

بهبود خواص سطحی فولاد ابزار AISI H13 با لایه‌نشانی تخلیه الکتریکی

آلیاژهای Cu-Cr-Ti

محمد رضا شهبگرد، جواد آسیابی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

هادی عیوضی باقری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۰۵ - پذیرش مقاله: ۹۹/۰۲/۱۵)

چکیده

در این مقاله تأثیر پارامترهای ورودی (زمان روشنی پالس، شدت جریان ورودی، ولتاژ و سیکل وظیفه) فرآیند لایه‌نشانی به روش تخلیه الکتریکی روی خواص سطحی فولاد ابزار AISI H13 شامل تغییرات سختی سطح، عمق لایه‌نشانی سطح و زبری سطح مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور از الکترودهای Ti-Cr-Cu فرآوری شده با متالورژی پودر استفاده شد. به منظور بررسی ضخامت لایه سطحی با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه‌ها تصویر برداری صورت گرفت و تغییرات سختی سطح به روش میکروسختی سنجی اندازه‌گیری شد. همچنین جهت شناسایی ترکیبات تشکیل شده در سطح، از روش پراش سنجی اشعه ایکس استفاده شده و زبری سطح نمونه‌ها، با استفاده از پارامتر زبری میانگین سطح (R_a) کنترل گردید. نتایج نشان می‌دهند در اثر انجام این فرآیند، کاربیدهایی مثل TiC ، Cr_7C_3 و Fe_2C در سطح قطعه کار تشکیل شده و باعث افزایش سختی سطح آن می‌شوند. همچنین با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس مقدار سختی سطح بیشتر شده و عمق لایه سطحی نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، با افزایش ولتاژ ورودی، ضخامت لایه سطحی بیشتر شده و زبری سطح قطعه کار کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش پارامتر سیکل وظیفه به دلیل افزایش تعداد جرقه‌ها در واحد زمان، عمق لایه سطحی نیز بیشتر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: لایه‌نشانی تخلیه الکتریکی، سختی، زمان روشنی پالس، شدت جریان، فولاد AISI H13.

Improvement of Surface Properties of AISI H13 Tool Steel by Electrical Discharge Deposition Using (Ti - Cr - Cu) Alloys

Mohammad Reza Shabgard, Javad Asiabi

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

Hadi Eivazi bagheri

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

(Received 26 December 2018, accepted 4 May 2020)

Abstract

In this paper, effect of input parameters (pulse on time, pulse current, voltage and duty cycle) of electric discharge deposition process on surface quality parameters including surface hardness, surface deposited layer thickness and roughness of AISI H13 tool steel using Ti-Cr-Cu alloys as electrode was studied. SEM was used to investigate the thickness of the surface layer, and the hardness of surface deposited layer was measured by microhardness test. Also, XRD method was used to identify the compounds on the surface and deposited surface roughness was controlled using R_a parameter. Based on the obtained results, TiC , Cr_7C_3 and Fe_2C are formed at the deposited layer due to surface alloying and increasing surface hardness. Also, by increasing the pulse current and the pulse on time, the surface hardness and depth of the deposited layer were increased. Furthermore, with increase in input voltage, the thickness of the surface layer is increased and the workpiece surface roughness is reduced. Also, by increasing the duty cycle due to the increase in the number of sparks in time, the depth of the surface deposited layer is increased.

Keywords: Electrical discharge deposition, hardness, pulse on time, pulse current, AISI H13.

E-mail of Corresponding author: mrshabgard@tabrizu.ac.ir.

مقدمه

یکی از مسائل مهم در فرآیند ساخت قطعات صنعتی، بهبود خواص سطحی آنها می‌باشد. مهندسی سطح روشی است که با ایجاد تغییر در خواص سطحی قطعات، ضمن افزایش دامنه کاربرد، زمان تخریب آنها را نیز به تأخیر می‌اندازد. یکی از راه حل‌های مهم در این خصوص، رسوب دهی، آلیاژسازی و نفوذ دادن عناصر مطلوب به سطح مورد نظر (قطعه کار) می‌باشد.

ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM)^۱ فرآیندی است که در آن با اعمال ولتاژ پالسی و متقطع بین ابزار و قطعه کار که غوطه‌ور در سیال دی الکتریک است و جرقه زنی بین آنها در هر پالس، عمل براده برداری و ماشینکاری قطعه کار انجام می‌شود. ماهیت و ساختار سطح ماشین کاری شده توسط پدیده تخلیه الکتریکی جزو ویژگی‌های مهم خروجی این فرآیند بوده و کیفیت آن بسیار حائز اهمیت است. لذا با اینکه ماشینکاری تخلیه الکتریکی یک فرآیند برداشت ماده از سطح قطعه کار محسوب می‌شود اما طی سالهای اخیر از این روش برای بهبود خواص سطحی قطعات، آلیاژسازی و لایه‌نشانی سطحی آنها نیز استفاده شده است. از این حالت که با بهبود کیفیت سطح قطعات همراه است به آلیاژسازی با روش تخلیه الکتریکی^۲ (EDA) یاد می‌شود.

نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که خارجی‌ترین لایه‌ی سطحی بعد از عملیات ماشینکاری یک لایه‌ی خنک شده با سرعت بالا است که ضخامت این لایه به انرژی و مدت زمان پالس‌های اعمال شده تخلیه الکتریکی بستگی دارد. در زیر این لایه، یک لایه‌ی متأثر از ماشینکاری وجود دارد که ترکیب شیمیایی آن تغییر یافته و تغییرات فازی در آن ایجاد می‌شود. لذا اصلاح ترکیب شیمیایی لایه‌ی دوباره منجمد شده به وسیله مواد موجود در الکتروود یا مایع دی الکتریک یک روش موثر برای بهبود کیفیت سطح

قطعات می‌باشد. این نوع بهبود خواص سطحی از طریق آلیاژسازی سطحی لایه دوباره منجمد شده با انتخاب مواد مناسب و با هدف افزایش سختی سطح، افزایش مقاومت به سایش، افزایش مقاومت به خوردگی و... قابل انجام است [۱ و ۲].

باتوجه به اینکه در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی قطعات، یک لایه دوباره منجمد شده^۳ سطحی ایجاد می‌شود که غالباً از نظر خواص مکانیکی مطلوب نیست، برای انجام عملیات سختکاری و پوشش دهی بعدی، این لایه ابتدا برداشته شده و سپس عملیات پوشش دهی بر روی سطح انجام شود. اما راه حل جایگزین برای مشکل مورد اشاره بهینه سازی یا آلیاژسازی سطحی همزمان با عملیات ماشینکاری تخلیه الکتریکی است که نیاز به عملیات ثانویه سطحی را برطرف می‌کند. این روش دارای انعطاف پذیری زیاد و هزینه پایین است [۱ و ۳]. از جمله قابلیت‌ها و مزایای آلیاژسازی سطحی به روش تخلیه الکتریکی می‌توان به عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و گران قیمت (مانند تجهیزات ایجاد خلأ) برای لایه‌نشانی، توانایی ایجاد لایه سطحی با دستگاه اسپارک معمولی و قابلیت ایجاد لایه سطحی با طیف وسیعی از مواد بدون محدودیت برای دمای ذوب آنها را نام برد [۳-۱ و ۲].

براساس نتایج تحقیقات انجام شده سه مدل برای مکانیزم این روش بیان شده است. براساس اولین مکانیزم پیشنهاد شده، با ایجاد جرقه اولیه، ذرات حاصل از الکتروود و قطعه کار به داخل مایع دی الکتریک پرتاب شده و به دلیل افزایش رسانایی مایع دی الکتریک در آن نقطه جرقه بعدی نیز در همان محل تشکیل می‌گردد و باعث انتقال این ذرات به داخل چاله‌های مذاب سطحی می‌شود، با تکرار جرقه‌های پی در پی لایه‌ی مورد نظر در سطح تشکیل می‌گردد [۴].

^۱ . Electrical Discharge Machining

^۲ .Electrical Discharge Alloying or surface modification

تنگستن به مایع دی‌الکتريک را مورد ارزیابی قرار داده و تأثیر پارامترهای زمان روشنی و خاموشی پالس و شدت جریان را به‌عنوان پارامترهای ورودی بر میکروسختی سطح قطعات به‌عنوان تنها پارامتر خروجی مطالعه نمودند. نتایج پراش سنجی اشعه ایکس^۴ نشان داده است نفوذ اتم های تنگستن به همراه اتم های کربن به سطح قطعات باعث افزایش ۱۰۰ درصدی سختی سطح هر سه نوع فولاد مورد بررسی شده است.

رودریگوئز و همکارانش [۸] آلیاژ سازی سطحی فولاد ابزار AISI H13 را با استفاده از الکتروود فرآوری شده متالورژی پودر WC-Co و الکتروود های مسی و گرافیتی جهت مقایسه نتایج، مورد بررسی قرار داده اند. براساس نتایج تحقیق آنها، لایه سطحی آلیاژسازی شده با الکتروود WC-Co دارای ترکهای سطحی کمتری نسبت به حالت ماشینکاری با ابزارهای سنتی (مسی و گرافیتی) است. با توجه به اینکه عنصر Co انقباض حین انجماد را کاهش می دهد، لذا باعث کاهش ترکهای سطحی و در نتیجه افزایش مقاومت به خستگی می شود. همچنین ضخامت لایه دوباره منجمد شده در هنگام استفاده از الکتروود متالورژی پودر به دلیل جذب مواد الکتروود بیشتر از حالت معمولی است.

در تحقیق جنیدمیر [۹] همکارانش مدل سازی زبری سطح در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار AISI H11 با روش افزودن پودر (آلومینیوم) به مایع دی الکتريک مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق آنها پارامترهای زمان روشنی پالس، شدت جریان و غلظت پودر آلومینیوم افزوده شده به مایع دی الکتريک به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده و از روش رویه پاسخ جهت بهینه سازی پارامترها استفاده شده است. بر اساس نتایج تحقیق آنها، پارامترهای شدت جریان و غلظت پودر مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر روی زبری سطح قطعه کار می باشند.

براساس مدل دوم، با ایجاد هر جرقه، در نقطه برخورد جرقه، مواد الکتروود به چاله مذاب منتقل می گردد و با تکرار جرقه ها عمل تشکیل لایه سطحی انجام می گیرد [۴]. در واقع در این روش مواد الکتروود ابزار بطور مستقیم وارد چاله مذاب سطحی می گردد. مکانیزم سوم براساس وجود ذرات اولیه در سطح قطعه کار ارائه شده است. براساس این مکانیزم، جرقه در اطراف ذرات موجود تشکیل شده و باعث ذوب و انتقال آنها به چاله مذاب می گردد. به عبارت دیگر ذرات روی سطح قطعه کار باعث ایجاد یک مسیر مطلوب برای جرقه می شوند که منجر به ذوب شدن ذرات و نفوذ آنها می شوند [۴].

فولاد های ابزار گرمکار به سه دسته تنگستنی، مولیبدنی و کرومی تقسیم می شوند، از میان این فولادها، فولادهای گرمکار بر پایه کروم (H11-H19) بیشترین کاربرد را در ساخت قالبهای آهنگری و همچنین قالبهای ریخته گری تحت فشار دارند. فولاد ابزار H13 به علت داشتن استحکام و سختی بالا یکی از مواد پرکاربرد در ساخت انواع قالبها و ابزارهای مهندسی به شمار می رود، که روز به روز کاربرد این فولاد به علت خواص منحصر به فرد آن، گسترش می یابد [۵].

با در نظر گرفتن کاربرد گسترده فولادهای ابزار در صنایع قالب سازی، بیشتر تحقیقات در این زمینه به بهبود خواص سطحی انواع فولادهای ابزار معطوف شده است. سیمائو و همکارانش [۳] با انجام فرآیند EDA آلیاژسازی سطحی فولاد ابزار H13 را با استفاده از الکتروود کامپوزیتی تنگستن کارباید-کبالت در داخل سیال هیدروکربنی مورد آزمایش قرار داده و نشان دادند که نه تنها سختی سطح پس از انجام فرآیند آلیاژسازی بیش از دو برابر افزایش یافته و به مقدار حدود 1319HV می رسد، بلکه میزان ترکهای سطحی فولاد نیز کاهش می یابد. کومار و همکارانش [۶] و نیز خدکار و همکارانش [۷] آلیاژسازی سطحی قطعات فولادهای ابزار گرم کار و سردکار (AISI D2, AISI H13, OHNS) را از طریق افزودن پودر

^۴ XRD

جدول ۱. پارامترهای ورودی فرآیند

پارامترها	مقادیر
ولتاژ	۱۲۰ و ۲۰۰ ولت
شدت جریان	۸-۱۲-۱۶ آمپر
زمان روشنی	۱/۶-۳/۲-۱۲/۸
سیکل وظیفه	۲۰-۱۱-۶ درصد
مایع دی الکتریک	نفت سفید
ترکیب الکتروود	ارائه شده در جدول ۲

جهت ساخت الکتروودهای آلیاژی مورد نیاز با ترکیب تیتانیوم، کروم و مس، درصد وزنی هریک از آنها توسط ترازوی دقیق (با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم) توزین شده و در ۳ مقدار متفاوت فشار پرس سرد (۱۵۰-۲۵۰-۳۰۰ مگاپاسکال) آماده شدند. تیتانیوم و کروم به‌عنوان عناصر آلیاژی جهت افزایش سختی لایه سطحی و مس نیز به‌عنوان بالابرنده مقدار رسانایی الکتریکی به ترکیب الکتروود اضافه شد. هر سه نوع پودر با اندازه مش^۱ ۳۲۵ (دانه بندی کوچکتر از ۴۵ میکرون) در ۳ مقدار ترکیبی مختلف درون آسیاب گلوله ای^۲ به مدت ۲ ساعت در هر دو جهت ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد مخلوط گردیده و بلافاصله درون قالب ساخته شده از فولاد SPK با اندازه قطر داخلی ۱۶ میلی مترتراکم شده (با ابعاد نهایی: قطر ۱۶ میلی متر و ارتفاع ۷ میلی متر) و درون کوره تحت اتمسفر محافظ (گاز آرگون) به مدت ۲ ساعت با حرارت ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد تفت جوشی شدند، در جدول ۲ ترکیب شیمیایی الکتروودهای فرآوری شده ارائه شده است. قطعه کارهای مورد بررسی نیز از جنس فولاد گرمکار AISI H13 به قطر ۱۹ میلی متر و ضخامت ۴ میلی متر برای لایه نشانی سطحی با روش تخلیه الکتریکی آماده شدند. شکل ۱ تصویر قطعه کارهای فولادی و

عیوضی و همکارانش [۱۰] بهبود خواص سطحی آلومینیوم خالص را با استفاده از الکتروود آلیاژ مونل ۴۰۰ به روش تخلیه الکتریکی مورد مطالعه قرار داده اند. بر اساس نتایج تحقیق آنها با نفوذ عناصر مس و نیکل به سطح آلومینیوم براساس مکانیزم فرآیند و ایجاد ترکیبات بین فلزی و کاربیدی در سطح، عملیات آلیاژسازی سطحی به روش تخلیه الکتریکی بطور موفقیت آمیزی با الکتروود آلیاژی انجام شده و لایه ی سطحی با ضخامت بیش از ۸۰ میکرون در سطح ایجاد شده است.

با توجه به این که بهبود کیفیت سطح با استفاده فرآیند تخلیه الکتریکی از یکی از زمینه‌های پژوهشی نسبتاً جدید در حوزه ی روشهای تولید مخصوص می‌باشد، بیشتر تحقیقات گزارش شده در خصوص فولاد H13 نیز پارامترهای ورودی و خروجی معدودی را مورد مطالعه قرار داده اند. لذا هدف این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر روی متغیرهای خروجی در بهبود خواص سطحی فولاد ابزار H13 به روش تخلیه الکتریکی با استفاده از الکتروودهای پودری (Cu-Cr-Ti) می‌باشد.

مواد و روش ها

برای طراحی آزمایشات، از آرایه L18 روش تاگوچی استفاده شده است؛ بدین صورت که ولتاژ ورودی در دو سطح، شدت جریان، زمان روشنی پالس و سیکل وظیفه^۵ در سه سطح به عنوان پارامترهای ورودی فرآیند بهبود خواص سطحی به روش تخلیه الکتریکی و پارامترهای درصد ترکیبات پودر الکتروود (Ti-Cr-Cu) و فشار پرس در سه سطح به عنوان متغیرهای ساخت الکتروود انتخاب شدند. در جدول ۱ پارامترها و مقادیر مورد استفاده در تهیه الکتروود ارائه شده است.

¹ Mesh size

² Ball mill

^۵ سیکل وظیفه: نسبت زمان روشنی پالس به مجموع زمان های روشنی و خاموشی پالس (درصد)

الکترودهای آلیاژی (Ti-Cr-Cu) آماده شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی (بر حسب درصد وزنی) الکترودهای

مختلف مورد استفاده در تحقیق

ردیف	مس (درصد)	کروم (درصد)	تیتانیوم (درصد)
۱	۳۰	۲۰	۵۰
۲	۴۰	۱۰	۵۰
۳	۴۰	۲۰	۴۰



شکل ۱. تصویر الکترودها و زیرلایه‌های مورد استفاده برای لایه‌نشانی. برای انجام فرآیند لایه‌نشانی سطحی، از دستگاه اسپارک مدل (Charmilles Roboform 200-CNC-EDM) در حالت آیروپالس^۶ استفاده شد. شکل ۲ نحوه بستن ابزار و قطعه کار را قبل از شروع عملیات نشان می‌دهد.



شکل ۲. نحوه بستن الکتروود و قطعه کار.

پس از انجام فرآیند EDA، سه پارامتر میکرو سختی سطح، ضخامت لایه پوششی و زبری سطح برای ارزیابی کیفیت سطح مورد سنجش قرار گرفتند. از روش میکرو

سختی سنجی جهت اندازه‌گیری سختی سطح نمونه‌های لایه‌نشانی شده، از هر نمونه سه بار سختی سنجی توسط دستگاه میکروسختی سنج مدل (PACE Technologies HV-1000Z) با نیروی ۰/۴۹ نیوتن انجام شد. برای تصویر برداری و اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ی سطحی ایجاد شده، کلیه نمونه‌ها توسط دستگاه وایرکات مقطع‌زنی شده و با کاغذهای سنباده با درجات زبری مختلف، سنباده زنی و در نهایت پولیش شدند. سپس از هر نمونه در حالت پولیش شده در سه منطقه مرکز و گوشه‌ها، تصاویر SEM توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (Leo-440I) تهیه شد و با اندازه‌گیری ضخامت لایه سطحی گزارش شد. برای اندازه‌گیری زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری سنج مدل (Maher-perthometer M2)، پارامتر زبری میانگین سطح (R_a) تعیین شد. همچنین پراش سنجی اشعه X (XRD) توسط دستگاه مدل (SIMENS_E500) برای شناسایی فازهای تشکیل شده در لایه سطحی انجام گرفت.

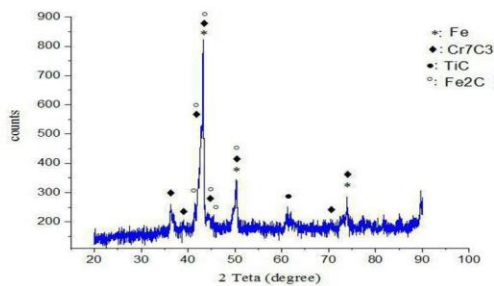
نتایج و بحث

بررسی تاثیر زمان روشنی پالس و شدت جریان

ورودی بر سختی لایه‌ی سطحی

شکل ۳ تاثیر زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی را بر روی سختی لایه‌ی ایجاد شده سطحی نشان می‌دهند. همانطور که ملاحظه می‌شود پس از لایه‌نشانی به روش تخلیه الکتریکی، سختی سطح بیشتر شده و مقدار آن با افزایش مقادیر زمان روشنی پالس و شدت جریان افزایش یافته است. با توجه به نتایج طیف XRD بدست آمده از سطح لایه‌نشانی شده در شکل ۴، دلیل افزایش سختی سطح را می‌توان به نفوذ عناصر کروم و تیتانیوم به سطح از طریق الکتروود و تشکیل ترکیبات TiC و Cr_7C_3 در سطح مرتبط دانست. براساس این شکل، علاوه بر ایجاد کاربید TiC و Cr_7C_3 در سطح، کربن حاصل از

⁶ Iso Pulse



شکل ۴. طیف XRD از سطح قطعه کار بعد از فرآیند تخلیه الکتریکی (الکتروود با ترکیب ۲، $P=150\text{Mpa}$ ، $V=200\text{v}$.)

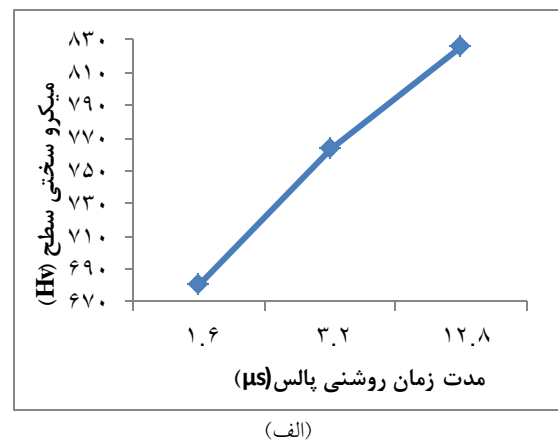
تأثیر زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی بر روی ضخامت لایه ی سطحی

شکل ۵ تأثیر پارامترهای ورودی بر روی ضخامت لایه سطحی و شکل ۶ ریز ساختار SEM از لایه سطحی ایجاد شده برای یک نمونه را نشان می‌دهند. از این تصاویر میکروسکوپی جهت اندازه‌گیری ضخامت لایه سطحی استفاده شده است. همانطوری که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی، ضخامت لایه ی سطحی افزایش یافته است. با توجه به اینکه مطابق رابطه ۱ پارامترهای اصلی تأثیر گذار بر روی انرژی جرقه ها (W) در فرآیند تخلیه الکتریکی زمان روشنی پالس (T)، شدت جریان ورودی (I) و ولتاژ ورودی می‌باشند، لذا با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی تا یک حد بهینه، بدلیل افزایش انرژی جرقه ها، نرخ ذوب و تبخیر افزایش یافته و میزان ذوب الکتروود بیشتر می‌شود. از طرف دیگر افزایش زمان روشنی پالس باعث افزایش طول زمان فرآیند تخلیه الکتریکی شده و در نتیجه باعث افزایش عمق متأثر از فرآیند می‌گردد [۱۰ و ۱۱].

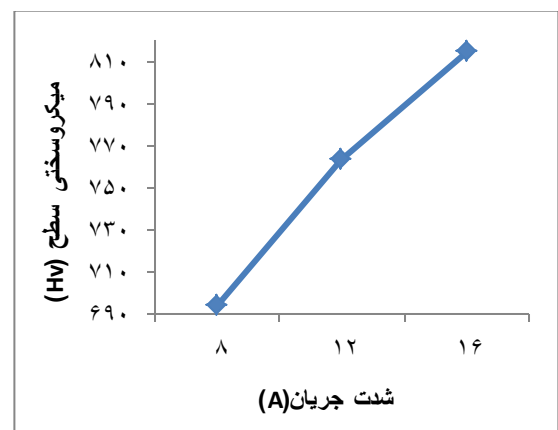
$$W = \int_0^{ton} U(Ii)I(Ti).dT \quad (1)$$

به عبارت دیگر با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان اعمال شده، به دلیل افزایش اندازه چاله های مذاب سطحی (از نظر قطر و عمق) متوسط ضخامت لایه تشکیل شده در سطح قطعه کار افزایش می‌یابد [۱۰ و ۱۱].

تجزیه دی الکتریک با ورود به سطح لایه نشانی شده باعث تشکیل Fe_2C نیز شده است. علاوه بر این با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی به دلیل اینکه انرژی جرقه زنی و چگالی جریان عبوری افزایش می‌یابد، دمای سطح قطعه کار و ابزار نیز افزایش می‌یابد [۵]. لذا مقدار فرسایش ابزار افزایش یافته و ذرات بیشتری از ترکیب الکتروود وارد فضای پلاسما بین ابزار و قطعه کار شده و به تبع آن وارد سطح قطعه کار می‌شوند و در نتیجه با تشکیل محلول جامد یا ترکیبات کاربیدی در سطح باعث افزایش سختی سطح می‌گردند.



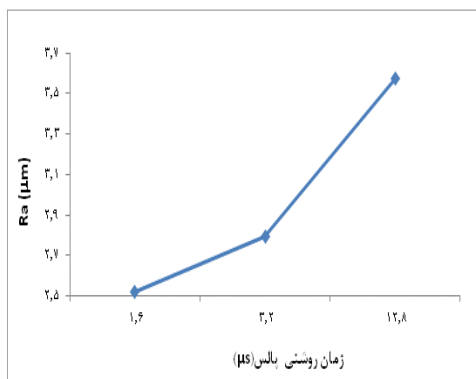
(الف)



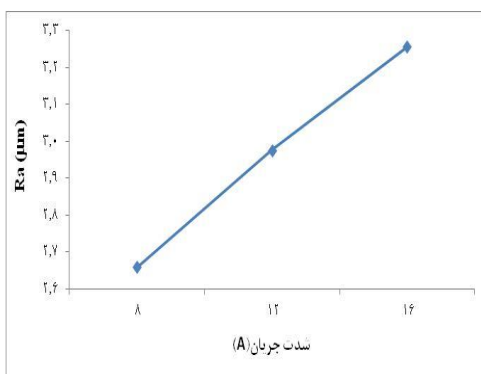
(ب)

شکل ۳. تأثیر پارامترهای ورودی بر روی سختی سطح قطعه کار (الف) تأثیر زمان روشنی پالس، (ب) تأثیر شدت جریان ورودی.

شکل ۷ تأثیر زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی را بر روی زبری سطح قطعه کار پس از فرآیند لایه نشانی با تخلیه الکتریکی نشان می‌دهد. همانطوریکه ملاحظه می‌شود مقدار زبری سطح با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی افزایش می‌یابد. علت این امر را این‌گونه می‌توان بیان نمود که مطابق رابطه (۱) با افزایش مقدار زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی، مقدار انرژی جرقه نیز افزایش یافته و سبب ایجاد چاله مذاب بزرگ‌تری در سطح می‌شود و در نتیجه پستی و بلندی‌های سطح افزایش می‌یابند. همچنین افزایش شدت جریان الکتریکی، شدت برخورد جرقه‌ها به سطح را افزایش داده و به دلیل افزایش عمق متأثر از جرقه‌ها، چاله‌های مذاب عمیق‌تر و بزرگ‌تری در روی سطح به وجود می‌آیند که باعث افزایش زبری سطح قطعه کار می‌گردد [۱۲].

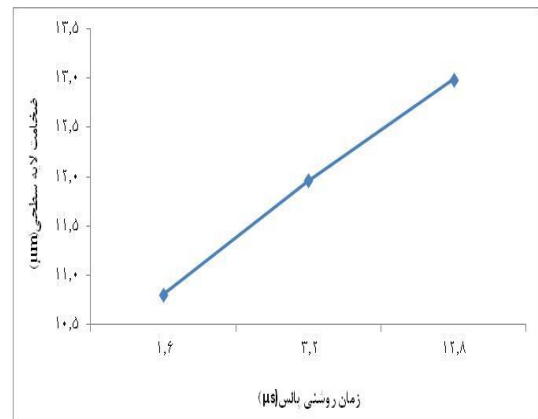


(الف)

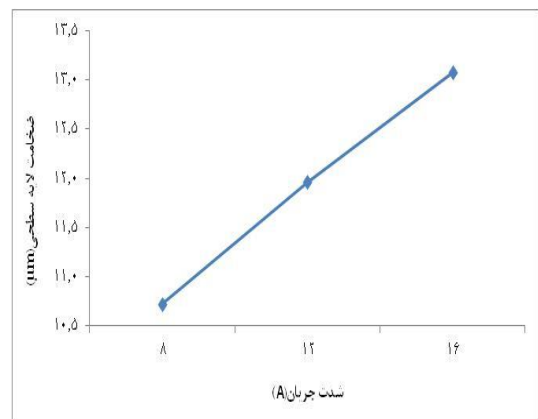


(ب)

شکل ۷. تأثیر پارامترهای ورودی بر روی زبری سطح قطعه کار (الف) تأثیر زمان روشنی پالس، (ب) تأثیر شدت جریان ورودی.



(الف)

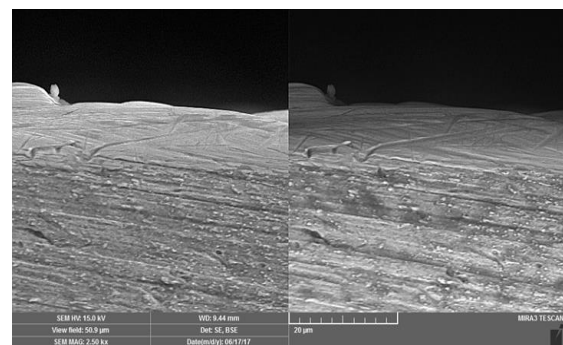


(ب)

شکل ۵. تأثیر پارامترهای ورودی بر روی ضخامت لایه سطحی ایجاد

شده، الکتروود شماره ۲، $V=200v$

(الف) تأثیر زمان روشنی پالس، (ب) تأثیر شدت جریان ورودی



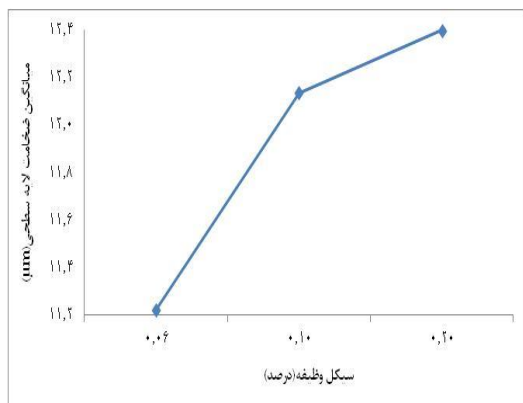
شکل ۶. تصویر SEM از لایه‌ی سطحی ایجاد شده تحت شرایط،

ترکیب الکتروود : شماره ۳، $p=150MPa$ ، $V=200v$.

تأثیر زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی بر زبری سطح قطعه کار

تأثیر سیکل وظیفه بر ضخامت لایه ی سطحی

همانطوریکه در شکل ۸ مشاهده می گردد با افزایش درصد سیکل وظیفه، مقدار ضخامت لایه ی سطحی ایجاد شده افزایش می یابد. با توجه به اینکه مقدار سیکل وظیفه از حاصل تقسیم زمان روشنی پالس به مجموع زمان کل پالس (زمان روشنی + زمان خاموشی) به دست می آید؛ لذا با افزایش سیکل وظیفه تا ۲۰٪، بدلیل کاهش زمان خاموشی پالس، زمان تلف شده کمتر می شود و این بدان معنی است که در سیکل وظیفه بالا تعداد جرقه ها افزایش می یابند. با افزایش تعداد جرقه ها، مکانیزم انجام تخلیه الکتریکی تقویت شده و تعداد بیشتری از ذرات وارد چاله های مذاب در سطح قطعه کار می شوند. همچنین با افزایش تعداد جرقه ها در واحد زمان، دمای سطح قطعه کار افزایش یافته و باعث افزایش ضخامت لایه ی سطحی ایجاد شده می گردد.



شکل ۸. تأثیر سیکل وظیفه بر ضخامت لایه سطحی لایه نشانی شده با تخلیه الکتریکی. $V=200v$ ، ترکیب الکترود: شماره ۳،

$$P=250Mpa$$

بررسی تاثیر مقدار فشار پرس اعمالی بر سختی لایه سطحی

مطابق شکل ۹ با افزایش مقدار فشار پرس اعمال شده برای فشرده سازی الکترودها، مقدار سختی سطح افزایش یافته است. دلیل این امر را در درجه اول می توان به افزایش رسانایی الکتریکی الکترود با افزایش فشار پرس آنها مرتبط دانست که در اثر آن به دلیل کاهش فضای های

تأثیر ولتاژ ورودی بر روی ضخامت لایه سطحی و زبری سطح

همانطور که در جدول ۳ ارائه شده است، با افزایش ولتاژ ورودی از سطح ۱ ($120V$) به سطح ۲ ($200V$)، مقدار ضخامت لایه سطحی افزایش می یابد. دلیل این مسئله را می توان بدین صورت توضیح داد که با افزایش ولتاژ ورودی به دلیل تقویت میدان الکتریکی ایجاد شده بین ابزار و قطعه کار، فاصله گپ^۱ پلاسما افزایش می یابد. با افزایش فاصله گپ به دلیل شستشوی بهتر فضای بین ابزار و قطعه کار، تعداد جرقه های آرک و اتصال کوتاه کمتر شده و تعداد جرقه های نرمال (اسپارک) افزایش می یابد [۱۳]. با افزایش تعداد جرقه های نرمال انرژی حرارتی بیشتری بین الکترود و قطعه کار متمرکز می شود که اولاً با توجه به مکانیزم فرآیند، باعث افزایش ورود عناصر آلیاژی به سطح قطعه کار شده و ثانیاً ایجاد جرقه های پرانرژی ضخامت لایه سطحی ایجاد شده را افزایش می دهد.

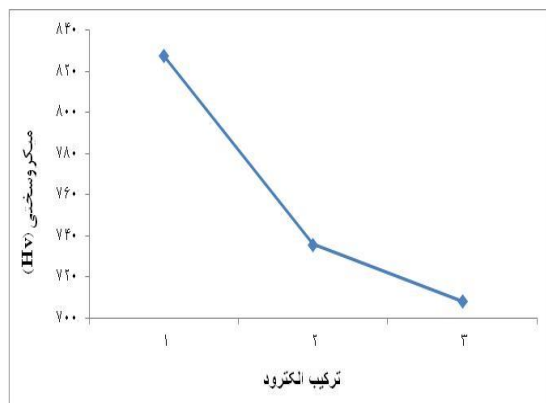
همچنین در جدول ۳ مقادیر زبری سطح بازای ولتاژ های ورودی متفاوت آورده شده است. با توجه به اینکه جرقه های آرک و اتصال کوتاه یکی از عوامل کاهش کیفیت سطح قطعه کار در فرآیند تخلیه الکتریکی هستند، با افزایش ولتاژ به دلیل کاهش این نوع جرقه ها که بواسطه ی افزایش گپ پلاسما و ایجاد فضای شستشوی جانبی ایجاد می شود، پایداری فرآیند افزایش یافته و زبری سطح کاهش می یابد [۱۳].

جدول ۳. مقادیر ضخامت لایه سطحی ایجاد شده و زبری سطح

$$T=3.2\mu s, P=150Mpa$$

ولتاژ ورودی (ولت)	ضخامت لایه سطحی (میکرون)	زبری سطح (میکرون)
۱۲۰	۱۱/۳	۳/۳
۲۰۰	۱۲/۴	۲/۵

¹ Gap



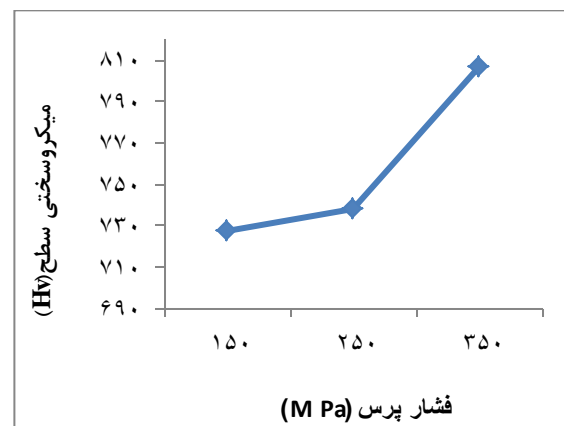
شکل ۱۰. تاثیر ترکیب شیمیایی الکتروود بر سختی سطح قطعه کار
 $V=200v, P=350Mpa$

نتیجه گیری

در این مقاله خواص سطحی فولاد ابزار H13 در فرآیند تخلیه الکتریکی با استفاده از الکتروودهای آلیاژی Ti-Cr-Cu فرآوری شده با متالورژی پودر مورد بررسی قرار گرفته است که مهمترین نتایج بدست آمده عبارتند از:

- ۱- بر اثر نفوذ تیتانیوم و کروم به سطح قطعات فولاد H13 به دلیل تشکیل ترکیبات TiC و Cr_7C_3 سختی سطح لایه نشانی شده بیشتر شده و مقدار سختی سطح آن با افزایش مقادیر زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی به بیش از ۸۰۰ ویکرز رسیده است.
- ۲- با افزایش ولتاژ ورودی از ۱۲۰V به ۲۰۰V به دلیل افزایش پایداری فرآیند، ضخامت لایه سطحی افزایش یافته و زبری سطح کاهش می یابد.
- ۳- با افزایش مقدار فشار اعمال شده برای پرس الکتروودهای پودری تا ۳۵۰Mpa، مقدار سختی سطح لایه نشانی شده با جرقه الکتریکی افزایش می یابد.
- ۴- با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی، به دلیل افزایش انرژی جرقه ها و افزایش چگالی جریان الکتریکی عبوری از کانال پلاسما، ضخامت سطح لایه

خالی بین ذرات تشکیل دهنده الکتروود، چگالی جریان الکتریکی عبوری و در نتیجه دمای الکتروود افزایش یافته و باعث تقویت مکانیزم فرآیند می گردد. دلیل دیگر می تواند ناشی از افزایش چسبندگی ذرات الکتروود در فشارهای بالای فشرده سازی الکتروودها باشد، که باعث ریزش تدریجی ذرات الکتروود به فضای گپ پلاسما شده که این امر می تواند باعث کاهش جرقه های اتصال کوتاه و آرک شده و در نتیجه پایداری فرآیند را افزایش دهد.



شکل ۹. تأثیر فشار پرس بر سختی سطح قطعه کار لایه نشانی شده با تخلیه الکتریکی: ترکیب الکتروود: شماره ۲، سیکل وظیفه=۲۰٪.

بررسی تاثیر ترکیب شیمیایی الکتروود بر سختی لایه سطحی

همانطوریکه در شکل ۱۰ ملاحظه می شود در بین سه نوع ترکیب الکتروود فرآوری شده، الکتروود ۱ که کمترین درصد مس را داشته، بیشترین مقدار سختی سطح را نسبت به دو نوع الکتروود دیگر ایجاد نموده است. با بررسی ترکیب شیمیایی الکتروودها در جدول ۲، مشاهده می شود که در مجموع درصد وزنی تیتانیوم و کروم در الکتروود ۱ نسبت به دو الکتروود دیگر بیشتر می باشد که باعث افزایش پتانسیل آلیاژ الکتروود ۱ برای ایجاد رسوب گذاری ترکیبات کاربیدی سخت مثل TiC و Cr_7C_3 در لایه سطحی شده که در نتیجه باعث افزایش سختی سطح قطعه کار پس از لایه نشانی با روش جرقه الکتریکی شده است.

Defect and Diffusion Forum, (2009) pp. 119-126

9. 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, , 4(3) (2012) 45-52.

۱۰. عیوضی باقری، هادی، گرجی، حمید، شبگرد، محمدرضا،

نوروزی، سلمان، افزایش سختی سطح آلومینیوم خالص با استفاده از آلیاژمونل 400 به وسیله فرآیند آلیاژسازی تخلیه

الکتریکی، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۸ (۱۳۹۶) ۶۹-۷۴.

11. 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, 3(2011) 5492-5499.

12. J. P. Davim, *Surface Integrity In Machining*, Springer, 2010.

13. K. Ojha, R. K. Garg, K. K. Singh, *MRR Improvement in Sinking Electrical Discharge Machining: A Review*, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 9(8) (2010) 709-739.

نشانی افزایش تا $13\mu\text{m}$ افزایش یافته و مقدار زبری سطح

بیشتر می‌گردد.

۵- با افزایش مقدار سیکل وظیفه تا ۲۰٪ به دلیل کاهش

زمان خاموشی پالس و در نتیجه افزایش تعداد جرقه ها در

واحد زمان، مقدار ضخامت لایه سطحی لایه نشانی شده

افزایش می‌یابد.

منابع

1. S. Kumar, R. Singh, T. P. Singh, B. L. Sethi, *Surface modification by electrical discharge machining: A review*, Journal of Materials Processing Technology, 209(2009) 3675-3687.

2. Ph. Bleys, J. P. Kruth, B. Lauwers, B. Schacht, *Surface and sub-surface quality of steel after EDM*, Advanced Engineering Materials, 8(2006)15-25.

3. 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(2001) 121-128.

4. J.W. Murray, S.J. Algodí, M.W. Fay, P.D. Brown, A.T. Clare, *Formation mechanism of electrical discharge TiC-Fe composite coatings*, Journal of Materials Processing Technology, 243 (2017) 143-151.

۵. شبگرد، محمدرضا، عیوضی باقری، هادی، رحمانی، روح‌الـ،

افسری، احمد، مطالعه تأثیر پارامترهای ورودی بر روی کیفیت

سطحی فولاد ابزار AISI H13 در فرآیند ماشین کاری تخلیه

الکتریکی، علوم و مهندسی سطح ۱۶ (۱۳۹۱) ۸۷-۹۹.

6. S. Kumar, U. Batra, *Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric*, Journal of Manufacturing Processes, 14 (2012) 35-40.

7. 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(2014) 161-166.

8. G.P. Rodriguez, J. Simao, G. Herranz, *Surface alloying of AISI H13 Steel during Electrical Discharge Machining (EDM)*,