزایش می‌یابد.

3-2- تنش پسماند سطحی

شکل‌های 6 و 7 مقادیر تنش‌های پسماند سطحی را در سطح قطعه‌کار آلومینیومی پس از فرآیند آلیاژسازی سطحی را نشان می‌دهند که بر مبنای رابطه‌ی (1) محاسبه شده اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تنش‌های پسماند سطحی بعد از فرآیند آلیاژسازی از نوع فشاری بوده و مقدار آن در جهت عمق قطعه‌کار کاهش می‌یابد. دلیل ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه سطحی را می‌توان با توجه به تغییر الگوی سرد شدن سطح قطعه‌کار که کاملاً با حالت ماشین‌کاری متفاوت است توجیه نمود. با توجه به اینکه در حالت آلیاژسازی سطحی از قطبیت منفی استفاده شده است، همواره دمای سطح قطعه‌کار (اند) حدود $1000^{\circ}K$ کمتر از دمای سطح کاتد می‌باشد [15] که این مسئله می‌تواند وضعیت تنش‌های پسماند سطح قطعه‌کار را دچار تغییر نماید. از طرفی یکی از دلایل اصلی ایجاد تنش‌های پسماند در سطح قطعاتی که به روش تخلیه الکتریکی ماشین‌کاری می‌شوند سرد شدن غیرتعدالی لایه سطحی و عدم فرصت کافی برای انجماد لایه دوباره منجمد شده می‌باشد. این در حالیست که در حالت آلیاژسازی سطحی پارامتر زمان خاموشی پالس بسیار بالاتر نسبت به حالت ماشین‌کاری انتخاب می‌شود که در این پژوهش مقدار آن $800\mu s$ در نظر گرفته شده است، لذا فرصت کافی جهت انجماد تعادلی چاله‌های مذاب فراهم می‌شود. علاوه بر این، مرور پژوهش‌های مرتبط با فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نشان می‌دهند همواره سطح پایانی قطعات دارای میکروتورک‌های سطحی است که معمولاً دلیل آن، به وجود تنش‌های پسماند کششی در سطح نسبت داده می‌شود، اما مطابق شکل 8 (و شکل 4) پس از فرآیند آلیاژسازی سطحی آلومینیوم هیچ نوع میکروتورک در سطح قطعات آلومینیومی مشاهده نشده است. لذا یکی دیگر از شواهد حذف تنش‌های پسماند کششی از لایه‌های نزدیک به سطح آلومینیوم، عدم ایجاد میکروتورک‌ها می‌باشد.

3-3- وضعیت جذب امواج الکترومغناطیس باند X

شکل 9 شبیه‌سازی رفتار امواج الکترومغناطیس در داخل موجبر را نشان می‌دهد که نتایج حاصل از آن بصورت دو بعدی به ترتیب نمودار وضعیت جذب امواج باند ایکس سطح آلومینیوم خالص در شکل 10 و آلومینیوم با لایه سطحی آلیاژسازی شده با استفاده از

میزان جذب در محدوده فرکانس 10/5-11 گیگاهرتز نسبت به آلومینیوم شده است.

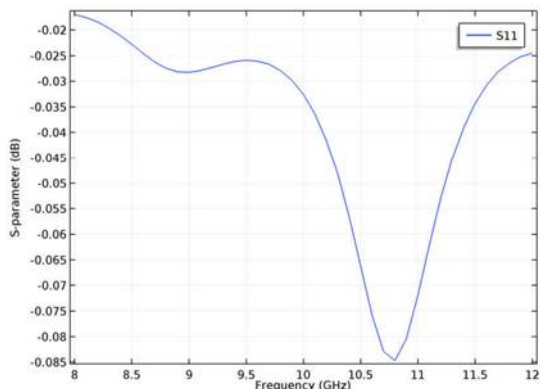


Fig. 12 Absorption of X-band electromagnetic waves after surface alloyed

شکل 12 نمودار جذب امواج میکروویو باند ایکس آلومینیوم با لایه آلیاژی سطحی ($T_{on}=400\mu s, I=24A$)

4- نتیجه گیری

در این مقاله پارامترهای وضعیت تنش‌های پسماند، تغییرات عمق نفوذگر ویکرز و وضعیت جذب امواج الکترومغناطیس لایه‌ی سطحی آلیاژی‌سازی شده به روش تخلیه الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت، خلاصه‌ی نتایج بدست آمده بصورت زیر می‌باشند:

- میزان تنش‌های پسماند فشاری در لبه‌ی قطعه‌کار بیشترین مقدار را داشته و در جهت عمق میزان آن کاهش می‌یابد.

- آلیاژی‌سازی سطحی آلومینیوم به روش تخلیه الکتریکی با حذف تنش‌های کششی در لبه‌ی قطعه کار، باعث حذف میکروتکرک‌های سطحی ناشی از فرآیند تخلیه الکتریکی شده است.

- میزان عمق نفوذگر ویکرز در لبه‌ی قطعه‌کار کمترین مقدار را داشته و با افزایش فاصله از سطح آلیاژی‌سازی شده، عمق نفوذگر ویکرز افزایش می‌یابد.

- بررسی وضعیت جذب امواج الکترومغناطیس باند X لایه سطحی ایجاد شده نشان می‌دهد این لایه از یک الگوی مشخص در برابر امواج تبعیت می‌کند که بیشترین جذب آن در محدوده 10/5-11 گیگاهرتز می‌باشد.

5- تقدیر و تشکر

با توجه به اینکه این پژوهش با حمایت مالی سازمان صنایع کوچک و شهرک‌های صنعتی ایران انجام شده است، لذا نویسندگان مقاله از آن سازمان به جهت حمایت انجام شده تقدیر و تشکر می‌نمایند.

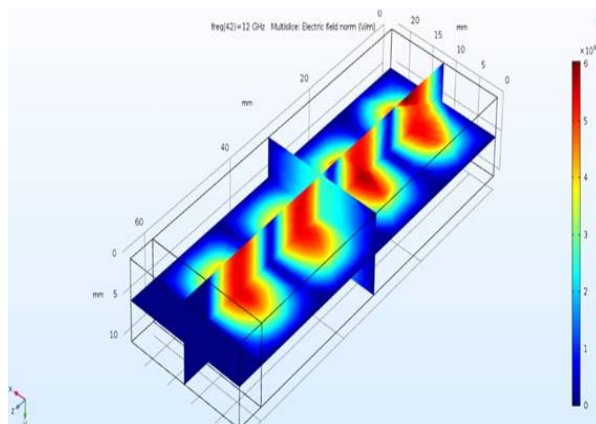


Fig. 9 Three dimensional image of electromagnetic waves inside a waveguide simulated in Comsol software

شکل 9 تصویر سه بعدی امواج الکترومغناطیس داخل موج بر شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول

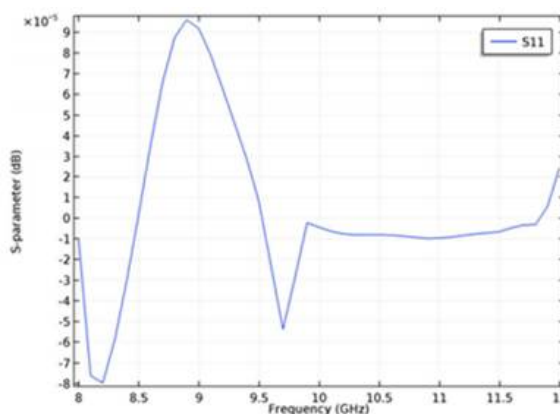


Fig. 10 Absorption of X-band electromagnetic waves without surface layer

شکل 10 نمودار جذب امواج میکروویو باند ایکس آلومینیوم بدون لایه سطحی

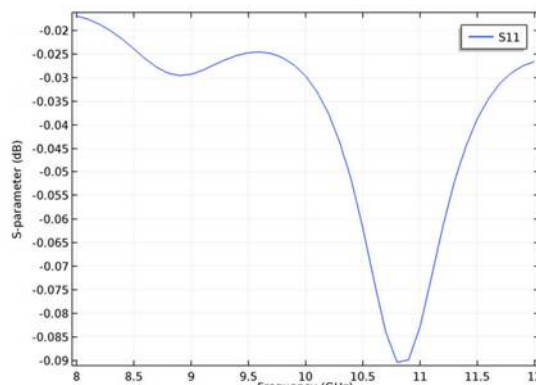


Fig. 11 Absorption of X-band electromagnetic waves after surface alloyed

شکل 11 نمودار جذب امواج میکروویو باند ایکس آلومینیوم با لایه آلیاژی سطحی ($T_{on}=50\mu s, I=32A$)

6- مراجع

- Absorption, *Iranian Journal of Ceramic Science & Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 15-22, 2016.
- [10] M. J. Mir, Kh. Sh., 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.
- [11] B. Jabbaripour, M. Motallebpouralishahi, the comparison of output characteristics in electrical discharge machining and aluminum powder mixed EDM processes on titanium aluminide intermetallic compound, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 25-37, 2017. (in Persian)
- [12] H. Eivazi Bagheri, H. Gorji, M.R. shabgard, S. Nourouzi, Improving the surface wear resistance of aluminum by electrical discharge process, *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 6, No. 24, pp. 24-33, 2018. (in Persian)
- [13] Sha., Mohanty, A., Kumar Das, A., Dixit, Surface integrity and residual stress analysis of μ EDM coated Ti-alloy miniature components, *Materials and Manufacturing Process*, pp.1-10,2020
- [14] M.R. shabgard, B. Khosrozadeh, Study on the effect of ultrasonic assisted electrical discharge machining process on residual stress and hardness of Ti-6Al-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No.8, pp. 169-176, 2016. (in Persian)
- [15] Eubank, Ph. T, Patel, M. R.; Barrufet, M. A.; 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.
- [16] Shabgard, M. R.; Eivazi Bagheri, H.; Afsari, A.; Rhamani, R.; 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)
- [17] Ekmekci, B.; White layer composition, heat Treatment, and crack formation in electric discharge machining Process, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 40, No. B, pp. 70-81, 2009
- [1] Y. Ab. Alwafi, N. Bidin, R. Hussin, M. Shkhawat, D. Gustiono, Michrohardness Evaluation of Pure Aluminum Substrate after Laser Surface Alloying with Iron and Copper, *Journal of Materials Science Engineering*, Vol. B, 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, 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, pp. 5515-552, 2013.
- [4] 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, pp. 121-128. 2003.
- [5] S. Kumar, R. Singh, T.P. Singh, B.L. Sethi, Surface modification by electrical discharge machining: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 3675-3687, 2009.
- [6] Ph. Bleys, J.P. Kruth, B. Lauwers, B. Schacht, , Surface and Sub-surface quality of steel after EDM, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8, pp.15-25, 2006.
- [7] M. R. Shabgard, H. Tavanaei, B. Khosrozadeh, Study the effect of electrical discharge machining (EDM) on residual stress and corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 171-178, 2018. (in Persian)
- [8] C.E. Mady, S. Rodriguez, A. Gómez, R. Souza, Numerical analysis of different methods to calculate residual stresses, in thin films based on instrumented indentation data, *Journal of Materials Research*, Vol. 27, No. 13, 2012.
- [9] A. Kianvash, D. Motmaen, Optimization of Electromagnetic Matching of Carbonyl iron / La_{0.8}Sr_{0.2}MnO₃ Composites for Microwave