



مطالعه تأثیر ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) بر تنش‌های پسماند و مقاومت به خوردگی آلیاژ Ti-6Al-4V

محمدرضا شبگرد^{1*}، حامد توانایی²، بهنام خسروزاده³

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ملکان، ملکان

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 دی 1396

پذیرش: 14 بهمن 1396

ارائه در سایت: 04 اسفند 1396

کلید واژگان:

ماشین کاری تخلیه الکتریکی

تنش پسماند

نانوایندنتیشن

مقاومت خوردگی

Ti-6Al-4V

چکیده

آلیاژ Ti-6Al-4V به دلیل داشتن خواص مکانیکی عالی عمدتاً در صنایع هوافضا، خودروسازی، بیوپزشکی استفاده می‌شود. از فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) در سطح وسیعی برای ماشین کاری این آلیاژ استفاده می‌شود. با توجه به ماهیت ترموالکتریکی این فرایند تغییرات نامطلوبی مانند ایجاد تنش‌های پسماند و تغییر مقاومت خوردگی سطح ماشین کاری شده ایجاد می‌گردد. هدف این پژوهش بررسی تجربی تأثیر پارامترهای ورودی (شدت جریان و زمان روشنی پالس) در این فرایند بر مقدار و نحوه توزیع تنش‌های پسماند و تغییرات مقاومت خوردگی سطح ماشین کاری شده آلیاژ Ti-6Al-4V است. برای این منظور ابتدا نمونه‌های تهیه شده از آلیاژ Ti-6Al-4V توسط فرایند EDM، ماشین کاری شدند و سپس تنش‌های پسماند در سطح ماشین کاری شده در شرایط ماشین کاری متفاوت به روش نانوایندنتیشن اندازه‌گیری شد و برای ارزیابی سلامتی سطوح ماشین کاری شده، تصاویر SEM از سطوح تهیه گردید. برای ارزیابی مقاومت خوردگی نمونه‌ها از روش اندازه‌گیری پلاریزاسیون Tafel استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد در سطوح قطعات ماشین کاری شده به روش EDM تنش پسماند کششی ایجاد می‌شود و مقدار آن با افزایش عمق ابتدا افزایش یافته و بعد از رسیدن به یک مقدار بیشینه، سیر نزولی پیدا کرده و در نهایت به تنش‌های فشاری تبدیل می‌شود. با افزایش جریان و زمان روشنی پالس حداکثر مقدار تنش پسماند افزایش اندکی دارد و حداکثر مقدار آن نزدیک به استحکام نهایی قطعه است. مقایسه نتایج خوردگی نشان می‌دهند که در کل نمونه‌های ماشین کاری شده به روش EDM نسبت به نمونه بدون ماشین کاری مقاومت به خوردگی کمتری دارند.

Study the effect of electrical discharge machining (EDM) on residual stress and corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy

Mohammad Reza Shabgard^{1*}, Hamed Tavanaei¹, Behnam Khosrozadeh²

1-Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

2-Department of Mechanical Engineering, Malekan Branch, Islamic Azad University, Malekan, Iran

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 29 December 2017

Accepted 03 February 2018

Available Online 23 February 2018

Keywords:

Electrical Discharge Machining

Residual Stress

Nanoindentation

Corrosion resistance

Ti-6Al-4V

ABSTRACT

Ti-6Al-4V alloy due to excellent mechanical properties mainly is used in the aerospace, automobile and biomedical industries. Electrical discharge machining (EDM) are used extensively for machining of this alloy. Due to the thermoelectric nature of this process, unwanted changes happen on machined surface such as development of residual stresses and the change in the corrosion resistance. The aim of this study is the experimental investigation of the effect of input parameters (discharge current and pulse on time) on the amount and distribution of residual stresses and corrosion resistance changes of the machined surface in EDM process of Ti-6Al-4V alloy. For this purpose, samples of Ti-6Al-4V alloy were machined by EDM process and residual stresses induced successive sparks in different setting (different discharge currents and pulses on time) were measured by nanoindentation method and SEM images of machined surface used to better assess of samples surface integrity. TOFL measurement method used to determine the corrosion resistance of the samples. Results indicate that at this process tensile stresses is formed on surface and mentioned stresses increase with depth initially and after reaching a maximum dropping out and eventually leads to pressure stress. By increasing pulse on time and discharge current, maximum tension residual stress only slightly increases and is near ultimate tensile strength of work piece material. Comparison of corrosion results indicated that the corrosion resistance of EDMed samples, was less than the not machined specimens.

Please cite this article using:

M. R. Shabgard, H. Tavanaei, B. Khosrozadeh, Study the effect of electrical discharge machining (EDM) on residual stress and corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 171-178, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. R. Shabgard, H. Tavanaei, B. Khosrozadeh, Study the effect of electrical discharge machining (EDM) on residual stress and corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 171-178, 2018 (in Persian)

1- مقدمه

ماشین کاری تخلیه الکتریکی¹ یک روش براده برداری نوین است که در آن بین دو الکترود به نام‌های ابزار و قطعه کار که در فاصله معین و کنترل شده‌ای از یکدیگر قرار دارند و فضای بین آن‌ها را سیالی به نام دی‌الکتریک پر کرده است، در نزدیک‌ترین فاصله بین آن‌ها جرقه الکتریکی تولید شده و در اثر حرارت بالای آن بار برداری صورت می‌گیرد. با این روش می‌توان مواد هادی و نیمه هادی را ماشین کاری نمود [1]. آلیاژ Ti-6Al-4V یک ماده مهم و کاربردی در صنایع پیشرفته‌ای چون هوافضا، خودروسازی، بیوپزشکی و دندانپزشکی است. این آلیاژ از خواص منحصر به فردی چون استحکام بالا، چگالی پایین، مقاومت به خوردگی عالی برخوردار است، در نتیجه ماشین کاری آن با روش‌های مرسوم مشکل است؛ بنابراین جهت ماشین کاری آن از روش‌های جدیدی مانند ماشین کاری تخلیه الکتریکی استفاده می‌شود [2].

در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی دمای بسیار بالای ناشی از تخلیه انرژی جرقه، سبب ذوب و خروج بخشی از فلز شده و بقیه ماده مذاب دوباره منجمد شده و لایه سفید² را تشکیل می‌دهد. این لایه دارای تنش‌های پسماند و شبکه‌ای از ترک‌های ریز است [3]. تنش‌های پسماند تولید شده در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی عمدتاً ناشی از انجماد غیرتعدادی و تغییرات متالوژیکی موضعی است [4]. تنش‌های پسماند اثرات قابل توجهی بر خواص مکانیکی از جمله عمر خستگی، اعوجاج، پایداری ابعادی، مقاومت به خوردگی و شکست ترد مواد مختلف از جمله آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V دارد. این تنش‌ها می‌توانند سبب گسترش ترک‌ها، افزایش میزان خوردگی و کاهش عمر مفید قطعات گردند. به همین منظور اندازه‌گیری و کنترل میزان تنش پسماند مخصوصاً در ماشین کاری قطعات در معرض بار خستگی به روش EDM یکی از مباحث مهم است و به همین منظور تحلیل و بررسی تنش‌های پسماند یک مرحله الزامی در طراحی قطعات و اجزای ماشین‌ها برای ارزیابی قابلیت اطمینان آن‌ها در شرایط مختلف کاری است. تنش‌های پسماند با استفاده از روش‌های پراش اشعه ایکس، پراش نوترونی³، مغناطیسی، التراسونیک⁴ و... قابل اندازه‌گیری هستند [5,6]. استفاده گسترده از آن‌ها به دلیل مشکلات مربوط به دقت اندازه‌گیری، محدودیت مربوط به جنس و اندازه نمونه‌ها، هزینه بالای آزمایش و در مواردی لزوم تخریب ماده محدود شده است [7].

به تازگی تعیین تنش پسماند با استفاده از روش نانوآیندنتیشن⁵ مورد توجه گسترده قرار گرفته است. این روش به علت عدم نیاز به آماده‌سازی قطعه کار و کوچک بودن ابعاد نفوذگر (داشتن ابعاد در حد نانو) و متعاقب آن کم بودن نیروی نفوذگر، اندازه‌گیری و کنترل میزان تنش پسماند سطح قطعه کار را بدون تخریب در مراحل مختلف فرایند ساخت و ماشین کاری به راحتی مقدور می‌سازد [8,9].

یکی دیگر از مؤلفه‌های اصلی سلامت سطح در قطعات پر مخاطره مقاومت خوردگی سطح است که در فرایند EDM تغییر می‌کند. با توجه به اهمیت بررسی رفتار خوردگی قطعات پس از فرایند EDM به ویژه در صنایع مهمی مانند هوافضا، انرژی هسته‌ای، صنایع ایمپلنت دندان و بیوپزشکی تحقیقات جامعی در این زمینه صورت نگرفته است. به همین دلیل اطلاعات موجود درباره رفتار مقاومت به خوردگی سطوح ماشین کاری شده به روش

EDM ناقص و ناکافی است [10].

دیاس و همکاران [11] ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی را بر صفحات فولادی کوئنچ و تمپر شده انجام داده و سلامت سطح از جمله تنش‌های پسماند ایجاد شده در عمق سطوح ماشین کاری را با استفاده از روش پراش اشعه ایکس و به کمک نرم‌افزار استرس ای تی⁶ به دست آوردند، نتایج آن‌ها بیانگر وجود تنش‌های پسماند از نوع کششی در لایه سطحی است.

ناواس و همکاران [12] تنش‌های پسماند ایجاد شده در سه روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی، تراش کاری و سنگ‌زنی را در شرایط مختلف بر فولاد ابزار AISI 01 مقایسه کرده‌اند. ایشان تنش‌های پسماند را توسط روش پراش اشعه ایکس و پولیش الکترولیتی اندازه‌گیری نمودند، نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تنش‌های پسماند فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی سیمی بیش از دو فرایند دیگر است.

ربلو و همکاران [13] تحلیل المان محدود را در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد AISI 304 انجام دادند، آن‌ها در بررسی‌های تجربی با تغییر پارامترهای ورودی مختلف ماشین کاری کرده و تنش‌های پسماند را با روش پراش اشعه ایکس اندازه‌گیری کرده و سپس نتایج را با تنش‌های پسماند حاصل از شبیه‌سازی از مقایسه کرده‌اند و گزارش داده‌اند که تنش‌های پسماند حاصل از فرایند به انرژی جرقه بستگی دارد.

قائم و همکاران [14] در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی انواع مختلف فولاد، سلامت سطح شامل تنش‌های پسماند و زبری سطح را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پروفیل تنش‌های پسماند در لایه‌های سطحی متفاوت است، ولی در لایه‌های عمقی تقریباً مشابه است و مقدار تنش پسماند به نوع فولاد ماشین کاری شده بستگی دارد.

نتایج تحقیق اکمکچی و همکاران [15] بر تأثیر سیال دی‌الکتریک و نوع الکترود بر ساختار لایه سفید در ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار بیانگر آن است که تنش‌های پسماند ناشی از فرایند در لایه‌های سطحی با ساختار ناهمگن و غیریکنواخت افزایش می‌یابد. صلاح به کمک همکاران [16] با استفاده شبیه سازی عددی فرایند تخلیه الکتریکی، نتایج تنش پسماند حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج تجربی برای فولاد AISI 316L مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پروفیل تنش پسماند حاصل از شبیه‌سازی عددی و تجربی مطابقت خوبی دارد و در لایه سطحی نمونه‌های ماشین کاری، تنش‌های پسماند کششی ایجاد می‌شوند.

شبرگرد و همکاران [17] تأثیر فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی بر تنش‌های پسماند و سختی سطح آلیاژ Ti-6Al-4V را مطالعه و گزارش داده‌اند که اعمال ارتعاشات فراصوتی بازده فرایند ماشین کاری را افزایش داده و تنش‌های پسماند را به طور میانگین تقریباً 17% کاهش داده است.

نتاسی [18] به بررسی تأثیر فرایند EDM بر مقاومت به خوردگی دو نوع آلیاژ دندانپزشکی از جنس Co-Cr و cpTi برای تولید ایمپلنت پرداخته است، این قطعات با دو روش EDM و سنگ‌زنی و پولیش تهیه شدند. مقاومت به خوردگی نمونه‌ها توسط پلاریزاسیون آندی در محلول رینگر ارزیابی شدند. نتایج به دست آمده بیان می‌کند که قطعات تهیه شده توسط فرایند EDM مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به نمونه‌های تولید شده با روش پرداخت کاری دارند.

یونو و همکاران [19] گزارش دادند که سطوح ماشین کاری شده

¹ Electrical Discharge Machining (EDM)

² White layer

³ Neutron diffraction

⁴ Ultrasonic

⁵ Nanoindentation

⁶ Stress AT

بردارای متوالیاً ثبت می‌شوند. جهت اندازه‌گیری تنش پسماند اولین نقطه بارگذاری در فاصله 10 میکرومتر از لبه سطح ماشین کاری شده (برای جلوگیری از شکست لبه قطعه کار) انتخاب شد و سایر موقعیت‌هایی که نفوذگر عمل نموده در فاصله‌های 25 میکرومتری از یکدیگر در نظر گرفته شدند. به دلیل هزینه بالای آزمایش‌ها هر آزمایش فقط یک‌بار انجام گرفته است.

اندازه‌گیری تنش پسماند به روش نانوایندنتیشن براساس اختلاف سطح اثر نفوذگر در نمونه‌های ماشین کاری شده با نمونه شاهد و بدون تنش به عمل می‌آید، مقدار تنش‌های پسماند توسط نمودارهای بار-جابه‌جایی حاصل از نرم‌افزار تریبواسکوپ 3.5⁵ پی‌ال و با استفاده از روابط (2,1) محاسبه گردید [6].

$$\sigma_t = H(1 - A_0/A) \quad (1)$$

$$\sigma_c = H(1 - A_0/A)/f \quad (2)$$

در این روابط σ_t و σ_c به ترتیب تنش پسماند کششی و تنش پسماند فشاری است. H سختی نمونه است که با واحد گیگا پاسکال بیان می‌شود، A و A_0 به ترتیب مساحت تورفتگی ناشی از نفوذگر نمونه با تنش پسماند و عاری از تنش پسماند است که مقدار آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار مخصوص دستگاه نانوایندنتیشن استخراج می‌شوند، f ضریب هندسی نفوذگر است که برای نفوذگر برگوویچ برابر 0.418 است.

در نمودارهای بار-جابه‌جایی به دست آمده از روش اندازه‌گیری نانوایندنتیشن، منحنی‌هایی با شیب کمتر نسبت به نمونه بدون تنش بیانگر تنش‌های پسماند کششی و با شیب بیشتر بیانگر تنش‌های پسماند فشاری است (شکل 3).

برای تعیین مقاومت خوردگی نمونه‌های ماشین کاری شده از آزمایش پتانسیل مدار باز تافل استفاده شد. قطعات آماده شده پیش از آزمایش خوردگی کاملاً با آب مقطر و استون شستشو داده شد تا عاری از هرگونه آلودگی و ناخالصی باشد. پس از این مرحله هر یک از قطعات جداگانه در داخل یک سل مخصوص سه الکترودی (الکترود شاهد از جنس Ag/AgCl، الکترود کاتر از جنس ورقه پلاتین و الکترود کاری از جنس قطعات ماشین کاری شده Ti-6Al-4V) حاوی محلول رینگر با ترکیب شیمیایی 9 g/l NaCl، 0.43 g/l KCl، 0.2 g/l NaHCO₃ و 0.24 g/l CaCl₂ به مدت دو ساعت در دمای 36 °C قرار گرفتند [22].

برای بررسی میزان خوردگی قطعات Ti-6Al-4V پس از عملیات EDM، اندازه‌گیری‌های پلاریزاسیون تافلی در بازه 2000 mV تا 200- و با سرعت اسکن 3 mV/s⁶ در محلول رینگر برای تمام نمونه‌های ماشین کاری شده و نمونه شاهد انجام شده، سپس نتایج با استفاده از نرم‌افزار پاور سوئیت⁷ تحلیل شده است.

2-1- روش محاسبه ی تنش پسماند

شکل‌های 4 نمونه‌ای از نمودارهای مربوط به نیرو-جابه‌جایی به دست آمده از

فولادهای کم آلیاژی با فرآیند ماشین کاری پرتو الکترونی مقاومت به خوردگی بیشتری نسبت به نمونه‌های ماشین کاری شده به روش EDM دارند. آن‌ها دلیل این امر را عدم حضور لایه سفید در فرایند ماشین کاری پرتو الکترونی بیان کردند.

جباری پور و همکاران [20] ماشین کاری EDM به کمک پودر را بر آلیاژ γ-TiAl بررسی کرده‌اند. آن‌ها با پودرهای مختلفی ماشین کاری را انجام داده و سپس مقاومت به خوردگی هر یک از نمونه‌ها را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مقاومت به خوردگی نمونه‌های ماشین کاری شده با پودر نسبت به حالت بدون پودر بیشتر است.

با مطالعه تحقیقات انجام شده در خصوص دو مؤلفه مهم سلامت سطح (تنش پسماند و مقاومت خوردگی) آلیاژ Ti-6Al-4V در فرآیند ماشین کاری EDM مشخص می‌گردد که مطالعات در این زمینه بسیار محدود و ناکافی است؛ به همین منظور در این پژوهش تأثیر پارامترهای اصلی ورودی در فرایند EDM (شدت جریان جرقه و زمان روشنی پالس) بر مقدار تنش‌های پسماند ایجاد شده در امتداد عمق سطح ماشین کاری شده و تغییر در مقاومت خوردگی آلیاژ Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفته است.

2- مواد و روش انجام آزمایش‌ها

نمونه‌های استفاده شده در این پژوهش از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V در ابعاد 10×10×5 میلی‌متر تهیه شده و توسط دستگاه سنگ کف ساب تمام سطوح آن‌ها پیش از ماشین کاری با فرآیند EDM سنگ‌زنی شدند. برای اطمینان از ترکیب شیمیایی نمونه‌های آزمایش، جنس قطعات مورد استفاده تحت آنالیز شیمیایی قرار گرفتند (جدول 1)، همچنین برخی از خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژ Ti-6Al-4V در جدول 2 ارائه شده است. الکترود ابزار با توجه به مقاومت الکتریکی پایین مس از جنس مس خالص الکترولیتی انتخاب شد و به قطر 15 و ارتفاع 30 میلی‌متر ماشین کاری شدند (جدول 3).

به منظور حصول اطمینان از عدم وجود تنش‌های پسماند ناشی از عملیات سنگ‌زنی و برش، عملیات حرارتی تنش‌زدایی بر آن‌ها انجام شد؛ به همین منظور پیش از انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای 540°C در کوره سرامیکی قرار گرفتند و سپس به آرامی تا دمای محیط خنک شدند [21]. برای انجام آزمایش‌های ماشین کاری تخلیه الکتریکی از دستگاه اسپارک شارمیلز روبوform¹ 200 با مولد ایزوپالس استفاده شده است. مدت زمان هر آزمایش ماشین کاری 10 دقیقه در نظر گرفته شده و هر آزمایش دو بار تکرار شده است. شرایط و تنظیمات صورت گرفته جهت انجام آزمایش‌ها در جدول 4 آورده شده است.

برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند قطعات ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی از دستگاه نانوایندنتیشن مدل تریبواسکوپ تی‌اس² 75 استفاده شده است که دارای نفوذگر برگوویچ³ هرمی شکل از جنس الماس به قطر میانگین 100 نانومتر، رزولوشن بار⁴ کمتر از 1 نانومتر و رزولوشن جابه‌جایی (نفوذ) 0.0004 نانومتر بوده است. در شکل‌های 1 و 2 نمایی از دستگاه و شماتیکی از نمونه مورد آزمایش به همراه موقعیت‌های نفوذگر نانوایندنتیشن نشان داده شده است. در این روش نفوذگر الماسی با یک نیروی مشخص به سطح قطعه نفوذ می‌کند. در مدت زمان نفوذ آن به سطح قطعه کار مقدار نیرو و جابه‌جایی (عمق نفوذ) در مراحل بارگذاری و بار

¹ Chammiles Roboform 200

² TriboScope TS75

³ Berkovich

⁴ Load Resolution

⁵ TriboScope 3.5 PL

⁶ Scan rate

⁷ PowerSuit

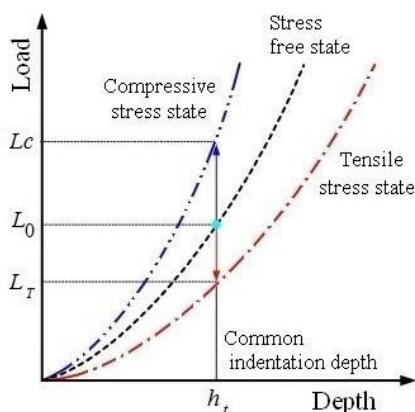


Fig. 3 the effect of tensile and compression residual stress on load-displacement curve [24]

شکل 3 تأثیر تنش‌های پسماند فشاری و کششی بر نمودار بار جابه‌جایی [24]

نرم‌افزار تریبواسکوپ 3.5 پی‌ال را برای نمونه مرجع و قطعات ماشین کاری شده در پنج موقعیت مختلف نفوذگر که مطابق شکل 2 شماره‌گذاری شده‌اند، در زمان روشنی پالس $4 \mu s$ و شدت جریان 4 A نشان می‌دهند.

تنش پسماند بر منحنی بار- جابه‌جایی در آغاز تسلیم شدن تأثیر می‌گذارد؛ در این روش توسط منحنی‌های بار- جابه‌جایی نمونه شاهد، تنش پسماند در سطح ماشین کاری شده تعیین می‌شود، بدین صورت که تنش پسماند فشاری عمق نفوذ کلی را کاهش می‌دهد، ولی تنش پسماند کششی عمق نفوذ را افزایش می‌دهد. در واقع تنش پسماند فشاری سختی نمونه را افزایش داده، اما تنش پسماند کششی سختی را کاهش می‌دهد، در نتیجه در سطوح ماشین کاری شده‌ای که تحت تنش پسماند کششی هستند، عمق نفوذ بیشتر می‌شود [23].

با توجه به این که منحنی بار- جابه‌جایی برای نقاط با تنش پسماند فشاری شیب تندی نسبت به منحنی نمونه بدون تنش دارند، در نتیجه با استفاده از این نمودارها (شکل 4) ماهیت تنش پسماند هر نقطه از نظر تنش کششی یا فشاری مشخص می‌شود.

در این روش با استفاده از نمودارهای نیرو- جابه‌جایی حاصل از آزمون نانواپندنتیشن، مقدار و نوع تنش‌های پسماند در پنج نقطه از سطح مقطع ماشین کاری شده (شکل 2) مشخص گردید و با استفاده از نتایج حاصل، که نمونه‌ای از آن در شرایط ماشین کاری زمان روشنی پالس $4 \mu s$ و شدت جریان 4 A در جدول 5 ارائه گردیده، مقدار تنش پسماند با استفاده از روابط (2,1) محاسبه شده است. مطابق نتایج مربوط به آزمون نمونه شاهد، مقدار مساحت اثر تورفتگی نفوذگر به طور میانگین 2.5×10^6 نانو مترمربع محاسبه شد.

3- نتایج و بحث

3-1- تأثیر شدت جریان جرقه بر پروفیل تنش پسماند

شکل‌های 5 و 6 نتایج مربوط به پروفیل تنش‌های پسماند در امتداد عمق نمونه‌های ماشین کاری شده در زمان روشنی پالس $3.2 \mu s$ و $25 \mu s$ و شدت جریان‌های متفاوت را نشان می‌دهند. همان طوری که شکل‌های یادشده نشان می‌دهد، در زمان‌های روشنی پالس متفاوت ماهیت تنش‌های پسماند در ابتدا کششی بوده و سپس به حداکثر مقدار رسیده و با افزایش عمق به تنش‌های پسماند فشاری تبدیل می‌شوند و سپس به وضعیت تعادل در فلز پایه برمی‌گردند. علت تغییرات فوق در تنش پسماند را این گونه می‌توان توجیه نمود، با توجه به ماهیت فرایند EDM در حوضچه مذاب به دلیل انجماد

جدول 2 خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه کار

Table 2 Physical and mechanical properties of work piece	
Ti-6Al-4V	خواص مکانیکی
950 MPa	استحکام نهایی کششی
880 MPa	استحکام تسلیم کششی
36 HRC	سختی
6.7 W/mK	هدایت حرارتی
113 GPa	مدول الاستیک
1660 °C	نقطه ذوب
178 $\mu\Omega$ cm	مقاومت الکتریکی
4.43 g/cm ³	چگالی

جدول 3 خواص فیزیکی و مکانیکی ابزار مسی

Table 3 Physical and mechanical properties of tool materials	
Cu	خواص مکانیکی
W/mK 401	هدایت حرارتی
110 GPa	مدول الاستیک
1084 °C	نقطه ذوب
16.78 $\mu\Omega$ cm	مقاومت الکتریکی
8.9 g/cm ³	چگالی

جدول 4 متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی دستگاه اسپارک

Table 4 Input variables and process parameters of spark	
متغیر	سطح آزمایش
زمان روشنی پالس (μs)	25, 3.2
شدت جریان (A)	24, 4
زمان خاموشی پالس (μs)	12.8
ولتاژ مدار باز (V)	160
قطبیت ماشین کاری	مثبت
نوع دی الکتریک	روغن فلاکس الف ¹



Fig. 1 Indentation Apparatus

شکل 1 نمایی از دستگاه نانواپندنتیشن

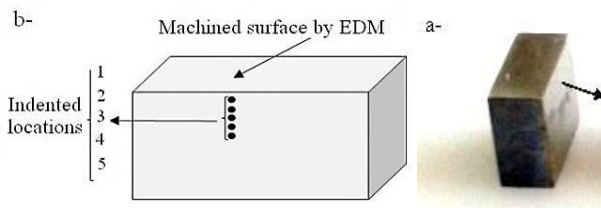


Fig. 2 Sample used for indentation test, a-real, b- schematic

شکل 2 نمونه مورد آزمایش در روش نانواپندنتیشن، الف- واقعی، ب- شماتیک

¹ Oil Flux ELF

موضوع نشان می‌دهد تنش ایجاد شده در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بیش از استحکام کششی آلیاژ Ti-6Al-4V است، این پدیده ایجاد ترک‌های ریز سطحی را در سطح ماشین کاری شده این آلیاژ توجیه می‌کند.

3-2- تأثیر مدت زمان روشنی پالس بر پروفیل تنش پسماند

پروفیل تنش‌های پسماند در امتداد عمق در زمان‌های روشنی پالس مختلف و شدت جریان 4A در شکل 9 ارائه شده است. در شکل یادشده ماهیت کششی بودن تنش‌های پسماند در لایه سطحی نمونه‌ها به طور واضح مشخص است.

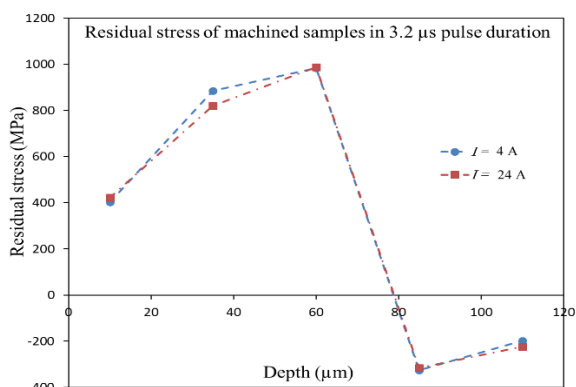


Fig. 5 Residual stress profile of cross section of machined samples in different pulse current ($T_i=3.2 \mu s$)

شکل 5 پروفیل تنش پسماند در سطح مقطع نمونه ماشین کاری شده در شدت جریان‌های مختلف ($\mu s T_i=3.2$)

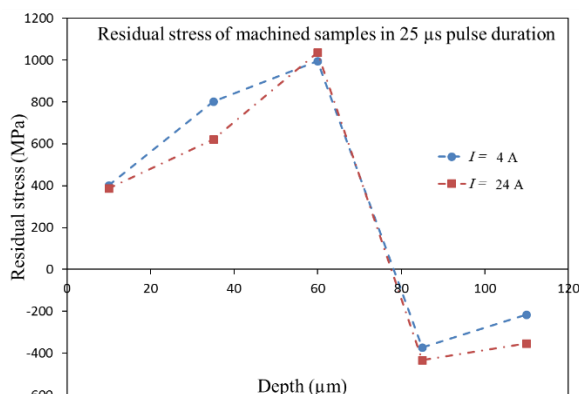


Fig. 6 Residual stress profile of cross section of machined samples in different pulse current ($T_i=25 \mu s$)

شکل 6 پروفیل تنش پسماند در سطح مقطع نمونه ماشین کاری شده در شدت جریان‌های مختلف ($\mu s T_i=25$)

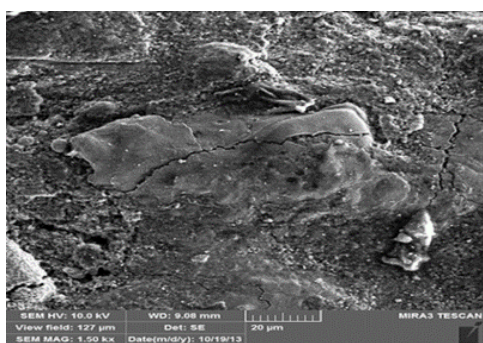


Fig. 7 SEM image of machined surface ($T_i=25 \mu s$, $I=24A$)

شکل 7 تصویر SEM سطح ماشین کاری شده ($T_i=25 \mu s$, $\mu A I=24$)

جدول 5 نتایج به دست آمده از نرم‌افزار مخصوص نانوآیندنتیشن برای نمونه ماشین کاری ($T_i=25 \mu s$, $\mu A I=4$)

Table 5 Input variables and process parameters of spark

شماره نفوذگر	سختی (H) GPa	مساحت تو رفتگی نفوذگر (A)x 10^6 nm^2
1	2.51	2.98
2	2.66	3.58
3	2.99	3.75
4	3.48	2.39
5	2.84	2.42

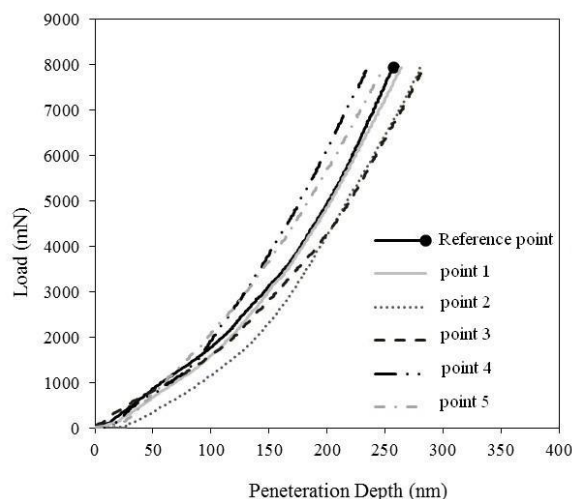


Fig. 4 Load-displacement curve in Nanoindentation test for reference sample and machined specimen in five point ($I=4A$, $T_i=25 \mu s$)

شکل 4 نمودارهای بار-جابجایی به دست آمده از روش نانوآیندنتیشن برای قطعه کار مرجع و نمونه ماشین کاری شده در پنج نقطه ($\mu s T_i=25$, $I=4A$)

غیرتعادلی و نرخ تبرید سریع ناشی از تماس مذاب با مایع دی‌الکتریک سرد، فرصت کافی انقباض به آن داده نمی‌شود به طوری که در اثر گرادیان‌های حرارتی بالا و همچنین تغییرات حجم به دلیل تبدیلات ساختاری و فازی (حاصل از سیکل‌های حرارتی و خنک کاری و نفوذ کربن حاصل از تجزیه مایع دی‌الکتریک) تغییر شکل‌های پلاستیکی در سطح نمونه ایجاد می‌شود و این امر باعث تشکیل تنش پسماند کششی در لایه‌های سطحی می‌شود [14]. همچنین به دلیل تشکیل میکروتورها در سطح ماشین کاری شده در شدت جریان و زمان‌های روشنی پالس مختلف (شکل‌های 7 و 8) بخشی از تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعه کار آزاد می‌شوند، این امر سبب می‌شود حداکثر تنش پسماند کششی در زیر سطح ایجاد شود [15, 4]. به عبارت دیگر تشکیل حداکثر تنش پسماند کششی در زیر سطح نه تنها ناشی از ایجاد ترک‌های ریز سطحی است، بلکه به دلیل وجود فعل و انفعال‌های پیچیده موضعی بین خواص مکانیکی وابسته به دمای جنس ماده و مکانیزم انتقال حرارت نیز است. به بیان دیگر حداکثر تنش پسماند کششی در محلی مشاهده می‌شود که وجود هم‌زمان حداکثر مقاومت مکانیکی و دامنه کرنش اتفاق می‌افتد [13].

همان طوری که شکل‌های 5 و 6 نمایش می‌دهند با افزایش شدت جریان جرقه تغییر چندانی در بیشینه تنش پسماند کششی ایجاد نمی‌شود و مقدار آن در حدود استحکام نهایی کششی ماده است.

به عبارت دیگر بیشینه تنش پسماند به استحکام نهایی جنس ماده بستگی دارد. به طوری که این مقدار برای فولاد به طور متوسط 750 تا 800 مگاپاسکال و برای آلیاژ Ti-6Al-4V در حدود 950 مگاپاسکال است. این

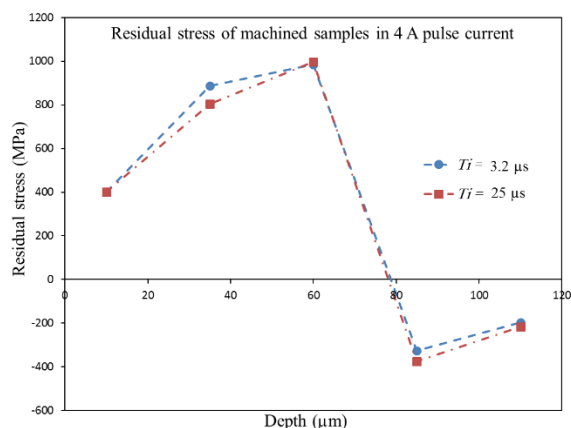


Fig. 9 Residual stress profile of cross section of machined samples in different pulse duration ($I=4$ A)

شکل 9 پروفیل تنش پسماند در سطح مقطع نمونه ماشین کاری شده در زمان‌های روشنی پالس مختلف ($I=4$ A)

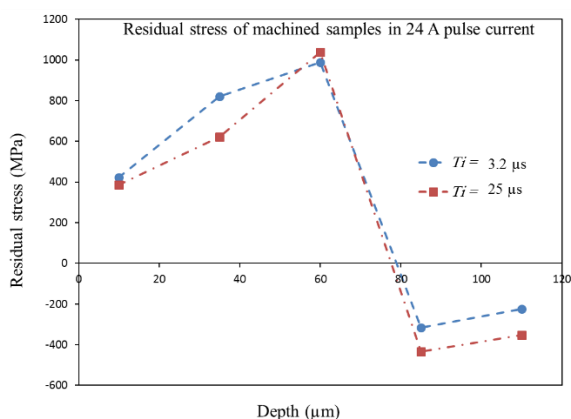


Fig. 10 Residual stress profile of cross section of machined samples in different pulse duration ($I=24$ A)

شکل 10 پروفیل تنش پسماند در سطح مقطع نمونه ماشین کاری شده در زمان‌های روشنی پالس مختلف ($I=24$ A)

نمونه شاهد دارای ساختار دوفازی با زمینه α و فاز پراکنده β بوده که ساختاری مطلوب برای مقاومت به خوردگی است. به عبارت دیگر وجود ریزساختار لایه‌لایه‌ای¹ مارتنزیت α' و β در سطح قطعات ماشین کاری شده که در اثر سرد شدن خیلی سریع به وجود آمده‌اند، به عنوان کوپل‌های (پیل) گالوانیکی² مؤثر عمل کرده و منجر به افزایش نرخ خوردگی نمونه‌های ماشین کاری شده می‌شود [21]. همچنین به علت ذوب شدن سریع قطعه کار در مرحله تخلیه الکتریکی و به دنبال آن خنک کاری با نرخ بالا (10^8 c/s) تغییرات شیمیایی و فیزیکی و حرارتی قطعه کار افزایش می‌یابد. زبری سطح بالا نسبت به نمونه شاهد، عیوب سطحی و زیرسطحی همچون ترک‌ها، حفره‌های ریز³ و چاله‌ها، تنش‌های پسماند و تبدیلات متالورژیکی و نواحی متأثر از حرارت در نمونه‌های ماشین کاری شده به روش EDM رخ می‌دهد که این عیوب سطحی و زیرسطحی منجر به کاهش مقاومت به خوردگی سطح قطعه کار خواهد شد. همه این دگرگونی‌ها نشان‌دهنده تغییر شدید رفتار الکتروشیمیایی نمونه‌های ماشین کاری شده به روش EDM با نمونه شاهد است [20,10].

¹ Lamellar

² Galvanic couples

³ Micro pit

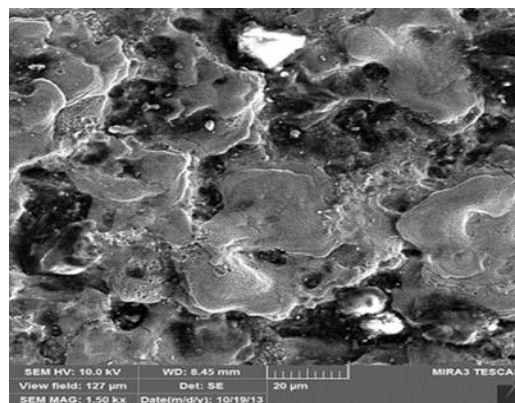


Fig. 8 SEM image of machined surface ($Ti= 3.2 \mu s, I=4A$)

شکل 8 تصویر SEM سطح ماشین کاری شده در حالت خشن کاری ($I=4$ A, $\mu Ti=3.2$)

به طوری که این تنش پسماند کششی با افزایش عمق تا حداکثر مقدار خود در زیر سطح رسیده و سپس به تنش پسماند فشاری تبدیل می‌شود تا از لحاظ مکانیکی در تعادل باشد. به عبارت دیگر تنش‌های پسماند درون لایه‌های تغییر شکل پلاستیکی یافته با تنش‌های الاستیک ماده پایه در تعادل هستند [15].

همچنین شکل 10 نتایج پروفیل تنش پسماند را برای شرایط ماشین کاری با شدت جریان 24A و مدت زمان‌های روشنی پالس مختلف نشان می‌دهد. همان طور که از این نتایج مشاهده می‌شود، در لایه سطحی نمونه‌ها تنش‌های پسماند کششی و در عمق‌های پایین تنش‌های پسماند فشاری ایجاد شده و سپس به حالت تعادل برمی‌گردد.

به عبارت دیگر در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی در مدت زمان روشنی پالس، بخشی از ماده که ذوب شده و یا به نزدیکی دمای ذوب رسیده، تمایل به منبسط شدن دارد، در صورتی که مواد جامد اطراف چاله مذاب مانع این انبساط می‌شوند، این امر باعث افزایش چشمگیر تنش‌های پسماند فشاری در این ناحیه می‌شود. این موضوع سبب تغییر شکل پلاستیکی موضعی می‌گردد. در ادامه وقتی که ناحیه حرارت دیده و ماده مذاب باقی‌مانده منجمد می‌شود فلز جامد اطراف آن اجازه انقباض تعادلی نداده و در نتیجه در سطح ماشین کاری شده تنش‌های پسماند کششی بالایی ایجاد می‌شود [16].

اگرچه با افزایش زمان روشنی پالس انرژی جرقه افزایش می‌یابد، ولی مقدار حداکثر تنش پسماند کششی در زیر سطح تغییر زیادی نمی‌کند، به طوری که بیشینه تغییرات تنش پسماند در حدود 70 مگاپاسکال است. در این حالت تنش‌های پسماند کششی از استحکام شکست ماده فراتر رفته و منجر به توزیع ترک‌های ریز در سطح ماشین کاری می‌شود. این ترک‌ها به عنوان مکانیزم آزاد شدن تنش عمل می‌کنند و سبب می‌گردند مقدار تنش پسماند در این نواحی کاهش یابد.

3-3- تأثیر شدت جریان جرقه بر مقاومت خوردگی

نتایج داده‌های حاصل از اندازه‌گیری پلاریزاسیون تافلی برای تمام نمونه‌ها و نمونه شاهد در جدول 6 ارائه شده است.

چگالی جریان خوردگی نمونه‌های ماشین کاری در کل بیشتر از نمونه شاهد (ماشین کاری نشده) است. در حالت کلی مقاومت خوردگی نمونه ماشین کاری شده به عواملی مانند ترکیب شیمیایی سطح، ضخامت لایه سطحی متأثر از فرآیند، وجود ترک، میکرو ترک و خلل و فرج موجود در سطح و زبری سطح ماشین کاری شده دارد [22].

چگالی جریان خوردگی بیش از تأثیر افزایش زمان روشنی پالس است که این امر به علت افزایش بیشتر انرژی ورودی به قطعه کار با افزایش جریان جرقه‌هاست که منجر به افزایش زبری و میکروتکرهای سطحی شده و در نهایت باعث افزایش چگالی جریان خوردگی می‌گردد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تنش‌های پسماند و تغییر مقاومت خوردگی ناشی از فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر آلیاژ Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر پارامترهای ورودی (شدت جریان جرقه و زمان روشنی پالس) بر خروجی‌ها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- 1- به دلیل تشکیل میکروتکرها در سطح ماشین کاری شده بخشی از تنش پسماند کشتی در این ناحیه آزاد شده و در نتیجه حداکثر تنش پسماند کشتی در زیر سطح قطعه کار ایجاد می‌شود.
- 2- با افزایش مقادیر زمان روشنی پالس و شدت جریان جرقه، مقدار حداکثر تنش پسماند کشتی در لایه زیری سطح ماشین کاری شده تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند، بلکه این مقدار تابعی از استحکام نهایی قطعه کار است.
- 3- تأثیر افزایش مقدار شدت جریان بر تغییرات تنش پسماند اندکی بیش از مدت زمان روشنی پالس است، این امر ناشی از افزایش چگالی انرژی جرقه است.
- 4- در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی مقاومت خوردگی قطعات ماشین کاری شده کاهش می‌یابد.
- 5- کاهش مقاومت خوردگی نمونه‌ها با افزایش انرژی جرقه‌ها بیشتر می‌گردد؛ اما تأثیر افزایش جریان بر افزایش چگالی جریان خوردگی بیش از تأثیر افزایش زمان روشنی پالس است.

5- مراجع

- [1] A. Descouedres, *Characterization of Electrical Discharge Machining Plasmas*, PhD Thesis, EPFL Lausanne, 2006.
- [2] J. Y. Kao, C. C. Tsao, S. S. Wang, C. Y. Hsu, Optimization of the EDM parameters on machining Ti-6Al-4V with multiple quality characteristics, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 47, No. 1-4, pp. 395-402, 2010.
- [3] A. Hasçalık, U. Caydas, A comparative study of surface integrity of Ti-6Al-4V alloy machined by EDM and AECG, *Materials Processing Technology*, Vol. 190, No. 1-3, pp. 173-180, 2007.
- [4] Ekmekci, Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM), *Applied Surface Science*, Vol. 253, No. 23, pp. 9234-9240, 2007.
- [5] N. S. Rossini, M. Dassisti, K. Y. Benyounis, A. G. Olabi, Methods of measuring residual stresses in components, *Materials and Design*, Vol. 35, No. 1, pp. 572-588, 2012.
- [6] L. Zhu, B. Xu, H. Wang, C. Wang, Measurement of residual stress in quenched 1045 steel by the nanoindentation method, *Materials Characterization*, Vol. 61, No. 12, pp. 1359-1362, 2010.
- [7] J. E. Wyatt, J. T. Berry, A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes, *Materials Processing Technology*, Vol. 171, No. 1, pp. 132-140, 2006.
- [8] F. Díaz, C. Mammana, A. Guidobono, Evaluation of residual stresses induced by high speed milling using an indentation method, *Modern Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 143-150, 2012.
- [9] C. A. Charitidis, D. A. Dragatogiannis, E. P. Koumoulos, I. A. Kartsonakis, Residual stress and deformation mechanism of friction stir welded aluminum alloys by nanoindentation, *Materials Science and Engineering*, Vol. A 540, pp. 226-234, 2012.
- [10] 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, *The Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 65, No 1-4, pp. 141-153, 2013.
- [11] J. C. Rebelo, A. M. Dias, D. Kremer, J. L. Lebrun, Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels, *Materials Processing Technology*, Vol. 84, No. 1-3, pp. 90-96, 1998.
- [12] V. G. Navas, I. Ferreres, J. A. Maranon, C.G. Rosales, J. G. Sevillano, Electro-discharge machining (EDM) versus hard turning and grinding—Comparison of residual stresses and surface integrity generated in AISI O1

چگالی جریان خوردگی نمونه‌های ماشین کاری شده در تنظیمات مختلف ماشین کاری در شکل‌های 11 و 12 ارائه شده است. همان طوری که از این تصاویر معلوم است چگالی جریان خوردگی نمونه‌ها با افزایش جریان و زمان روشنی پالس افزایش یافته است؛ با افزایش جریان و زمان روشنی پالس انرژی جرقه‌ها افزوده شده و در هر تخلیه ماده مذاب بیشتری از سطح نمونه‌ها خارج شده و عمق و ابعاد حفره‌های ایجاد شده بیشتر می‌شود، در این شرایط با افزایش ناهمواری سطح، سطح در معرض خوردگی نمونه‌ها بیشتر شده و نرخ خوردگی (به ویژه خوردگی حفره‌ای و شیاری) افزایش می‌یابد [18].

با مشاهده شکل‌های 11 و 12 مشخص می‌گردد که شیب منحنی در شکل 11 بیشتر از شکل 12 است، یعنی تأثیر افزایش جریان بر افزایش

جدول 6 نتایج آزمون تست پلاریزاسیون تافلی در محلول رینگر در دمای 36°C
Table 6 results of Tafel polarization tests in Ringer solution in 36 °C temperature

نمونه	جریان خوردگی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	پتانسیل خوردگی (mV)
شاهد	0.02314	366.896
1	1.0168	469.962
2	0.1622	460.569
3	0.6349	537.431
4	0.8893	533.545

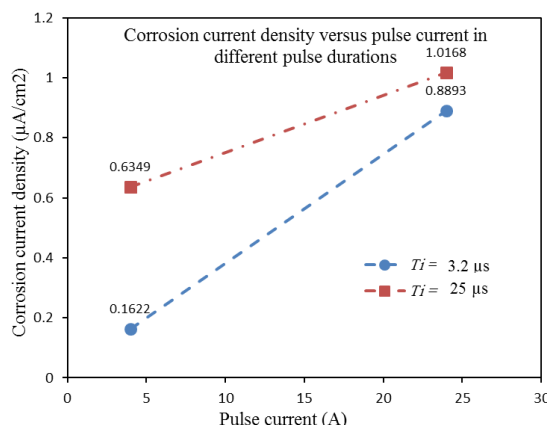


Fig. 11 Corrosion current density versus pulse current

شکل 11 چگالی جریان خوردگی نمونه‌های ماشین کاری شده در مقابل شدت جریان پالس

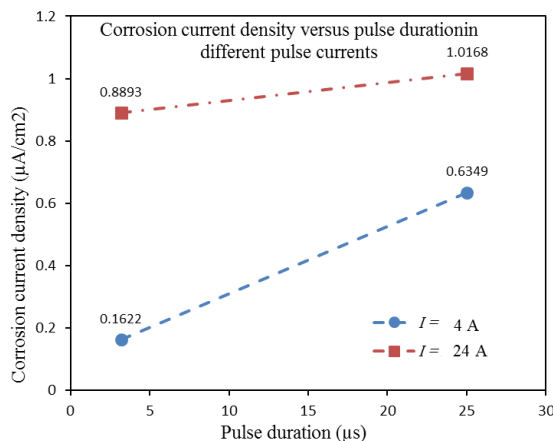


Fig. 12 Corrosion current density versus pulse duration

شکل 12 چگالی جریان خوردگی نمونه‌های ماشین کاری شده در مقابل زمان روشنی پالس

- Discharge Machining (EDM) on the corrosion resistance of dental alloys, *Dental Materials*, Vol. 26, No. 12, pp. e237-e245, 2010.
- [19] Y. Uno, A. Okada, K. Uemura, P. Raharjo, T. Furukawa, K. Karato, High-efficiency finishing process for metal mould by large-area electron beam irradiation, *Precision Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 449-455, 2005.
- [20] B. Jabbaripour, M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, H. Faraji, Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic, *Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 1, pp. 56-68, 2013.
- [21] G. Lütjering, J. C. Williams, *Titanium*, 2nd edition, pp. 115-125, Berlin, Springer, 2007.
- [22] M. G. Fontana, *Corrosion Engineering*, third edition, pp. 499-502, Sinagapore, McGraw Hill, 1987.
- [23] A. W. Warren, Y. B. Guo, M. L. Weaver, The influence of machining induced residual stress and phase transformation on the measurement of subsurface mechanical behavior using nanoindentation, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, No. 11, pp. 3459-3467, 2006.
- [24] F. Karimzadeh, M. Heidarbeigy, A. Saatchi, Effect of heat treatment on corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy weldments, *Materials Processing Technology*, Vol. 206, No. 1-3, pp. 388-394, 2008.
- tool steel, *Materials Processing Technology*, Vol. 195, No. 1-3, pp. 186-194, 2008.
- [13] J. C. Rebelo, M. Kommeier, A. C. Batista, A. M. Dias, Residual stress after EDM-FEM study and measurement results, *Materials Science Forum*, Vol. 404-407, pp. 159-164, 2002.
- [14] F. Ghanem, C. Braham, H. Sidhom, Influence of steel type on electrical discharge machined surface integrity, *Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 1, pp. 163-173, 2003.
- [15] B. Ekmekci, O. Elkoca, A. E. Tekkaya, A. Erden, Residual stress state and hardness depth in electric discharge machining: De-Ionized water as dielectric liquid, *Machine Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 39-61, 2005.
- [16] N. B. Salah, F. Ghanem, K. B. Atig, Thermal and mechanical numerical modelling of electric discharge machining process, *Numerical Methods in Biomedical Engineering*, Vol. 24, No. 12, pp. 2021-2034, 2008.
- [17] M. R. Shabgard, B. Khosrozadeh, Study the effect of ultrasonic assisted electrical discharge machining process on residual stress and hardness of Ti-6Al-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 169-176, 2016. (in Persian فارسی)
- [18] A. Ntasi, W. D. Mueller, G. Eliades, S. Zinelis, The effect of Electro