

بررسی ماشین کاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب آلومینیوم تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم

علی اکبر لطفی نیستانک^{۱*}، سعید دانشمند^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

*مسئول مکاتبات: Aklotfi@Gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۴)

چکیده: نانو ذرات مورد استفاده در مواد مرکب زمینه فلزی دارای انواع مختلف و خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی متفاوتی می باشند که باعث بهبود سختی، مقاومت مکانیکی، سایش و خواص دمایی می شوند و قابلیت های ماشینکاری مواد را تغییر می دهند. در این تحقیق به بررسی پارامترهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب آلومینیوم تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم پرداخته می شود. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی و خاموشی پالس و نانو ذرات اکسید تیتانیوم بر نرخ براده برداری، سایش ابزار و زبری سطح می باشد. از نفت سفید به عنوان دی الکتریک و الکتروود مسی به عنوان ابزار و تجزیه و تحلیل واریانس برای اعتبار سنجی آزمایشگاهی استفاده می شود. نتایج نشان داد نانو ذرات سرامیکی اکسید تیتانیوم با توجه به اینکه غیر هادی هستند تاثیر زیادی بر پارامترهای ماشینکاری ندارند و حین فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی ذوب نمی شوند و شدت جریان و زمان روشنی بیشترین تاثیر بر نرخ براده برداری، سایش ابزار و زبری سطح دارند. با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس سایش ابزار و زبری سطح زیاد شده و با افزایش زمان خاموشی پالس سایش ابزار کم می شود. به طور متوسط نرخ سایش الکتروود ابزار در آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد به میزان ۳/۴۶ درصد معادل ۰/۳۴۶ گرم بیشتر از نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴ از نظر وزنی است.

واژه های کلیدی:

ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماده مرکب زمینه فلزی، نانو ذرات اکسید تیتانیوم، نرخ براده برداری، سایش ابزار.

۱- مقدمه

ماشینکاری آنها اثر گذار باشد. استفاده از روش های ماشینکاری سنتی برای مواد مرکب زمینه فلزی در بعضی مواقع مشکل و یا حتی غیر ممکن می باشد و باعث سایش زیاد ابزار و افزایش زمان ماشینکاری می شود [۱-۲]. ماشینکاری تخلیه الکتریکی فرایندی است که برای فلزات هادی با سختی بالا استفاده می کنند. این فرایند مواد را بوسیله جرقه ای که بین ابزار و قطعه کار هادی بوجود می آید برداشت می کند. ابزار و قطعه کار در یک مایع دی الکتریک که توسط ولتاژ بالا یونیزه می شود قرار دارند و با تکرار جرقه

تولید مواد مرکب زمینه فلزی جدید نیاز به روش هایی برای شکل دهی و ماشینکاری دارند. مواد مرکب زمینه فلزی که کاربرد زیادی دارند آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم می باشد که با تقویت کننده هایی مثل SiC، TiO_2 ، ZrO_2 ، WC، TiC، Al_2O_3 ، B_4C و غیره ترکیب می شوند. هدف اصلی از تولید مواد مرکب زمینه فلزی آلومینیوم با تقویت کننده های مختلف بدست آوردن موادی با وزن کم، استحکام بالا و سختی بالا به منظور کاهش هزینه ها می باشد در صورتیکه ممکن است بر روی قابلیت

ها بین ابزار و قطعه کار شکل پروفیل ابزار بر روی قطعه کار ایجاد می شود. ماشینکاری تخلیه الکتریکی دارای یکسری پارامترهای الکتریکی و یکسری پارامترهای غیر الکتریکی می باشد. پارامترهای الکتریکی شامل زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، گپ ماشینکاری و پلاریته می باشد. تغییر در این پارامترها بر روی کیفیت جرقه و نرخ براده برداری تاثیر دارد. پارامترهای غیر الکتریکی شامل دوران ابزار، شستشو و هندسه ابزار و جنس ابزار می باشد. تغییر در این پارامترها بر کیفیت ماشینکاری تاثیر می گذارد [۳-۴]. تحقیقات مختلفی در زمینه ماشینکاری تخلیه الکتریکی مواد مرکب زمینه فلزی انجام شده است و اکثر آنها نیز به این نتیجه رسیده که ماشینکاری تخلیه الکتریکی مواد مرکب زمینه فلزی دارای زبری سطح زیادی می باشد و آن نیز به دلیل متفاوت بودن زمینه و فاز دوم است. به همین منظور در این تحقیق از نانو ذرات به عنوان فاز دوم استفاده شد که کمترین تاثیر را بر روی زبری سطح داشته باشند. Velmurungan و همکاران اثر پارامترهای شدت جریان، زمان روشنی پالس، ولتاژ و فشار دی الکتریک بر نرخ برداشت مواد، سایش ابزار و زبری سطح آلومینیوم ۶۰۶۱ تقویت شده با ۱۰ درصد Sic و ۴ درصد گرافیت مورد بررسی قرار دادند. آنها از نرم افزار Minitab برای طراحی آزمایش و از تکنیک مجموع مربعات برای محاسبه ضرائب رگرسیون و آنالیز واریانس برای تایید مدل های توسعه داده شده استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش شدت جریان، زمان روشنی پالس و فشار دی الکتریک نرخ برداشت ذرات افزایش می یابد و با افزایش ولتاژ نرخ برداشت کاهش می یابد. سایش ابزار با افزایش شدت جریان و ولتاژ افزایش و با افزایش زمان روشنی پالس و فشار دی الکتریک کاهش می یابد. آنها به این نتیجه رسیدند که زبری سطح با افزایش شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی پالس و فشار دی الکتریک افزایش می یابد [۵]. Yan-Cherng Lin و همکاران تاثیر پارامترهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی را بر روی سرامیک های اکسید آلومینیوم با ۳۰ درصد TiC را مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای ماشینکاری شامل پلاریته، حداکثر جریان، جریان کمکی با ولتاژ بالا، زمان روشنی پالس و ولتاژ بار بودند. تاثیر این پارامترها بر نرخ برداشت مواد،

سایش ابزار و زبری سطح مورد بررسی قرار گرفت. برای بهینه سازی آزمایشات از آرایه متعامد L18 و آنالیز واریانس استفاده نمودند. نتایج نشان داد که روش ماشینکاری تخلیه الکتریکی یک روش مناسب برای ماشینکاری سرامیک های هادی می باشد [۶]. Hung و همکاران ماشینکاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب تقویت شده با کاربید سیلیسیم را مورد بررسی قرار دادند آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از ذرات کاربید سیلیسیم در زمینه آلومینیوم باعث کاهش نرخ برداشت مواد می شود و ذرات کاربید سیلیسیم ذوب نمی شوند و این ذرات مجددا در لایه دوباره منجمد شده باقی می ماند و در این منطقه و منطقه متاثر از حرارت ترکی مشاهده نشد. با کنترل توان می توان نرخ براده برداری و عمق لایه دوباره منجمد شده را کنترل نمود و مهمترین پارامتر در زبری سطح شدت جریان می باشد [۷]. Patel و همکاران تاثیر پارامترهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر ماده مرکب تقویت شده با کاربید سیلیسیم و کاربید تیتانیوم ($Al_2O_3-SiC-TiC$) را مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای مورد بررسی آسیب سطح و نرخ برداشت مواد بود. آنها به این نتیجه رسیدند که ماشینکاری تخلیه الکتریکی یک روش مناسب برای ماشینکاری مواد مرکب سرامیکی هادی بوده و پارامترهای ماشینکاری بر استحکام این مواد و منطقه آسیب دیده سطح اثر دارد [۸]. Narender و همکاران به این نتیجه رسیدند که ماشینکاری مواد مرکب آلومینیوم تقویت شده به روشهای سنتی مشکل و دارای دقت ابعادی و کیفیت سطح پایین می باشد به همین منظور به بررسی ماشینکاری مواد مرکب آلومینیوم تقویت شده با ده درصد کاربید سیلیسیم به روش ماشینکاری تخلیه الکتریکی پرداخته و تاثیر شدت جریان، زمان روشنی پالس، فشار دی الکتریک را بر روی نرخ برداشت مواد، سایش ابزار، گشادی کناری و زبری سطح مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که بالاترین نرخ برداشت با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس بدست می آید و بر روی گشادی کناری و زبری سطح اثر می گذارد. سایش ابزار با افزایش شدت جریان افزایش یافته و بر روی دقت ابعادی اثر می گذارد. فشار دی الکتریک نیز بر روی MRR و TWR تاثیر

سایش ابزار بررسی کردند. لازم به ذکر است که آنها در جهت طراحی آزمایشات از جدول اورتاگونال ۹ تایی (L9) و در جهت تعیین اولویت تشابه به پاسخ مطلوب (Topsis) برای بهینه سازی پاسخ‌های فرایند از تحلیل وابستگی گری استفاده کردند و نتایج آنها توسط تجزیه و تحلیل آماری و نرم افزاری به گونه‌ای تعیین و مدل سازی شد تا بیشترین نرخ براده برداری به ازای کمترین زبری سطح حاصل شود [۱۳]. با توجه به تحقیقات و آزمایشات انجام شده دیده می شود که تحقیقات خاصی در رابطه با ماشینکاری نانو کامپوزیت آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با اکسید تیتانیوم انجام نشده است. در این تحقیق به بررسی پارامترهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی شامل شدت جریان، زمان روشنی و خاموشی پالس و ولتاژ بر روی نرخ برداشت مواد، سایش ابزار و زبری سطح پرداخته می شود.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

۲-۱- ماده مرکب آلومینیوم تقویت شده با نانو اکسید تیتانیوم

ماده مرکب زمینه انتخاب شده برای این تحقیق آلومینیوم ۲۰۲۴ می باشد. ماده تقویت کننده ذرات نانو اکسید تیتانیوم (TiO_2) با درصد وزنی ۵ درصد است. استفاده از تقویت کننده های نانو در مقایسه با تقویت کننده های میکرو می توانند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی ماتریس را بهبود بخشند. اضافه کردن ذرات نانو اکسید تیتانیوم در آلومینیوم باعث افزایش استحکام کششی، سختی و مقاومت در برابر ضربه می شود. پراکندگی خوب و یکنواخت نانو ذرات در زمینه باعث افزایش مقاومت تسلیم و خزش ماده مرکب می شود و حتی با کاهش نانو ذرات باز این خواص حفظ می شود و عملکرد آنها در دماهای بالا افزایش می یابد [۱۴]. نانو کامپوزیت آلومینیوم-اکسید تیتانیوم در دسته ای از نانو کامپوزیت های زمینه فلزی قرار دارد. در این ماده مرکب زمینه آلومینیوم با ذرات اکسید تیتانیوم تقویت می شود که ترکیبی از خواص فلزی و خواص سرامیکی را بوجود می آورد و باعث افزایش خواص فیزیکی و شیمیایی ماده مرکب می شود. مواد

دارد [۹]. Dvived و همکاران قابلیت ماشینکاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب Al6063 تقویت شده با SiCp را مورد بررسی قرار داده و تنظیمات بهینه برای ماکزیمم نرخ برداشت مواد را برای این ماده مرکب بدست آوردند [۱۰]. Karthikeyan و همکاران با استفاده از روش تاگوچی به مدلسازی ریاضی نرخ براده برداری، زبری سطح و نرخ سایش ابزار در ماشین کاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات سیلیسیم کاربرد پرداختند. پارامترهای ورودی فرآیند شامل جریان پالس ولتاژ گپ، مدت زمان روشنی پالس و درصد ذرات SiC و پارامترهای خروجی عبارتند از کیفیت سطح و نرخ براده برداری که پس از عملیات ماشین کاری با استفاده از روش تاگوچی مقادیر پارامترهای ورودی فرآیند جهت دستیابی به حداکثر نرخ برداشت براده و حداقل زبری سطح بصورت جداگانه استخراج شده است. علاوه بر این با استفاده از تحلیل واریانس میزان تأثیر و اهمیت هر یک از این پارامترها بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری نیز محاسبه گردیده است [۱۱]. Senthilkumar و همکاران با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و طرح L18 به بررسی تأثیر شدت جریان، زمان روشنی پالس و فشار پاشش بر خوردگی ابزار و نرخ براده برداری آلیاژ آلومینیوم Al-MMC با پودر همراه دی الکتریک از جنس TiC پرداخته‌اند. نتایج نشان داد ذرات TiC در طی فرآیند، ذوب نمی شوند و براده برداری بر اثر ذوب ماتریس رخ می دهد، بنابراین با افزایش میزان ذرات، نرخ برداشت براده کاهش می یابد. همچنین مشخص شد شدت جریان بر نرخ خوردگی ابزار و نرخ برداشت براده تأثیر بیشتری دارد. آنها تنظیم زمان روشنی پالس $500\mu s$ و شدت جریان $6A$ را دارای بیشترین نرخ خوردگی ابزار و نرخ برداشت براده تعیین کردند [۱۲]. Kalayarsan و همکارش در سال ۲۰۱۶ از فرایند تخلیه الکتریکی برای ماشین کاری ماده مرکب سرامیکی سیلیکون نیتريد و تیتانیوم نیتريد استفاده نمودند و همچنین این محققان تأثیرات پارامترهای ورودی ماشین کاری شامل زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، فشار پاشش دی الکتریک و شدت جریان را بر روی پاسخ های فرآیند مانند، نرخ براده برداری، زبری سطح و

زبری سطح قطعه کار بوسیله دستگاه زبری سنج-Mahr-M300 RD18 اندازه گیری شد. جهت اندازه گیری آزمایشات یک نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴ (Al2024) به ابعاد ۸۵×۸۵×۱۲ میلیمتر و یک نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد (Al5%TiO₂) به ابعاد ۸۵×۸۵×۴۰ جهت ماشینکاری انتخاب شدند. شکل (۱) ابزار مورد استفاده در این آزمایش از جنس مس به ابعاد ۱۰×۵۰ و قطعه کار را نشان می دهد. مشخصات تنظیمی دستگاه اسپارک در جدول (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱): قطعه کار و الکترود

جدول (۲): پارامترهای طراحی و تنظیم دستگاه اسپارک

مشخصات	پارامترها
آلومینیوم ۲۰۲۴	قطعه کار قطب (-) کاتد
آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۵	قطعه کار قطب (-) کاتد
۴۰×۸۵×۱۲	ابعاد قطعه کار (mm)
مس (Cu)	الکترود قطب (+) آند
∅ ۱۰×۵۰	قطر و اندازه الکترود (mm)
نفت سفید، ۲۵	مایع دی الکتریک، حجم دی الکتریک (lit)
۱- روش غوطه وری ۲- روش جت از کنار	روش پاشش دی الکتریک
۱۰	زمان ماشین کاری (min)
۸۰، ۲۵۰	ولتاژ (V)
۱۰، ۱۵، ۲۰	شدت جریان (A)
۳۵، ۵۰، ۱۰۰	زمان روشنی جرقه (μs)
۳۰، ۷۰، ۲۰۰	زمان خاموشی جرقه (μs)

مرکب زمینه آلومینیوم به دلیل وزن کم، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی خوب، خواص مکانیکی در دمای بالا، مقاومت به سایش بالا و ضریب انبساط حرارتی کم دارای کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف می باشد. روش های ساخت کامپوزیت های زمینه آلومینیوم شامل تکنیک های متالورژی پودر، رسوب افشانی و روش ریخته گری می باشد که هر کدام دارای مزایا و معایبی می باشد [۱۵].

روشی که در این تحقیق برای تولید نانو کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت روش ریخته گری هم زدنی است. استفاده از این روش به علت اختلاف دانسیته بین مایع و ذرات جامد، ویسکوزیته بالا، ترشوندگی ضعیف در زمینه و نسبت سطح به حجم بالا با مشکل آلوده شدن همراه است و خواص مکانیکی آن نسبت به روش های دیگر تولید نانو کامپوزیت ها پایین تر است. در این روش آلومینیوم ذوب و بوسیله پره ای با دور 350 RPM دوران و ذرات نانو پیش گرم شده به آن اضافه می شود. خواص فیزیکی و شیمیایی نانو اکسید تیتانیوم در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): خواص مکانیکی و فیزیکی ماده مرکب ۲۰۲۴ تقویت شده با اکسید آلومینا [۱۵]

علامت شیمیایی	TiO ₂
تیتانیوم	۵۹/۹۳
اکسیژن	۴۰/۵۵
چگالی	۴/۲۳ g/cm ³
جرم مولر	۷۹/۹۳۷۸ g/mol
نقطه ذوب	۱۸۴۳
نقطه جوش	۲۹۷۲

۲-۲- تجهیزات

برای انجام آزمایشات از ماشین اسپارک تهران اکرام مدل 204H استفاده شد و اکثر پارامترهای ماشینکاری روی آن قابل تنظیم است. برای اندازه گیری نرخ براده برداری و سایش ابزار از ترازوی الکتریکی AND-GR-300 با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم استفاده گردید که قبل و بعد از هر آزمایش قطعه کار و ابزار وزن می شود.

۲-۳- طراحی آزمایش

زبری سطح برای آلومینیوم ۲۰۲۴ و ماده مرکب $Al_5\%TiO_2$ مورد بررسی قرار گرفته است. نوع و مقدار پارامترها و چند سطحی بودن آنها در جدول (۳) آمده است.

در این تحقیق اثر پارامترهای ورودی ماشینکاری تخلیه الکتریکی شامل شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بر روی ۳ پارامتر خروجی نرخ برداشت ماده، سایش ابزار و

جدول (۳): طراحی آزمایشات و نتایج پارامترهای خروجی

سطح ۱			سطح ۲			سطح ۳			پارامترهای ورودی
۷۸۰			۷۲۵۰			۷۸۰			(A) ولتاژ (V)
۱۰	۱۵	۲۰	۱۰	۱۵	۲۰	۱۰	۱۵	۲۰	(B) شدت جریان (A)
۳۵	۵۰	۱۰۰	۵۰	۱۰۰	۳۵	۱۰۰	۳۵	۵۰	(C) زمان روشنی پالس (μs)
۳۰	۷۰	۲۰۰	۲۰۰	۳۰	۷۰	۷۰	۲۰۰	۳۰	(D) زمان خاموشی پالس (μs)

زمان ماشینکاری بر حسب دقیقه است [۱۶]. برای اندازه گیری زبری سطح قطعه کار پس از عملیات ماشینکاری از دستگاه زبری سنج مدل Mahr-M300-RD18 با دقت 0.01 میکرون استفاده شد.

برای بهینه سازی تعداد آزمایشات و افزایش تعمیم نتایج به تمام سطوح مورد بررسی از آرایه متعامد L_9 و تکنیک سطوح تکراری با تکرار سطح ولتاژ ۸۰ استفاده شده است زیرا دستگاه مورد استفاده دارای ۲ سطح ولتاژ می باشد. در این تحقیق تعداد آزمایش ها ۹ و تعداد فاکتورها ۴ است.

۳- نتایج و بحث

آزمایشات در دو مرحله برای $Al_5\%TiO_2$ و Al_{2024} انجام شد. پارامترهای خروجی ماشینکاری شامل نرخ براده برداری (MRR)، سایش ابزار (TWR) و زبری سطح (SR) برای هر دو ماده مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۴) و (۵) وزن ابزار و نمونه Al_{2024} و $Al_5\%TiO_2$ را قبل و بعد از ماشینکاری نشان می دهد. جدول (۶) طراحی آزمایش و نرخ براده برداری، سایش ابزار و زبری سطح برای نمونه های آزمایش را نشان می دهد.

برای محاسبه نرخ براده برداری حجمی از رابطه (۱) استفاده شده است.

$$MRR = \frac{(W_1 - W_2)}{\rho_w \times t} \times 10^3 \quad (1)$$

در این رابطه MRR نرخ براده برداری حجمی بر حسب میلیمتر مکعب بر دقیقه (mm^3/min) و W_1 و W_2 وزن قطعه کار قبل و بعد از ماشینکاری، ρ_w چگالی قطعه کار و t زمان ماشینکاری است. سایش ابزار بر حسب میلیمتر مکعب بر دقیقه (mm^3/min) از رابطه (۲) استفاده شد.

$$TWR = \frac{(T_1 - T_2)}{\rho_t \times t} \times 10^3 \quad (2)$$

در این رابطه TWR نرخ سایش ابزار بر حسب (mm^3/min)، T_1 و T_2 وزن ابزار قبل و بعد ماشینکاری، ρ_t چگالی ابزار مسی و t

جدول (۴): اختلاف وزن ابزار و نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴

شماره آزمایش	اختلاف وزن	وزن ابزار بعد از ماشین کاری	وزن ابزار قبل از ماشین کاری	اختلاف وزن	وزن قطعه بعد از ماشین کاری	وزن قطعه قبل از ماشین کاری
۱	۰/۰۰۲	۴۳/۱۱۶	۴۳/۱۱۸	۰/۲۱	۱۴۰/۲۳۳	۱۴۰/۴۴۳
۲	۰/۰۰۴	۴۳/۱۱۲	۴۳/۱۱۶	۰/۱۳۳	۱۴۰/۱۰۰	۱۴۰/۲۳۳
۳	۰/۰۰۲	۴۳/۱۱۰	۴۳/۱۱۲	۰/۱۷۱	۱۳۹/۹۲۹	۱۴۰/۱۰۰
۴	۰/۰۰۱	۴۳/۱۰۹	۴۳/۱۱۰	۰/۰۶۹	۱۳۹/۸۶۰	۱۳۹/۹۲۹
۵	۰/۰۰۲	۴۳/۱۰۷	۴۳/۱۰۹	۰/۰۰۶	۱۳۹/۸۵۴	۱۳۹/۸۶۰
۶	۰/۰۰۷	۴۳/۱۰۰	۴۳/۱۰۷	۰/۰۹۵	۱۳۹/۷۵۹	۱۳۹/۸۵۴
۷	۰/۱۱۰	۴۲/۹۹۰	۴۳/۱۰۰	۰/۱۵۹	۱۳۹/۶۰۰	۱۳۹/۷۵۹
۸	۰/۰۶۰	۴۲/۹۳۰	۴۲/۹۹۰	۰/۰۶۴	۱۳۹/۵۳۶	۱۳۹/۶۰۰
۹	۰/۳۱۰	۴۲/۶۲۰	۴۲/۹۳۰	۰/۸۱۶	۱۳۸/۷۲۰	۱۳۹/۵۳۶

جدول (۵): اختلاف وزن ابزار و ماده مرکب Al5%TiO₂

شماره آزمایش	اختلاف وزن	وزن ابزار بعد از ماشین کاری	وزن ابزار قبل از ماشین کاری	اختلاف وزن	وزن قطعه بعد از ماشین کاری	وزن قطعه قبل از ماشین کاری
۱	۰/۰۰۲	۴۳/۱۷۰	۴۳/۱۷۲	۰/۰۲۷	۱۳۳/۳۲۱	۱۳۳/۳۴۸
۲	۰/۰۰۷	۴۳/۱۶۳	۴۳/۱۷۰	۰/۱۴۰	۱۳۳/۱۸۱	۱۳۳/۳۲۱
۳	۰/۰۱۲	۴۳/۱۵۱	۴۳/۱۶۳	۰/۳۶۳	۱۳۲/۸۱۸	۱۳۳/۱۸۱
۴	۰/۰۰۴	۴۳/۱۴۷	۴۳/۱۵۱	۰/۰۶۶	۱۳۲/۷۵۲	۱۳۲/۸۱۸
۵	۰/۰۰۱	۴۳/۱۴۶	۴۳/۱۴۷	۰/۷۷۲	۱۳۱/۹۸۰	۱۳۲/۷۵۲
۶	۰/۰۰۷	۴۳/۱۳۹	۴۳/۱۴۶	۰/۱۳۳	۱۳۱/۸۴۷	۱۳۱/۹۸۰
۷	۰/۰۰۲	۴۳/۱۳۷	۴۳/۱۳۹	۰/۱۰۰	۱۳۱/۷۴۷	۱۳۱/۸۴۷
۸	۰/۰۰۶	۴۳/۱۳۱	۴۳/۱۳۷	۰/۰۴۶	۱۳۱/۷۰۱	۱۳۱/۷۴۷
۹	۰/۰۱۳	۴۳/۱۱۸	۴۳/۱۳۱	۰/۴۲۲	۱۳۱/۲۷۹	۱۳۱/۷۰۱

جدول (۶): طراحی آزمایشات و نتایج پارامترهای خروجی

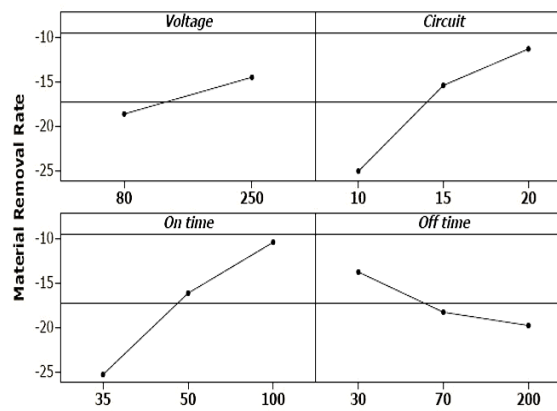
شماره آزمایش	پارامترهای ورودی				پارامترهای خروجی ماشینکاری Al5%TiO ₂			پارامترهای خروجی ماشینکاری Al 2024		
	ولتاژ (A)	شدت جریان (B)	زمان روشنی پالس (C)	زمان خاموشی پالس (D)	زبری سطح (μm)	نرخ براده (Cm ³ /min)	نرخ سایش ابزار (Cm ³ /min)	زبری سطح (μm)	نرخ براده (Cm ³ /min)	نرخ سایش ابزار (Cm ³ /min)
۱	۱	۱	۱	۱	۳/۴۲۷	۰/۰۲۷	۰/۰۰۲	۳/۲۱۵	۰/۲۱۰	۰/۰۰۲
۲	۱	۲	۲	۲	۴/۲۶۹	۰/۱۴۰	۰/۰۰۷	۳/۶۴۹	۰/۱۳۳	۰/۰۰۴
۳	۱	۳	۳	۳	۵/۷۹۳	۰/۳۶۳	۰/۰۱۲	۴/۷۵۶	۰/۱۷۱	۰/۰۰۲
۴	۲	۱	۲	۳	۳/۱۱۶	۰/۰۶۶	۰/۰۰۴	۳/۱۷۲	۰/۰۶۹	۰/۰۰۱
۵	۲	۲	۳	۱	۶/۸۱۷	۰/۷۲۲	۰/۰۰۱	۳/۱۹۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲
۶	۲	۳	۱	۲	۵/۲۱۱	۰/۱۳۳	۰/۰۰۷	۴/۵۶۰	۰/۰۹۵	۰/۰۰۷
۷	۳	۱	۳	۲	۵/۱۱۷	۰/۱۰۰	۰/۰۰۲	۴/۷۲۹	۰/۱۵۹	۰/۱۱۰
۸	۳	۲	۱	۳	۳/۲۹۶	۰/۰۴۶	۰/۰۰۶	۳/۹۱۷	۰/۰۶۴	۰/۰۶۰
۹	۳	۳	۲	۱	۶/۹۱۶	۰/۴۲۲	۰/۰۱۳	۷/۱۹۶	۰/۸۱۶	۰/۳۱۰

۱-۳- تحلیل نتایج نرخ براده برداری

تأثیر پارامترهای ورودی ماشینکاری تخلیه الکتریکی شامل شدت جریان، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و ولتاژ بر نرخ براده برداری برای ماده مرکب آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با ۵ درصد نانو کامپوزیت اکسید تیتانیوم در شکل (۲) نشان داده شده است.

با توجه به شکل با افزایش شدت جریان، زمان روشنی پالس و ولتاژ نرخ براده برداری افزایش می یابد. با افزایش شدت جریان، زمان روشنی پالس و ولتاژ انرژی جرقه افزایش پیدا نموده و در نتیجه نرخ براده برداری زیاد می شود. با افزایش زمان روشنی جرقه قطر کانال پلاسما افزایش یافته و یونهای مثبت فعال تر شده و از نمونه که به قطب منفی متصل است امکان برداشت ذرات آنها بیشتر می شود. با افزایش زیاد زمان روشنی پالس به دلیل مسائل ترمودینامیکی پیش آمده و انتقال حرارت، نرخ براده برداری به تدریج روند نزولی پیدا نموده. شکل (۳) مقایسه نرخ براده برداری برای Al2024 و Al2024 تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم در ۹ آزمایش را نشان می دهد. وجود ذرات نانو TiO₂ در زمینه Al2024 با توجه به اینکه مقاومت حرارتی را افزایش می دهد و هدایت الکتریکی را کاهش می دهد تأثیر زیادی در نرخ براده برداری ندارد و این نوع کامپوزیت قابلیت ماشینکاری تخلیه الکتریکی خوبی دارد اگر چه نرخ براده برداری در مقایسه با Al2024 کمتر می باشد. کاهش نرخ براده برداری Al5%TiO₂ در مقایسه با Al2024 به دلیل ذرات TiO₂ موجود در زمینه، افزایش

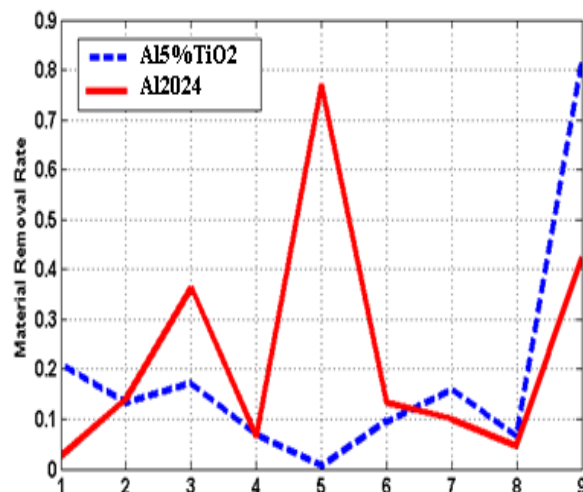
Main Effects Plot for SN ratios
Al2024 - Titanium Carbide 5%



Signal-to-noise: Larger is better

شکل (۲): تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری Al5%TiO₂

مقاومت حرارتی و اثرات محافظتی نانو ذرات می باشد.



شکل (۳): مقایسه نرخ براده برداری برای Al5%TiO2 و Al2024

از جداول (۷) و (۸) تحلیل واریانس برای نرخ براده برداری دو نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴ و آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانوذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد، ملاحظه می شود که برای سطح اطمینان ۹۵ درصد با مقدار P کمتر از ۵ درصد اثرات ولتاژ، شدت جریان، زمان خاموشی پالس و زمان روشنایی پالس بعنوان اثرات بحرانی و مهم فرآیند نرخ براده برداری AL2024 شناخته می شوند و اثرات زمان روشنایی پالس، زمان خاموشی پالس، شدت جریان و ولتاژ بعنوان اثرات بحرانی و مهم فرآیند نرخ براده برداری برای Al5%TiO2 شناخته می شوند. لازم به ذکر است درصد تأخیر هر پارامتر P مطابق با محاسبات واریانس کمتر از (0.01) خیلی مؤثر است و بین (0.01-0.05) مؤثر و بیشتر از (0.05) بی تأثیر می باشد و هر چه نرخ براده برداری بیشتر باشد مطلوب تر است و با توجه به اینکه نتایج رگرسیون به صورت مرتبه اول خطی بدست آمد، اگر مرحله بعد را ادامه دهیم بسیار کوچک محاسبه می شد و بی-تأثیر است. از رابطه های (۳) و (۴) مربوط به معادلات رگرسیون نرخ براده برداری مربوط به دو نمونه نشان داده شده است. می توان نتیجه گرفت که معادلات مربوطه تقریب بسیار خوبی برای پیش-بینی میزان MRR است.

$$Ra = -0.476 + 0.00117 \text{ Voltage} + 0.0242 \text{ Current} + 0.00497 \text{ on Time} - 0.00104 \text{ off Time} \quad (۳)$$

$$Ra = 0.263 - 0.00168 \text{ Voltage} + 0.0215 \text{ Current} - 0.00127 \text{ on Time} - 0.00113 \text{ off Time} \quad (۴)$$

در طول فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی ذرات سرامیک TiO2 ذوب نمی شوند و این زمینه اطراف نانو ذرات است که ذوب و تبخیر می شود. افزایش زمان روشنایی پالس نیز تا یک اندازه باعث کاهش نرخ براده برداری می شود زیرا تجمع ذرات نانو سرامیک در کانال پلاسما زیاد می شود. افزایش ولتاژ و گپ نیز دز نرخ براده برداری و تشکیل کانال پلاسما موثر است. با افزایش ولتاژ و گپ ذرات نانو سرامیک TiO2 راحت تر از بین ابزار و قطعه کار دور می شوند و کانال پلاسما قوی زودتر تشکیل می شود.

۳-۲- تحلیل واریانس نرخ براده برداری

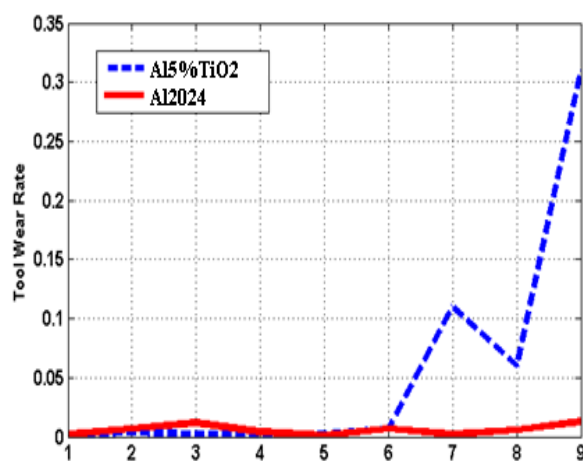
جدول (۷): تجزیه و تحلیل واریانس نرخ براده برداری Al5%TiO2

پارامتر	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر
ولتاژ	۱	۰/۰۳۹۶	۰/۰۳۹۶	۰/۰۶۲	۰/۴۵۶	۴
شدت جریان	۲	۰/۱۲۳۶	۰/۰۶۱۸	۱/۰۳	۰/۴۱۳	۳
زمان روشنایی پالس	۲	۰/۱۷۸۴	۰/۰۸۹۲	۱/۷۵	۰/۲۵۲	۱
زمان خاموشی پالس	۲	۰/۱۴۲۹	۰/۰۷۱۴	۱/۲۵	۰/۳۵۱	۲

جدول (۸): تجزیه و تحلیل واریانس نرخ براده برداری آلومینیوم ۲۰۲۴

پارامتر	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تاثیر
ولتاژ	۱	۰/۰۸۱۷	۰/۰۸۱۷	۱/۴۷	۰/۲۶۴	۱
شدت جریان	۲	۰/۱۳۸۱	۰/۰۶۹	۱/۲۵	۰/۳۵۲	۲
زمان روشنی پالس	۲	۰/۰۹۸۶	۰/۰۴۹۳	۰/۸۰	۰/۴۹۴	۴
زمان خاموشی پالس	۲	۰/۱۰۵۹	۰/۰۵۲۹	۰/۸۷	۰/۴۶۵	۳

است. علت این امر به تغییر شرایط طبق جدول تاگوچی مربوط می شود و الزاماً به دلیل استفاده از اکسید تیتانیوم نیست. مقایسه نرخ سایش ابزار برای ماشینکاری Al2024 و Al5%TiO₂ نشان می دهد که ذرات سرامیکی نانو TiO₂ در کانال پلازما به دام افتاده و برای ادامه فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیاز به فشار بیشتر دی الکتریک می باشد و در نتیجه نرخ سایش ابزار کاسته می شود. افزایش سایش ابزار به انرژی جرقه بین دو الکترود بستگی دارد. با افزایش قطر کانال پلازما یا به عبارتی افزایش زمان جرقه دانسیته انرژی کاهش می یابد و سایش ابزار کم می شود.



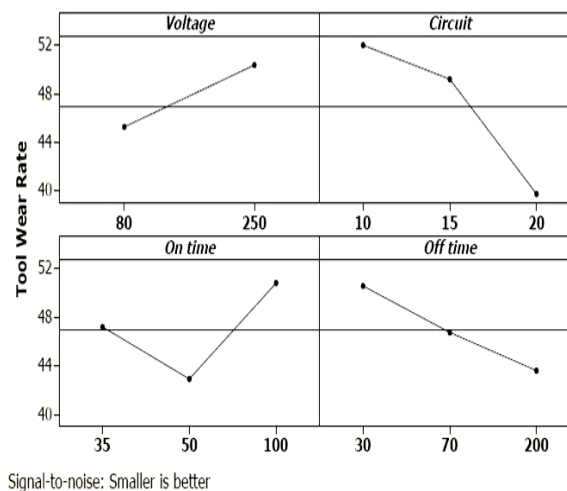
شکل (۵): مقایسه نرخ سایش ابزار برای Al5%TiO₂ و Al2024

نرخ سایش ابزار را می توان با به کار بردن جنس ابزارهایی که قابلیت هدایت الکتریکی بالا، مقاومت حرارتی و سایش بالا دارند نیز بهبود بخشید. کربن موجود در دی الکتریک نیز تا حدودی می تواند از فرسایش ابزار جلوگیری کند. معمولاً افزایش زمان روشنی پالس، کم نمودن شدت جریان و زمان خاموشی پالس

۳-۳- تحلیل نتایج نرخ سایش ابزار (TRW)

سایش الکترود ابزار یک فرایند دینامیکی است که به طور همزمان فرایندهای مختلفی روی آن تاثیر دارند [۱۷]. ماشینکاری تخلیه الکتریکی فرایندی است که به طور همزمان از ابزار و قطعه کار باربرداری می شود. تغییرات نرخ سایش ابزار بر روی نمونه Al5%TiO₂ بر حسب شدت جریان، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی و ولتاژ در شکل (۴) نشان داده شده است.

Main Effects Plot for SN ratios
Al2024 - Titanium Carbide 5%



شکل (۴): تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ سایش ابزار

با توجه به شکل دیده می شود با افزایش ولتاژ و زمان روشنی پالس نرخ سایش ابزار زیاد می شود همچنین مقایسه تاثیر نانو ذرات TiO₂ در مقایسه با حالت بدون ذرات نانو در آلومینیوم ۲۰۲۴ در شکل (۵) نشان داده شده است. در ۶ آزمایش نخست نتایج بر روی هم منطبق بوده اند اما در سه آزمایش دیگر شرایط تغییر کرده

آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو اکسید تیتانیوم ۵٪ شناخته می‌شود. روابط ۵ و ۶ رگرسیون مربوط به فرسایش الکتروود ابزار را به ترتیب برای دو نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو کامپوزیت اکسید تیتانیوم ۵٪ و آلومینیوم ۲۰۲۴ نشان می‌دهد.

$$Ra = -0.00333 - 0.000025 \text{ Voltage} + 0.000800 \text{ Current} - 0.000015 \text{ on Time} \quad (5)$$

$$Ra = 0.081 - 0.000650 \text{ Voltage} + 0.00687 \text{ Current} - 0.00016 \text{ on Time} - 0.000407 \text{ off Time} \quad (6)$$

امکان نشستن کربن بر روی ابزار را فراهم کرده و در نتیجه سایش ابزار کم می‌شود.

۳-۴- تحلیل واریانس نرخ سایش TWR

از جداول (۹) و (۱۰) تحلیل واریانس برای فرسایش الکتروود ملاحظه می‌شود که برای سطح اطمینان ۹۵ درصد با مقدار P کمتر از ۵ درصد، اثرات شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بعنوان اثرات بحرانی و مهم برای نرخ سایش ابزار

جدول (۹): تجزیه و تحلیل واریانس نرخ سایش ابزار Al5%TiO₂

پارامتر	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر
ولتاژ	۱	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۹۷	۰/۳۵۸	۲
شدت جریان	۲	۰/۰۰۰۱۰۴	۰/۰۰۰۰۵۲	۷/۰۹	۰/۰۲۶	۱
زمان روشنی پالس	۲	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۴۲	۰/۶۷۸	۳
زمان خاموشی پالس	۲	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۱۷	۰/۸۴۶	۴

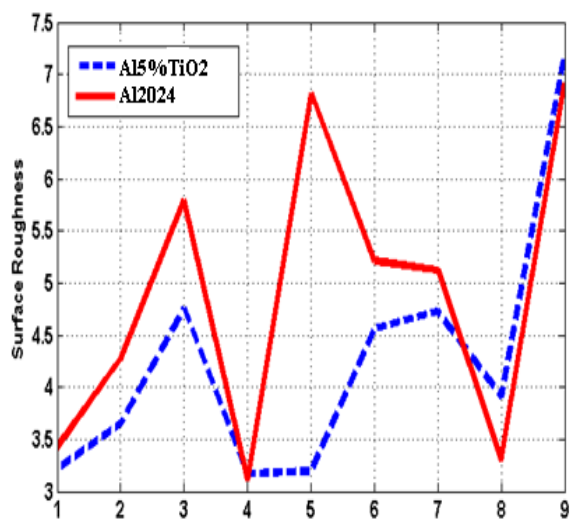
جدول (۱۰): تجزیه و تحلیل واریانس نرخ سایش ابزار آلومینیوم ۲۰۲۴

پارامتر	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر
ولتاژ	۱	۰/۰۱۲۲	۰/۰۱۲۲	۱/۱۸	۰/۳۱۳	۱
شدت جریان	۲	۰/۰۱۲۱	۰/۰۰۶	۰/۵۰	۰/۶۲۹	۲
زمان روشنی پالس	۲	۰/۰۱۱۴	۰/۰۰۵۷	۰/۴۷	۰/۶۴۶	۴
زمان خاموشی پالس	۲	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۵۸	۰/۴۷	۰/۶۴۴	۳

نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد، در شکل (۶) نشان داده شده است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که مستقل از جنس الکتروود ابزار با افزایش زمان روشنی پالس و بخصوص ولتاژ زبری سطح

۳-۵- تحلیل نتایج زبری سطح

اثرات عوامل اصلی شامل شدت جریان، زمان خاموشی پالس، زمان روشنی پالس و ولتاژ بر نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با



شکل (۷): مقایسه زبری سطح برای Al5%TiO₂ و Al2024

۳-۶- تحلیل واریانس نتایج زبری سطح

با توجه به جداول (۱۱) و (۱۲) تحلیل واریانس زبری سطح برای سطح اطمینان ۹۵ درصد با مقدار P کمتر از ۵ درصد و با توجه به نتایج رگرسیون که هر چه زبری سطح کمتر باشد مطلوب تر است اثرات شدت جریان پالس، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و ولتاژ بعنوان اثرات بحرانی و مهم فرآیند برای آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد شناخته می شوند و برای آلومینیوم ۲۰۲۴ اثرات مهم و بحرانی به ترتیب شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس است. روابط ۷ و ۸ رگرسیون مربوط به زبری سطح را به ترتیب برای دو نمونه Al5%TiO₂ و آلومینیوم ۲۰۲۴ نشان می دهد.

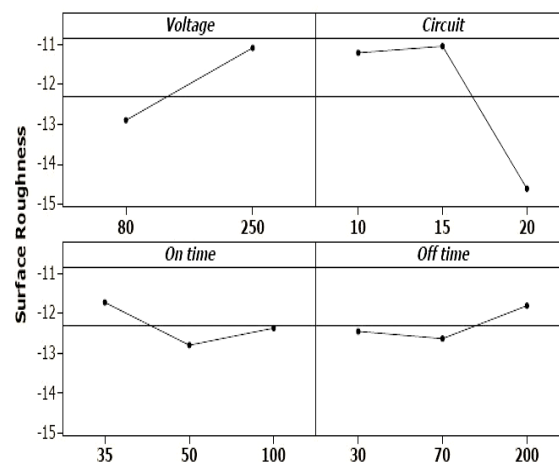
$$Ra = 0.667 + 0.00204 \text{ Voltage} + 0.209 \text{ Current} + 0.0280 \text{ on Time} - 0.00883 \text{ off Tim} \quad (۷)$$

$$Ra = 2.74 - 0.00780 \text{ Voltage} + 0.180 \text{ Current} + 0.0015 \text{ on Time} - 0.00329 \text{ off Time} \quad (۸)$$

نمونه به دلیل افزایش انرژی جرقه و فعال تر شدن یون های مثبت، افزایش می یابد. در واقع با افزایش زمان روشنی پالس و فعال تر شدن یون های مثبت برخورد این یون ها به سطح نمونه افزایش می یابد و این حالت موجب ایجاد حفره های بزرگتر بر سطح نمونه شده و زبری سطح را افزایش می دهد. زبری سطح به این دلیل است که پالس ها با انرژی بالا که در اثر شدت جریان بالا تولید می شود باعث ایجاد جرقه هایی با عمق بیشتر می شود و در نتیجه بی نظمی ها در سطح بیشتر شده و زبری سطح بالا می رود. در صورتیکه شدت جریان هم ثابت در نظر گرفته شود افزایش زمان روشنی پالس باعث عمیق تر شدن حفره ها و افزایش زبری سطح می شود.

Main Effects Plot for SN ratios

Al2024



Signal-to-noise: Smaller is better

شکل (۶): تأثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح Al5%TiO₂

شکل (۷) زبری سطح در دو حالت آلومینیوم ۲۰۲۴ و آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد، برای ۹ آزمایش را نشان می دهد. تغییرات و شکستگی های نمودار طبق جدول تاگوجی تغییر می کنند و تفاوت زیادی با همدیگر ندارند. اما مشاهده می شود در اکثر موارد علی رغم تغییر شرایط آزمایش زبری سطح در حالت استفاده از نانو ذرات اکسید تیتانیوم بهبود قابل توجه یافته است.

جدول (۱۱): تجزیه و تحلیل واریانس زبری سطح $Al_5\%TiO_2$

پارامتر	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر
ولتاژ	۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۸۳	۴
شدت جریان	۲	۶/۵۷	۳/۲۸	۱/۸۹	۰/۲۳۱	۱
زمان روشنی پالس	۲	۵/۶۶	۲/۸۳	۱/۵	۰/۲۹۷	۲
زمان خاموشی پالس	۲	۴/۰۹	۲/۰۵	۰/۹۵	۰/۴۳۸	۳

جدول (۱۲): تجزیه و تحلیل واریانس زبری سطح آلومینیوم ۲۰۲۴

پارامتر	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	درجه تأثیر
ولتاژ	۱	۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۰۸	۰/۳۳۳	۲
شدت جریان	۲	۶/۹۳	۳/۴۶	۳/۳۸	۰/۱۰۴	۱
زمان روشنی پالس	۲	۰/۹۱	۰/۴۵	۰/۲۲	۰/۸۰۶	۳
زمان خاموشی پالس	۲	۰/۵۲	۰/۲۶	۰/۱۳	۰/۸۸۴	۴

۷-۳- بررسی تغییرات متالورژیکی

برای تجزیه و تحلیل XRD نمونه شماره ۵ آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد انتخاب شد. پارامترهای ورودی جدول طراحی آزمایشات برای ولتاژ، شدت جریان، زمان

روشنی پالس و زمان خاموشی پالس به ترتیب 250V، 20A، 35 μs و 70 μs تعیین شده است. آنالیز XRD قبل و بعد از ماشینکاری انجام شد و نتایج آن در جدول (۱۳) و (۱۴) و شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است.

جدول (۱۳): لیست فازبندی $Al_5\%TiO_2$ قبل از ماشین کاری

Visible	Ref. code	Score	Compound name	Scale factor	Chemical formule
1	00 - 004 - 0787	65	Aluminum	0.863	Al
2	00 - 049 - 1433	21	Titanium oxide	0.024	TiO ₂

جدول (۱۴): لیست فازبندی $Al_5\%TiO_2$ بعد از ماشین کاری

Visible	Ref. code	Score	Compound name	Scale factor	Chemical formule
1	00 - 004 - 0787	65	Aluminum	0.863	Al
2	00 - 049 - 1433	21	Titanium oxide	0.024	TiO ₂
3	01 - 075 - 2356	6	Copper Aluminum	0.058	Cu AlO ₂

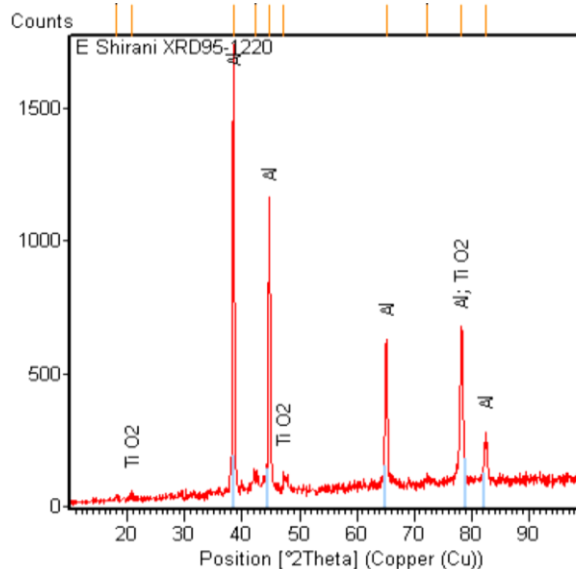
4	98-001-2389	9	Tenorite	0.626	Cu ₂ O
---	-------------	---	----------	-------	-------------------

در سطح بسیار وابسته به ترکیب پارامترها و تغییر در شرایط ماشین کاری می باشد.

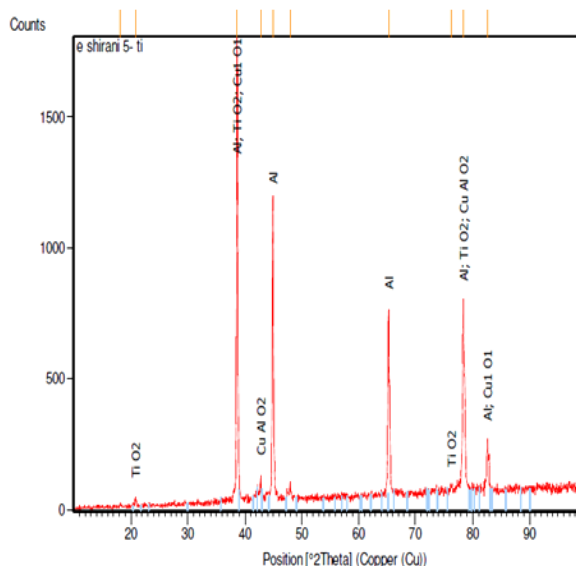
با توجه به فرآیند ماشین کاری، به علت اینکه تمرکز حرارت بر روی سطح ماشین کاری شده یکنواخت نیست، ترکیبی از اکسیدها بر روی سطح شکل گرفته است. آنالیز XRD قبل و بعد از ماشین کاری نشان می دهد بیشتر پیک های دو نمودار با هم مطابقت دارند. بلندترین پیک در ناحیه 2θ و زاویه 38.66° افتاده است که مربوط به پیک آلومینیوم است. از آنجائیکه هر یک از نمونه های ماشین کاری با استفاده از ترکیب های مختلفی از پارامترهای ورودی، ماشین کاری شده است بر کم و زیاد شدن تعداد پیک ها و در نتیجه تشکیل فازهای اکسید تاثیر گذار است.

۳-۸- بررسی توپوگرافی سطح

شکل های (۱۰-الف تا د) توپوگرافی سطح نمونه $Al_5\%TiO_2$ در شرایط قبل و بعد از ماشین کاری با ولتاژ ۲۵۰ ولت، شدت جریان ۲۰ آمپر، زمان روشنی پالس ۷۰ میکروثانیه و زمان خاموشی پالس ۳۵ میکروثانیه در بزرگنمایی ۲۰۰ و ۲۰ میکرون را نشان می دهد. با توجه به شکل ها دیده می شود که تمام سطوحی که ماشین کاری دهانه آتشفشان، آوار و شیارها می باشد. این آسیب ها به دلیل ذوب و منجمد شدن سریع به دلیل وجود دی الکتریک است. آسیب های سطح در نمونه ای که دارای ذرات نانو TiO_2 می باشد کمتر است. عمق دهانه های آتشفشان ایجاد شده در سطح به انرژی جرقه بستگی دارد که خود تابع شدت جریان، ولتاژ، و زمان روشنی جرقه می باشد. نانو ذرات TiO_2 به صورت سفید و غیر منظم به سطح ماشین کاری شده چسبیده هستند و همانطور که دیده می شود بوسیله تخلیه الکتریکی ذوب نشده است و به صورت یکسری ذرات سست در سطح لایه دوباره منجمد شده دیده می شوند. سطحی که تحت ماشین کاری تخلیه الکتریکی قرار می گیرد شامل لایه سفید یا دوباره منجمد شده که در بالاترین قسمت سطح

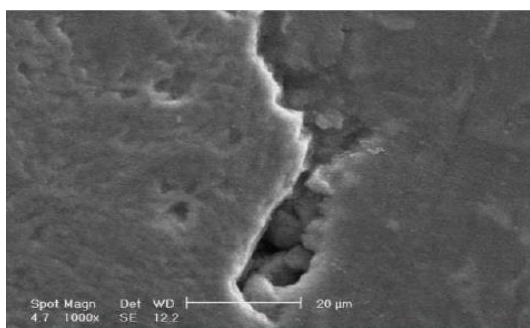


شکل (۸): آنالیز XRD ماده مرکب $Al_5\%TiO_2$ قبل از ماشین کاری



شکل (۹): آنالیز XRD ماده مرکب $Al_5\%TiO_2$ بعد از ماشین کاری

آنالیز XRD از سطح ماشین کاری شده، تشکیل برخی فازهای جدید را نشان می دهد و پس از ماشین کاری، پیک هایی که با پیک های آلومینیوم مطابقت داشتند، تشکیل فازهای اکسید مس و اکسید آلومینیوم مس در ناحیه 2θ و در زوایای 47.9° و 65.1° و 78.5° را می دهند. این به معنی آن است که تغییرات متالورژیکی



د

شکل (۱۰): (الف و ج): تصویر میکروسکوپ الکترونی ماده مرکب Al5\%TiO_2 بعد از تخلیه الکتریکی و (ب و د): قبل از تخلیه الکتریکی

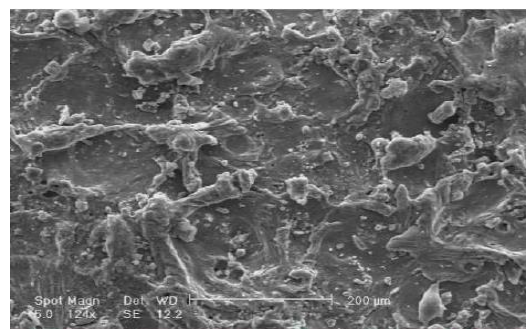
۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثرات پارامترهای ورودی مهم نظیر ولتاژ، زمان روشنی پالس، شدت جریان و زمان خاموشی پالس بر متغیرهای خروجی فرآیند شامل نرخ براده برداری، نرخ سایش الکتروود ابزار و صافی سطح بر روی نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانوذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد و آلومینیوم ۲۰۲۴ با الکتروود ابزار مسی جهت آزمایش، توسط فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این آزمایشات از تکنیک طراحی آزمایشات تاگوچی به همراه تحلیل واریانس و معادلات رگرسیون خطی مرحله اول جهت تخمین پاسخ‌های فرآیند استفاده شده است. پس از مطالعات تئوری و تجربی به عمل آمده در ارتباط با نرخ براده برداری، نرخ فرسایش الکتروود ابزار و صافی سطح نتایج حاصل به شرح زیر است:

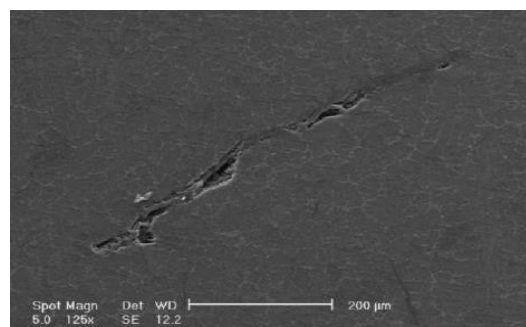
۱- مواد مرکب با ذرات TiO_2 قابلیت ماشینکاری تخلیه الکتریکی دارند اگر چه حضور ذرات TiO_2 تا حدودی باعث کاهش کارایی EDM می شود اما نرخ برداشت مواد، سایش ابزار و زبری سطح با پارامترهای شدت جریان، ولتاژ و زمان روشنی پالس قابل کنترل است.

۲- با توجه به توپوگرافی سطح نمونه ها، آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد، از نظر صافی سطح در مورد آزمایش کیفیت بهتری داشت و موجب کاهش ترک‌های سطحی شده است در صورتی که در نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴ بیشترین مقدار ترک‌ها و خلل و فرج سطحی وجود داشت و سطح

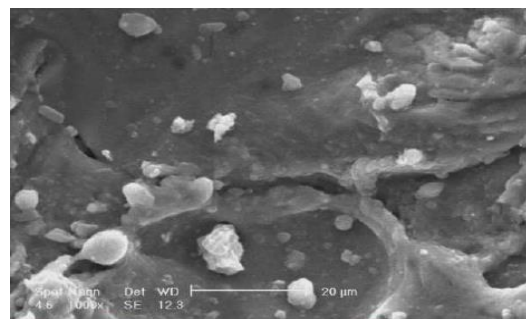
ماشینکاری قرار دارد، لایه متاثر از حرارت که ساختار ماده تا حدودی تغییر می کند و لایه بدون تاثیر که دارای خواص پایه فلز می باشد. اکثر ترک ها در لایه سفید یا دوباره منجمد شده قرار دارند. این ترک ها به دلیل آن است که قطرات ذوب شده از جرقه های مختلف دارای تنش های کششی مختلف بوده و به همدیگر به خوبی متصل نمی شوند.



الف



ب



ج

- غیر یکنواخت و ناهموارتر است.
- ۳- افزایش شدت جریان باعث افزایش انرژی جرقه و در نتیجه افزایش نرخ برداشت مواد و سایش ابزار می شود.
- ۴- نرخ سایش الکتروود ابزار در آلومینیوم ۲۰۲۴ در ۹ مورد آزمایش روند ثابت داشته و در حد متوسط $0.055\mu\text{m}$ بوده در صورتیکه در آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد معادل $0.23\mu\text{m}$ است.
- ۵- نرخ سایش الکتروود ابزار در نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴ تقویت شده با نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۵ درصد به میزان $3/46$ درصد معادل 0.346 گرم بیشتر از نمونه آلومینیوم ۲۰۲۴ از نظر وزنی است
- ۶- ساختار مواد نشان داد که ذرات TiO_2 سرامیکی حین فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی ذوب نشده و این ماتریس است که ذوب شده و شکل مکمل ابزار در قطعه کار ایجاد می شود.
- ۷- پدیده ذوب نشدن نانو ذرات سرامیک باعث می شود که نرخ برداشت ذرات نسبت به حالت بدون ذرات کمتر شود.
- ۵- مراجع**
- [1] B. Chandra Kandpal, J. kumar & H. Singh, "Machining of aluminium metal matrix composites with electrical discharge machining - a review", *Materials Today*, pp. 1665-1671, 2015.
- [2] Ch. Roy, Kh. Hussain Syed & P. Kuppan, "Machinability of al/ 10% sic/ 2.5% tib2 metal matrix composite with powder-mixed electrical discharge machining", *Procedia Technology*, Vol. 25, pp. 1056- 1063, 2016.
- [3] M. Sivaraj & N. Selvakumar, "Experimental analysis of Al-TiC sintered nano composite on EDM process parameters using ANOVA", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 31, pp. 802-812, 2016.
- [4] S Gopalakannan1 & T Senthilvelan, "A parametric study of electrical discharge machining process parameters on machining of cast Al/B4C metal matrix nanocomposites, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*", Part B: J Engineering Manufacture, Vol. 227, pp. 993-1004, 2013.
- [5] C. Velmurugan, R. Subramanian, S. Thirugnanam & B. Ananadavel, "Experimental investigations on machining characteristics of Al 6061 hybrid metal matrix composites processed by electrical discharge machining", *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 3, No. 8, pp. 87-101, 2011.
- [6] Y. Lin, A. Wang, D. Wang & C. Chen, "Machining performance and optimizing machining parameters of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ceramics using EDM based on the taguchi method", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 24, pp. 667-674, 2009.
- [7] N. P. Hung, L. J. Yang & K.W. Leong, "Electric discharges machining (EDM) of cast metal matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 44, pp. 229-236, 1994.
- [8] K. M. Patel, P. M. Pandey & P. Venkateswara Rao, "Surface integrity and material removal mechanisms associated with the EDM of Al_2O_3 ceramic composite", *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 27, pp. 892-899, 2009.
- [9] P. Narender Singh, K. Raghukandan, M. Rathinasabapathi & B. C. Pai, "Electrical discharge machining of Al- 10% SiC as cast metal matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 1653-1657, 2004.
- [10] D. Akshay, K. Pradeep & S. Inderdeep, "Experimental investigation and optimization in EDM of Al 6063 SiCp metal matrix composite", *Journal of Machining and Machability of Materials*, Vol. 3, pp. 293-308, 2008.
- [11] R. Karthikeyan, P. R. Lakshmi Narayanan & R. S. Naagarazan, "Mathematical modeling for electric discharge machining of aluminium-silicon carbide particulate composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 87, No. 1-3, pp. 59- 63, 1999.
- [12] V. Senthilkumar & B. U. Omprakash, "Effect of Titanium Carbide particle addition in the

aluminium composite on EDM process parameters”, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 13, pp. 60-66, 2011.

[13] M. Kalayarasan & M. Murali, “Optimization process Parameters in edm using Taguchi method with grey relational analysis and topsis for ceramic composites”, Journal of Engineering Research in Africa, Vol. 22, pp. 83-93, 2016.

[14] K. Padmavathi & R. Ramakrishnan, “Tribological properties of micro and nano TiO₂ reinforced aluminium metal matrix composites”, Journal of Engineering and Technology, Vol. 9, pp. 3368-3373, 2017.

[15] S. Siddesha, T. D. Jagannath, T. R. Punith & N. S. Rakshith, “Effects of fabrication of aluminium 2024/TiO₂ metal matrix composite”, Journal of Innovative Research & Development, Vol. 5, pp. 174-177, 2016.

[۱۶] ب. مسعودی و س. دانشمند، "بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی، بر روی ماده مرکب پایه آلومینیوم 2024 با استفاده از تحلیل مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت سیگنال به نویز (S/N)", فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد / سال یازدهم / شماره اول / بهار ۱۳۹۶.

[17] M. Ramulu, G. Paul & J. Patel, “EDM surface effects on fatigue strength of 15 vol.% SiCp/Al metal matrix composite material”, Composite Structure, Vol. 54, pp. 79-86, 2001.

Electrical discharge machining of aluminum matrix composite reinforced with titanium oxide nano-particles

Ali Akbar Lotfi Neyestanak^{1,*}, Saeed Daneshmand²

1- Assistant Professor,, Department of Engineering, Yadegar -e- Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

*Corresponding Author: Aklotfi@Gmail.com

Abstract

Nano-particles used in metal matrix composites show a various range of mechanical, chemical and physical features, causing significant improvements in mechanical strength, hardness and thermal characteristics. They can also change the capability of machining. Electrical discharge machining is considered as an integrate part of hard metal machining. In this paper, the parameters of electrical discharge machining for aluminum composite material improved by Nano-particles of titanium dioxide have been studied. The purpose of this study was to evaluate the impacts of electrical current and voltage and pulse on and off-time on the material removal rate, tool wear rate and surface roughness. Kerosene as a dielectric and copper electrode were used to carry out the experiment. In addition, Analysis of variance was utilized to authenticate the experimental results. The result shows that Nano-particles titanium dioxide has trivial effects on machining parameters due to being insulators. They also do not melt in the process of electrical discharge machining. Moreover, the electrical current and the pulse on time have the most influence on the material removal rate, tool wear rate and surface roughness. By increasing the electrical current and pulse on time, tool wear rate and surface roughness have grown, while by increasing the pulse off time tool wear rate has decreased. The average wear rate of the electrode in the aluminum alloy 2024 reinforced with 5% titanium oxide nanoparticles is 46.3%, equivalent to 0.346 gr, more than the weight loss of the aluminum 2024 specimen.

Keywords: Electrical Dscharge Machining, Metal Matrix Composites, Nano-Particles of Titanium Dioxide, Material Removal Rate, Tool Wear.

Journal homepage: ma.iaumajlesi.ac.ir

Please cite this article using:

Ebrahim Shirani, Ali Akbar Lotfi Neyestanak, Saeed Daneshmand, Electrical discharge machining of aluminum matrix composite reinforced with titanium oxide nano-particles, in Persian, New Process in Material Engineering, 2019, 13(2), 27-43.