

بررسی اثرات ماشینکاری EDM بر ریز ساختار سطح در فولاد CK45

سینا عابدپور^۱اسماعیل جعفری^۲احمد افسری^۳سعید حدیدی مود^{۴*}

* نویسنده مسئول: hadidi@um.ac.ir

چکیده

ماشینکاری به روش تخلیه الکتریکی (EDM) برای براده برداری فلزات و مواد رسانای الکتریکی با سختی بالا و همچنین برای ماشینکاری قطعاتی با فرم های پیچیده کاربرد دارد. این ویژگی ها سبب شده تا این روش ماشینکاری برای ساخت قالب های کوبشی، به روشی مقرون به صرفه و کاربردی تبدیل شود. به دلیل ماهیت این فرایند در سطح موضع ماشینکاری تنش های حرارتی و میکرو ترک ها در سطح موضع ماشینکاری ایجاد می شوند. فولاد (CK45) در ساخت قالب های کوبشی کاربرد دارد و طیف وسیعی از قالب ها از این فولاد ساخته می شوند. در این مقاله تأثیر پارامترهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر روی سطح ماشینکاری شده فولاد CK45 مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور فرآیند EDM با پارامترهای مختلف، روی مجموعه ای از نمونه ها، انجام شده و سطح آنها توسط میکروسکوپ نوری بررسی و رابطه پارامترهای ماشینکاری با صافی سطح (Ra) و تراکم میکرو ترک های سطحی به روش برازش، ارزیابی کمی شده است. هدف از این پژوهش آن است که با استفاده از نتایج حاصل بتوانیم در هنگام ماشینکاری قالب، صافی سطح و میزان میکرو ترک ها را با توجه به پارامترهای ماشینکاری پیش بینی کنیم. در نتیجه امکان انتخاب مناسب پارامترهای ماشینکاری به منظور دستیابی به کیفیت مطلوب فراهم می شود.

واژه های کلیدی: میکرو ترک، صافی سطح، ماشینکاری تخلیه الکتریکی، فولاد (CK45)، پارامترهای ماشینکاری.

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز.

۲- استادیار گروه مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز.

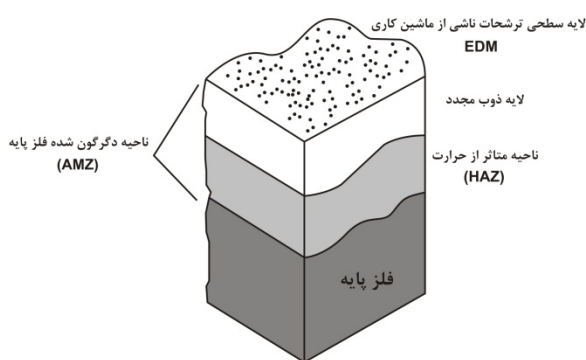
۳- استادیار گروه کارشناسی ارشد ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز.

۴- استادیار گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

۱- مقدمه

در جریان ماشینکاری EDM دو الکتروود به فاصله ۰/۵ تا ۰/۱ میلیمتر در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند. ابزار، قطب کاتد و قطعه قطب آند می‌باشد و فضای بین این دو با یک سیال دی‌الکتریک اشباع شده است. اختلاف پتانسیلی به صورت مقطعی (پالسی) بین این دو الکتروود برقرار شده و به دلیل کمی فاصله بین ابزار و قطعه کار، دی‌الکتریک تجزیه می‌شود. فرایند تجزیه به صورت متمرکز در یک کانال با قطر تقریبی ۲۰ میکرومتر اتفاق می‌افتد. علت تجزیه، مهاجرت الکترون‌ها از کاتد به آند به علت وجود میدان القایی است. الکترون‌های مهاجر با اتمهای دی‌الکتریک تصادم کرده و یون‌های مثبت و الکترون‌ها به صورت تصاعدی ایجاد می‌شوند. یون‌های مثبت به سمت کاتد و الکترون‌ها به سمت آند شتاب می‌گیرند. با افزایش تصاعدی یون‌ها و الکترون‌ها ابری از ذرات باردار ایجاد شده و با مهاجرت این ذرات باردار به الکتروودها یک جریان ایجاد می‌شود. وقتی این ذرات باردار به سطح الکتروودها برخورد کنند انرژی جنبشی‌شان به گرما تبدیل می‌شود. این دما به دلیل تمرکز بالا، بیشتر از دمای جوش تمامی فلزات است ولی به دلیل وجود فشار کانال پلاسما فلز بخار نمی‌شود. پس از قطع جریان پالسی این فشار به صورت ناگهانی حذف گردیده و با حذف این فشار پدیده جوشش حجمی رخ داده و از سطح قطعه براده برداری صورت می‌گیرد [۱]. سپس موضع گداخته شده توسط مایع دی‌الکتریک به سرعت خنک می‌شود و در موضع براده برداری تنش پسماند حرارتی ایجاد می‌شود که علاوه بر تغییرات سطحی در قطعه به خاطر عمل براده برداری، سه لایه مشخص از نظر ساختار متالورژیکی در سطح قطعه به وجود می‌آید. مطابق شکل (۱) این لایه‌ها عبارت‌اند از: (۱) لایه حاصل از قطره‌های کروی مذاب فلز قطعه، ابزار و ترشحات محل تخلیه جرقه (۲) لایه ذوب مجدد (فلز سفید) که در نتیجه ماشینکاری با تخلیه الکتریکی ساختار متالورژیکی آن تغییر یافته و توسط انجماد مجدد فلز گداخته شده، در حوضچه جوش، ایجاد شده است، این لایه

فاز سخت ماتریتی دارد و به دلیل وجود تنش‌های حرارتی پسماند در این لایه میکروتُرک‌های زیادی ایجاد می‌شود [۲، ۳] لایه انتقال حرارت که منطقه انتقال حرارت حوضچه جوش به فلز پایه را تشکیل می‌دهد [۱]. در قالب‌های کوبشی باید سطح سختی بر روی بستری نرم ایجاد شود تا قالب بتواند در برابر پدیده خستگی مقاومت کند. ایجاد شدن لایه‌های پیش گفته شده، در جریان ماشینکاری با EDM، سطح مورد نیاز برای قالب را ایجاد می‌ند و قالب‌ای تولید شده دیگر نیاز به سخت کاری سطحی ندارند.



شکل (۱) مناطق حرارتی ایجاد شده در سطح قطعه در نتیجه فرآیند EDM

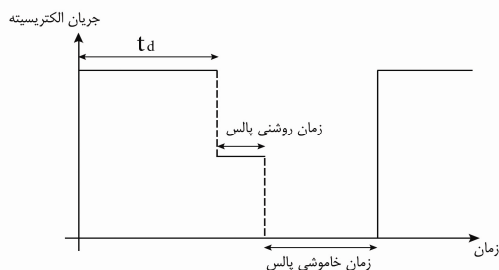
تنش‌های حرارتی ایجاد شده در سطح قطعات اکثراً مضر هستند و همین تنش‌ها در سطح لایه ذوب مجدد، که جنسی ترد دارد، باعث به وجود آمدن میکروتُرک‌ها می‌شود. مشخص کردن ارتباط پارامترهای ماشینکاری با مقدار میکروتُرک‌های ایجاد شده در سطح قطعه کار، برای انتخاب پارامترهای مناسب در ساخت قالب کوبشی لازم است. (هنگامی که قطعه کوبیده می‌شود سطوح داخلی قالب نیز از طرف قطعه تحت بار فشاری قرار دارند. سطوح ماشینکاری شده توسط EDM تنشهای حرارتی و میکروتُرک‌ها تنها در سطح لایه ذوب مجدد تشکیل می‌شوند) لایه HAZ جنسی نرم‌تر نسبت لایه ذوب مجدد دارد پس چنانچه این سطح زیر بار فشاری قرار بگیرد، لایه بالایی (ذوب مجدد) تحت فشار و لایه پایینی HAZ تحت کشش قرار می‌گیرد. در نتیجه ترک تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد (یعنی کوپل در جهت بسته شدن ترک‌ها است). بولنت اکمکسی و همکاران رفتار میکروتُرک‌ها را در

مقدار جریان الکتریکی و زمان اعمال این جریان می باشد که مقدار جریان همان آمپر و مدت زمان اعمال آن همان زمان روشنی پالس است. زمان خاموشی پالس، علاوه بر زمان شست و شو، زمان خنک شدن موضع ماشینکاری شده نیز است. بنابراین اثرات آن بر روی سطح ماشینکاری شده باید دقیق تر بررسی شود و پارامتر ولتاژ نیز کیفیت جرقه ایجاد شده را تحت تأثیر قرار می دهد که این امر روی مقدار انرژی جذب شده توسط قطعه کار تأثیر می گذارد. با اطلاعاتی که از بزرگ نمایی (AFM) به دست آورده تنها سطح محل اثر یک جرقه را مورد بررسی قرار داد در حالی که صافی سطح شامل میانگینی از مجموع پستی و بلندی ها در روی سطح است. از سوی دیگر به رغم اینکه با افزایش انرژی در محل اثر یک جرقه مقدار میکروتراک ها افزایش می یابد، تعداد اثرات جرقه در واحد سطح کاهش پیدا می کند. پس برای مطالعه تمامی سطح بایستی مسئله را با دید کلی تری بررسی کرد.

کیفیت خواص متالورژیکی لایه ذوب مجدد در قالب های کوبشی داری اهمیت است زیرا استفاده از مواد روانکار در جریان فرایند کوبیده شدن و مقدار اصطکاک سطح بر نحوه و مقدار اعمال نیروی کوبیده شدن و به تبع آن بر هزینه تأثیر زیادی دارد. در نتیجه کیفیت خواص متالورژیکی لایه ذوب مجدد و واکنش آن با ماده روانکار و سایر عوامل محیطی اهمیت می یابد. رامجیت باسو و همکاران به بررسی اثر ماشینکاری EDM بر روی TiCN پرداختند و رفتار عناصر آلیاژی را در موضع ماشینکاری شده مورد مطالعه قرار دادند [۵]. آنها تأثیر پارامترهای ماشینکاری را بر روی این عناصر آلیاژی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ روبشی الکترونی (SEM) نشان دادند. ایشان همچنین نحوه انتقال ماده فلز پایه را از موضع ماشینکاری به ابزار مورد استفاده در جریان فرآیند را مورد بررسی قرار داده و مقدار عناصر آلیاژی در سطح قطعه کار را قبل و بعد از تشکیل لایه ذوب مجدد اندازه گرفتند [۵]. وجود کربن در مایع دی الکتریک مورد استفاده در این تحقیق باعث نفوذ کربنی در لایه ذوب مجدد می شود که بر

جریان ماشینکاری EDM بر روی سطح فولاد میکروآلیاژی مورد بررسی قرار دادند و به این نتایج رسیدند که اثر حرارتی موضع گداخت جرقه به مانند یک ضریب برای تشکیل میکروتراکهای سطحی عمل می کند [۳]. همچنین تنش های حرارتی ایجاد شده در موضع ماشین کاری از نوع فشاری هستند و میکروتراک ها در زیر کشش موضعی قرار دارند [۳]. هنگامی که فلز مذاب منبسط شده در موضع ماشینکاری، به سرعت سرد می شود. فلز ذوب شده تمایل دارد که به حجم اولیه خود باز گردد ولی انجماد سریع مانع آن می شود. بنابراین نوعی تنش کششی از کناره ها به سمت مرکز محل اثر جرقه به وجود می آید. در نتیجه برای خود محل اثر جرقه، این تنش فشاری است و میکروتراک ها باید در مرزها ایجاد شوند. حال اگر نیروی فشاری بر روی این سطح قرار بگیرد، در جهت بسته شدن میکروتراک ها عمل می کند که برای قالب کوبشی امر مثبتی است. در حالت عادی میکروتراک ها زیر موضع کششی هستند. مقدار تغییرات انرژی پالس در جریان فرایند ماشینکاری، باعث تغییر در اندازه ناحیه متأثر از حرارت می شود که این امر باعث تغییر در میزان تنش به وجود آمده در سطح قطعه کار حاصل از فرآیند ماشینکاری است. در نتیجه پارامترهای ماشینکاری که تأثیر زیادی بر روی مقدار تغییرات انرژی پالس دارند، اهمیت بیشتری پیدا می کنند. اثرات ماشینکاری EDM بر روی فولاد ابزار (AISI D2) را با استفاده از میکروسکوپ اتمی اسکن کننده (AFM) بررسی کرده و توانسته است تصویر سه بعدی از سطح موضع ماشینکاری تهیه کند که در آن میکروتراک ها به خوبی مشخص شده اند [۴]. وی نتیجه گرفت که روند ماشینکاری مناسب برای مرحله پرداخت کاری نهایی، مستلزم پایین آوردن انرژی پالس است و صافی سطح و عمق میکروتراک ها با مقدار انرژی ماشینکاری رابطه مستقیم دارند. به علاوه با استفاده از (AFM) اطلاعات مربوط به عمق میکروتراک ها را برای انتخاب مناسب پارامترهای ماشین کاری فولاد ابزار (AISI D2) مورد بررسی قرار داد [۴]. تغییرات انرژی اعمالی در موضع ماشینکاری شده تابع

ایجاد کانال یونی و تشکیل پلاسما. t_{off} زمان قطع کانال و زودودن ذرات مذاب از محل جرقه. این سه مرحله در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲) مراحل طی شده در هر جرقه

۳-۲- شرح انجام آزمایش

ابتدا نمونه‌هایی از فولاد CK45 را به قطر ۳ سانتیمتر تهیه شد. علت انتخاب این قطر آن است که برای آمپرها، بالا، طبق دستورالعمل شرکت سازنده ماشین اسپارک مورد استفاده در جریان آزمایش، در حین عملیات ماشینکاری حداقل سطح مورد نیاز ۷ سانتیمتر مربع است. جنس ابزار از نوع مرسوم، مس با خلوص ۹۹/۹۸ و سطح مقطع ابزار ۳ سانتیمتر مربع است. نوع دی‌الکتریک نیز از نوع دی الکتریک مرسوم در کارگاه‌های قالب سازی یعنی گازوئیل انتخاب شده است. پارامترهای ماشینکاری مورد استفاده در جریان آزمایش برای ولتاژ، زمان خاموشی جرقه و زمان روشنی جرقه، پارامترهایی هستند که برای ماشینکاری اسپارک به صورت استاندارد شده، در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند و آمپر با توجه به آزمایش‌های آنتونی دیسکوئیدرس انتخاب شده است [۷]. در این آمپرها تغییرات شیب در نمودار (نسبت تغییرات آمپر به صافی سطح) اتفاق می‌افتد. با وجودی که نوع جنس قطعه و ابزار در آزمایش‌های ذکر شده متفاوت است با این حال در جریان هر دو آزمایش تغییرات شیب نمودار در این مقادیر آمپر اتفاق افتاده و در روند آزمایش‌ها نیز این مقادیر آمپر به عنوان مبنا در نظر گرفته شده است. پارامترهای ماشینکاری در جریان آزمایش در جدول (۲) نشان داده شده است.

روی استحکام و صافی سطح این لایه تأثیر می‌گذارد. در نتیجه جنس ماده دی‌الکتریک و مقدار ضریب هدایت گرمایی آن در جریان هر آزمایش بر روی خواص متالورژیکی لایه ذوب مجدد اثر گذار است. لذا نتایج تحقیقات بیک رامجیت باسو بر روی TiCN باید بازنگری شود. در این تحقیق با اینکه خواص متالورژیکی سطح فلز بررسی نشده ولی آثار تغییرات متالورژیکی در روی مقدار میکروترک‌های ایجاد شده مشهود است.

۲- شرح آزمایش

در این بخش به شرح آزمایش مورد نظر مقاله پرداخت می‌شود:

۲-۱- جنس قطعه کار

فولاد به کار رفته در این آزمایش، طبق استاندارد دین (DIN) با نام CK45 و در استاندارد AISI با نام 1045 شناخته می‌شود. درصد عناصر آلیاژی آن طبق جدول (۱) است [۳].

جدول (۱) درصد عناصر آلیاژی فولاد مورد آزمایش در این تحقیق [۳]

نام	شماره	ماکزیوم درصد عناصر آلیاژی			
	UNS	C	Mn	P	S
۱۰۴۵	G1۰۴۵	۰/۴۲-۰/۵	۰/۸-۰/۵	۰/۰۴	۰/۰۵

این فولاد قابلیت عملیات حرارتی خوبی دارد و از کاربردهای آن ساخت قالب‌های فورج است.

۲-۲- نوع ژنراتور EDM

ولتاژ و جریان مورد نیاز ماشینکاری توسط ژنراتور دستگاه تأمین می‌گردد. یک سرؤموتور محور Z (ابزارگیر) را به شکلی تحت کنترل دارد تا فاصله ابزار نسبت به قطعه کار همیشه در حالتی قرار بگیرد که محیط مناسبی برای ایجاد جرقه فراهم شود. در این حالت جرقه میان ابزار و قطعه کار در حالت ایدئال اتفاق می‌افتد و از بروز اتصال کوتاه و یا عدم ایجاد جرقه و در نتیجه آلودگی دی‌الکتریک اجتناب می‌شود. به طور خلاصه هر جرقه در یک پروسه زمانی سه قسمتی کامل می‌شود. ۱- t_d زمان تشکیل میدان الکتریکی و یونیزاسیون دی‌الکتریک. ۲- t_{on} زمان

شده در سطح موضع ماشینکاری شده با توجه به پارامترهای فرآیند ماشینکاری اسپارک، قابل پیش‌بینی باشد.

جدول (۲) پارامترهای ماشین کاری مورد استفاده حین آزمایش

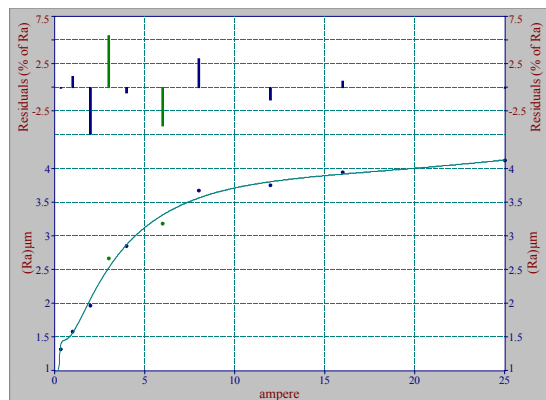
آمپر	زمان روشنی جرقه μsec	زمان خاموشی جرقه μsec	ولتاژ
۰.۱۳۳	۱۲	۶	۳۰
۱	۲۵	۱۲	۴۰
۲	۵۰	۲۵	۴۵
۳	۱۰۰	۵۰	-
۴	۲۰۰	۱۰۰	-
۶	۴۰۰	۲۰۰	-
۸	۸۰۰	۴۰۰	-
۱۲	۱۵۰۰	۸۰۰	-
۱۶	-	-	-
۲۵	-	-	-

۳- تحلیل نتایج

در ادامه به تحلیل نتایج به دست آمده پرداخته می‌شود.

۳-۱- صافی سطح

تغییرات (R_a) میانگین نسبت به پارامترهای ماشین کاری در فرآیند اسپارک در شکل‌های (۳) تا (۶) مشاهده می‌شود.



شکل (۳) تغییرات زبری سطح با آمپر اعمالی

براساس نتایج این نمودار با افزایش مقدار آمپر در ابتدا، مقدار زبری سطح با شیب نسبتاً زیادی افزایش پیدا می‌کند و سپس روند تغییرات آرام می‌شود. این امر در آزمایش‌های متالوگرافی انجام شده به این صورت است که روند تغییرات قطر اثر محل جرقه کند می‌شود. علت این تغییر را می‌توان این گونه بیان کرد که قابلیت جذب انرژی حاصل از فرآیند توسط قطعه در مقادیر پایین انرژی، بالا است. ولی با افزایش

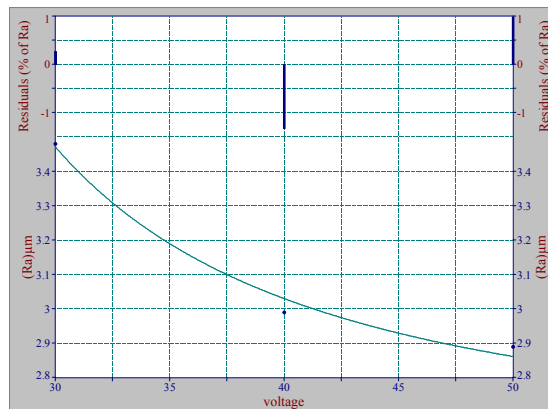
شرایط آزمایش به گونه‌ای است که تنها یک متغیر تغییر می‌کند و باقی متغیرها ثابت در نظر گرفته می‌شوند (به استثنای فاصله ابزار و قطعه کار که در طول فرایند ماشینکاری با استفاده از اطلاعات دریافتی از موضع ماشینکاری به صورت خودکار، برای ایجاد جرقه ایدئال تغییر می‌کند). قطعات به ترتیب با تغییر متغیر آمپر، زمان روشنی جرقه، زمان خاموشی جرقه و ولتاژ ماشینکاری شده اند. در مرحله بعدی صافی سه نقطه از سطح هر نمونه با تکنیک R_a اندازه‌گیری شده است. دستگاه مورد استفاده TR100 ساخت شرکت تایم^۱ است. نمودارهای تغییرات پارامترهای ماشینکاری نسبت به میانگین صافی سطح سه نقطه از هر نمونه، به روش رگرسیون رسم شده است. در گام بعدی از سطح ماشینکاری شده تصویر با استفاده از میکروسکوپ نوری تهیه شده است. به کمک این تصاویر طول و عرض میکروتترک‌های ایجاد شده در موضع تخلیه الکتریکی یک جرقه اندازه‌گیری شده است. محل اثر جرقه روی سطح کار، شبیه به یک دایره است. بنابراین اثر محل جرقه‌ها توسط یک دایره فرضی احاطه شده و برای هر نمونه ماشینکاری شده، این کار برای سه اثر جرقه انجام گرفته است و میانگین قطر این سه اثر به عنوان قطر اثر محل جرقه نامگذاری شده است. در گام بعدی نمودار مساحت اشغال شدخ توسط میکروتترک‌ها نسبت به قطر اثر جرقه، به کمک روش رگرسیون رسم شده است. این نمودارها کمک می‌کنند تا در گام بعدی مساحت میکروتترک‌ها در سطح معینی از قطعه کار، با توجه به تعداد اثر جرقه در آن سطح مشخص شده (۴۰۰×۵۰۰ میکرومتر)، قابل محاسبه باشد. یک نمودار روابط میان تغییرات پارامترهای ماشینکاری (آمپر، زمان روشنی جرقه، زمان خاموشی جرقه و ولتاژ) به صورت مستقل از یکدیگر و مساحت جرقه‌ها در سطح نمونه را نشان می‌دهد که باعث می‌شود مقدار میکروتترک ایجاد

دلیل این رفتار را می‌توان این‌طور بیان کرد که با افزایش زمان جرقه، زمان لازم برای جذب یک مقدار ثابت انرژی توسط قطعه کار افزایش می‌یابد. در نتیجه براده بیشتری از سطح قطعه برداشته شده و به دنبال آن کیفیت سطح کاهش می‌یابد. با ادامه زمان جرقه حرارت در موضع ماشینکاری منتشر شده و لبه‌های چاله ایجاد شد در اثر براده برداری ذوب می‌شود و با پخش شدن لایه مذاب، سطح قطعه کار یکنواخت می‌شود. در ادامه با طولانی‌تر شدن زمان روشنی جرقه فلز مذاب موجود در مرکز اثر جرقه به تبخیر شدن ادامه می‌دهد تا جایی که مذاب حاصل از ذوب نواحی اطراف نیز قادر نیست تا آن را هم سطح کند. بنابراین کیفیت سطح کاهش می‌یابد.

علت رفتار سینوسی صافی سطح نسبت به زمان خاموشی جرقه^۱ را می‌توان به ایجاد پل کربنی مقاوم الکتریکی، ناشی از تجزیه دی‌الکتریک، نسبت داد. در حالت ایدئال می‌توان رفتار زبری سطح نسبت به آن را به صورت یک خط افقی بیان کرد که تأثیر خاصی از خود برجای نمی‌گذارد.

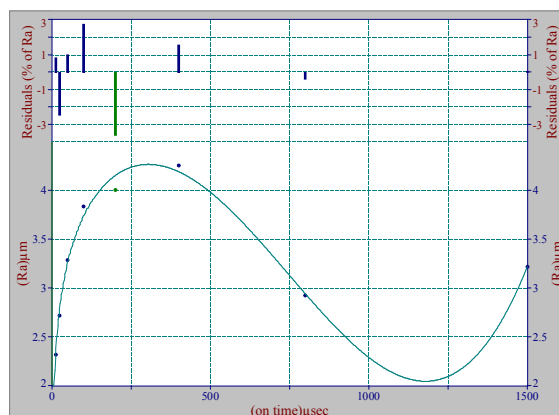
با توجه به نمودارها این‌گونه استنباط می‌شود که صافی سطح بیشتر متأثر از دو پارامتر زمان روشنی جرقه و آمپر است. در شکل (۷) تغییرات دو پارامتر آمپر و زمان روشنی جرقه نسبت به صافی سطح به کمک برازش دو متغیره رسم شده‌اند. به کمک شکل (۷) می‌توان صافی سطح در جریان ماشینکاری فولاد (CK45) پیش‌بینی کرد. در این شکل دید کلی از تأثیر رفتار متغیرها روی صافی سطح به صورت عمومی حاصل می‌شود.

مقدار انرژی قابلیت جذب آن توسط قطعه کم می‌شود و در نتیجه نسبت براده‌برداری با توجه به تغییرات انرژی کم می‌شود که نتیجه آن آرام شدن شیب نمودار صافی سطح نسبت به تغییرات آمپر (انرژی) است.

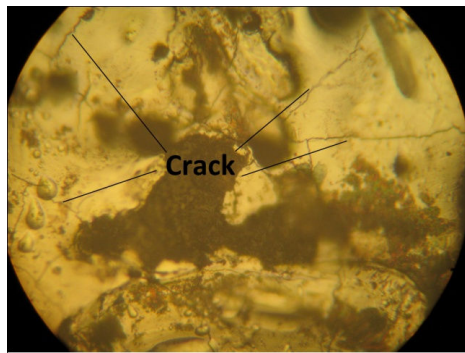


شکل (۴) تغییرات زبری سطح با ولتاژ اعمالی

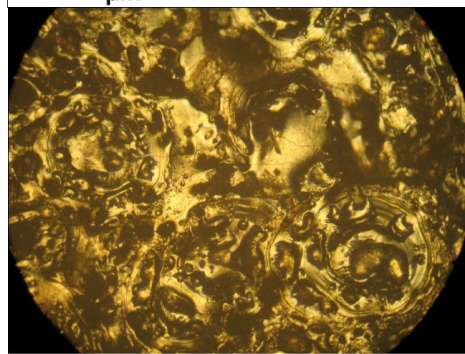
همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، صافی سطح با افزایش مقدار ولتاژ، اندکی بهبود می‌یابد. علت این رفتار را می‌توان این‌گونه توضیح داد که افزایش ولتاژ باعث پایداری بیشتر کانال پلاسما در جریان فرایند ایجاد جرقه می‌شود و در نتیجه محل اثر جرقه ایجاد شده در روی قطعه کار انحراف کمتری نسبت به محل اثر جرقه در روی ابزار خواهد داشت. بنابراین مقدار ترشحات ناشی از جرقه کاهش یافته و صافی سطح افزایش می‌یابد.



شکل (۵) تغییرات زبری سطح با زمان روشنی جرقه

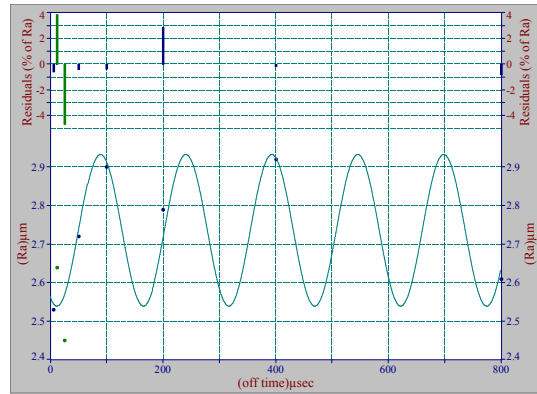


125 μm

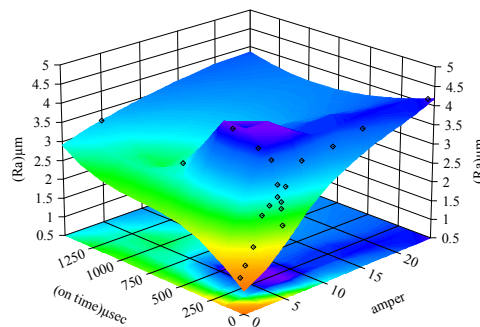


250 μm

شکل (۹) ماشینکاری روی نمونه ای با پارامترهای زمان



شکل (۶) تغییرات زبری سطح با زمان خاموشی جرقه

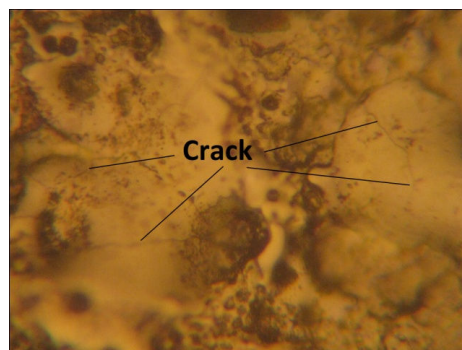


شکل (۷) تغییرات صافی سطح با آمپر و زمان روشنی جرقه

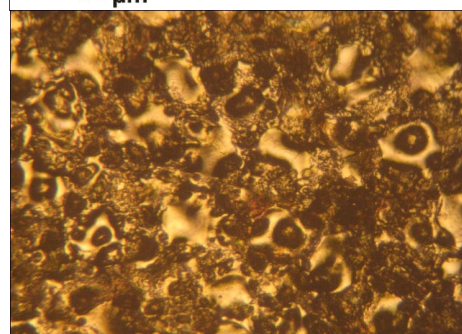
۲-۳- میکروترک‌ها

در شکل (۸) و شکل (۹) دو اسلاید تهیه شده به کمک میکروسکوپ نوری از نمونه‌ها مشاهده می‌شود که از آنها برای تعیین مساحت میکروترک‌ها نسبت به قطر آنها استفاده شده است. روشنی جرقه $800 \mu\text{s}$ ، آمپر ۵، زمان خاموشی جرقه $40 \mu\text{s}$ ، ولتاژ ۴۰ ولت. در اسلاید اول میکروترک‌ها و در اسلاید دوم دایره محاط شده به اثر یک جرقه مشاهده می‌شود. همان‌طور که در مقایسه این دو اسلاید نمونه نیز مشاهده می‌شود هر چه قدر انرژی دریافتی از فرایند EDM بیشتر باشد، ترک‌ها با طول و عرض بیشتری در نقطه اثر جرقه ایجاد می‌شوند. از طرف دیگر قطر اثر جرقه نیز افزایش پیدا می‌کند. در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) مساحت میکروترک‌ها در محل اثر یک جرقه نسبت به تغییرات قطر اثر جرقه نشان داده شده است.

علت این رفتار متفاوت برای پارامتر زمان روشنی جرقه را می‌توان در شکل (۹) مشاهده نمود. با افزایش زمان روشنی جرقه از یک حد مشخص دیگر تمامی فلز موضع



50 μm



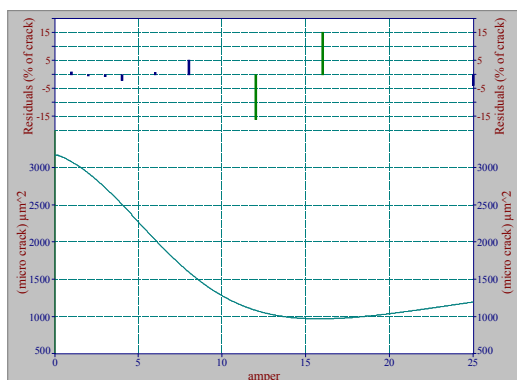
100 μm

شکل (۸) ماشینکاری روی نمونه ای با پارامترهای زمان روشنی جرقه $800 \mu\text{s}$ ، آمپر ۱، زمان خاموشی جرقه $40 \mu\text{s}$ ، ولتاژ ۴۰ ولت.

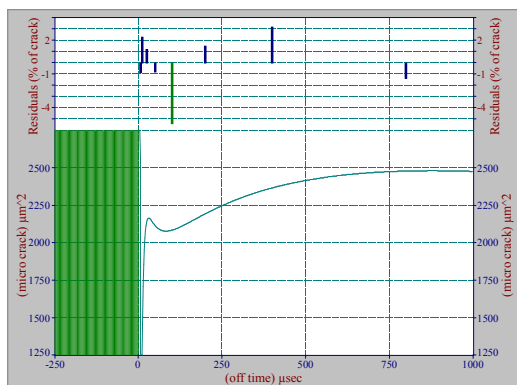
در اسلاید اول میکروترک‌ها و در اسلاید دوم دایره محاط شده به اثر یک جرقه مشاهده می‌شود.

علت این رفتار پارامتر آمپر را می‌توان این گونه بیان کرد که هر چه قدر انرژی دریافتی از فرایند EDM بیشتر باشد ترک‌های با طول و عرض بیشتری در نقطه اثر جرقه ایجاد می‌شوند. ولی از سوی دیگر در این حالت اثر جرقه نیز افزایش پیدا می‌کند. مساحت ترک‌ها در یک سطح مشخص به علت بیشتر بودن تعداد اثر جرقه روی سطح در ماشینکاری‌های با انرژی پایین، می‌تواند بیشتر از مساحت میکروتُرک‌ها در همان سطح مشخص، در حالت ماشینکاری با انرژی بالا باشد.

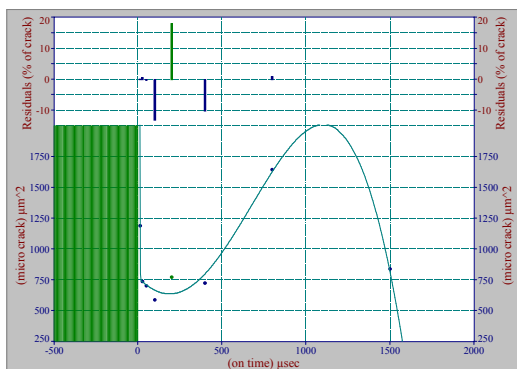
اثر جرقه بخار نمی‌شود و بخشی از انرژی جرقه فرصت پیدا می‌کند تا به صورت حرارت به نقاط همسایگی محل اصابت جرقه انتقال پیدا کند. و این حرارت با دور شدن از محل اصابت تنها می‌تواند فلز را ذوب کند. این فلز مذاب سرد شده به صورت لایه‌های چین‌خورده متحدالمرکز نسبت به محل اصابت جرقه، در شکل (۹) قابل مشاهده است. پس این رفتار را می‌توان به این امر نسبت داد که مذاب حاصل از ذوب نواحی جانبی سطح ترک‌ها را می‌پوشاند و آنها را مجدداً جوش می‌دهد.



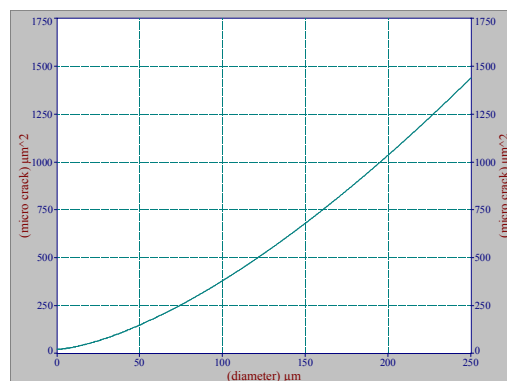
شکل (۱۲) تغییرات مساحت میکروتُرک‌ها در سطح با آمپر اعمالی



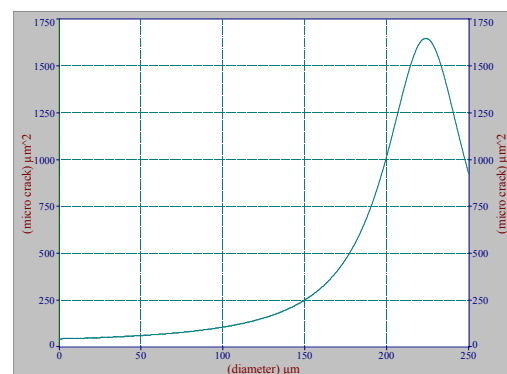
شکل (۱۳) تغییرات مساحت میکروتُرک‌ها در سطح با زمان خاموشی جرقه



شکل (۱۴) تغییرات مساحت میکروتُرک‌ها در سطح با زمان روشنی جرقه



شکل (۱۰) تغییرات مساحت میکروتُرک‌ها (محور عمودی) به قطر دانه‌ها (محور افقی) برای پارامترهای زمان خاموشی جرقه، ولتاژ، آمپر



شکل (۱۱) تغییرات مساحت میکروتُرک‌ها (محور عمودی) به قطر دانه‌ها (محور افقی) برای پارامتر زمان روشنی جرقه

حال به کمک اطلاعات شکل‌های (۱۰) و (۱۱) همان طور که در بخش شرح آزمایش ذکر شد میزان مساحت میکروتُرک‌ها در سطحی از نمونه به مساحت $20000 \mu\text{m}^2$ نسبت به پارامترهای ماشینکاری به صورت مستقل از یکدیگر، در شکل‌های (۱۳) تا (۱۴) نشان داده شده است.

(۲) رابطه میزان میکروترک ها با قطر موضع اثر جرقه در دامنه تغییرات پارامتر زمان روشنی جرقه، در ابتدا مشابه رفتار این رابطه در پارامترهای زمان خاموشی جرقه، آمپر و ولتاژ است ولی در ادامه روند ماشینکاری و با طولانی شدن زمان روشنی جرقه به دلیل وجود انتقال حرارت میزان میکروترک ها، سیری نزولی پیدا می کنند.

(۳) قابلیت آبکاری خوب CK45 باعث توزیع یکنواخت میکروترک ها در تمام سطح آن شده است.

(۴) پیش بینی می شود که رفتار دو گانه زمان روشنی جرقه در فلزات با ضریب انتقال حرارت بالاتر از CK45 تشدید شود. ولی برای فلزاتی که ضریب انتقال حرارت و یا دمای ذوب بالاتری دارند این رفتار دو گانه کاهش یابد.

(۵) طول و عرض میکروترک ها با افزایش مقدار انرژی دریافتی از ژنراتور برای محل اثر یک جرقه افزایش می یابد اما در مساحت ثابت طول میکروترک ها کاهش یافته ولی عرض آنها همچنان افزایش می یابد

(۶) پیش بینی می شود که استفاده از دی الکتریک با ضریب انتقال حرارت بسیار بالا رفتار دو گانه پارامتر زمان روشنی جرقه را کاهش خواهد داد.

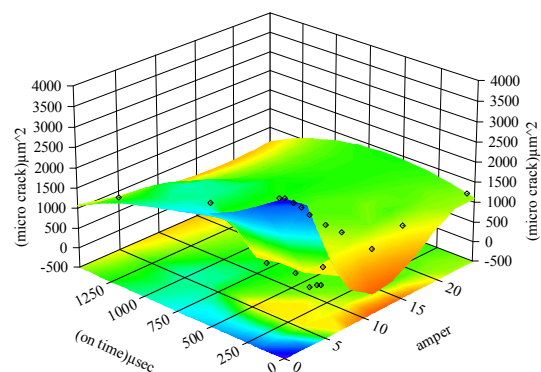
مراجع

- [1] McGeough, J. A., *Advanced Methods of Machining*, First edition, Chapman and Hall, USA, 2000.
- [2] Kruth J. P., Stevens L., Froyen L. and Lauwers B., *Study on the white layer of a surface machined by die sinking electro-discharge machining*, Annals of the CIRP Vol. 44 (1), 1995, pp. 169-172.
- [3] Ekmekci B., Elkoca O., Tekkaya A. E. and Erden A., *Observations on cracking behavior of micro alloy steel in electric discharge machining EDM*, 10th International Conference on Machine Design and Production, Cappadocia, Turkey, 2002.
- [4] Guu Y. H., AFM surface imaging of AISI D2 tool steel machined by the EDM process, *Applied Surface Science*, Vol 242(3-4), 2005, pp. 245-250.
- [5] Manoj Kumar B. V., Ramkumar J., Basu B. and Kang S., Electro-discharge machining performance of Ti CN-based cermets, *Int. J. Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 25, 2007, pp. 293-299.

تغییرات میکروترک ها نسبت به پارامتر زمان خاموشی پالس ناچیز است که علت همان تغییرات ناچیز را می توان به اثراتی که بر روی شستشوی موضع ماشینکاری دارد نسبت داد.

با افزایش زمان روشنی جرقه مقدار انرژی وارد شده به سطح قطعه برای انجام عملیات براده برداری در واحد زمان افزایش می یابد که این افزایش انرژی سبب می شود که مقدار تنش های حرارتی پسماند در سطح قطعه افزایش پیدا کند و در نتیجه مقدار میکروترک های سطحی افزایش می یابد. ولی در ادامه با طولانی تر شدن زمان روشنی جرقه مقدار میکروترک ها سیری نزولی پیدا می کنند که علت این رفتار در توضیح شکل (۱۱) بیان شد.

همانطور که مشاهده می شود، دو پارامتر زمان روشنی جرقه و آمپر بیشترین تأثیر را روی تغییرات مساحت میکروترک ها دارند. بنابراین در شکل ۱۵ تغییرات این دو پارامتر نسبت به مساحت میکروترک ها ترسیم شده است، که از این شکل می توان در پیش بینی مقدار میکروترک ها استفاده کرد.



شکل (۱۵) رابطه آمپر و زمان روشنی جرقه با میزان مساحت میکروترک ها در سطحی به مساحت $(200000 \mu\text{m}^2)$

۴- نتیجه گیری

به طور خلاصه از مباحثی که مطرح شد می توان به نتایج زیر اشاره کرد:

(۱) دو پارامتر زمان روشنی جرقه و آمپر پارامترهایی هستند که نقش اصلی را در کیفیت سطح نهایی ماشینکاری شده با روش EDM و با استفاده از ژنراتور ایزوپالس ایفا می کنند.

- [6] Bringas J. E, Handbook of comparative world steel standards, 2nd ed., (ASTM data series. DS 67A), USA, 2008.
- [7] Descoedres A., Characterization of electrical discharge machining plasmas, PhD thesis, Mechanical and Mechatronic Engineering, University of Lausanne, EPFL, 2006.