



مطالعه قابلیت ماشینکاری سرامیک نارسانای Si_3N_4 به روش فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی با الکتروود کمکی

سیدسلیمان سید افقهی^{۱*}، فرشاد سلیمانی^۲، هادی عیوضی باقری^۳

۱- دانشیار، مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

۲- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۳- پژوهشگر، مهندسی ساخت و تولید، مرکز مواد پیشرفته و نانو فناوری، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱، kpsafghahi@ihu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۷ تیر ۱۴۰۱ داوری اولیه: ۱۴ تیر ۱۴۰۱ پذیرش: ۲۸ شهریور ۱۴۰۱	بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام گرفته بیش از ۵۰٪ هزینه تمام شده قطعات سرامیکی مربوط به هزینه‌ی ماشینکاری می‌باشد، این درحالیست که در مورد نیتريد سيليسيم (Si_3N_4) که یکی از مهمترین سرامیک‌های مهندسی است، این مقدار تا ۸۰٪ گزارش شده است. این سرامیک ترکیبی از خواص مطلوب مانند مقاومت به سایش، خوردگی و سختی بالا را دارا می‌باشد. با توجه به فرسایش زیاد ابزار در ماشینکاری سرامیک‌ها، استفاده از روش‌های سنتی ماشینکاری مناسب نیستند. فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی روشی است که می‌تواند تمامی مواد رسانا را بدون توجه به خواص مکانیکی و متالورژیکی ماشینکاری نماید، اما ماشینکاری سرامیک‌های نارسانا از جمله نیتريد سيليسيم بصورت معمول با این روش امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا در این تحقیق جهت انجام ماشینکاری تخلیه الکتریکی این سرامیک از روش الکتروود کمکی استفاده شده است بدین صورت که پس از ساخت نمونه‌های سرامیکی، پوشش دولایه مس-کربن و تک لایه مس بر روی نمونه‌ها قرار داده شد و قطعات با موفقیت ماشینکاری شدند. جهت بررسی بیشتر از سطح حفره ماشینکاری شده توسط میکروسکپ الکترونی تصویربرداری انجام گرفت و الگوی توزیع عناصر نیز تهیه گردید. نتایج نشان دهنده افزایش نرخ براده برداری در حالت پوشش دولایه نسبت به پوشش تک لایه می‌باشد. همچنین پس از اتمام ماشینکاری، از سطح قطعات سرامیکی و ابزار مس، آنالیز EDX انجام شد که نشان دهنده وجود عناصر کربن و مس در سطح ماشینکاری شده می‌باشد. علاوه بر این، فرسایش نسبی ابزار مسی در حالت پوشش دولایه کمتر می‌باشد.
کلیدواژگان: نیتريد سيليسيم ماشینکاری تخلیه الکتریکی رسانایی الکتروود کمکی	

Study of nonconductive Si_3N_4 ceramic machining ability by electrical discharge machining process by assisting electrode

Seyyed Salman Seyyed Afghahi^{1*}, Farshad Soleymani², Hadi Eivazi Bagheri³

1- Faculty of Engineering, Department of Material science, Imam Hossein University, Tehran, Iran

2- Department of Material science, Malayer University, Malayer, Iran

3- Advanced Materials and Nanotechnology Research Center, Imam Hossein University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1698715461 Tehran, Iran, kpsafghahi@ihu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 28 June 2022
First Decision: 5 July 2022
Accepted: 19 September 2022

Keywords:

Silicon nitride
Electrical discharging machining
Conductivity
Assisted electrode method

Abstract

Based on the review of the previous researches, more than 50% of the cost of ceramic parts is related to machining costs, about silicon nitride (Si_3N_4), which is one of the most important engineering ceramics, while up to 80% has been reported. This ceramic has a combination of desirable properties such as wear and corrosion resistance and high hardness. Due to the high tool wear in machining process, the use of traditional methods is not appropriate. The electrical discharging machining process is a method that can machined all conductive materials without regard to mechanical and metallurgical properties, but machining of non-conducting ceramics such as silicon nitride is not normally possible by electrical discharging machining process. Therefore, in this research, the assisted electrode method has been used to perform the electrical discharge machining of silicon nitride ceramics. After preparing ceramic samples, copper-carbon bilayer and single copper layer were coating on the Si_3N_4 and they were successfully machined. In order to further examine the machined surface, imaging was performed by SEM. The results show that an increase in material removal rate in two-layer coating compared to single-layer coating. Also, after finishing machining process, EDX analysis was performed from the surface of ceramic workpiece, which indicates the presence of carbon and copper elements in the machined surface. In addition, the copper tool wear ratio in two-layer coating is less than that of single-layer coating.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. S. Seyyed Afghahi, F. Soleymani, H. Eivazi Bagheri, Study of nonconductive Si_3N_4 ceramic machining ability by electrical discharge machining process by assisting electrode, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 5, pp. 13- 22, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.160055>

۱- مقدمه

سرامیک‌های پیشرفته به دلیل داشتن استحکام بالا، مقاومت به سایش و خوردگی عالی و پایداری شیمیایی و حرارتی فوق العاده، پتانسیل بالایی جهت کاربرد در صنایع مختلف از جمله هوافضا، اپتیک و مهندسی پزشکی دارند. سرامیک‌های پیشرفته به دو دسته عمده سرامیک‌های اکسیدی و سرامیک‌های غیراکسیدی تقسیم‌بندی می‌شوند. سرامیک‌های اکسید آلومینیم و اکسیدزیرکونیوم از سرامیک‌های اکسیدی بوده و سرامیک‌های سیلیکون نیتراید و سیلیکون کارباید از سرامیک‌های غیراکسیدی هستند، از جمله متداولترین و پرکاربردترین سرامیک‌های پیشرفته محسوب می‌شوند [۱]. سرامیک‌ها می‌توانند رسانا، نارسانا و نیمه‌رسانا باشند، با در نظر گرفتن حداقل رسانایی الکتریکی برای مواد در ماشینکاری تخلیه الکتریکی، از جمله سرامیک‌ها رسانا می‌توان B_4C ، TiB_2 و سرامیک‌های نارسانا Al_2O_3 ، SiC ، Si_3N_4 را نام برد [۲].

امروزه سرامیک‌ها به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب، چگالی پایین و سختی بالا در ساخت قطعات و اجزایی با کاربرد در دمای بالا و همچنین ابزارهای برش مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین داشتن خواص مکانیکی بالا، باعث ایجاد مشکلاتی در فرآیند نهایی قطعات سرامیکی بویژه ماشینکاری برش کاری می‌شود. لذا رویکردهای موجود جهت حل این مشکلات استفاده از روش‌هایی مانند لیزر و فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی (EDM) می‌باشد [۳].

سابقه‌ی استفاده از نیتريد سيليسيم Si_3N_4 به نسوز کوره‌ها، تجهیزات ریخته گری پیوسته، تجهیزات راهگامی و غلاف ترموکوپل‌ها بر می‌گردد. همچنین به علت سختی بالا از این سرامیک جهت ساخت ابزارهای ماشینکاری، به دلیل پایداری حرارتی در صنایع هسته ای و با توجه به مقاومت به خوردگی به عنوان پوشش فیبرهای نوری استفاده می‌گردد.

روشهای ماشینکاری سرامیک‌ها معمولا به سه گروه مکانیکی، حرارتی و شیمیایی تقسیم بندی می‌شود. در روش مکانیکی پرکاربردترین روش، فرآیند سنگزنی می‌باشد که در آن از ساینده ای مانند SiC با زمینه‌های مختلف (لاستیک، رزین آلی و ..) به عنوان ابزار ماشینکاری استفاده می‌شود. روش شیمیایی عمدتا برای بهبود پرداخت سطحی و یا کاهش اصطکاک به کار برده می‌شود، اکثر ترکیبات شیشه سلیکاتی را می‌توان توسط اسید هیدروفولیک ماشینکاری شیمیایی کرد.

از جمله روشهای حرارتی، فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی می‌باشد. فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی یک فرآیند غیرسنتی ماشینکاری است که برای ساخت اشکال پیچیده استفاده می‌شود. علاوه براین، به دلیل عدم اعمال نیرو و کاهش منطقه متأثر از ماشینکاری، می‌توان دقت قابل توجهی در ساخت قطعات به دست آورد. همچنین اخیرا با استفاده از تکنیکی با عنوان الکتروود کمکی^۲ این روش را می‌توان برای سرامیک‌های نارسانایی مانند Si_3N_4 به کار گرفت. ایجاد لایه رسانا در سطح قطعه کار طی ماشینکاری باعث ادامه فرآیند و برداشت ماده شده و از طرفی دیگر تجزیه مایع دی الکتریک هیدروکربنی باعث ترکیب کربن با سطح قطعه کار و رسانایی آن می‌شود [۴]. به دلیل استفاده از مکانیزم فرسایش حرارتی در این فرآیند، این روش مستقل از خواص مکانیکی مانند سختی، استحکام و تردی است. همچنین عدم تماس فیزیکی بین ابزار و قطعه کار مزیت اصلی این فرآیند است. حداقل رسانایی الکتریکی در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی در حدود $10^{-2} \Omega cm^{-1}$ می‌باشد که توسط فلزات به طور کامل برآورده می‌شود. لذا حداقل رسانایی الکتریکی یک فاکتور بحرانی در جهت امکان ماشینکاری تخلیه الکتریکی سرامیک‌ها می‌باشد [۳]. سرامیک‌های رسانا مانند سیلیکون کاربید (SiC)، دی‌بروید تیتانیوم (TiB_2)، نیتريد تیتانیوم (TiN)، می‌توانند مانند فلزات با استفاده از فرآیند EDM ماشینکاری شوند، اما سرامیک‌های نارسانا مانند ZrO_2 ، اکسید آلومینیوم Al_2O_3 و سیلیکون نیتراید Si_3N_4 دارای رسانایی بسیار پایین برای فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی می‌باشند، بنابراین از فرآیند معمول EDM نمی‌توان استفاده نمود. شکل ۱ تقسیم‌بندی سرامیک‌های مهندسی بر مبنای رسانایی الکتریکی (الماس به عنوان مرجع محور افقی) را جهت فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نشان می‌دهد [۳].

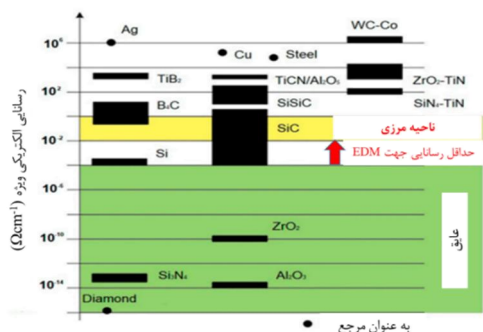


Fig. 1 Overview of materials and their electrical conductivity.

شکل ۱ تقسیم‌بندی سرامیک‌ها بر مبنای پارامتر رسانایی الکتریکی جهت ماشینکاری EDM

² Assisting Electrode Method (AEM)

¹ Electrical Discharge Machining (EDM)

افزایش می‌یابد [۱۳].

هاناکا و همکارانش ماشینکاری تخلیه الکتریکی Si_3N_4 را با استفاده از افزودن نانوتیوب کربن (CNT) و گرافیت (GNP) به ترکیب سرامیک و ایجاد کامپوزیت به ترتیب با درصد حجمی $5/3\%$ و $20/6\%$ با مقدار رسانایی ۱۰ و $100\text{ (sm}^{-1}\text{)}$ مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آنها نانوکامپوزیت سرامیک-کربن با موفقیت به روش تخلیه الکتریکی ماشینکاری شده که براساس نتایج بدست آمده ایجاد کامپوزیت باعث افزایش نرخ براده برداری و کاهش فرسایش ابزار و زبری سطح قطعه شده است [۶]. لین و همکارانش قابلیت اجرای ماشینکاری تخلیه الکتریکی سرامیک ZrO_2 و Al_2O_3 را به روش ایجاد لایه رسانا با استفاده از فویل مس در سطح قطعه کار مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آنها تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند ماشینکاری بر روی نرخ براده برداری، فرسایش نسبی ابزار و زبری سطح قطعه کار سرامیکی مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی، نرخ براده برداری برای هر دو نوع جنس افزایش می‌یابد [۷].

رودیک و همکارانش جهت افزایش بازده ماشینکاری مواد پیشرفته، بحث گسترش و بهبود فرآیند EDM را همزمان مورد بررسی قرار دادند. به همین منظور، آنها در تحقیق خود همزمان از روش الکتروود کمکی و افزودن پودر به مایع دی الکتریک در ماشینکاری ZrO_2 استفاده نموده اند. در واقع الکتروود کمکی قید مربوط به نارسایی قطعه کار را رفع کرده و افزودن پودر باعث افزایش نرخ براده برداری، کاهش سایش ابزار و زبری سطح می‌گردد. با اجرای این تکنیک در ماشینکاری ZrO_2 زبری سطح قطعه کار و فرسایش ابزار به ترتیب 18% و 6% کاهش و نرخ براده برداری 12% افزایش یافته است [۱۴].

مرور تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که بطور کلی بحث ماشینکاری تخلیه الکتریکی انواع سرامیک‌های پیشرفته و بویژه نوع نارسا جزء جدیدترین زمینه‌های پژوهشی در حوزه فرآیندهای تولید مخصوص می‌باشد ولی تاکنون در رابطه با ماشینکاری تخلیه الکتریکی سرامیک‌های نارسا در داخل کشور پژوهشی گزارش نشده است. با توجه به افزایش کاربردهای سرامیک‌های مهندسی و نیاز به داشتن اطلاعات تکنولوژیکی ماشینکاری سرامیک‌های نارسا، هدف این پژوهش ساخت قطعه سرامیک نارسای (Si_3N_4) و بررسی مقایسه‌ای قابلیت ماشینکاری آن با استفاده از روش الکتروود کمکی می‌باشد. بدین منظور جهت ایجاد الکتروود کمکی در حالت اول برای ایجاد تک لایه‌ی رسانا، از فویل مس و در حالت دوم از فویل مس به همراه

نمود. براساس نتایج ارائه شده در تحقیق آنها، استفاده از نفت سفید به عنوان مایع دی الکتریک باعث افزایش نرخ براده براده برداری شده و آب دی یونیزه باعث کاهش نرخ سایش ابزار مسی در ماشینکاری تیتانیوم می‌گردد [۱۰]. اما تاکنون در رابطه با ماشینکاری سرامیک‌های پیشرفته بویژه سرامیک نارسا پژوهشی گزارش نشده است. این درحالیست که پژوهش در موضوع ماشینکاری سرامیک‌ها به روش تخلیه الکتریکی جزء جدیدترین کارها در این حوزه می‌باشد. موتوروما و همکارانش فرآیند μEDM (سوراخ کاری) Si_3N_4 را با استفاده از سه نوع الکتروود Cu ، CuW ، AgW مورد بررسی قرار دادند. آنها جهت ایجاد لایه رسانا بر روی سطح سیلیکون نیتراید از پوشش TiN استفاده نمودند. براساس نتایج بدست آمده بیشترین نرخ براده برداری با استفاده از الکتروود مسی حاصل شده است [۱۱]. هاناکورا و همکارانش ماشینکاری سرامیک نارسای ZrO_2 را مورد بررسی قرار دادند. آنها تأثیر پارامترهای ورودی شدت جریان و قطبیت را بر روی نرخ براده برداری، زبری سطح و ضخامت لایه باقی مانده در سطح قطعه کار پس از ماشینکاری مورد بررسی قرار دادند. براساس آنالیز انجام شده، ترکیب ZrC در سطح قطعه کار ایجاد شده و بیشترین مقدار زبری سطح ($R_a=10\mu\text{m}$) نیز مربوط به شدت جریان ۱۵ آمپر می‌باشد [۴]. سابور و همکارانش ماشینکاری تخلیه الکتریکی، سرامیک نارسای ZrO_2 با استفاده از الکتروود کمکی فویل مسی مورد بررسی قرار دادند، براساس نتایج تحقیق آنها، ایجاد لایه کربن تجزیه شده در سطح قطعه کار وابسته به پارامترهای ورودی، جنس ابزار و قطعه کار، ماده دی الکتریک، قطبیت و زمان روشنی پالس می‌باشد. در تحقیق دیگر کلاک و همکارانش فرآیند وایرکات Si_3N_4 ترکیب شده با TiN را مورد بررسی قرار دادند. با در نظر گرفتن دمای 1900 درجه سانتی گراد برای تجزیه Si_3N_4 براساس نتایج بدست آمده توسط آنها، در برش اصلی، فاز TiN ذوب و تبخیر شده و سیلیکون نیتراید تجزیه می‌شود اما مقداری از آن بصورت قله‌های در سطح باقی می‌ماند که به علت نارسا بودن، برش ترمیم‌های بعدی قادر به از بین بردن آنها نمی‌باشند و صرفاً با ذوب TiN باعث کاهش جزئی زبری سطح می‌شود [۱۲]. لاورز و همکارانش ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی (WEDM) سرامیک‌های Si_3N_4-TiN ، ZrO_2-TiN و Al_2O_3-TiC را مورد بررسی قرار دادند. آنها تأثیر پارامتر زمان روشنی پالس بر روی نرخ برش هر سه نوع سرامیک را مورد بررسی قرار دادند، نرخ برش (براده برداری) سرامیک Si_3N_4-TiN بیشتر از دو نوع دیگر است و با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ براده برداری

زیر لایه‌ی کربن استفاده شده است.

و برش داده شده (قطعه‌کار) جهت انجام ماشینکاری را نشان می‌دهد.

در ادامه جهت آماده سازی نمونه‌ها سرامیکی برای ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ابتدا نمونه‌ها و ابزار مس ۹۹٪ با الکل شستشو و پس از خشک شدن بلافاصله با استفاده از ترازو با دقت 0.001 توزین گردیدند. در ادامه بر روی یکی از نمونه ابتدا یک لایه چسب کربن و سپس فویل مس با ضخامت 0.06 میلی‌متر (دارای چسب یک طرفه) چسبانده شد و بر روی نمونه دوم فقط فویل مس به عنوان پوشش رسانا قرار داده شد (نمونه‌ها از لحاظ خواص یکسان می‌باشند). شکل ۴ تصویر نوع فویل استفاده شده به همراه قطعه‌کار پوشش داده شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱ برخی از خصوصیات سرامیک Si_3N_4

Table 1 Si_3N_4 property

۱۹۰۰	سختی (ویکرز)
۳۵۰	استحکام خمشی (مگاپاسکال)
۳/۲۳۴	چگالی (گرم بر سانتی‌مترمکعب)
۷	چقرمگی ($Mpam^{\frac{1}{2}}$)



Fig. 3 Si_3N_4 work piece

شکل ۳ تصویر قطعات سرامیکی تولید شده قبل از ماشینکاری (قطعه‌کار)

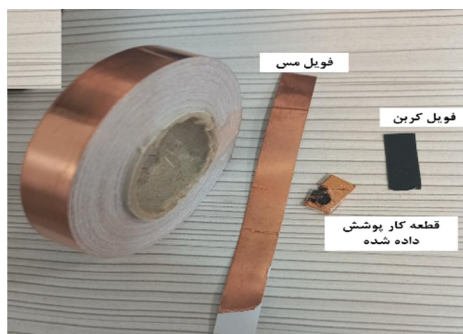


Fig. 4 Foil for Si_3N_4 work piece coating

شکل ۴ فویل مورد استفاده در ایجاد پوشش قطعات

۲- مواد و روش تحقیق

جهت تولید نمونه سرامیک نیتريد سيليسيم_اکسید سيليسيم به کمک افزودن کمک تفجوش اکسید یوروپیوم، از روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای^۱ استفاده شده است. برای ساخت نمونه سرامیکی، در ابتدا پودر نیتريد سيليسيم (۸۷٪) و اکسید سيليسيم (۱۰٪) با کمک تفجوش اکسید یوروپیوم (۳٪)، با نسبت‌های وزنی توزین و در داخل اتانول ریخته شدند. در مرحله دوم به منظور آسیاکاری و مخلوط‌سازی مواد اولیه از دستگاه آسیاکاری مکانیکی سیاره‌ای استفاده شد. مخلوط مواد اولیه و اتانول همراه با گلوله‌های نیتريد سيليسيم داخل ظرف تفلونی ضد ساییش ریخته شده و آسیاکاری به مدت ۲۴ ساعت انجام گرفت. بعد از اتمام فرآیند اختلاط دوغاب فوق به داخل بشر ریخته شد و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند تا تمامی اتانول موجود در پودر تبخیر شود. بعد از عملیات خشک کردن، پودر فوق توسط‌هاون سرامیکی خرد و از الک با مش ۲۰۰ عبور داده شد. پودر بدست آمده، قبل از پرس شدن جهت جریان‌پذیری بهتر در قالب و توزیع یکنواخت مواد اولیه، با استفاده از روش گریز از مرکز، گرانوله شده و جهت پرس تک محوره، از قالب فولادی با قطر ۲۵ میلی‌متر استفاده شد. فرآیند پرس تک محوره با فشار ۳۰ مگاپاسکال و زمان اعمال فشار بیشینه ۵ ثانیه، انجام شد. در مرحله بعد نمونه‌های شکل‌دهی شده توسط پرس تک محوره به منظور افزایش چگالی نسبی خام، تحت فرآیند پرس ایزواستاتیک سرد قرار گرفتند. فرآیند پرس ایزواستاتیک سرد با فشار ۲۵۰ مگاپاسکال به مدت ۳۰ ثانیه انجام شد. همه‌ی نمونه‌ها قبل از انجام فرآیند، جهت جلوگیری از نفوذ روغن دستگاه پرس ایزواستاتیک سرد توسط نایلون آب‌بندی شدند. در ادامه نمونه‌های خام پرس ایزواستاتیک شده جهت حذف چسب افزوده شده در مرحله تولید پودر گرانوله، در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در کوره الکتریکی کلسینه^۲ شدند. سپس نمونه داخل قالب و سنبه گرافیتی در دمای ۱۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه به روش سینتر پلاسمای جرقه‌ای با سرعت حرارت‌دهی ۱۰۰ درجه بر دقیقه و اعمال فشار ۴۰ مگاپاسکال در دمای بیشینه، تفجوشی شد. برخی از خصوصیات این سرامیک در جدول ۱ آورده شده است. علاوه بر این شکل ۳ قطعه سرامیکی تولید شده

¹ Spark Plasma Sintering

² Calcination

$$MRR = \frac{(M_{w1} - M_{w2}) \times 10^3}{(\rho_w \times t)} \quad (1)$$

$$TWR\% = \frac{(M_{T1} - M_{T2}) \times \rho_w}{(M_{w1} - M_{w2}) \times \rho_T} \times 100 \quad (2)$$

که در این روابط (MRR^1) نرخ براده برداری از قطعه کار ماشینکاری بر حسب گرم، ρ_w چگالی قطعه کار، t زمان ماشین کاری (min) می باشند. همچنین TWR^3 درصد سایش نسبی ابزار بر حسب حجم برداشته شده از مواد قطعه کار، M_{T1} و M_{T2} به ترتیب وزن ابزار قبل و بعد از ماشین کاری بر حسب گرم و ρ_T چگالی ابزار مس می باشد. مقدار چگالی قطعه کار $\rho_w=3/234$ (g/cm^3) و چگالی ابزار $\rho_T=8/93$ (g/cm^3) در نظر گرفته شده است.



Fig. 6 Copper tool and Si_3N_4

شکل ۶ ابزار مس و قطعه کار سیلیکون نیتراید (در حین عملیات ماشینکاری)

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تأثیر جنس پوشش بر روی نرخ براده برداری

شکل ۷ تأثیر جنس لایه پوشش سطحی ایجاد شده به عنوان الکتروود کمکی را بر روی مقدار نرخ براده برداری از سطح قطعه سرامیک نیتريد سیلیسیوم و شکل ۸ تصاویر میکروسکپ الکترونی از منطقه ماشینکاری را نشان می دهند. همان طوریکه ملاحظه می گردد سرامیک نارسانای Si_3N_4 به روش تخلیه الکتریکی ماشینکاری شده و مقدار نرخ براده برداری $0/2$ میلیمتر معکب بر دقیقه برای حالت پوشش دولایه و مقدار $0/13$ میلیمتر معکب بر دقیقه برای پوشش تک لایه بدست آمده است. در روش الکتروود کمکی، شروع جرقه ها بین لایه رسانای سطحی و ابزار رسانا می باشد، در ادامه مکانیزم براده برداری این نوع سرامیکها از طریق ایجاد لایه سطحی رسانای کربن حاصل از تجزیه دی الکتریک هیدروکربنی در سطح و محصولات رسانای

برای انجام عملیات ماشینکاری و مقایسه ی تأثیر نوع پوشش اولیه بر روی نرخ براده برداری، پارامترهای ورودی مطابق جدول ۲ با شرایط شستشوی یکسان به مدت ۲۰ دقیقه توسط دستگاه ماشینکاری CNC_EDM Charmils در حالت ایزوپالس ماشینکاری شدند. همچنین شکل ۵ قطعه کار سرامیک پوشش داده شده و ابزار مسی (با قطر ۳ میلی متر) را نشان می دهد. انتخاب پارامترهای ورودی براساس بررسی و مرور پژوهش های قبلی و در حالت پرداختکاری می باشند و هر آزمایش سه بار تکرار شده و مقدار میانگین در نمودارها درج گردیده است.

جدول ۲ پارامترهای ورودی تنظیمی

Table 2 EDM input parameter

جنس ابزار	مس خالص
جنس الکتروود کمکی (دولایه)	چسب کربن - فویل مس
نوع شستشو	غوطه وری
قطبیت ابزار مس	منفی
نوع مایع دی الکتریک	نفت سفید
ولتاژ ورودی (ولت)	۲۰۰
زمان روشنی پالس (میکروثانیه)	۱/۶
شدت جریان ورودی (آمپر)	۱۲

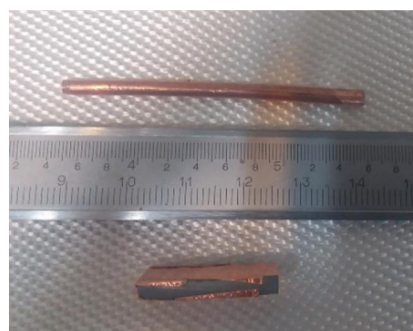


Fig. 5 Copper tool and Si_3N_4 with copper foil

شکل ۵ قطعه کار سرامیکی پوشش داده شده با فویل مس و ابزار مسی

پس از اتمام عملیات ماشینکاری، نمونه ها پس از جدا نمودن فویل مس و کربن در الکل شستشو شده و پس از خشک شدن مجدداً توزین گردیدند. همچنین برای بررسی وضعیت سوراخ های ایجاد شده در سطح قطعه ی سرامیکی از میکروسکپ الکترونی استفاده شد و تغییرات درصد عناصر موجود در سطح قطعه کار و ابزار بعد از ماشینکاری با استفاده روش EDX¹ انجام شد. شکل ۶ نحوه بستن ابزار و قطعه کار را جهت ماشینکاری نشان می دهد. جهت محاسبه نرخ براده برداری از رابطه (۱) و (۲) استفاده شده است:

² Material Removal Rate

³ Tool Wear Ratio

¹ Energy Dispersive X ray

به بیان دیگر مکانیزم الکتروود کمکی را در چهار مرحله می‌توان تشریح نمود، در مرحله اول در هنگام شروع فرآیند ماشینکاری مانند مواد رسانا، جرقه‌ها بین مواد پوشش و ابزار اتفاق می‌افتد، در مرحله دوم جرقه‌ها به عمق بیشتری از سطح پوشش نفوذ کرده و محصولات رسانای حاصل از جرقه‌ها که با کربن حاصل از تجزیه ی مایع دی الکتریک ترکیب شده اند به سطح قطعه ی نارسا می‌چسبند. در مرحله سوم محصولات کاربیدی با ماده عایق در تماس هستند و بالاخره در مرحله چهارم محصولات حاصل از تخلیه الکتریکی کاربیدی ناشی از تجزیه مایع دی الکتریک، رسانایی الکتریکی را در ناحیه ماشینکاری پس از اتمام پوشش الکتروود مصرفی حفظ می‌کنند [۴].

همچنین مطابق تصاویر میکروسکپ الکترونی و اندازه گیری قطر میانگین حفره‌ی ماشینکاری شده (شکل ۸)، عامل دیگری که تایید کننده افزایش نرخ براده برداری در حالت پوشش دولایه می‌باشد، وجود براده برداری جانبی بیشتر (افزایش قطر سوراخ) می‌باشد. وجود براده برداری جانبی (گشادی کناری) یکی از پارامترهای مورد ارزیابی در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی می‌باشد که معمولاً با افزایش نرخ براده برداری به دلیل افزایش ذرات در فضای گپ و قرارگیری و تجمع براده‌ها، میزان براده برداری جانبی افزایش می‌یابد، در ماشینکاری سرامیک نارسا با پوشش دولایه نیز به علت افزایش مقدار محصولات حاصل از براده برداری و در نتیجه افزایش مقدار ذرات رسانا در فضای گپ، میزان براده برداری جانبی بیشتر است بطوریکه قطر حفره ماشینکاری شده نسبت به حالت ماشینکاری با پوشش تک لایه افزایش یافته است. در واقع براده‌ها با تأثیر بر روی رسانایی مایع دی الکتریک بصورت موضعی، رسانایی آن را افزایش داده و باعث ایجاد جرقه‌های جانبی بین ابزار و قطعه کار می‌شوند.

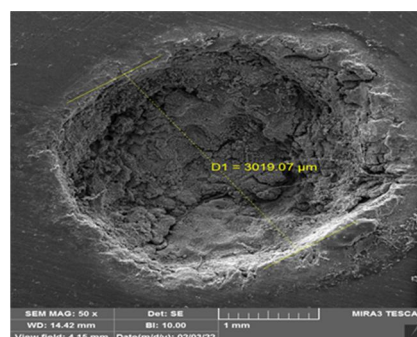
عامل دیگر افزایش نرخ براده برداری در حالت پوشش دولایه را می‌توان با استفاده از الگوی توزیع عناصر شکل‌های ۹ و ۱۰ پس از ماشینکاری تخلیه الکتریکی در سطح و اطراف حفره ماشینکاری شده توجیه نمود. همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌گردد در حالت ماشینکاری با پوشش دولایه، سطح قطعه‌ی ماشینکاری شده شامل درصد بیشتری از محصولات حاصل از براده برداری می‌باشد. به عبارتی دیگر، نقاط قرمز رنگ که نشان دهنده ماده سازنده قطعه کار می‌باشند در حالت پوشش دولایه کمتر در سطح حفره و اطراف آن مشاهده می‌گردند. در واقع در حالت پوشش دولایه، وجود ذرات رسانای حاصل از ماشینکاری (کربن و مس) باعث ایجاد سهولت شروع جرقه

حاصل از جرقه‌ها (براده‌ها) بوده که با توجه به حالت قطبیت منفی ابزار، در سطح قطعه کار لایه نشانی شده و امکان ادامه فرآیند ماشینکاری را فراهم می‌کنند. لذا وجود یک لایه پوشش کربنی اولیه در زیر لایه مس اولاً باعث تولید بیشتر ذرات کربن رسانا و تجمع آنها در سطح قطعه کار می‌شود و از طرفی دیگر لایه کربنی فضاهای خالی احتمالی بین فویل مس و قطعه سرامیکی را پر می‌کند، بطوریکه وجود لایه رسانای یکنواخت اولیه در سطح قطعه کار می‌تواند باعث ایجاد جرقه‌های پیوسته و در نتیجه پایداری فرآیند شود که نتیجه آن، افزایش نرخ براده برداری در حالت پوشش دولایه است.

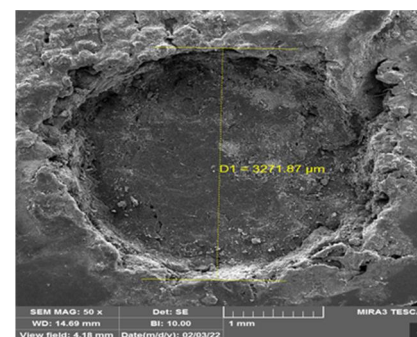


Fig. 7 Effect of coating materials on the MRR

شکل ۷ تأثیر جنس پوشش بر روی نرخ براده برداری



(الف)

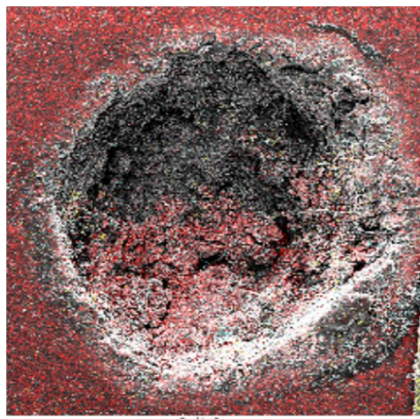


(ب)

Fig. 8 SEM image of Machined surface

شکل ۸ تصاویر SEM از سطح قطعه ماشینکاری شده، (الف) قطعه کار ماشین کاری شده با پوشش مس، (ب) قطعه کار ماشینکاری شده با پوشش دولایه مس-کربن

می‌شود بطوریکه دما در فاصله بین ابزار و قطعه‌کار تا $10000^{\circ}C$ می‌رسد که برای براده برداری این نوع سرامیک مؤثر می‌باشد [۱۵].

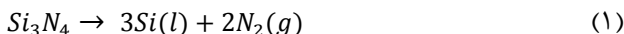


ب- توزیع ترکیب عناصر پوشش تک لایه

Fig. 10 Map of EDMed surface

شکل ۱۰ توزیع عناصر در سطح قطعه‌کار پس از عملیات ماشینکاری

همچنین شکل ۱۱ نتایج آنالیز EDX از منطقه ماشینکاری شده را نشان می‌دهد. همان‌طوریکه ملاحظه می‌شود پس از انجام عملیات ماشینکاری عناصر کربن حاصل از تجزیه مایع دی الکتریک و مس در سطح قطعه‌کار وجود دارند. اما دلیل وجود Si در سطح ماشینکاری شده را بدین صورت می‌توان بیان نمود که در فرآیند EDM فلزات، مکانیزم براده برداری ذوب و تبخیر می‌باشد، در حالیکه در سرامیک‌های نارسا مکانیزم غالب برداشت ماده سوختن در اثر حرارت جرقه‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه سرامیک Si_3N_4 در دمای بالای 1700 درجه سانتی‌گراد بصورت واکنش (۱) تجزیه می‌شود:



لذا وجود سیلیسیم در لایه‌ی سطحی قطعه‌کار مربوط به مکانیزم براده برداری ارائه شده برای ماشینکاری سرامیک Si_3N_4 که شامل سوختن، تجزیه و اکسید شدن می‌باشد قابل توجیه بوده که میزان آن وابسته به انرژی ورودی جرقه‌ها می‌باشد، در واقع مکانیزم اصلی براده برداری ذوب و تبخیر می‌باشد، اما تجزیه و اکسیداسیون نیز وجود دارد [۱۲ و ۱۳].

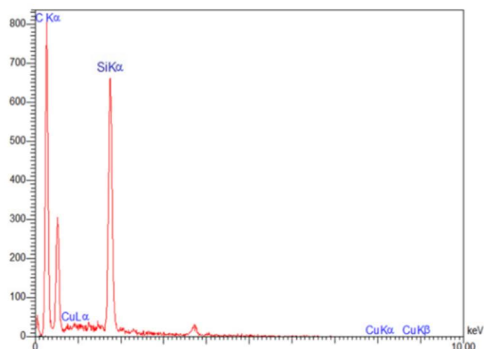
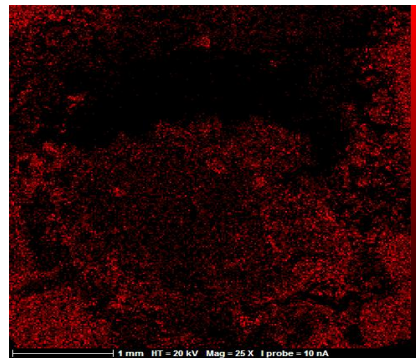
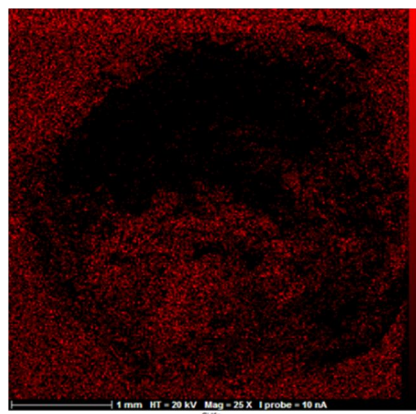


Fig. 11 EDX of Si_3N_4 surface after EDM

شکل ۱۱ آنالیز EDX از منطقه ماشینکاری شده



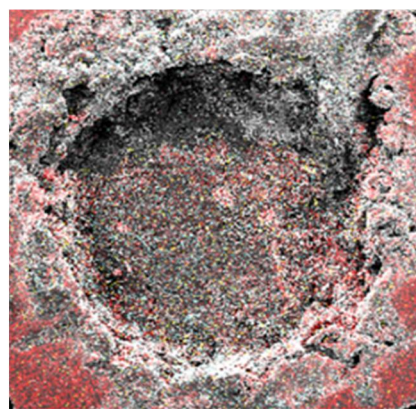
الف- توزیع ذرات سیلیسیم پوشش دولایه



ب- توزیع ذرات سیلیسیم پوشش تک لایه

Fig. 9 Map of EDMed surface

شکل ۹ توزیع عناصر در سطح ماشینکاری شده پس از عملیات ماشینکاری



الف- توزیع ترکیب عناصر پوشش دولایه

جدول ۳ نتایج آنالیز EDX از سطح ابزار مس بعد از ماشینکاری

Table 3 EDX of copper tool surface after EDM

درصد عناصر در سطح ابزار	نوع پوشش قطعه کار
%Cu=۲۸/۰۶ و %C=۷۱/۹۴	قطعه کار فویل مس- کربن
%Cu=۳۳/۰۵ و %C=۶۶/۹۵	قطعه کار فویل مس

۴- نتیجه گیری

به دلیل اهمیت بررسی قابلیت ماشینکاری سرامیک‌های مهندسی بویژه با استفاده از فرآیندهای غیر سنتی ماشینکاری و با توجه به اینکه تاکنون در داخل کشور پژوهشی در این زمینه گزارش نشده است، در این تحقیق قابلیت ماشینکاری سرامیک عایق Si_3N_4 با استفاده از روش تخلیه الکتریکی الکتروود کمکی مورد بررسی قرار گرفت و با موفقیت ماشینکاری شد. برخی از مهمترین نتایج بدست آمده بصورت زیر می‌باشند:

- مقایسه بین پوشش تک لایه مس و دولایه کربن-مس نشان می‌دهد که مقدار نرخ براده برداری $0/2$ میلیمتر معکب بر دقیقه برای حالت پوشش دولایه و مقدار $0/13$ میلیمتر معکب بر دقیقه برای پوشش تک لایه می‌باشد، بنابراین نرخ براده برداری سرامیک عایق Si_3N_4 در حالت پوشش دولایه کربن-مس بیشتر می‌باشد.

- میزان براده برداری جانبی در حالت پوشش دولایه مس-کربن، به دلیل افزایش محصولات حاصل از جرقه‌ها، بیشتر است.

- نتایج EDX از سطح قطعه کار نشان می‌دهد که لایه سطحی ایجاد شده ترکیبی از کربن، مس و سیلیسیم می‌باشد.

- فرسایش نسبی ابزار مسی در حالت ایجاد پوشش دولایه در سطح قطعه کار کمتر از حالتی است که صرفاً پوشش تک لایه مس روی سطح قطعه سرامیکی قرار گرفته است.

- براساس نتایج بدست آمده، علاوه بر مکانیزم ذوب و تبخیر به عنوان مکانیزم اصلی در فرآیند EDM، مکانیزم غالب براده برداری برای ماشینکاری سرامیک عایق Si_3N_4 شامل سوختن، تجزیه و اکسید شدن می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] Sh. Sōmiya, F. Aldinger, N. Claussen, R. M. Spriggs, K. Uchino, K. Koumoto, M. Kaneno, *Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties*, Second Edition, pp. 20-60, New York: Academic Press, 2013.
- [2] A. Bilal, M. Pervej Jahan, D. Talamona, A. Perveen, *Electro-Discharge Machining of Ceramics: A Review*, *Micro machines*, Vol. 10, No. 10, pp. 1-41, 2019.
- [3] A. Schubert, H. Zeidler, R. Kühn, M. Hackert-Oschätzchen, *Microelectrical Discharge Machining*:

۲-۳- تأثیر نوع پوشش بر روی فرسایش نسبی ابزار

شکل ۱۲ تأثیر نوع پوشش بر روی فرسایش نسبی ابزار مسی را نشان می‌دهد. همان‌طوریکه ملاحظه می‌شود درصد فرسایش نسبی ابزار در حالت پوشش دولایه کمتر از حالت استفاده از پوشش تک لایه فویل مس بر روی سطح قطعه کار می‌باشد. دلیل این مسئله را می‌توان بدین صورت بیان نمود که با توجه به بیشتر بودن نرخ برداشت ماده از سطح قطعه کار سرامیک نیتريد سیلیسیم در حالت پوشش دولایه نسبت به تک لایه، لذا میزان ماده برداشت شده از سطح قطعه کار نسبت به ابزار (درصد فرسایش نسبی ابزار) در حالت ایجاد پوشش دولایه کمتر خواهد بود. همچنین شکل ۱۳ آنالیز EDX از سطح ابزار مس بعد از ماشینکاری را نشان می‌دهد، با توجه به اینکه در فرآیند EDM معمولاً لایه کربن تجزیه شده از دی الکتریک در روی سطح ابزار قرار می‌گیرد و بر میزان فرسایش آن مؤثر می‌باشد، به نظر می‌رسد در حالت وجود یک لایه اولیه پوشش کربن در سطح قطعه کار (پوشش دولایه)، میزان کربن حاصل از جرقه‌ها بیشتر از حالت پوشش تک لایه فویل مس بوده و به سطح ابزار مسی چسبیده‌اند (جدول ۳)، این ذرات می‌توانند با قرار گیری در سطح ابزار مس و افزایش دمای ذوب سطح، باعث کاهش فرسایش آن در حین ماشینکاری شوند.

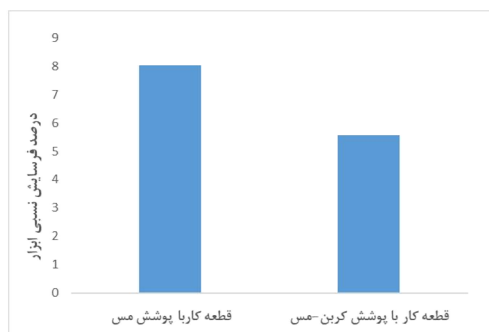


Fig. 12 Effect of coating materials on the TWR

شکل ۱۲ تأثیر جنس پوشش بر روی درصد فرسایش نسبی ابزار مس

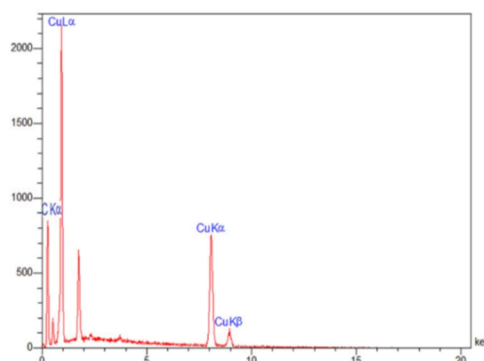


Fig. 13 EDX of copper tool surface after EDM

شکل ۱۳ نتایج EDX از سطح ابزار مس بعد از ماشینکاری قطعه کار با چسب کربن و فویل مس

- [10] M. Shabgard, H. Faraji, B. Khosrozade, H. Eivazi Bagheri, K. Amini, Study the Effects of Dielectric Type on the Machining Characteristics of γ -Ti Al in Electrical Discharge Machining, *International Journal of Engineering Research in Africa*, Vol. 33, pp. 40-49, 2017.
- [11] A. Muttamara, P. Janmanee, Y. Fukuzawa, A Study of Micro-EDM on Silicon Nitride Using Electrode Materials, *International Transaction Journal of Engineering, Management, Applied Sciences & Technologies*, pp. 1-7, 2010.
- [12] F. Klocke, M. Oliviera, U. Degenhardt, T. Herriga, U. Tombula, A. Klinka, Investigation on Wire-EDM Finishing of Titanium Nitride Doped Silicon Nitride in CH-based Dielectrics, *Procedia CIRP*, Vol. 77, pp. 650-653, 2018.
- [13] B. Lauwers, W. Liu, J.P. Kruth, J. Vleugels, D. Jiang, O. Biest, Wire EDM machining of Si_3N_4 , ZrO_2 based ceramics, *International Journal of Electrical Machining*, No. 10, pp. 33-38, 2005.
- [14] D. Rodic, M. Gostimirovic, M. Sekulic, B. Savkovic, B. Strbac, Investigation an assisting electrode powder mixed electrical discharge machining of nonconductive ceramic, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol. 118, pp. 2419-2435, 2022.
- [15] M. Volosova, A. Okunkova, P. Peretyagin, Y. A. Melnik, N. Kapustina, On Electrical Discharge Machining of Non-Conductive Ceramics: A Review, *Technologies*, Vol. 7, pp. 1-16, 2019.
- A Suitable Process for Machining Ceramics, *Journal of Ceramics*, Vol. 2015, pp. 1-9, 2015.
- [4] D. Hanaoka, R. Ito, Y. Fukuzama, Electrical Discharge Machined Surface of the Insulating ZrO_2 Ceramics, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 5, No. 4, pp. 372-384, 2011.
- [5] A. Sabur, M. Yeakub, Md. A. Maleque, A. A. Khan, Investigation of material removal characteristics in EDM of nonconductive ZrO_2 ceramic, *Procedia Engineering*, Vol. 56, pp. 696 – 701, 2013.
- [6] D. Hanaoka, Y. Fukuzawa, C. Ramirez, P. Miranzo, M. I. Osendi, M. Belmonte, Electrical discharge machining of ceramic/carbon nanostructure composites, *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp. 95 – 100, 2013.
- [7] Y. J. Lin, Y.-Ch. Lin, A-Ch. Wang, D. Wang, H.M. Chow, Machining characteristics of EDM for non-conductive ceramics using adherent copper foils, *Advanced Materials Research*, Vol. 154-155, pp. 794-805, 2011.
- [8] M. Mahboubkhah, A. Ziae azar, Determination of the optimal grinding parameters of oxide ceramics through experimental tests, *The First National Conference on Computational and Experimental Mechanics, Tehran, Iran, 28 February, 2019.*, (in Persian فارسی)
- [9] M. Emami, M. Sdeghi, Study of the effect of lubricant type and tool (grinding wheel) material on the performance of minimum quantity lubrication in grinding of advanced ceramics, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 281-292, 2018. (in Persian فارسی)