



مطالعه تاثیر فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی بر روی تنش‌های پسماند و سختی سطح آلیاژ Ti-6Al-4V

محمد رضا شبگرد^{1*}، بهنام خسروزاده²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

*تبریز، صندوق پستی 5166616471، mrshabgard@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 تیر 1395

پذیرش: 23 تیر 1395

ارائه در سایت: 24 مرداد 1395

کلید واژگان:

EDM

ارتعاشات فراصوتی

سلامت سطح

تیتانیوم

تنش پسماند

چکیده

یکی از فرآیندهای ماشین کاری معمول و پرکاربرد برای ماشین کاری فلزات و آلیاژهای سخت که با روش‌های ماشین کاری سنتی قابلیت ماشین کاری پایینی دارند، ماشین کاری تخلیه الکتریکی است. با توجه به ماهیت ترموالکتریکی این فرآیند، تغییرات خواص متالورژیکی و مکانیکی سطح ماشین کاری شده و ایجاد تنش‌های پسماند در قطعات اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با فرآیند تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی ابزار انجام شده است و تاثیر ارتعاشات فراصوتی ابزار بر بازده ماشین کاری و سلامت سطح تولید شده از جمله میکروتورک‌های ایجاد شده، تنش‌های پسماند و سختی سطح ارزیابی شده است. سطح نمونه‌های ماشین کاری شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی عکس‌برداری شده تا اندازه و توزیع میکروتورک‌های سطحی مطالعه گردد؛ تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند در امتداد عمق سطوح ماشین کاری شده، با روش نانوآیندتیشین ارزیابی شده و سختی سطوح ماشین کاری شده با استفاده از دستگاه میکروسختی سنج اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد اعمال ارتعاشات فراصوتی بازده فرآیند ماشین کاری را افزایش داده (میانگین افزایش 90% در نرخ براده برداری)، باعث کاهش مقدار و اندازه میکروتورک‌های سطح شده، توزیع تنش‌های پسماند را تغییر داده و سطح آن را (تقریباً 17%) کاهش داده است؛ افزایش سختی سطح در ماشین کاری تخلیه الکتریکی با ارتعاشات فراصوتی تقریباً 13% بیشتر از فرآیند سنتی تخلیه الکتریکی است.

Study on the effect of ultrasonic assisted electrical discharge machining process on residual stress and hardness of Ti-6Al-4V alloy

Mohammadreza Shabgard^{*}, Behnam Khosrozadeh

Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

* P.O.B. 5166616471, Tabriz, Iran, mrshabgard@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 July 2016

Accepted 13 July 2016

Available Online 14 August 2016

Keywords:

EDM

ultrasonic vibration

surface integrity

titanium

residual stress

ABSTRACT

Electrical discharge machining is one of the most common and widely used machining processes for machining hard metals and alloys which has low machinability by traditional machining methods. Due to the thermoelectric nature of this process, changes in metallurgical and mechanical properties of machined surface and development of residual stresses in components are inevitable. In this research machining of Ti-6Al-4V titanium alloy is conducted by ultrasonic assisted electrical discharge machining process and the effects of ultrasonic vibration of tool on the machining efficiency, surface integrity- such as surface micro-cracks, residual stress and surface hardness have been evaluated. Machined surface was imaged by scanning electron microscopy imaging to study the size and distribution of surface micro-cracks. Residual stresses along the depth of the machined surface, evaluated using Nano indentation technique and hardness of discharged surface are measured using a micro hardness measuring instrument. The results show that applying ultrasonic vibration increases electrical discharge machining process efficiency (about 90%), reduces the amount and size of surface micro-cracks, changes residual stress distribution and decreases the amount of it (average 17%). Increase of surface hardness caused by ultrasonic assisted electrical discharge machining process is 13% more than the traditional electrical discharge machining process.

1- مقدمه

فرآیند ابزار و قطعه‌کار در فاصله مشخصی از یکدیگر و در داخل سیال دی‌الکتریک قرار گرفته و انرژی الکتریکی بین آن‌ها اعمال می‌گردد. فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی را می‌توان به چهار مرحله تقسیم کرد: اعمال انرژی الکتریکی، شکست دی‌الکتریک، فرآیند جرقه‌زنی یا اسپارک و انفجار و

ماشین کاری تخلیه الکتریکی¹ فرآیند براده‌برداری ترموالکتریکی است که برای ماشین کاری مواد رسانا و نیمه رسانا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این

¹ Electrical discharge machining (EDM)

جدایش مواد از الکترودها [1]. از دید فیزیکی در این فرآیند انرژی الکتریکی از طریق انجام تخلیه‌های الکتریکی بین الکترودها به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. با توجه به اعمال کنترل بر روی انرژی الکتریکی و الکترودها، این فرآیند یک روش ماشین کاری با دقت و قابلیت اعتماد بالا می‌باشد. انرژی حرارتی تولید شده در بین الکترودها کانال پلاسمایی ایجاد می‌کند که دمای آن بین 8000°C تا 12000°C است که باعث ذوب و حتی تبخیر الکترودها می‌گردد. با قطع انرژی الکتریکی و اتمام زمان روشنی پالس، دما و فشار کانال پلاسما به سرعت افت کرده و باعث جدایش کسری از مواد مذاب از قطعه کار و ابزار می‌گردد. در این زمان چرخش سیال دی‌الکتریک باعث کاهش دمای سریع الکترودها و دفع براده‌ها از محل ماشین کاری می‌شود [2].

با توجه به ماهیت فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خصوصیات مکانیکی قطعه کار از جمله سختی، استحکام و چقرمگی تأثیری در قابلیت ماشین کاری آن ندارد؛ بنابراین این روش برای ماشین کاری موادی که قابلیت ماشین کاری پایینی دارند از جمله فولادهای قالب، سرامیک‌ها و مواد کامپوزیتی، مناسب است. در فرآیند مذکور با توجه به این که تماس مستقیم بین ابزار و قطعه کار اتفاق نمی‌افتد، پدیده‌هایی نامطلوبی مانند تنش‌های مکانیکی ناشی از ماشین کاری و ارتعاشات حذف می‌گردد. علی‌رغم مزایایی که برای این روش ماشین کاری غیرسنستی بیان گردید؛ محدودیت‌ها و معایبی نیز در این روش وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به نرخ براده‌برداری پایین، سایش ابزار بالا، تحت تأثیر قرار گرفتن سطح و لایه‌های زیر سطحی در اثر حرارت ورودی و تشکیل لایه نازک و ترد در سطح ماشین کاری شده اشاره کرد [4,3].

تأثیر منفی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر برخی از قطعات تولید شده با این تکنیک عیوبی در آن‌ها ایجاد می‌کند که نیاز به برطرف کردن آنها در برخی از کاربردها ضروری است. از جمله این موارد به صنایع حساسی مانند هوافضا می‌توان اشاره کرد. یکی از پرکاربردترین مواد استفاده شده در صنعت هوافضا آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V می‌باشد [5]. خواصی مانند استحکام بالا، سبکی وزن، خواص خزشی مناسب و مقاومت خوردگی مناسب باعث شده از آلیاژ Ti-6Al-4V در قطعات حساسی مانند موتور هواپیما و سازه‌های فضایی استفاده گردد. با توجه به حساسیت عملکرد این قطعات قابلیت اعتماد به آن‌ها موضوع بسیار مهمی بوده و نیاز به داشتن سلامت سطح بالا و کنترل مداوم آن بسیار حیاتی است [7,6].

یکی از مشخصه‌های فرآیند تخلیه الکتریکی وجود میکروتراک‌ها در سطح قطعات ماشین کاری شده است. این تراک‌ها به دلیل تنش‌های حرارتی و تغییر فازهای ناشی از انجام سریع بعد از تخلیه‌های الکتریکی است که معمولاً به داخل لایه ذوب مجدد نفوذ کرده و خواص سایشی، عمر خستگی و مقاومت خوردگی قطعات را تحت تأثیر قرار می‌دهند [9,8].

تأثیر دیگر فرآیندهای ماشین کاری حرارتی ایجاد تنش‌های پسماند بعد از اتمام ماشین کاری است. این تنش‌ها حاصل تغییرات شدید حرارتی ناشی از بارگذاری‌های سریع حرارتی، انقباض‌های انجمادی همراه با تغییر شکل‌های پلاستیکی و تغییرات فازی می‌باشند [11,10].

اکمکچی و همکارانش با بررسی تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی گزارش داده‌اند این تنش‌ها از نوع کششی بوده و در لایه‌های نزدیک به سطح ماشین کاری شده بیشترین مقدار را دارند که نزدیک به استحکام حد نهایی ماده است؛ در امتداد عمق تنش‌های پسماند به سرعت کاهش یافته و به تنش‌های پسماند فشاری تبدیل می‌گردند. عمقی که در آن بیشترین تنش‌های پسماند وجود دارد و عمقی که این تنش‌ها به

تنش‌های فشاری تبدیل می‌گردند به انرژی جرقه‌ها بستگی دارد [12]. مامالس و همکارانش توزیع تنش‌های پسماند در ماشین کاری فولاد میکروآلیاژی با روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از تکنیک پراش اشعه ایکس را مطالعه کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد تنش‌های پسماند بزرگی که اندازه آن‌ها در حد استحکام نهایی ماده است، در لایه‌های داخلی سطح ماشین کاری شده رخ می‌دهد و بزرگی آن مستقل از انرژی جرقه‌ها است. افزایش انرژی جرقه‌ها باعث افزایش عمقی می‌شود که در آن بیشترین مقدار تنش‌های پسماند رخ می‌دهد؛ این موضوع به دلیل ایجاد ترک‌های سطحی بیشتر در انرژی‌های بالاتر است که منجر به آزادسازی تنش‌های پسماند نزدیک به سطح می‌گردد [13].

گو و همکاران تأثیر ورودی‌های فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی را بر روی تنش‌های پسماند ایجاد شده بر روی فولاد AISI D2 با استفاده از تکنیک رگرسیون تحلیل کرده‌اند. نتایج نشان داد که جریان تخلیه در مقایسه با زمان روشنی پالس، تأثیر بیشتری بر روی تنش‌های پسماند ایجاد شده دارد. در این فرآیند عیوب بسیار ریزی در سطح ماشین کاری شده ایجاد می‌شود که محل تمرکز تنش بوده و باعث کاهش استحکام قطعات ماشین کاری شده می‌گردد [14].

تنش‌های پسماند زیر سطحی و تغییرات ریزساختاری فولاد ابزار در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی توسط غانم و همکاران بررسی شده است. تنش‌های پسماند اندازه گیری شده با روش پراش اشعه ایکس مشخص کرد که تنش‌های پسماند نزدیک به استحکام نهایی قطعه در حدود 50 میکرومتر در زیر سطح ماشین کاری شده قرار دارد. سختی سطح ماشین کاری شده تقریباً 4 برابر سختی ماده پایه بوده که این به علت تغییرات فازی و نفوذ کربن ناشی از تجزیه دی‌الکتریک پایه نفتی است [15].

کاساس و همکاران با بررسی خواص خستگی و شکست قطعات WC-CO ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی به نتیجه رسیده‌اند که علت اصلی کاهش استحکام آن‌ها ایجاد تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند است؛ و برای این قطعات که در معرض بارهای خستگی قرار می‌گیرند، بایستی عملیاتی به منظور حذف یا کاهش سطح تنش‌های پسماند انجام گردد [16]. غانم و همکاران با بررسی عمر خستگی فولاد ابزار بعد از فرآیند پرداختکاری تخلیه الکتریکی گزارش داده‌اند تنش‌های پسماندی به بزرگی 750 MPa در زیر سطح تولید شده که در عمق 120 میکرومتری به تنش‌های پسماند فشاری تبدیل می‌شوند؛ با حذف تنش‌های مذکور و اعمال تنش‌های پسماند فشاری عمر خستگی این قطعات تا 70% افزایش می‌یابد [17].

یکی از محدودیت‌ها یا معایب فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی راندمان پایین آن و کیفیت نامناسب سطح ماشین کاری شده می‌باشد، که استفاده از این روش ماشین کاری را برای برخی کاربردها محدود می‌کند. برای رفع محدودیت‌ها و افزایش راندمان از تکنیک‌هایی مانند اعمال ارتعاشات فراصوتی، افزودن نانوپودرها به دی‌الکتریک، اعمال میدان‌های مغناطیسی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک و اعمال چرخش به ابزار استفاده می‌گردد. با توجه به پیشینه تحقیقات انجام گرفته در خصوص تنش پسماند در این فرآیند، بیشتر به توزیع تنش پسماند و تأثیر پارامترهای مختلف بر آن پرداخته شده است و مطالعات انجام شده در خصوص کاهش و برطرف کردن آن در حین فرآیند بسیار کم و یا اصلاً وجود ندارد؛ از جمله تحقیقات معدود انجام شده برای کنترل و کاهش تنش پسماند میتوان به موارد زیر اشاره کرد.

جدول 2 خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه کار و ابزار

Table 2 Physical and mechanical properties of work piece and tool materials

Cu	Ti-6Al-4V	خواص مکانیکی
W/mK 401	6.7 W/mK	هدایت حرارتی
110 GPa	113 GPa	مدول الاستیک
1084 °c	1660 °c	نقطه ذوب
16.78 μΩ.cm	178 μΩ.cm	مقاومت الکتریکی
8.9 g/cm ³	4.43 g/cm ³	چگالی

ارتعاشات فراصوت³ با توان 200 W و فرکانس ارتعاش 20 kHz با ایجاد امواج فراصوت با دامنه 15 μm استفاده گردید. از متمرکز کننده آلومینیومی به منظور تقویت دامنه ارتعاشات استفاده گردید. به منظور کنترل فرآیند و مقایسه شکل پالس‌ها در حالت اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار و بدون آن از یک مدار الکترونیکی استفاده شد تا شکل پالس‌های ایجاد شده در حین فرآیند را در مقابل زمان، در یک رایانه ضبط و ذخیره کند. شکل پالس‌های ایجاد شده مبنایی برای کنترل پایداری و بازده ماشین‌کاری است. تصاویر شماتیک و واقعی از انجام آزمایش‌ها در "شکل 1 و 2" نشان داده شده است. آزمایش‌های ماشین‌کاری طبق اصول طراحی آزمایشات و براساس مدل طرح عاملی کامل⁴، 4 سطح جریان پالس، 4 سطح زمان روشنی پالس، و 2 سطح برای ابزار (یا و بدون اعمال ارتعاشات فراصوتی) انجام شدند. سایر

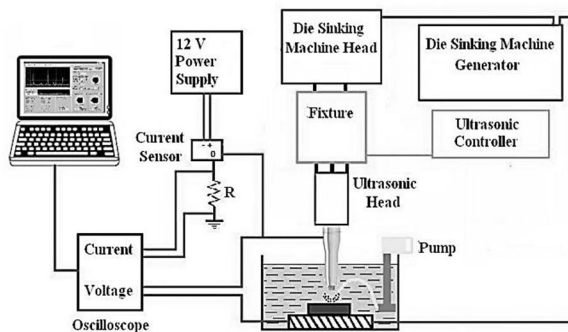


Fig. 1 Schematic set up of experiments

شکل 1 تجهیزات و تنظیمات مربوط به انجام آزمایش‌ها

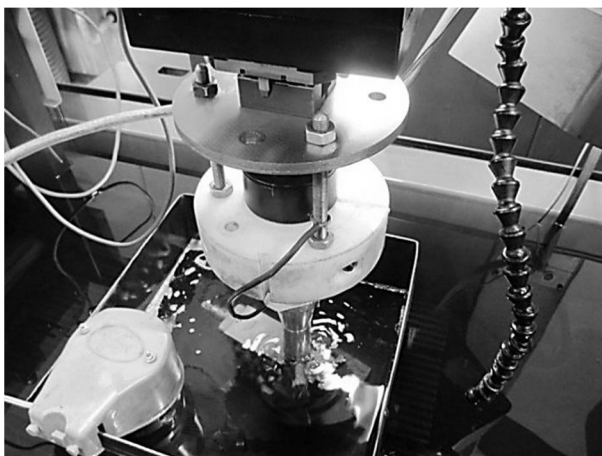


Fig. 2 picture of used equipment for Experimental tests

شکل 2 تصویر تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری

کریمر و همکاران تاثیر ارتعاش فراصوتی بر کارایی فرآیند مذکور را مطالعه کرده‌اند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که ارتعاشات فراصوتی کارایی این فرآیند را بهتر کرده و تنش‌های پسماند حاصله در یک عمق مشخص کمتر از تنش‌های پسماند فرآیند معمولی است؛ اما تغییری در تنش‌های پسماند سطحی ایجاد نگردید. همچنین ارتعاشات فراصوتی تاثیر مثبتی بر روی عمر خستگی و کاهش ضخامت لایه متاثر از حرارت داشت [11].

استفاده از ارتعاشات فراصوتی در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سیمی توسط گو و همکاران انجام شده است. در این حالت با افزایش بازده و نرخ براده‌برداری صافی سطح نیز بهبود یافته، همچنین مشخص گردید که تنش‌های پسماند در اثر اعمال ارتعاشات فراصوتی کاهش یافته است [18]. با مطالعه پیشینه تحقیقی مشاهده می‌گردد که بررسی تنش پسماند و سختی سطح که از مهمترین فاکتورهای موثر بر سلامت سطح است، در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی کمتر تحقیق و بررسی شده است؛ همچنین تحقیقاتی در خصوص تاثیر فرآیندهای ترکیبی با این روش بر روی مولفه‌های ذکر شده انجام نشده است. به همین منظور در این تحقیق از آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V که یکی از آلیاژهای پرکاربرد صنایع پرخطر می‌باشد، استفاده شده است. کاربردهای آلیاژ مذکور مستلزم داشتن سلامت سطح بالایی است و وجود تنش‌های پسماند و تغییر متالورژیکی سطح در فرآیندهای ماشین‌کاری بر استحکام خستگی و خوردگی و سایر مولفه‌های عملکردی آن تاثیر نامطلوب دارد. در این پژوهش سعی شده است ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی¹ ابزار انجام شده و تاثیر آن بر بازده ماشین‌کاری و سلامت سطح تولید شده به ویژه تنش‌های پسماند و سختی ارزیابی گردد.

2- مواد و روش‌ها

نمونه‌های لازم برای انجام عملیات ماشین‌کاری از میلگردهای آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به قطر 20 mm تهیه شدند. این نمونه‌ها در ارتفاع 10 mm به وسیله دستگاه برش سیمی بریده شده و با استفاده از دستگاه سنگ‌زنی سطح قطعات پولیش شدند. در انتهای مرحله آماده‌سازی، نمونه‌ها به مدت دو ساعت در کوره عملیات حرارتی در دمای 500°C گذاشته شدند و بعد از آن به آرامی در دمای محیط خنک شدند تا عملیات حرارتی تنش‌زدایی بر روی آن‌ها انجام گردد و اطمینان حاصل گردد که نمونه‌ها قبل از عملیات ماشین‌کاری بدون تنش باشند [19]. ابزار مسی برای انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید که از میلگردهای به قطر 10 mm با عملیات تراش‌کاری تهیه شدند. برای اتصال ابزار مسی به کلگی مخصوص فراصوتی برای انجام آزمایش‌های تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی، عملیات رزوه‌کاری روی آن‌ها انجام گردید. ترکیب درصد عناصر آلیاژی قطعه کار و مشخصات فیزیکی و مکانیکی قطعه کار و ابزار به ترتیب در جداول 1 و 2 ارائه شده است [18].

آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از دستگاه اسپارک² با مولد ایزوپالس انجام گردید. برای اعمال ارتعاشات به ابزار از دستگاه مولد

جدول 1 ترکیب درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ Ti-6Al-4V

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy in %							
Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
89.464	6.08	4.02	0.22	0.18	0.02	0.01	0.0053

³ Bandelin HD 2200

⁴ Full factorial

¹ Ultrasonic assisted electrical discharge machining (USEDMD)

² Charmilles Roboform 200

فرآیند بر روی نرخ براده‌برداری به راحتی امکان‌پذیر است. نسبت نرخ براده‌برداری در مقابل زمان روشنی پالس در شدت جریان‌های متفاوت در "شکل 3" ارائه شده است و نسبت نرخ براده‌برداری در مقابل شدت جریان جرقه در زمان‌های مختلف روشنی پالس در "شکل 4" آورده شده است. همان‌طوری‌که از تصاویر 3 و 4 مشخص می‌گردد اعمال ارتعاشات فراصوتی باعث افزایش نرخ براده‌برداری در همه تنظیمات ماشین‌کاری می‌گردد (نسبت نرخ براده‌برداری < 1 و افزایش میانگین 90% نرخ براده‌برداری).

دلایل این افزایش را در موارد زیر می‌توان خلاصه کرد:

1- امواج فراصوتی حاوی انرژی و اندازه حرکت هستند که در اثر برخورد آن‌ها را به ذرات داخل کانال پلاسما انتقال داده و باعث ایجاد جریان اکوستوالکتریک⁸ می‌گردد [20]. تحریک ذرات بی‌بار توسط امواج اکوستیکی باعث افزایش یونیزاسیون ناشی از برخورد شده و به توسعه کانال پلاسما سرعت بیشتری می‌دهد. تلاطم ایجاد شده در اثر ارتعاشات باعث جدایش هرگونه ذرات چسبیده به سطوح الکترودها شده و ازین‌رو منجر به کاهش پالس‌های آرک و اتصال کوتاه می‌گردد. 2- اعمال انرژی فراصوتی به کانال پلاسما باعث افزایش انرژی ذرات باردار شده و در نتیجه شکست دی‌الکتریک و شروع تخلیه‌های الکتریکی با سرعت بیشتری رخ می‌دهد، کاهش زمان‌های اتلاف شده بین برقراری جریان تا شکست دی‌الکتریک باعث افزایش نرخ براده‌برداری می‌گردد [21].

3- ارتعاش ابزار با فرکانس فراصوتی امواج فشاری و کششی در داخل سیال ایجاد می‌کند؛ بنابراین جریان‌ها و حباب‌های بسیار ریزی در کانال پلاسما توسعه می‌یابد که شبیه به یک پمپ عمل کرده و در دفع براده‌ها و محصولات ماشین‌کاری از محل جرقه‌ها بسیار موثر می‌باشند. با تجدید به موقع دی‌الکتریک پالس‌های مدار باز و اتصال کوتاه کاهش یافته و پایداری ماشین‌کاری افزایش می‌یابد. 4- امواج فراصوتی در مرحله انبساط باعث پرتاب مواد مذاب از چاله مذاب شده و در مرحله انقباض، افت فشار ناشی از آن در داخل کانال پلاسما باعث ایجاد نیروی مکشی شده و پدیده جوشش حجمی را در چاله مذاب ایجاد می‌کند و باعث انفجار مواد مذاب داخل چاله مذاب می‌شود. از این‌رو مقدار ماده خارج شده از حفره‌های تخلیه بیشتر می‌گردد [22,23].

با توجه به "شکل 3" مشاهده می‌گردد که روند موجود در داده‌ها در شرایط ماشین‌کاری جریان 12 آمپر و زمان روشنی پالس 400 میکروثانیه با بقیه متفاوت است و در این شرایط نسبت نرخ براده‌برداری افزایش زیادی دارد؛ همچنین مقدار نسبت نرخ براده‌برداری در "شکل 4" در زمان روشنی پالس 25 میکروثانیه و در شدت جریان‌های 6 و 12 آمپر بسیار زیاد است و با بقیه شرایط ماشین‌کاری تفاوت دارد. در جریان‌های کم، ابزار و قطعه کار خیلی به همدیگر نزدیک می‌شوند تا امکان یونیزه شدن کانال پلاسما ایجاد گردد، با این حال اگر زمان روشنی پالس هم بیشتر باشد به دلیل انباشته شدن محصولات ماشین‌کاری در این فضای کوچک امکان شستشو و تمیز شدن محل تخلیه‌ها محدود می‌شود و درصد ایجاد پالس‌های غیر مفید آرک و اتصال کوتاه بیشتر شده و نرخ براده‌برداری شدیداً کاهش می‌یابد. با اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار و افزایش فاصله الکترودها شرایط ماشین‌کاری به شکل قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته و نرخ براده‌برداری افزایش قابل توجهی پیدا

متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی آزمایش‌ها و دستگاه اسپارک در جدول 3 آورده شده است.

وزن قطعات قبل و بعد از هر آزمایش توسط ترازوی دیجیتالی (با دقت 0.0001 g) اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه (1) نرخ براده‌برداری محاسبه گردید.

$$MRR = \left(\frac{M_1 - M_2}{\rho t} \right) \times 10^6 \quad (1)$$

در این رابطه MRR^1 مقدار نرخ براده‌برداری (mm^3/min)، M_1 وزن قطعه کار قبل از ماشین‌کاری (g)، M_2 وزن قطعه بعد از ماشین‌کاری (g)، t مدت زمان ماشین‌کاری (min) و ρ چگالی قطعه کار (gr/cm^3) است.

برای بررسی و مقایسه بهتر تاثیر ارتعاشات فراصوت بر روی نرخ براده‌برداری، از نسبت نرخ براده‌برداری² در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی نسبت به فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی استفاده شده که این نسبت به صورت رابطه (2) تعریف شده است:

$$MRR \text{ Ratio} = \frac{MRR(USEDM)}{MRR(EDM)} \quad (2)$$

به منظور بررسی سطوح ایجاد شده در فرآیندهای ماشین‌کاری، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی³ تهیه گردید.

به‌منظور اندازه‌گیری تنش پسماند از روش نانوایندنتیشن⁴ مدل تریبواسکوپ⁵ TS 75 با نفوذگر برکویچ⁶ هرمی شکل از جنس الماس به قطر میانگین 100 نانومتر، رزولوشن بار کمتر از 1 نانومتر و رزولوشن جابجایی یا نفوذ 0.0004 نانومتر استفاده شد. در این تکنیک نفوذگر الماسی با نیروی مشخصی به سطح قطعه نفوذ کرده، و در مدت بارگذاری و باربرداری مقادیر نیرو و جابجایی یا عمق نفوذ به‌صورت پیوسته ثبت می‌گردد. براساس اختلاف سطح تماس واقعی نفوذگر با سطح نمونه در نمونه‌های دارای تنش پسماند و بدون تنش پسماند و منحنی بارگذاری - جابجایی تنش پسماند اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری‌ها از فاصله 10 میکرومتری سطح شروع شده (به‌منظور جلوگیری از شکست لبه و آسیب دیدگی نفوذگر) و در فواصل 10، 15 و 20 میکرومتری نسبت به یکدیگر اندازه‌گیری‌ها انجام شده است.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر روی نسبت نرخ براده‌برداری

با استفاده از رابطه نسبت نرخ براده‌برداری، بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی در

جدول 3 متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی دستگاه اسپارک

Table 3 Input variables and process parameters of spark

متغیر	سطح آزمایش
زمان روشنی پالس (μs)	400, 100, 25, 6.4
شدت جریان (A)	48, 24, 12, 6
زمان خاموشی پالس (μs)	6.4
ولتاژ مدار باز (V)	200
فاصله گپ $m(\mu)$	50
نوع دی‌الکتریک	روغن فلاکس الف ⁷

¹ Material Removal Rate

² MRR Ratio

³ Scanning Electron Microscope (SEM)

⁴ Nanoindentation

⁵ TriboScope TS75

⁶ Berkovich

⁷ Oil Flux ELF

⁸ Acousto-Electric Current

باعث کاهش اندازه و مقدار ترک‌های تولید شده است. افزایش شدت جریان جرقه از 12 به 24 آمپر باعث افزایش اندازه ترک‌ها شده است که این به علت افزایش انرژی ورودی به قطعه کار بوده که باعث افزایش حجم ماده مذاب شده و به تبع آن مقدار ماده مذاب باقی مانده روی سطح که از چاله مذاب خارج نمی‌گردد، افزایش یافته و انقباض‌های حین انجماد و سرد شدن ماده دوباره منجمد شده¹ بیشتر می‌شود و ترک‌های بیشتر و بزرگتری ایجاد می‌گردد. اعمال ارتعاشات فراصوتی باعث افزایش نرخ براده‌برداری می‌گردد؛ همان‌طوری‌که در بخش 3-1 به آن اشاره شد این افزایش هم ناشی از افزایش مقدار انرژی ورودی به قطعه کار و همچنین به علت افزایش حجم ماده بیرون انداخته شده از چاله‌های مذاب در اثر افت فشار ناشی از امواج فراصوتی و پدیده جوشش حجمی است، بنابراین با فرض یکسان بودن حجم ماده ذوب شده در چاله مذاب، وجود ارتعاشات فراصوتی باعث می‌شود کسر بیشتری از آن مذاب به بیرون انداخته شود و مقدار ماده مذاب باقیمانده در چاله‌ها کمتر می‌شود و در اثر انقباضات انجمادی و کاهش حجم ناشی از کاهش دمای ماده دوباره منجمد شده، تنش‌های حرارتی کمتر شده و از مقدار و اندازه ترک‌ها کاسته می‌شود.

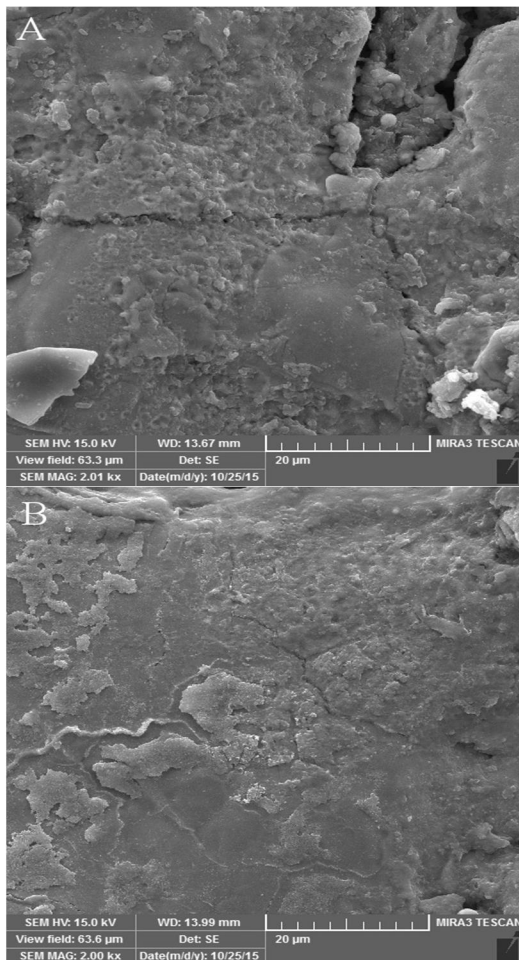


Fig. 5 SEM micrograph of produced surfaces in processes A) EDM, B) USEDM, in 12 A pulse current and 100 μ s pulse duration

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح حاصل از فرآیندهای (A) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (B) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با ارتعاشات فراصوتی ابزار (شدت جریان 12 آمپر، زمان روشنی پالس 100 میکروثانیه)

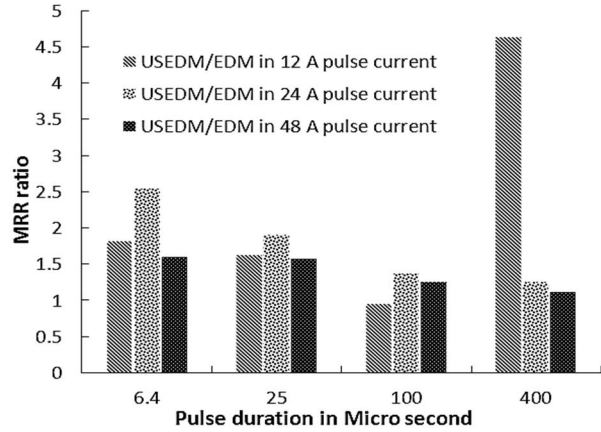


Fig. 3 MRR ratio versus pulse duration in different pulse current.

شکل 3 نسبت نرخ براده‌برداری در مقابل زمان روشنی پالس در شدت جریان‌های متفاوت تخلیه

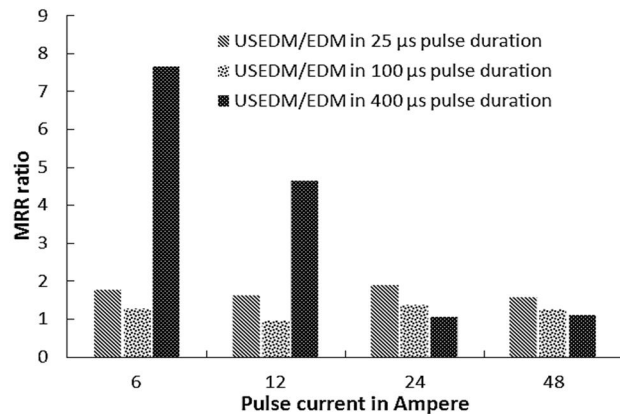


Fig. 4 MRR ratio versus pulse current in different pulse duration.

شکل 4 نسبت نرخ براده‌برداری در مقابل شدت جریان پالس در زمان‌های مختلف روشنی پالس

می‌کند، به همین دلیل نسبت نرخ براده‌برداری در شرایط مذکور بسیار بالا است. همچنین با توجه به این‌که نمودارهای "شکل 3 و 4" نسبت نرخ براده‌برداری را نشان می‌دهند و با در نظر گرفتن اینکه در جریان کم و زمان روشنی پالس طولانی، ماشین‌کاری آلیاژ فوق با روش تخلیه الکتریکی سنتی بسیار ناپایدار بوده و نرخ براده‌برداری بسیار کمی دارد که اعمال ارتعاشات فرآیند را بسیار پایدار تر می‌کند (در مقایسه با جریان‌های بیشتر) به همین علت عدد نسبت نرخ براده‌برداری با توجه به تعریف آن (رابطه 2) در شرایط مذکور عدد بزرگتری می‌شود [25,24].

2-3- بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر روی میکروتترک‌های سطح

میکروتترک‌های سطحی ایجاد شده در فرآیندهای ماشین‌کاری، فاکتور مهمی در تعیین سلامت سطح قطعات تولید شده دارند. تعداد، اندازه و توزیع میکروتترک‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در کارکرد، عمر خستگی، خوردگی و حتی مقدار تنش‌های پسماند موجود در قطعات را دارند. تاثیر اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی میکروتترک‌های ایجاد شده در سطح در زمان روشنی پالس 100 میکروثانیه و شدت جریان‌های 12 و 24 آمپر به ترتیب در "شکل‌های 5 و 6" ارائه شده است. همان‌طوری‌که از این شکل‌ها مشخص می‌گردد ارتعاشات فراصوتی

¹ Recast

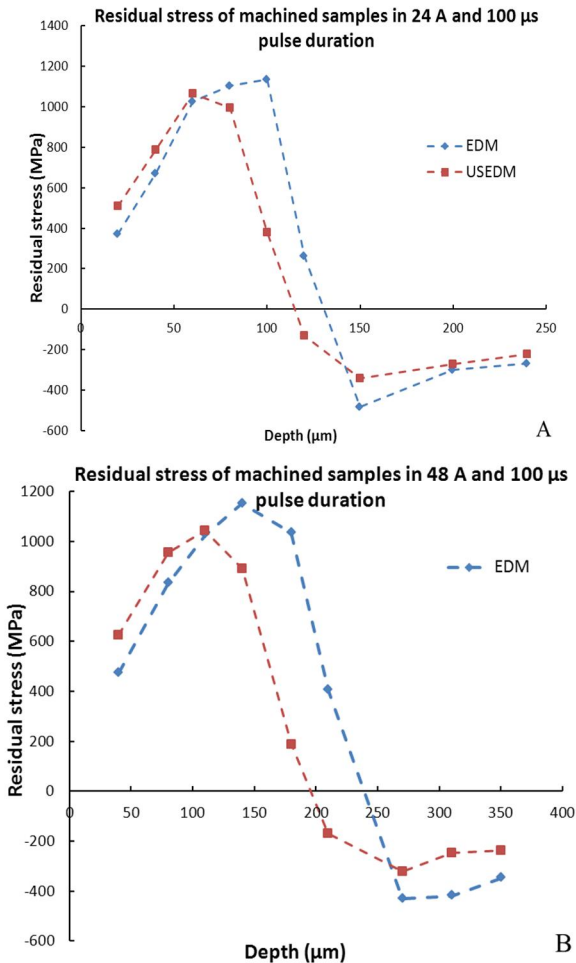


Fig. 7 Residual stress distribution of machined samples A) 24 A pulse current and 100 μ s pulse duration, B) 48 A pulse current and 100 μ s pulse duration

شکل 7 توزیع تنش پسماند نمونه های ماشین کاری شده (A) شدت جریان 24 آمپر زمان روشنایی 100 میکروثانیه (B) شدت جریان 48 آمپر زمان روشنایی 100 میکروثانیه

تخلیه الکتریکی به علت وجود ترک‌های سطحی بیشتر در این روش نسبت به روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی با ارتعاشات فراصوتی می‌باشد، به علت آزاد شدن تنش‌های پسماند با ایجاد ترک از مقدار آن‌ها کاسته می‌شود. کاهش تنش‌های پسماند فرآیند همراه شده با ارتعاشات (کاهش 17%) به علت افزایش خروج ماده مذاب از چاله‌ها و کاهش حجم لایه دوباره منجمد شده در اثر وجود امواج الاستیک فراصوتی است که در بخش 3-1 به آن اشاره شده است؛ در این شرایط تنش‌های پسماند ناشی از انقباض انجمادی لایه نازکتر، کاهش می‌یابد. در "شکل 7-B" در مقایسه با "شکل 7-A" تنش‌های پسماند در عمق بیشتری به تنش‌های پسماند فشاری تبدیل شده و در نهایت پراکنده می‌شوند که این موضوع به دلیل افزایش انرژی ورودی به قطعه کار در اثر بیشتر بودن شدت جریان جرقه‌ها است که حجم ماده مذاب بیشتری در حفره‌های تخلیه الکتریکی بر جای می‌گذارد و به تبع آن عمق لایه دوباره منجمد شده افزایش یافته و تنش‌های پسماند تا عمق بیشتری از سطح قطعه کار امتداد می‌یابند.

4-3- بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر روی میکروسختی سطح

نمودار تغییرات میکروسختی سطح ماشین کاری شده در شدت جریان‌های

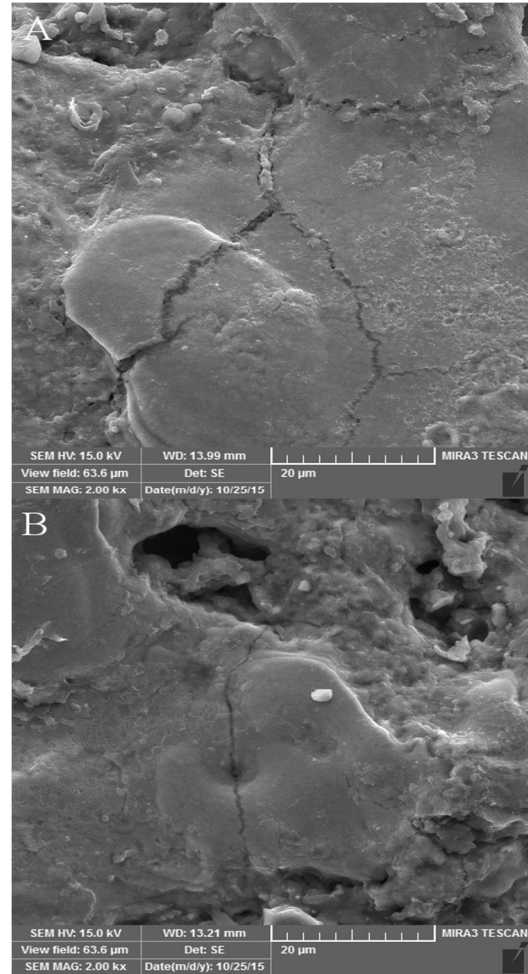


Fig. 6 SEM micrograph of produced surfaces in processes A) EDM, B) USED, in 24 A pulse current and 100 μ s pulse duration

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح حاصل از فرآیندهای (A) ماشین کاری تخلیه الکتریکی (B) ماشین کاری تخلیه الکتریکی با ارتعاشات فراصوتی ابزار (شدت جریان 24 آمپر، زمان روشنایی 100 میکروثانیه)

3-3- بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر روی تنش‌های پسماند

در بسیاری از فرآیندهای حرارتی ایجاد تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعات اجتناب‌ناپذیر است؛ به منظور برطرف کردن این تنش‌ها، بعد از فرآیند عملیات تکمیلی بر روی قطعات انجام می‌گردد. در فرآیند تخلیه الکتریکی تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعات ایجاد می‌شود که بر عملکرد نهایی و عمر خستگی آن‌ها تاثیر منفی دارد. تنش‌های پسماند ایجاد شده در هر دو فرآیند در زمان روشنایی پالس 100 میکروثانیه و جریان‌های 24 و 48 آمپر به ترتیب در "شکل‌های 7-A و 7-B" ارائه شده است. همان‌طوری که از هر دو تصویر مشخص است تنش‌های پسماند در نزدیکی سطح مقدار مشخصی دارد که با افزایش عمق این مقدار افزایش یافته و به حداکثر مقدار می‌رسد، بعد از آن با شیب تندی کاهش یافته و به تنش‌های پسماند فشاری تبدیل می‌گردند و در نهایت به مقدار صفر نزدیک می‌گردند. تفاوت‌هایی که بین این نمودارها وجود دارند بدین شرح است که در ابتدای نمودارها تنش پسماند فرآیند همراه شده با ارتعاشات بزرگتر از فرآیند معمولی می‌باشد ولی مقادیر حداکثر کششی و حداقل فشاری تنش پسماند در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بیشتر است.

کمتر بودن مقدار تنش پسماند در نزدیک سطح در فرآیند ماشین کاری

متفاوت در هر دو فرآیند در "شکل 8" نشان داده شده است.

همان‌طوری که از این شکل مشخص می‌گردد در اثر این فرآیندها سختی سطح افزایش زیادی داشته است. سختی آلیاژ Ti-6Al-4V در مقیاس ویکرز در حدود 350 Hv می‌باشد که بعد از فرآیندهای ماشین‌کاری ذکر شده این مقدار به 800 Hv هم رسیده است.

افزایش سختی سطح باعث کاهش مقاومت به ضربه می‌گردد، که در برخی از کاربردهای بسیار مخرب است [26]. دلیل اصلی افزایش سختی سطح تغییرات متالورژیکی ایجاد شده در لایه ذوب مجدد و نفوذ کربن به داخل این لایه است که با تشکیل فاز کاربید باعث افزایش سختی سطح نهایی می‌گردد [27]. مقدار افزایش سختی در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با ارتعاشات فراصوتی بیشتر از فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی معمولی می‌باشد (به‌طور میانگین افزایش 13%) که البته در شدت جریان 24 آمپر تفاوت چندانی با هم ندارند. دلیل افزایش بیشتر سختی در فرآیند همراه شده با ارتعاشات ناشی از افزایش انتقال کربن تجزیه شده از دی‌الکترونیک پایه نفتی است. امواج الاستیک حاصل از ارتعاشات انتقال این ذرات به سطح مذاب را تسریع کرده [28]. فاز کاربید بیشتری تشکیل شده و در نتیجه سختی هم بیشتر افزایش پیدا می‌کند. اما در جریان 24 آمپر به‌علت افزایش گپ بین الکترودها امواج فراصوتی انتشار یافته از الکتروود ابزار میرا شده و انرژی آنها کمتر می‌شود و کمکی به انتقال ذرات کربن به داخل سطح مذاب نمی‌کنند در نتیجه در این شرایط سختی سطح حاصل از هر دو فرآیند تقریباً یکسان است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌کمک ارتعاشات فراصوتی بر روی تنش‌های پسماند و سختی سطح آلیاژ Ti-6Al-4V، انجام شده و نتایج حاصل را در موارد زیر می‌توان خلاصه کرد:

- 1- اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار باعث افزایش نرخ براده‌برداری در همه تنظیمات ماشین‌کاری ذکر شده می‌گردد؛ مقدار این افزایش در شدت جریان‌های پایین که همراه با زمان روشنی پالس بالاست، زیاد است.
- 2- در اثر وجود ارتعاشات فراصوتی در کانال پلاسما اندازه و مقدار

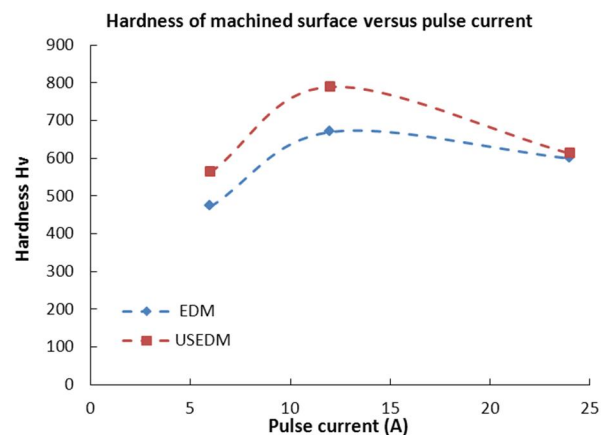


Fig. 8 Hardness of machined surface in different pulse current and 100 μ s pulse duration

شکل 8 سختی سطح ماشین‌کاری شده در شدت جریان‌های مختلف و در زمان روشنی پالس 100 میکروثانیه

- 3- پروفیل توزیع تنش‌های پسماند در امتداد عمق در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با ارتعاشات فراصوتی ابزار با فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سنتی متفاوت است. در ابتدای نمودارها، تنش پسماند فرآیند همراه با ارتعاشات بزرگتر از فرآیند سنتی می‌باشد ولی مقادیر حداکثر کششی و حداقل فشاری تنش پسماند در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سنتی بیشتر است.
- 4- در اثر وجود ارتعاشات فراصوتی و افزایش پدیده انتقال کربن ناشی از دی‌الکترونیک به سطح ذوب شده قطعه‌کار، افزایش سختی سطح ماشین‌کاری شده در فرآیند همراه با ارتعاشات بیشتر از افزایش سختی فرآیند تخلیه الکتریکی سنتی است.

5- مراجع

- [1] Q. H. Zhang, R. Du, J. H. Zhang, Q. B. Zhang, An investigation of ultrasonic-assisted electrical discharge machining in gas, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1582–1588, 2006.
- [2] H. C. Tsai, B. H. Yan, F.Y. Huang, EDM performance of Cr/Cubased composite electrodes, *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, Vol. 43, pp. 245–252, 2003.
- [3] V. Srivastava, P. M. Pandey, Effect of process parameters on the performance of EDM process with ultrasonic assisted cryogenically cooled electrode, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, pp. 393–402, 2012.
- [4] Y. C. Lin, F. P. Chuang, A. C. Wang, H. M. Chow, Machining Characteristics of Hybrid EDM with Ultrasonic Vibration and Assisted Magnetic Force, *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, Vol. 15, No. 6, pp. 1143-1149, 2014.
- [5] A.R. Nikravan, F. Kolahan, Statistical analysis and optimization of process parameters for cutting rate and surface roughness in wire cut machining of Ti-6Al-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 141-152, 2015. (in Persian)
- [6] L. Li, L. Feng, X. Bai, Z. Y. Li, Surface characteristics of Ti-6Al-4V alloy by EDM with Cu-SiC composite electrode, Accessed on 20 October 2015; *Applied Surface Science*, In Press, Accepted Manuscript.
- [7] B. Khosrozadeh, M. R. Shabgard, Investigating the effect of simultaneous ultrasonic vibration of tool and addition of SiO nanoparticles into the dielectric on machining characteristics of titanium alloy Ti-6Al-4V in EDM process, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 318-324, 2015. (in Persian)
- [8] L. C. Lim, L. C. Lee, Y. S. Wong, H. H. Lu, Solidification microstructure of electro discharge machined surfaces of tool steels, *Materials Science and Technology*, Vol. 7, pp. 239-249, 1991.
- [9] H. Sidhom, F. Ghanem, T. Amadou, G. Gonzalez, C. Braham, Effect of electro discharge machining (EDM) on the AISI316L SS white layer microstructure and corrosion resistance, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 65, pp. 141–153, 2013.
- [10] C. K. Biswas, M. K. Pradhan, FEM of Residual stress of EDMed Surfaces, *Advanced Materials Research*, Vols. 383-390, pp. 872-876, 2012.
- [11] D. Kremer, J. L. Lebrun, B. Hosari, A. Moisan, Effects of Ultrasonic Vibrations on the Performances in EDM, *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 199-202, 1989.
- [12] B. Ekmekci, A. E. Tekkaya, A. Erden, A semi-empirical approach for residual stresses in electric discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 858–868, 2006.
- [13] G. Mamalis, G. C. Vosniakos, N. M. Vacevanidis, Residual Stress Distribution and Structural Phenomena of High-Strength Steel Surfaces Due to EDM and Ball-Drop Forming, *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 1, pp. 531-535, 1988.
- [14] Y.H. Guu, H. Hocheng, C.Y. Chou, C.S. Deng, Effect of electrical discharge machining on surface characteristics and machining damage of AISI D2 tool steel, *Materials Science and Engineering*, Vol. A358, pp. 37-43, 2003.
- [15] F. Ghanem, C. Braham, M.E. Fitzpatrick, and H. Sidhom, Effect of Near-Surface Residual Stress and Microstructure Modification From Machining on the Fatigue Endurance of a Tool Steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 11, No. 6, pp. 631-639, 2002.
- [16] B. Casas, Y. Torres, L. Llanes, Fracture and fatigue behavior of electrical-discharge machined cemented carbides, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 24, pp. 162–167, 2006.
- [17] F. Ghanem, N.B. Fredj, H. Sidhom, C. Braham, Effects of finishing processes on the fatigue life improvements of electro-machined surfaces of tool steel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 52, pp. 583–595, 2011.
- [18] Z.N. Guo, T.C. Lee, T.M. Yue, W.S. Lau, A Study of Ultrasonic-aided Wire Electrical Discharge Machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, pp. 823-828, 1997.

- frequency, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 68, pp. 83-88, 1997.
- [25] T. Endo, T. Tsujimoto, K. Mitsui, Study of vibration-assisted micro-EDM- The effect of vibration on machining time and stability of discharge, *Precision Engineering*, Vol. 32 pp. 269-277, 2008.
- [26] R. Oliniki, P. A. Beltrao, Influence of Correlation between Electrical Discharge Machining Parameters with the Formation of Surface Defect's in Products Machined by EDM, *Advanced Materials Research*, Vol. 223, pp 950-959, 2011.
- [27] Y. Zhang, Y. Liu, R. Ji, B. Cai, Study of the recast layer of a surface machined by sinking electrical discharge machining using water-in-oil emulsion as dielectric, *Applied Surface Science*, Vol. 257, pp. 5989-5997, 2011.
- [28] S. Coleman, S. Roy, Effect of ultrasound on mass transfer during electrodeposition for electrodes separated by a narrow gap, *Chemical Engineering Science*, Vol. 113, pp. 35-44, 2014.
- [19] G. Lütjering, J. C. Williams, *Titanium*, 2nd edition, pp. 115-125, Berlin, Springer, 2007.
- [20] V.S.R. Murthy, P.K. Philip, PULSE TRAIN ANALYSIS IN ULTRASONIC ASSISTED EDM, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 27, No. 4, pp. 469-477, 1987.
- [21] H. Takeshi, H. Masanori, O. Toshiaki, Mechanical vibration assisted plasma etching for etch rate and anisotropy improvement, *Precision Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 442-447, 2002.
- [22] A. Abdullah, M. R. Shabgard, Effect of ultrasonic vibration of tool on electrical discharge machining of cemented tungsten carbide (WC-Co), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, pp. 1137-1147, 2008.
- [23] M. R. Shabgard, H. Kakolvand, M. S. Seyedzavvar, R. M. Shotorbani, Ultrasonic assisted EDM: Effect of the workpiece vibration in the machining characteristics of FW4 Welded Metal, *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 419-428, 2011.
- [24] J.H. Zhang, T.C. Lee, W.S. Lau, X. Ai, Spark erosion with ultrasonic