



مطالعه تجربی فرآیند تمیزکاری به کمک پلاسمای الکترولیتی با شکل سیگنال‌های مختلف

مهدی نصراله‌هی¹، محمدرضا کرفی^{2*}

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115143، modares.ac.ir، karafi@

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 2 مرداد 1400
داوری اولیه: 11 شهریور 1400
پذیرش: 11 مهر 1400

کلیدواژگان:

تمیزکاری
پلاسمای الکترولیتی
بهینه‌سازی
تاگوچی

فرآیند تمیزکاری به کمک پلاسمای الکترولیتی، یک فرآیند الکتروفیزیکی است که در آن قطعه‌کار رسانا در الکترولیت، غوطه‌ور شده و در اثر عبور جریان الکتریکی، در سطح آن پلاسمای تشکیل می‌شود. تشکیل پلاسمای موجب ایجاد ذوب موضعی در سطح، و تمیزکاری آن می‌گردد. در این تحقیق پارامترهای مؤثر بر فرآیند تمیزکاری پلاسمای شامل جریان، ولتاژ، عرض پالس، فرکانس، دمای الکترولیت و شکل سیگنال اعمالی، بر مقدار باربرداری و زبری سطح به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل سیگنال‌های مورد استفاده در این مقاله به صورت DC، DC پالسی و AC با قطبیت نامتقارن است. پس از انجام آزمایش‌ها نتایج به کمک نرم‌افزارهای تحلیل آماری مورد بررسی قرار گرفته و روابط بین پارامترها استخراج شده است. نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد که در فرآیند تمیزکاری با جریان مستقیم، پلاسمای تنها در محدوده‌ی جریان کوچکی تشکیل می‌شود. پایین‌تر از این محدوده پلاسمای تشکیل نشده و بیشتر از آن نیز پلاسمای آسیب جدی به قطعه‌کار وارد کرده و آن را ذوب می‌کند. با پالسی شدن جریان، کنترل روی فرآیند بالاتر رفته و می‌توان جریان را تا حد زیادی افزایش داد. اثر جریان و زمان تمیزکاری نسبت به سایر پارامترها بیشتر بوده و با افزایش هر کدام از آن‌ها بر میزان باربرداری افزوده می‌شود. جریان متناوب با قطبیت نامتقارن در فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی از حجم باربرداری کم می‌کند. میزان زبری سطح را می‌توان با کاهش درصد روشنی پالس کاهش داد. حداکثر باربرداری در آزمون‌های انجام شده 30 میلی‌گرم و حداقل زبری سطح بدست آمد 0/5 میکرومتر بوده است.

Experimental study of the plasma electrolyte cleaning using different signal shapes

Mehdi Nasrollahi, Mohammad Reza Karafi*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115143 Tehran, Iran, karafi@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 24 July 2021
First Decision: 2 September 2021
Accepted: 3 October 2021

Keywords:

Cleaning
Electrolytic plasma
Optimization
Taguchi

Abstract

The plasma electrolyte cleaning is an electro-physical process in which a conductive workpiece immerses in an electrolyte and plasma generates on its surface due to passing large currents. Melting the surface locally causes the cleaning of the workpiece's surface. In this article, the parameters affecting the plasma cleaning process, including current, voltage, duty cycle, frequency, electrolyte temperature, and signal shape are studied. The effects of the parameters on the material removal and the workpiece surface roughness have been studied experimentally. The signals used in this study are DC, pulse DC and AC with asymmetric polarity. In this research, the design of the experiments is performed using the Taguchi method. After the experiments, the results were analyzed by statistical analysis software. Experimental relationships between parameters are also extracted. The experiment results show that in the process of cleaning with direct current, plasma is only formed in a small current range. Using pulse current, the controllability of the process has increased. The effect of current and time of cleaning in the process of plasma cleaning has a great and direct effect on the material removal rate. Alternating current with asymmetric polarity reduces the material removal rate in the electrolytic plasma cleaning process. The surface roughness can be reduced by reducing the percentage of duty cycle, and this process can be used for fine polishing of workpiece surfaces. Maximum removal of materials, and minimum roughness are 30 mg and 0.5 micrometer respectively.

1- مقدمه

می‌شود. این روش در مقایسه با سایر روش‌های تمیزکاری مکانیکی، تمام سطح قطعه‌کار غوطه‌ور در الکترولیت را فارغ از هرگونه پیچیدگی آن در چند ثانیه تمیزکاری می‌کند [1]. تمیز کردن سطوح در بسیاری از فرایندهای مورد استفاده در صنعت

تمیزکاری به کمک پلاسمای الکترولیتی، یک فرآیند الکتروفیزیکی است که به ولتاژهای بالای 200 ولت نیاز دارد و از محلول‌های آب و نمک سازگار با محیط‌زیست در آن استفاده

Please cite this article using:

M. Nasrollahi, M. R. Karafi, Experimental study of the plasma electrolyte cleaning using different signal shapes, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 8, pp. 1- 11, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پوشش‌های اکسیدی مواد مختلف مثل آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم و برخی آلیاژهای آهن توسط این روش صورت گرفته است. پوشش دهی سرامیکی ادوات پزشکی از جنس تیتانیوم توسط این روش در سال 2008 مورد بررسی قرار گرفته است. یروخین² در مورد نیتروژنه و کربونیزه کردن سطوح توسط این روش تحقیقاتی انجام داده است [6]. علی اف³ در سال 2008 نشان داد که پوشش دهی توسط این روش سبب بهبود مقاومت به خوردگی در فلز پایه می‌شود [7].

در سال 2002 تیورین یک روش جدید برای کونچ کردن فلز توسط پلاسمای الکترولیتی را معرفی کرد [8]. توسط این روش می‌توان ذرات تیتانیوم اکساید را روی سطح تیتانیوم رشد داد که از آن در سلول‌های خورشیدی و کاتالیزگرهای نوری استفاده می‌شود. این ذرات می‌توانند با ذوب کردن محلی و جامد کردن دوباره آن‌ها ایجاد شوند. اندازه ذرات به مشخصات ماده اولیه، انرژی و مدت‌زمان ذوب و انجماد بستگی دارد [9]. ملتیس⁴، در سال 2001، به بررسی تأثیر فرایند تمیزکاری و پوشش دهی پلاسمای بر روی خواص مکانیکی قطعه‌کار پرداخته است [10]. مطالعه اثر تغییرات ولتاژ و جریان در فرایند تمیزکاری و پولیش‌کاری با پلاسمای الکترولیتی بر روی قطعه‌کار توسط یروخین و راجپوت⁵ انجام شده است [11، 12]. در سال 2013، محدوده‌ای از پارامترها که پلاسمای الکترولیتی در آن قابل تشکیل است توسط کومار اوغلو⁶ بیان شده است [13]. نستلر ضمن تشریح فرایند پولیش‌کاری با پلاسمای الکترولیتی امکان انجام فرایند را بر روی قطعه‌کارهای مختلف مورد بررسی قرار دادند [14]. در ایران پژوهش‌های زیادی در زمینه روش پوشش دهی به کمک پلاسمای الکترولیتی بر روی مواد مختلف انجام شده است، اما گزارش‌های بسیار کمی در رابطه با استفاده از این فناوری در پولیش‌کاری یا تمیزکاری وجود دارد. از این روش برای زدودن چربی‌ها، اکسیدها، گرد و خاک و زنگارهای سخت شده روی سطوح قطعات استفاده می‌شود. قطعات رسانایی که دارای سطوح پیچیده و یا غیر قابل دسترسی هستند با غوطه‌وری در الکترولیت، در زمان بسیار کوتاهی قابل تمیزکاری هستند. این روش در مقایسه با روش تمیزکاری به کمک امواج آلتراسونیک بسیار سریع تر بوده، امکان تمیزکاری آلودگی‌های سخت‌تر، روی سطوح غیر قابل دسترسی در آن وجود دارد. بر خلاف روش آلتراسونیک که معمولاً برای افزایش

نظیر پوشش دهی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا وجود گرد و خاک، روغن و چربی‌ها، رنگ و یا پوشش‌های قبلی، مواد شیمیایی، زنگار و لایه‌های اکسیدی موجود در سطح فلز می‌توانند به‌طور قابل توجهی از اثرگذاری عملیات کم کنند. برای تمیزکاری سطح از روش‌های مکانیکی، شیمیایی و حرارتی استفاده می‌شود [2]. از معایب این روش‌ها چندمرحله‌ای بودن آن‌ها و استفاده از مواد شیمیایی در آن‌ها است. با افزایش توجه به حفاظت از محیط‌زیست و مقررات وضع شده در این رابطه، استفاده از روش‌های سنتی محدود شده‌اند؛ بنابراین به تدریج روش‌های تمیزکاری بی‌ضرر برای محیط‌زیست توسعه پیدا کردند. عملیات تمیزکاری توسط پلاسمای الکترولیتی برخلاف روش‌های سنتی، تک‌مرحله‌ای و سریع بوده و برای انجام این عملیات از مواد سمی و خطرناک استفاده نمی‌شود. فرایند تمیزکاری به کمک پلاسمای الکترولیتی در اثر تخلیه الکتریکی بر سطح قطعه‌کار انجام می‌شود. با توجه به این‌که هدایت الکتریکی از الزامات این روش است، قطعه‌کارها باید رسانا باشند [3]. استفاده از فناوری پلاسمای برای عملیات روی سطوح از سال 1930 مورد توجه دانشمندان روسی و اکراینی قرار گرفت و گزارش‌هایی نیز به زبان روسی ثبت شده است. اما این روش، در اوایل قرن 21 مورد توجه بسیاری از دانشمندان غرب قرار گرفته است. این فرایند معمولاً بین الکترولیت و فلز جامد اتفاق می‌افتد. معمولاً مطالعه پلاسمای در مورد پلاسمای گازی در شرایط خلأ یا شبه خلأ بررسی می‌شود. درحالی‌که این فرایند می‌تواند جهت استفاده آسان‌تر و بازده اقتصادی بیشتر در فشار اتمسفر هم انجام شود [4].

تخلیه پلاسمای آنودیک از دو دهه قبل بسیار گسترده شده است. نام معمول این فرایند، اکسیداسیون پلاسمای الکترولیتی است. این روش به‌طور عمده برای آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم استفاده شده است. این روش باعث ایجاد یک لایه اکسیدی روی فلز هدف می‌شود که خواص مناسب مکانیکی و شیمیایی را نسبت به روش‌های دیگر دارا است. در سال 2006 توسط مکسیمو¹ جزئیات ویژگی‌های این لایه با استفاده از منبع تغذیه مستقیم و متناوب مورد بررسی قرار گرفته است [5]. در سال‌های اخیر تخلیه پلاسمای کاتدی که در آن قطعه‌کار به الکترومنفی متصل می‌گردد، جهت بهبود ویژگی‌های سطح و تمیزکاری قطعات مورد توجه قرار گرفته است.

در دهه اخیر از زمانی که مزایای پوشش دهی توسط پلاسمای الکترولیتی آشکار شده تحقیقات زیادی روی

² Yerokhin³ Aliev⁴ Meletis⁵ Rajput⁶ Kumruoglu¹ Maksimov

راندمان از مواد شوینده و گرم کردن آب استفاده می‌شود، در این روش نیازی به این کار وجود ندارد.

تاکنون پژوهشی کاملی روی تاثیر شکل سیگنال‌های مختلف بر عملکرد این روش تمیزکاری انجام نشده است. لذا در این تحقیق تاثیر سیگنال‌های مستقیم، پالسی و متناوب بر عملکرد این روش پولیش کاری مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله پس از شناسایی پارامترهای مؤثر بر فرآیند تمیزکاری پلاسمای و نیز شاخص‌های کیفیت تمیزکاری، طراحی آزمایش‌ها صورت گرفته و پس از انجام آزمایش‌ها نتایج به کمک نرم‌افزارهای تحلیل آماری مورد بررسی قرار می‌گیرند و همچنین روابط تجربی بین پارامترها نیز استخراج می‌شود.

2- مجموعه آزمایشگاهی انجام فرآیند

در این تحقیق قطعه‌کار از جنس فولاد ST37 و با ضخامت 1/5 میلی‌متر برای بررسی فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی انتخاب شده است. برای مشاهده بهتر نتایج از قطعه‌کارهایی دارای زنگار استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها از محلول بی‌کربنات سدیم در آب مقطر استفاده شده است. غلظت الکترولیت، به گونه‌ای انتخاب شد که با رسیدن هم‌زمان جریان و ولتاژ به مقداری مشخص، پلاسمای بروی قطعه‌کار شکل گیرد. ولتاژ حدودی 300 ولت و جریان حدودی 4 آمپر برای قطعه‌کار با ابعاد به طول و عرض و ارتفاع به ترتیب 10، 5 و 1/5 میلی‌متر مورد نیاز است. چگالی جریان برای انجام فرآیند 6/5 آمپر بر سانتی‌متر مربع است. مقاومت تقریبی بین الکترودها 75 اهم می‌باشد. رسانایی محلول 13/5 میلی‌زیمنس بوده و برای انجام تمامی آزمایش‌ها از این محلول استفاده شده است. حداکثر مدت زمان هر آزمون 25 ثانیه بوده است. پس از هر آزمون، الکترولیت مورد استفاده تخلیه شده و الکترولیت جدید با مشخصات ذکر شده، برای آزمون بعد مورد استفاده قرار گرفته است. از تغییرات رسانایی الکترولیت در خلال انجام یک تست، با توجه حجم بزرگ ظرف الکترولیت در قیاس با منطقه تشکیل پلاسمای صرف نظر شده است. شکل 1 محفظه ساخته شده برای انجام تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی را نشان می‌دهد.

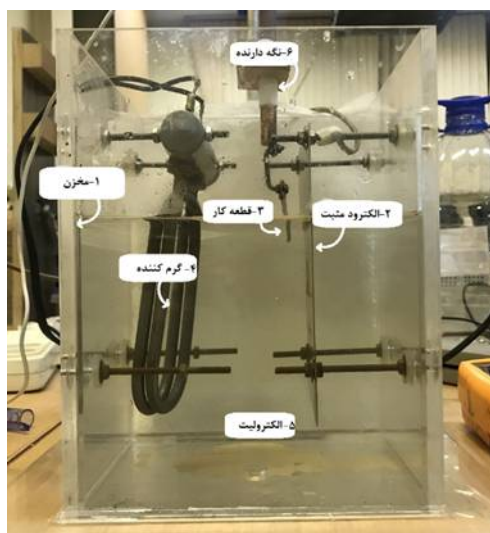


Fig. 1 The experimental setup of plasma cleaning

شکل 1 محفظه ساخته شده برای انجام فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی

آزمون‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. برای انجام آزمون‌ها، متغیرهای ورودی سطح جریان (مثبت و منفی)، نوع جریان (ثابت، پالسی و متناوب)، درصد روشنی پالس جریان، فرکانس در جریان‌های پالسی، دمای الکترولیت و مدت زمان تمیزکاری انتخاب شده‌اند. صافی سطح و مقدار باربرداری نیز به عنوان متغیر خروجی بررسی می‌شوند. برای تشکیل پلاسمای و بررسی نتایج، انتخاب محدوده مناسب پارامترها اهمیت زیادی دارد. برای انتخاب محدوده‌ی پارامترها، آزمایش‌های اولیه‌ای صورت گرفته و محدوده مجاز این پارامترها برای تشکیل پلاسمای بدست آمده است. در این مقاله روش طراحی آزمایش‌ها تا کوچکی برای بررسی اثر متوسط هر پارامتر روی فرآیند تمیزکاری به

قسمت 1، مخزن، از پلکسی گلاس ساخته شده تا جزئیات فرآیند قابل مشاهده بوده و در برابر حرارت تولید شده از تشکیل پلاسمای مقاوم باشد. مخزن حاوی الکترولیت و نگه‌دارنده اجزای سیستم تمیزکاری است. قسمت 2، الکتروده مثبت می‌باشد. جنس این الکتروده از فولاد ضدزنگ است تا در طول انجام فرآیند که توسط یون‌های اکسیژن احاطه می‌شود، اکسید نشده و

طبق شکل 2 با افزایش ولتاژ، باربرداری از قطعه کار نیز افزایش یافته است. افزایش ولتاژ موجب افزایش جریان و در نتیجه افزایش شدت پلاسمای روی سطح قطعه کار می‌شود.

جدول 1 طراحی آزمایش برای قطعه کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر با جریان مستقیم

Table 1 Design of experiment for the workpiece with thickness of 1.5mm, under direct current

شماره آزمایش	دما (سانتی‌گراد)	ولتاژ (ولت)	زمان تمیزکار؛ مقدار باربرداری (ثانیه)	مقدار باربرداری (گرم)
1	20	130	5	0/0006
2	20	150	10	0/0007
3	20	170	15	0/0005
4	20	190	20	0/0008
5	20	210	25	0/0018
6	35	130	10	0/0014
7	35	150	15	0/0034
8	35	170	20	0/0012
9	35	190	25	0/0044
10	35	210	5	0/0007
11	50	130	15	0/0014
12	50	150	20	0/0017
13	50	170	25	0/0071
14	50	190	5	0/0008
15	50	210	10	0/0009
16	65	130	20	0/0028
17	65	150	25	0/0118
18	65	170	5	0/0018
19	65	190	10	0/002
20	65	210	15	0/0028
21	80	130	25	0/0209
22	80	150	5	0/0157
23	80	170	10	0/0322
24	80	190	15	0/0491
25	80	210	20	0/01141

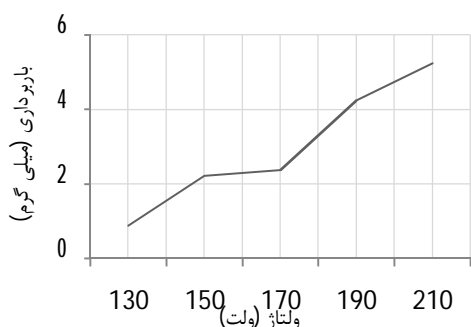


Fig. 2 Material removal versus voltage in DC tests

شکل 2 تغییرات باربرداری از سطح قطعه کار برحسب تغییر ولتاژ در آزمون جریان مستقیم

کمک پلاسمای الکترولیتی، انتخاب شده است. تاثیر میانگین هر پارامتر در این روش طراحی آزمایش گزارش می‌شود. تعداد سطوح پارامترها نیز بر اساس انتخاب آرایه متعامد 25 تایی طرح تاگوچی در نظر گرفته شده است. آزمونها به صورت تصادفی از آرایه، انتخاب و انجام شده است. هر آزمون سه بار تکرار شده است. در روش طرح آزمایش تاگوچی اثر هر متغیر مستقل روی متغیر وابسته، به طور متوسط در شرایط تغییر سایر متغیرهای مستقل بیان می‌شود. برای بررسی اثرات متقابل متغیرها باید طرح‌های فاکتوریل و یا سایر روشهای طراحی آزمایش استفاده کرد که موجب افزایش چشمگیر تعداد آزمونها می‌شود.

3- نتایج آزمون‌ها

برای مطالعه فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان مستقیم از قطعه کار با ابعاد به طول و عرض و ارتفاع به ترتیب 10، 5 و 1/5 میلی‌متر دارای زنگ‌زدگی استفاده شده است. آزمایش‌های طراحی شده توسط روش تاگوچی جهت بررسی فرایند در جدول 1 آورده شده است. در این قسمت تأثیر پارامترهای دمای الکترولیت، ولتاژ و زمان تمیزکاری بر روی باربرداری از قطعه کار بیان شده است. مقدار باربرداری با اندازه گیری وزن قطعه قبل و بعد از فرآیند تمیزکاری بدست آمده است. برای تأمین انرژی لازم جهت انجام آزمایش‌ها از اتوترانس و مدار یک‌سوساز استفاده شده است. با استفاده از اتوترانس، ولتاژ خروجی از مقدار صفر تا ولتاژ مؤثر 300 ولت به صورت پیوسته قابل تنظیم است. حداکثر جریان مؤثر این منبع تغذیه 6.7 آمپر می‌باشد.

با تحلیل رگرسیونی نتایج به دست آمده، می‌توان معادله (1) را روی داده‌های تجربی مقدار باربرداری قطعه کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر و عمق غوطه‌وری 5 میلی‌متر در آزمون‌های جریان مستقیم برآزش کرد، دو عامل ولتاژ و زمان بیشترین تأثیرات را داشتند. این مدل دارای ضریب تعیین 80 درصد و ضریب تعیین تعدیل یافته 72 درصد است.

$$MRR = -8.74306 + 0.0518322 V * t \quad (1)$$

در این معادله، MRR مقدار باربرداری برحسب ده‌هزارم گرم و V، ولتاژ برحسب ولت (V) و t زمان تمیزکاری برحسب ثانیه (s) است. نتیجه آنالیز واریانس رابطه رگرسیونی (1) در زیر آورده شده است.

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Reg.	1	9008.4	9008.44	9008.44	8.1236	0.024
V*t	1	9008.4	9008.44	9008.44	5.1236	0.0224
Error	18	5047.8	5047.76	280.43		
Total	19	14056.2				

جدول 2 طراحی آزمایش برای تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

Table 2 Design of experiments for pulse tests

شماره آزمایش (آمپر) (هرتز)	درصد روشنایی الکترولیت تمیزکاری	مقدار زبری سطح (میکرومتر)	زمان (ثانیه)	دمای (گرم)	جریان فرکانس	درصد	پالس	شماره
0/503	0/0006	5	15	30	2000	12	1	
0/6035	0/00065	10	25	45	2500	12	2	
0/623	0/00085	15	35	60	3000	12	3	
0/5735	0/0011	20	45	75	3500	12	4	
0/6485	0/0009	25	55	90	4000	12	5	
0/5245	0/0005	25	45	45	2000	14	6	
0/2435	0/0012	5	55	60	2500	14	7	
0/376	0/0012	10	15	75	3000	14	8	
0/6465	0/00115	15	25	90	3500	14	9	
0/641	0/00065	20	35	30	4000	14	10	
0/657	0/00145	20	25	60	2000	16	11	
0/59	0/00095	25	35	75	2500	16	12	
0/601	0/0014	5	45	90	3000	16	13	
0/695	0/0009	10	55	30	3500	16	14	
0/484	0/0019	15	15	45	4000	16	15	
0/7015	0/0016	15	55	75	2000	18	16	
0/471	0/00195	20	15	90	2500	18	17	
0/6835	0/00075	25	25	30	3000	18	18	
0/516	0/001	5	35	45	3500	18	19	
0/573	0/0021	10	45	60	4000	18	20	
0/6095	0/0019	10	35	90	2000	20	21	
0/746	0/00205	15	45	30	2500	20	22	
0/632	0/00235	20	55	45	3000	20	23	
0/609	0/0027	25	15	60	3500	20	24	
0/6325	0/00125	5	25	75	4000	20	25	

با توجه به نتایج آزمون، با افزایش دمای الکترولیت طبق شکل 3 مقدار باربرداری افزایش پیدا می‌کند. افزایش دما موجب افزایش نرخ تبخیر الکترولیت و در نتیجه افزایش شدت پلاسمای روی سطح می‌گردد.

طراحی آزمایش‌ها برای انجام فرآیند تمیزکاری با جریان پالسی توسط روش تاگوچی انجام شده است که در جدول (2) آورده شده است. در این آزمون‌ها از قطعه‌کارهایی دارای زنگ‌زدگی و با عمق غوطه‌وری 10 میلی‌متر در الکترولیت و عرض 10 میلی‌متر استفاده شده است. ضخامت قطعه‌کارها ثابت و برابر 1/5 میلی‌متر انتخاب شده است. در این قسمت مطالعه روی تأثیر پارامترهای دمای الکترولیت، جریان، زمان تمیزکاری، فرکانس و درصد روشنایی پالس روی باربرداری و صافی سطح قطعه‌کار انجام شده است.

منبع تغذیه مورد استفاده در این قسمت دارای توان 20 کیلووات و قابلیت تولید سیگنال پالسی و AC با قطبیت نامتقارن (800 ولت مثبت و 200 ولت منفی) و زمان روشنایی پالس از 10 تا 90 درصد، فرکانس از 100 هرتز تا 10 کیلوهرتز می‌باشد.

شکل سیگنال جریان در آزمون‌های تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی به شکل 4 است.

شکل سیگنال اعمالی در آزمون‌های با جریان متناوب به شکل 5 می‌باشد.

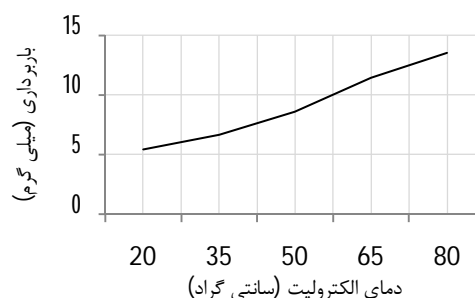


Fig. 3 Material removal versus temperature changes of the electrolyte in DC tests

شکل 3 تغییرات باربرداری از سطح قطعه‌کار بر حسب تغییر دمای الکترولیت در آزمون جریان مستقیم

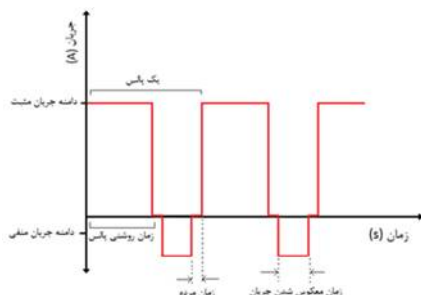


Fig. 5 Asymmetric bipolar alternative current used for plasma cleaning
شکل 5 جریان متناوب با قطبیت نامتقارن، استفاده شده در فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی

رابطه‌ی (2) رابطه برازش شده روی مقدار باربرداری شده از سطح را نشان می‌دهد. این مدل دارای ضریب تعیین 82 درصد و ضریب تعیین تعدیل یافته 75 درصد است.

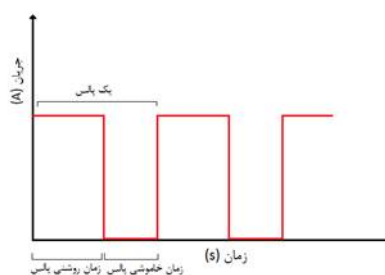


Fig. 4 Pulse current used for plasma cleaning

شکل 4 جریان پالسی استفاده شده در فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی

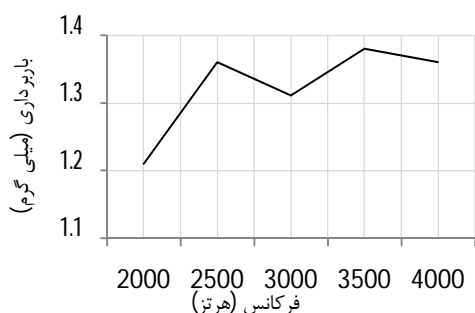


Fig. 7 Material removal versus frequency in pulsed tests

شکل 7 تغییرات باربرداری برحسب تغییر فرکانس در فرایند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

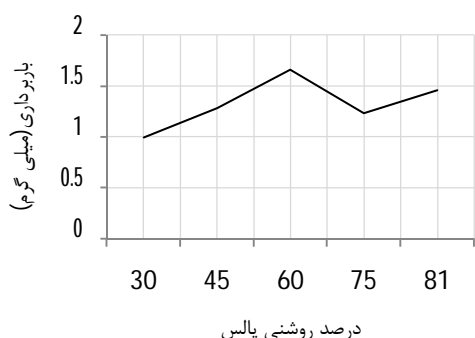


Fig. 8 Material removal versus duty cycle in pulsed tests

شکل 8 تغییرات باربرداری برحسب تغییر درصد روشن پالس در فرایند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

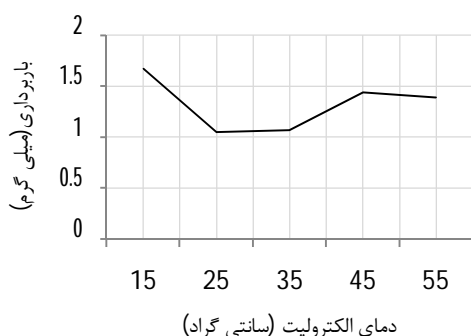


Fig. 9 Material removal versus electrolyte temperature in pulsed tests

شکل 9 تغییرات باربرداری نسبت به تغییر دمای الکترولیت در فرایند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

طبق شکل 10 با افزایش زمان تمیزکاری، مقدار باربرداری از قطعه بیشتر می‌شود.

زبری سطح قطعه در جهت افقی و عمودی با دستگاه زبری سنج mahr marsurf ps1 ساخت کشور آلمان اندازه گیری شده و میانگین آن در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است. در معادله برازش شده برای باربرداری، تأثیر متغیرهای تداخلی بیشتر بوده اما در معادله برازش شده برای صافی سطح، تأثیر توان دوم جریان از سایر پارامترها بیشتر است. به طوری که افزایش یک واحد جریان هم به طور خطی در خروجی اثر می‌گذارد هم به طور غیرخطی با توان دوم تأثیر دارد، تأثیر

$$MRR = -2.23017 + 0.103422 D - 0.0480051 t * t + 0.094385 I * t \quad (2)$$

در این رابطه، MRR مقدار باربرداری برحسب ده هزارم گرم، I جریان برحسب آمپر (A)، t زمان تمیزکاری برحسب ثانیه (s)، D درصد روشن پالس است. نتیجه آنالیز واریانس رابطه رگرسیون (2) در زیر آورده شده است.

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Reg.	3	627.408	627.408	209.136	8.9181	0.03
t*t	1	0.236	473.799	473.799	4.8590	0.012
I*t	1	533.994	585.748	585.748	5.9857	0.04
D	1	93.179	93.179	93.179	8.4288	0.021
Error	21	232.152	232.152	11.055		
Total	24	859.560				

طبق شکل 6 افزایش مقدار جریان باعث افزایش مقدار باربرداری می‌شود. این امر به علت افزایش شدت جرقه‌ها و در نتیجه برخورد بیشتر یا سطح و براده برداری از آن است.

با توجه به شکل 7 تغییر فرکانس تأثیر زیادی روی میزان باربرداری ندارد. با افزایش فرکانس، مقدار باربرداری به اندازه خیلی جزئی بیشتر می‌شود. که این مقدار نیز به علت افزایش تعداد جرقه‌ها در واحد زمان بوده است.

پیش‌بینی می‌شود که هر چه جریان پالسی به جریان مستقیم نزدیک‌تر شود براده برداری نیز افزایش پیدا کند. شکل 8 میزان باربرداری را برحسب زمان روشن پالس نشان می‌دهد. در عرض پالس‌های کم پلاسمای قدرت کافی جهت باربرداری را پیدا نمی‌کند. در عرض پالس‌های بزرگ‌تر زمان کافی بیشتری برای تمیزکاری وجود خواهد داشت.

شکل 9 مقدار باربرداری را برحسب دمای الکترولیت نشان می‌دهد. در این شکل، کاهش و سپس افزایش مقدار باربرداری با افزایش دما نشان دهنده این است که افزایش دما (در بازه مورد آزمایش در این پژوهش) تأثیر معناداری به لحاظ آماری بر مقدار باربرداری در آزمون‌های جریان پالسی ندارد.

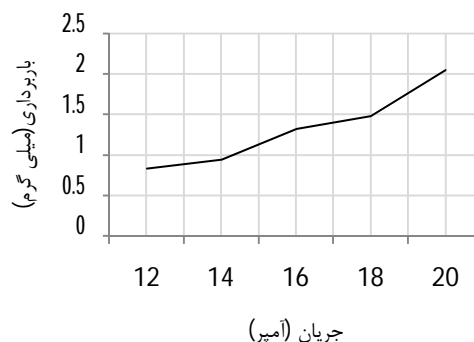


Fig. 6 Material removal versus current in pulsed tests

شکل 6 تغییرات باربرداری برحسب تغییرات جریان در فرایند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

شکل 12 نشان می‌دهد که افزایش فرکانس موجب افزایش زبری سطح شده است. ابتدا باعث افزایش زبری و سپس باعث کاهش آن شده است. افزایش اولیه زبری را می‌توان به افزایش تعداد جرقه‌ها در واحد زمان نسبت داد و کاهش زبری را می‌توان به کوچک شدن سایز جرقه‌ها در فرکانس‌های بالاتر مربوط کرد.

شکل 13 نشان می‌دهد که با افزایش زمان روشنایی پالس، زبری سطح افزایش پیدا کرده است. علت این پدیده برخوردهای بیشتر جرقه‌ها به سطح در زمان و ایجاد حفرات بیشتر در آن است.

شکل 14 مقدار صافی سطح را برحسب تغییرات دمای الکترولیت نشان می‌دهد. افزایش دمای الکترولیت، به میزان جزئی موجب افزایش صافی سطح قطعه کار شده است.

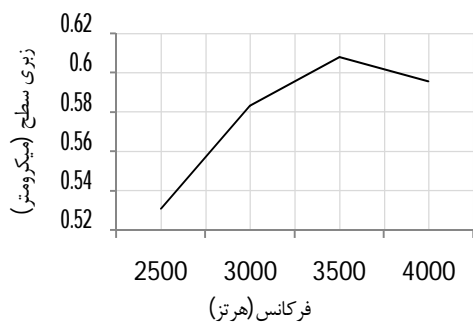


Fig. 12 Surface roughness versus frequency in pulsed tests
 شکل 12 تغییرات زبری سطح برحسب تغییرات فرکانس در فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

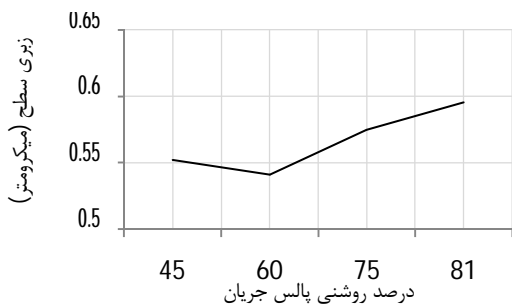


Fig. 13 Surface roughness versus duty cycle in pulse tests
 شکل 13 تغییرات زبری سطح برحسب تغییرات زمان روشنایی پالس در فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

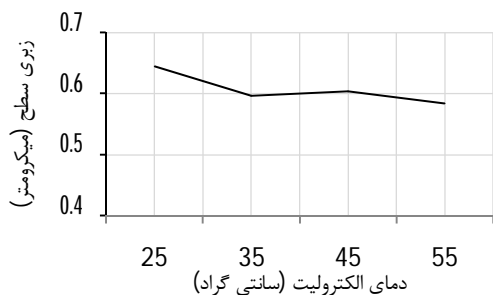


Fig. 14 Surface roughness versus electrolyte temperature in pulsed tests
 شکل 14 تغییرات زبری سطح برحسب تغییرات دمای الکترولیت در فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

پارامتر زمان نیز به همین صورت است. معادله (3) برای داده‌های تجربی ارائه شده است. مدل دارای ضریب تعیین 80 درصد و ضریب تعیین تعدیل یافته 62 درصد است.

$$R = 0.497251 - 0.0161149 D + 0.01623 T + 0.010685 I + 0.004946 t + 0.000136459 D^2 - 0.000210429 T^2 \quad (3)$$

در این معادله، R زبری سطح برحسب میکرومتر، I جریان برحسب آمپر (A)، t زمان تمیزکاری برحسب ثانیه (s)، T دمای الکترولیت برحسب درجه سانتی‌گراد، f فرکانس پالس برحسب هرتز (Hz) و D درصد روشنایی پالس است. نتیجه آنالیز واریانس رابطه رگرسیونی (3) در زیر آورده شده است.

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Reg.	6	0.134325	0.134325	0.0223875	2.69245	0.04805
D*D	1	0.003340	0.032166	0.0321663	3.86851	0.034811
T*T	1	0.005661	0.030996	0.0309961	3.72778	0.029421
I	1	0.022834	0.022834	0.0228338	2.74613	0.011426
D	1	0.035326	0.035326	0.0353258	4.24849	0.054033
T	1	0.036585	0.036585	0.0365851	4.39994	0.050326
t	1	0.030579	0.030579	0.0305786	3.67757	0.041157
Error	18	0.149668	0.149668	0.0083149		
Total	24	0.283993				

بر اساس نمودارهای صافی سطح در شکل 11 مشاهده می‌شود که با افزایش جریان از صافی سطح کم می‌شود. این امر به علت بزرگ شدن اندازه جرقه‌ها و برخورد شدیدتر آن به سطح قطعه و در نتیجه ایجاد حفرات بزرگ‌تر می‌باشد.

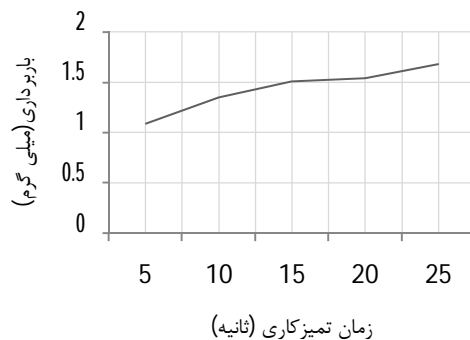


Fig. 10 Material removal versus process time of cleaning in pulsed tests
 شکل 10 تغییرات بازبرداری نسبت به تغییر زمان تمیزکاری در فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

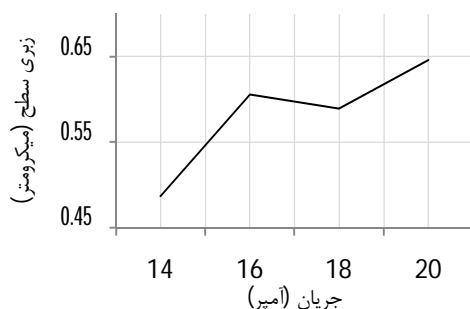


Fig. 11 Surface roughness versus current in pulsed tests
 شکل 11 تغییرات زبری سطح برحسب تغییرات جریان در فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

جدول 4 بررسی حساسیت پارامترهای فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی

Table 4 Sensitivity of the plasma cleaning parameters

عنوان آزمایش	پارامتر ورودی	مقدار پارامتر خروجی حساسیت
آزمون با جریان مستقیم (قطعه کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	ولتاژ (V)	210
	دمای الکترولیت (°C)	65
	زمان تمیزکاری (s)	10
آزمون با جریان پالسی (قطعه کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	جریان (A)	16
	فرکانس (Hz)	2500
	روشنی پالس	75
آزمون با جریان پالسی (قطعه کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	دمای الکترولیت (°C)	35
	زمان تمیزکاری (s)	25
	جریان (A)	16
آزمون با جریان پالسی (قطعه کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	فرکانس (Hz)	2500
	روشنی پالس	75
	دمای الکترولیت (°C)	35
زمان تمیزکاری (s)	25	0/018

برای مقایسه تمیزکاری با جریان پالسی و جریان متناوب با قطبیت نامتقارن تعدادی از آزمایش‌هایی که در بخش قبل انجام شد با جریان متناوب نیز آزمایش شدند تا تأثیر جریان معکوس مورد بررسی قرار گیرد. همان‌طور که در شکل 16 مشخص است میزان باربرداری در فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان متناوب، کمتر از جریان پالسی است. دلیل این امر، قطع شدن پلاسمای در فواصلی است که جریان معکوس از قطعه‌کار می‌گذرد. همچنین معکوس شدن جریان موجب تجمع گاز اکسیژن اطراف سطح قطعه‌کار و اکسید شدن آن می‌شود. به‌گونه‌ای وزن قطعه‌کار در آزمایش شماره 19 پس از انجام آزمایش بیشتر شده است.

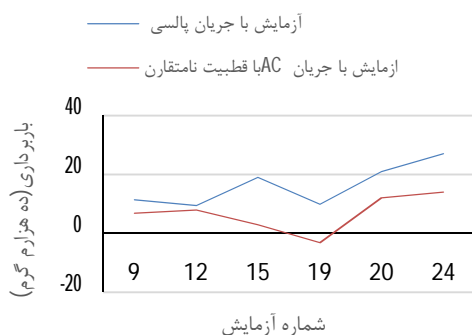


Fig. 16 Comparison of the material removal in pulsed and alternative current tests

شکل 16 مقایسه مقدار باربرداری در فرآیند تمیزکاری با جریان پالسی و جریان متناوب (AC)

مقایسه صافی سطح قطعه‌کار بعد از انجام فرآیند با استفاده

شکل 15 نشان می‌دهد که هر چه زمان تمیزکاری بیشتر شود صافی سطح نیز کم می‌شود.

جدول 3 بازه‌ی تغییرات هرکدام از متغیرهای مستقل توابع باربرداری و صافی سطح و نیز بازه تغییرات کلی آن توابع را نشان می‌دهد. قابل‌ذکر است که بازه تغییرات با قطعیت 95 درصد ذکر شده است.



Fig. 15 Surface roughness versus process time of cleaning in pulsed tests

شکل 15 تغییرات زبری سطح برحسب تغییرات زمان تمیزکاری در فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان پالسی

جدول 3 عدم قطعیت رابطه‌های به‌دست‌آمده برای فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی

Table 3 Uncertainty of the plasma cleaning parameters

عنوان آزمون	پارامتر	مقدار پارامتر	خطای پارامتر	بازه عدم قطعیت رابطه
باربرداری با جریان مستقیم (قطعه کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	ولتاژ (V)	210	±3	5.2± (ده هزارم گرم)
	دمای الکترولیت (°C)	65	±2	
	زمان تمیزکاری (s)	10	±2	
باربرداری با جریان پالسی (قطعه کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	جریان (A)	16	±0/1	3.4± (ده هزارم گرم)
	فرکانس (Hz)	2500	±1	
	روشنی پالس	75	±1	
صافی سطح با جریان پالسی (قطعه کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	دمای الکترولیت (°C)	35	±2	
	زمان تمیزکاری (s)	25	±2	
	جریان (A)	16	±0/1	0.3± (میکرومتر)
فرکانس (Hz)	2500	±1		
	روشنی پالس	75	±1	
	دمای الکترولیت (°C)	35	±2	
زمان تمیزکاری (s)	25	±2		

تحلیل حساسیت به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی گفته می‌شود. حساسیت از رابطه‌ی (4) محاسبه می‌شود.

$$\text{حساسیت} = \frac{\text{تغییرات خروجی}}{\text{تغییرات ورودی}} \quad (4)$$

جدول 4 حساسیت پارامترهای خروجی در فرآیند تمیزکاری به کمک پلاسمای الکترولیتی را نشان می‌دهد.

و اثر برخورد پلاسما با دمای بالا به سطح قطعه کار به‌طور واضح در شکل‌های 19 و 20 پیداست.

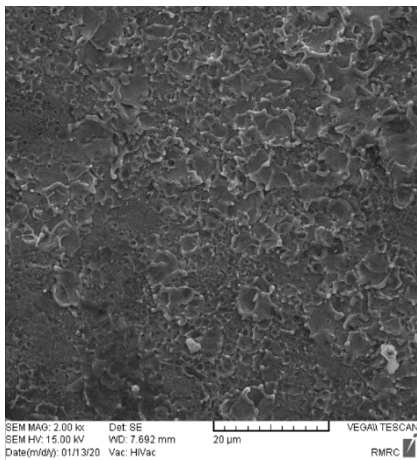


Fig. 19 Surface of a workpiece after plasma cleaning under conditions of 20 amp, 3000 Hz, 45% duty cycle, process time of 20 sec, electrolyte temperature of 55 C

شکل 19 قطعه تمیزکاری شده با فرایند پلاسمای الکترولیتی با جریان 20 آمپر، فرکانس پالس 3000 هرتز، روشنی پالس 45 درصد، دمای الکترولیت 55 درجه سانتی‌گراد و زمان تمیزکاری 20 ثانیه

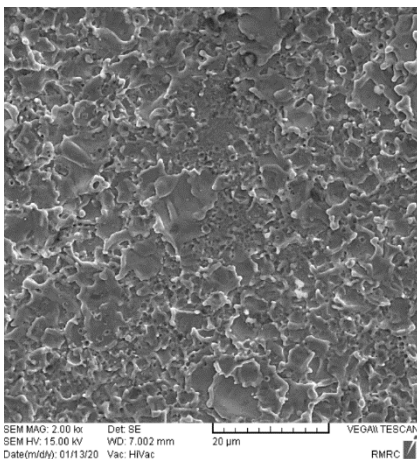


Fig. 20 Surface of a workpiece after plasma cleaning under conditions of 18 amp, 2000 Hz, 75% duty cycle, process time of 15 sec, electrolyte temperature of 55 C

شکل 20 قطعه تمیزکاری شده با فرایند پلاسمای الکترولیتی با جریان 18 آمپر، فرکانس پالس 2000 هرتز، روشنی پالس 75 درصد، دمای الکترولیت 55 درجه سانتی‌گراد و زمان تمیزکاری 15 ثانیه

شکل 21 سطح قطعه کار بعد از تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان متناوب را نشان می‌دهد. در سطح این قطعه کار، اثرات برخورد پلاسما به سطح توسط یک‌لایه اکسید، پوشیده شده است.

جدول 5 ضریب همبستگی هر کدام از پارامترهای ورودی را بر پارامترهای خروجی بیان می‌کند.

از این دو نوع جریان در شکل 17 آورده شده است. این نمودار اثر اکسیداسیون در صافی سطح را به‌خوبی نشان می‌دهد. قطعه کار 19 که در طول فرایند افزایش وزن پیدا کرده بود دارای صافی سطح بسیار خوبی شده است. همچنین قطعه کارهای شماره 12 و 24 که زمان انجام فرایند 25 ثانیه است و فرصت انجام اکسیداسیون فراهم می‌باشد صافی سطح در آزمون‌های با جریان AC بهتر از جریان پالسی است. برای بررسی سطح قطعه کار از میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است. شکل 18 زنگار و کثیفی‌ها بر روی سطح کار قبل تمیزکاری را نشان می‌دهد.

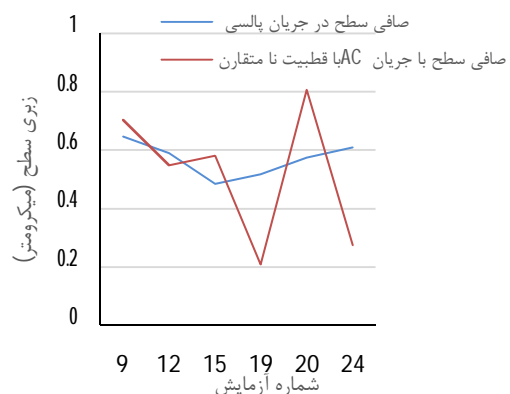


Fig. 17 Comparison of the surface roughness between pulsed and alternative tests

شکل 17 مقایسه زبری سطح در فرایند تمیزکاری با جریان پالسی و متناوب (AC)

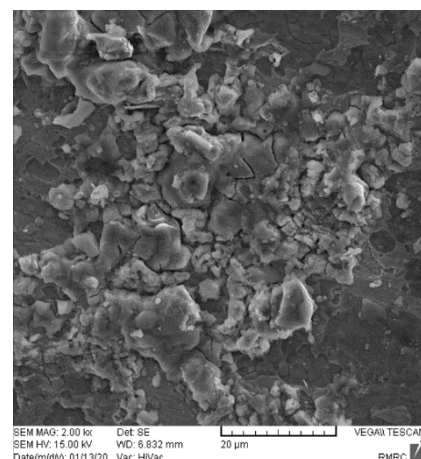


Fig. 18 Surface of a workpiece before cleaning

شکل 18 سطح قطعه کار قبل از تمیزکاری

پس انجام فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی روی قطعه کارها، کثیفی‌ها و زنگ‌زدگی از سطح قطعه کار پاک‌شده‌اند

جدول 5 کوواریانس و ضریب هم‌بستگی متغیرهای مستقل

Table 5 Covariance of the independent variables

عنوان آزمایش	تأثیر پارامتر X روی Y	کوواریانس	ضریب هم‌بستگی	بررسی	
				شدت اثر	نوع اثر
آزمون با جریان مستقیم (قطعه‌کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	ولتاژ (V)	109/75	0/585	زیاد	مستقیم
آزمون با جریان پالسی (قطعه‌کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	دمای الکترولیت (°C)	-96	-0/128	ناچیز	معکوس
	زمان تمیزکاری (s)	119	0/431	زیاد	مستقیم
آزمون با جریان پالسی (قطعه‌کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	جریان (A)	8/762	0/659	زیاد	مستقیم
	فرکانس (Hz)	-225/3	-0/0623	ناچیز	معکوس
آزمون با جریان پالسی (قطعه‌کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	روشنی پالس	-9/995	-0/124	ناچیز	معکوس
	دمای الکترولیت (°C)	-21/142	-0/2679	زیاد	معکوس
آزمون با جریان پالسی (قطعه‌کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	زمان تمیزکاری (s)	8/904	0/2439	زیاد	مستقیم
	جریان (A)	0/0741	0/2563	زیاد	مستقیم
آزمون با جریان پالسی (قطعه‌کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	فرکانس (Hz)	5/4336	0/068	ناچیز	مستقیم
	روشنی پالس	0/0239	0/013	ناچیز	مستقیم
آزمون با جریان پالسی (قطعه‌کار با ضخامت 1/5 میلی‌متر)	دمای الکترولیت (°C)	0/3514	0/204	زیاد	مستقیم
	زمان تمیزکاری (s)	0/258	0/3244	زیاد	مستقیم

و آن را ذوب می‌کند؛ اما با پالسی شدن جریان، کنترل روی فرایند بالاتر رفته و می‌توان جریان را تا حد زیادی افزایش داد. پارامترهای ولتاژ و دمای الکترولیت و زمان تمیزکاری در انجام فرایند با ولتاژ مستقیم اثر مستقیم بر میزان باربرداری داشته و با افزایش هر یک از این پارامترها، باربرداری نیز افزایش پیدا می‌کند. در آزمون‌های تمیزکاری با جریان پالسی، جریان و زمان تمیزکاری بر میزان باربرداری تأثیر مستقیم دارند.

5- مراجع

- [1] Braithwaite, N s. J. 2000. "Introduction to gas discharges." *Plasma Sources Science and Technology* 9:517-527.
- [2] Yerokhin, A. L. "Plasma electrolysis for surface engineering." *Surface and coatings technology* 122.2-3 (1999): 73-93.
- [3] Liang, Jiandong. "A study on the cleaning and modification of metal surfaces by direct current cathodic electrolytic plasma process." (2013).
- [4] Yerokhin, AL, X Nie, A Leyland, A Matthews, Dowey, and SJ. 1999. "Plasma electrolysis for surface engineering." *Surface & Coatings Technology* 122(2-3):73-93.
- [5] Maksimov, A I., I K. Naumova, and A V. Khlyustova. 2008. "Effect of the properties of Solution on the transfer of componets to the plasma zone and their emission in an Electrolytic-Cathode Glow Discharge." *High Engery Chemistry* 42(6):488-491.
- [6] Yerokhin, AL, X Nie, A Leyland, A Matthews, Dowey, and SJ. 1999. "Plasma electrolysis for surface engineering." *Surface & Coatings Technology* 122(2-3):73-93.

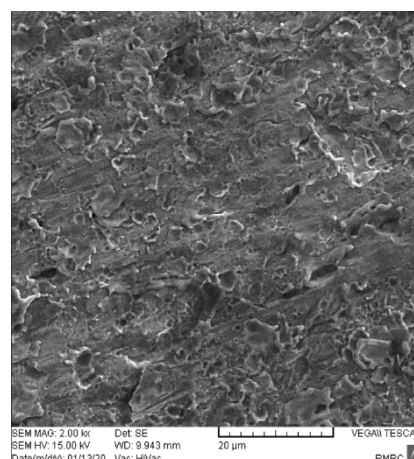


Fig. 21 Surface of a workpiece after plasma cleaning under conditions of positive current of 18 amp, reversed current of 5 amp, 3500 Hz, 45% duty cycle, process time of 5 sec, electrolyte temperature of 35 C

شکل 21 قطعه تمیزکاری شده با فرایند پلاسمای الکترولیتی با جریان مثبت 18 آمپر، جریان معکوس 5 آمپر، فرکانس 3500 هرتز، روشن پالس 45 درصد، دمای الکترولیت 35 درجه سانتی‌گراد و زمان تمیزکاری 5 ثانیه

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فرآیند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی به کمک سه شکل سیگنال مستقیم، پالسی و متناوب انجام شد. به‌طور کلی میزان باربرداری در فرآیند تمیزکاری بسیار کم بوده و این فرآیند برای زدودن آلودگی‌ها و زنگار از سطوح قطعه‌کار مناسب می‌باشد. در فرایند تمیزکاری با پلاسمای الکترولیتی با جریان مستقیم، پلاسمای تنها در محدوده‌ی جریان کوچکی تشکیل می‌شود. پایین‌تر از این محدوده پلاسمای تشکیل نشده و بیشتر از این محدوده پلاسمای آسیب جدی به قطعه‌کار وارد کرده

- "Pulse current plasma assisted electrolytic cleaning of AISI 4340 steel." *Journal of Materials Processing Technology* 210.1 (2010): 54-63.
- [12] Rajput, Ajeet Singh, Henning Zeidler, and Andreas Schubert. "Analysis of voltage and current during the Plasma electrolytic Polishing of stainless steel."
- [13] Kumruoglu, Levent Cenk, and Ahmet Özel. "Electrolytic Plasma Surface Cleaning of Industrial Metallic Components." *Acta Physica Polonica A* 125.2 (2014): 379-381.
- [14] Nestler, Klaus, "Plasma Electrolytic Polishing—an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range." *Procedia CIRP* 42 (2016): 503-507.
- [7] Aliev, M. Kh, A. Sabour, and T. Shahrabi. "Study of corrosion protection of different stainless steels by nanocrystalline plasma electrolysis." *Protection of Metals* 44.4 (2008): 402.
- [8] Tyurin, YN and AD Porgrebnjak. 2002. "Specific features of electrolytic-plasma quenching." *Technical Physics* 47(11):1463-1464.
- [9] Paulmier, T, J M. Bell, and PM Fredericks. 2008. "Plasma electrolytic deposition of titanium dioxide nanorods and nano-particles." *Journal of Materials Processing Technology* 208(1-3):117-123.
- [10] Meletis, E. I., "Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel surfaces." *Surface and Coatings Technology* 150.2-3 (2002): 246-256.
- [11] Yerokhin, A., A. Pilkington, and A. Matthews.