



## بررسی تجربی تأثیر پارامترهای فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی مقاومت به خستگی فولاد MnCr516

محمدرضا شبگرد<sup>1\*</sup>، بابک روشنگر زینه<sup>2</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

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

\* تبریز، صندوق پستی: 16471-51664، mrshabgard@tabrizu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 دی 1394

پذیرش: 01 اسفند 1394

ارائه در سایت: 07 فروردین 1395

کلید واژگان:

خستگی

ماشین کاری تخلیه الکتریکی

روشنی پالس

زبری سطح

### چکیده

این مقاله تأثیر پارامترهای فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی را بر روی مقاومت به خستگی فولاد آلیاژی 16MnCr5 بصورت تجربی مورد بررسی قرار می‌دهد. فولاد 16MnCr5 در ساخت قطعاتی که نیاز به مقاومت سایشی بالایی دارند کاربرد دارد. به علت سختی بالای این فولاد یکی از فرایندهای تولیدی که جهت شکل‌دهی این قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی است. شدت جریان جرقه با مقادیر 8، 16 و 32 آمپر و مدت زمان روشنی پالس با مقادیر 25، 100 و 400 میکروثانیه برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شده است. آزمایش‌ها به حالت عاملی کامل انجام پذیرفت و از تست خستگی مور جهت تعیین عمر خستگی استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد با افزایش شدت جریان جرقه و مدت زمان روشنی پالس مقاومت به خستگی کاهش می‌یابد. بیشترین مقاومت به خستگی در شدت جریان جرقه 8 آمپر و مدت زمان روشنی پالس 25 میکروثانیه و کمترین مقاومت به خستگی در شدت جریان جرقه 32 آمپر و مدت زمان روشنی پالس 400 میکروثانیه حاصل شد. مقاومت به خستگی نمونه‌ها به تراکم ترک‌های سطح و ضخامت منطقه متأثر از حرارت بستگی دارد. در قطعه‌کارهایی که مقاومت به خستگی پایین دارند، ترک ناشی از خستگی از چند نقطه مختلف از سطح مقطع قطعات آغاز می‌گردد. به نظر می‌رسد علت این پدیده زبری سطح بالا در نمونه‌ها باشد. همچنین مقاومت به خستگی نمونه‌ها با کمترین زبری سطح، حدود 3 تا 5 برابر بیشتر از مقاومت به خستگی نمونه با بیشترین زبری سطح بدست آمد.

## Experimental study on the effects of electro-discharge machining process parameters on the fatigue strength of 16MnCr5 steels

Mohammadreza Shabgard<sup>\*</sup>, Babak Roushangar Zineh

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

\* P.O.B. 51664-16471 Tabriz, Iran, mrshabgard@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 January 2016

Accepted 20 February 2016

Available Online 26 March 2016

### Keywords:

Fatigue

Electrical discharge machining

Pulse time

Roughness

### ABSTRACT

steel. 16MnCr5 alloy steels have good wear resistance. For this purpose, pulse current and pulse time have been considered as variables in the process. The selected EDM parameters were pulsed current (8, 16 and 32A) and pulse time (25, 100 and 400μs). Tests were conducted in full factorial mode and the R. R. Moore fatigue test machine was used to determine the fatigue life of components. The results show that by increasing the spark current and pulse duration 16MnCr5 alloy steel fatigue life is reduced. Respectively, the greatest resistance to fatigue was achieved at current of 8A and pulse time of 25 microseconds and lowest resistance to fatigue achieved at pulse current of 32A and pulse time of 400 microseconds. Resistance to fatigue crack depends on cracks density on the surface of the workpiece and heat-affected zone, where the density of cracks increase resistance to fatigue will be reduced. Also, in the specimens that have low resistance to fatigue, fatigue cracks are initiated from multiple points of the cross-section. It seems the reason for this phenomenon is the high surface roughness in the samples. EDM machining with high energy sparks can decrease the fatigue strength of 16MnCr5 by as much as factors of 3-5.

### 1- مقدمه

استحکام فولاد را افزایش و باعث کاهش ضربه پذیری آن می‌گردد. به علت سختی و استحکام بالای این فولاد یکی از فرایندهای تولیدی که برای شکل‌دهی این قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی است [1،2]. چون مکانیزم باربرداری در فرایند تخلیه الکتریکی به صورت الکتروترمال است این عامل سبب ایجاد تحولات فازی، میکروسکوپی و

فولاد آلیاژی 16MnCr5 در ساخت انواع چرخ‌دنده، محورها و قطعات حساس لغزنده که نیاز به مقاومت سایشی بالایی دارند کاربرد دارد. درصد منگنز و کروم موجود در این فولاد آلیاژی قابلیت سختی پذیری آن را افزایش و مقاومت به سایش را بهبود می‌بخشد. منگنز متناسب با درصد کربن فولاد

Please cite this article using:

M. Shabgard, B. Roushangar Zineh, Experimental study on the effects of electro-discharge machining process parameters on the fatigue strength of 16MnCr5 steels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 395-400, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ایجاد ترک روی سطح ماشین کاری می شود [4,3].

راژندران و همکارانش [5] دانسته ترک را در سطوح ماشین کاری شده توسط فرایند تخلیه الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. آنها متوجه شدند که شدت جریان جرقه رابطه مستقیم با دانسیته ترک موجود در سطح دارد. این ترکها نقاط تمرکز تنش در بارگذاریها بوده و عامل کاهش مقاومت به خستگی قطعات می باشد.

ابهای و همکارانش [6] تأثیر اضافه کردن پودر به مایع دی الکتریک در ماشین کاری تخلیه الکتریکی را بر روی عمر خستگی فولاد ضد زنگ 15-ph5 مورد تحقیق قرار دادند و پی بردند که کاهش عمر خستگی وابسته به کیفیت سطح در این فولادها بوده و با اضافه کردن پودر به مایع دی الکتریک می توان زبری سطح را کاهش و در نتیجه مقاومت به خستگی را افزایش داد.

لی و همکارش [7] رابطه بین پارامترهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی و ایجاد ترک بر روی سطح این قطعات را بررسی نمودند. آنها دو پارامتر شدت جریان جرقه و مدت زمان روشنی پالس را به عنوان متغیر در نظر گرفته و از فولاد D2 و H13 بعنوان قطعه کار استفاده کردند. ولتاژ را 120V، شدت جریان جرقه را بین 12-16A و زمان روشنی را بین 6-9 $\mu$ s در نظر گرفته و پی بردند که با افزایش این دو پارامتر دانسیته ترک در سطح افزایش می یابد، که عامل اصلی در کاهش مقاومت به خستگی می باشند. این دو در ادامه مطالعه خود [8] بیان نمودند با ایجاد پیش تنش و پولیش کاری سطح می توان مقاومت به خستگی را به میزان قابل توجهی افزایش داد.

ابو زید [9] اثر ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر روی مقاومت به خستگی فولاد AISI D6 را مورد تحقیق قرار داد. وی پی برد که با افزایش میزان ترک در سطح قطعات ماشینکاری شده توسط روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی مقاومت به خستگی کاهش می یابد. همچنین متوجه افزایش میزان سختی در سطوح ماشین کاری شده به روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی شد و عامل آن را افزایش میزان کربن موجود در سطح گزارش نمود.

تاد موور [10] تأثیر ماشینکاری تخلیه الکتریکی را بر روی مقاومت به خستگی 6AL-4V مطالعه نمود. وی گزارش کرد روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی عمر خستگی قطعات را کاهش می دهد که عامل این کاهش آغاز رشد ترک در منطقه HAZ<sup>1</sup> تشکیل شده از فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی است.

کیاک و همکارش [11] مطالعه تأثیر پارامترهای ماشینکاری از جمله مدت زمان روشنی پالس، مدت زمان خاموشی پالس و شدت جریان جرقه را بر روی کیفیت سطح فولاد 40CrMnNiMo864 مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند با افزایش مدت زمان خاموش پالس و کاهش هم زمان شدت جریان جرقه و مدت زمان روشنی پالس کیفیت سطح افزایش می یابد.

گوو و همکارانش [12] تأثیر پارامتر مدت زمان روشنی پالس و شدت جریان جرقه در ماشین کاری تخلیه الکتریکی را بر روی ساختار سطحی آلیاژ Fe-Mn-AL مورد بررسی قرار دادند. آنها متوجه شدند که تأثیر پارامتر زمان روشنی پالس بر روی ساختار و کیفیت سطح بیشتر از شدت جریان جرقه می باشد.

هیائو و همکارانش [13] میکروتُرکها را بر روی سطح ماشین کاری شده توسط فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی و ارتباط آن را با شکست خستگی در موتور دیزلی تحقیق نمودند و پی بردند خستگی تابعی از ناحیه متأثر از حرارت است، که باید توسط کنترل شدت جریان جرقه، عمق و ابعاد آن را

کنترل نمود.

با توجه به تحقیقات بعمل آمده یکی از مهمترین عوامل در کاهش مقاومت به خستگی فولادها میزان زبری سطح ماشین کاری شده می باشد. بررسی تراکم ترکهای ناشی از ماشین کاری تخلیه الکتریکی<sup>2</sup> (EDM) در ناحیه متأثر از حرارت و سطح ماشین کاری شده برای تعیین عمر خستگی قطعات ضروری بنظر می رسد. به همین منظور این پژوهش با انجام آزمایشهای تجربی در سطوح مختلفی از مدت زمان روشنی پالس و شدت جریان جرقه، تأثیر پارامترهای فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی مقاومت به خستگی فولاد آلیاژی 16MnCr5 را مورد بررسی قرار می دهد.

## 2- مواد و روشهای انجام آزمایشها

برای انجام آزمایشهای ماشین کاری EDM از دستگاه اسپارک شارمیلز روبوفر<sup>3</sup> 200 با مولد ایزو پالس استفاده شد. فولاد آلیاژی 16MnCr5 که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن در جدولهای 1 و 2 آورده شده، به عنوان جنس قطعه کار انتخاب گردید. ابعاد و شکل نمونهها بر اساس نمونه استاندارد مورد استفاده در تست خستگی مور در شکل 1 نمایش داده شده است.

برای تهیه نمونهها توسط دستگاه اسپارک، از ابزار (الکترو) مسی استفاده گردید و برای این منظور ابزار ثابت و قطعه کار با سرعت 5 دور در دقیقه به چرخش درآورده شد تا تمامی سطوح به مقطع دایروی توسط ماشینکاری تخلیه الکتریکی براده برداری شود. تصویر قطعه کار و ابزار در شکل 2 ارائه شده است. ولتاژ ماشین کاری 120 ولت و بصورت ثابت اعمال گردید.

جدول 1 درصد عناصر فولاد آلیاژی 16MnCr5

Table 1 Chemical composition (weight %) of 16MnCr5 alloy steel

نام عنصر	درصد عنصر (%)
C	0.14-0.19
Si	0-0.4
Mn	1-1.3
P	0-0.025
S	0-0.035
Cr	0.8-1.1

جدول 2 خواص مکانیکی فولاد آلیاژی 16MnCr5

Table 2 Mechanical properties of 16MnCr5 alloy steel

خواص مکانیکی	مقادیر
استحکام کششی	400 MPa
تنش تسلیم نهایی	640 MPa
کرنش	11%

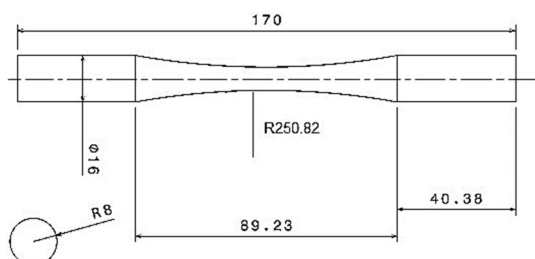


Fig. 1 Geometry and dimensions (mm) of fatigue specimens

شکل 1 ابعاد نمونه تهیه شده جهت انجام تست خستگی بر حسب میلی متر

<sup>2</sup> Electrical Discharge Machining

<sup>3</sup> CHARMILLES ROBOFORM 200

<sup>1</sup> Heat Affected Zone

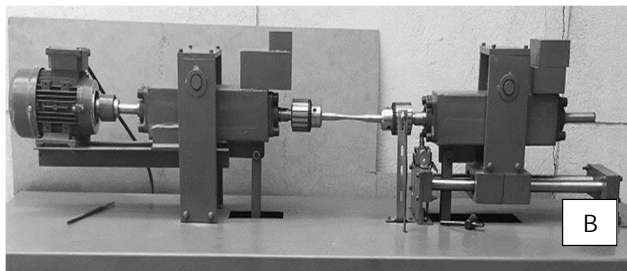
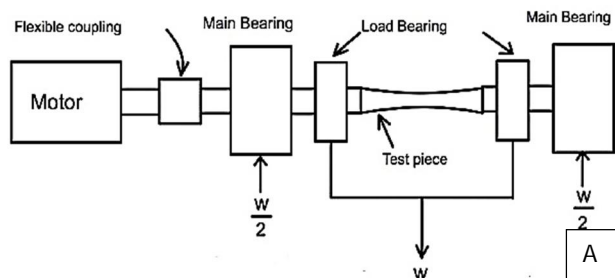


Fig. 3 fatigue test machine A: Schematic view B: Actual view

شکل 3 دستگاه خستگی جهت انجام تست خستگی. A: نمای شماتیک دستگاه

خستگی مور. B: نمای واقعی دستگاه خستگی مور

تخلیه الکتریکی از جمله شدت جریان جرقه، مقدار انرژی حرارتی وارد شده به سطح قطعات را افزایش داده و همین باعث افزایش ضخامت لایه متاثر از حرارت می‌شود [14,9]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از سطح مقطع شکست نمونه‌ها در شکل 5 نمایش داده شده است. تصاویر تهیه شده به وضوح ضخامت ناحیه متاثر از حرارت و همچنین دانسیته بالای ترک‌ها را با افزایش شدت جریان الکتریکی در این ناحیه نشان می‌دهد. ناحیه متاثر از حرارت به دلیل ذوب و به دنبال آن انجماد سریع به سبب وجود مایع دی الکتریک دارای تنش باقی مانده در ساختار خود می‌باشد که عامل تشکیل ترک‌های ریز و عیوب سطحی در قطعات ماشین کاری شده به روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی است [14,13]. بررسی‌ها نشان می‌دهد ترک خستگی در قطعات ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی از ناحیه متاثر از حرارت شروع به رشد کرده و به فلز پایه می‌رسد که هر چه ضخامت این لایه افزایش یابد، دانسیته و تعداد ترک‌های موجود در سطح نیز بیشتر بوده و

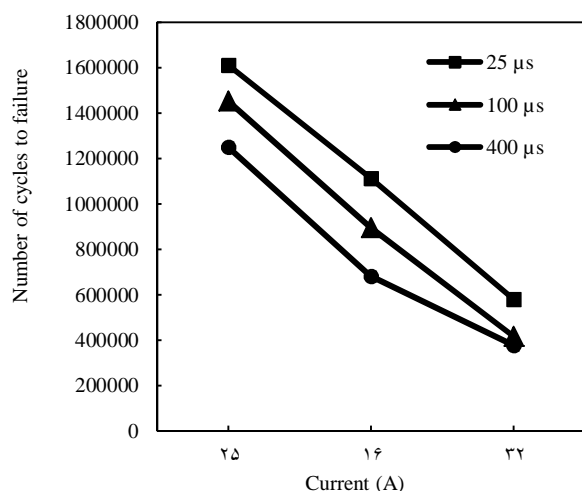


Fig. 4 the relationship between pulse current and fatigue life of 16MnCr5 alloy steel samples

شکل 4 رابطه بین شدت جریان جرقه و مقاومت به خستگی فولاد آلیاژی 16MnCr5

پارامترهای شدت جریان جرقه و مدت زمان روشنی پالس بکار رفته برای ماشین کاری هر یک در 3 سطح در جدول 3 آورده شده است. به منظور دقت و صحت بیشتر، ماشین کاری در هر یک از سطح‌ها با سه بار تکرار صورت پذیرفته است.

وضعیت سطح نمونه‌های ماشین کاری شده توسط میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی 200 برابر بررسی شدند. برای انجام تست‌های خستگی، دستگاه استاندارد تست خستگی مور<sup>1</sup> که در شکل 3 نمایش داده شده ساخته شد. دستگاه تست خستگی مور ساخته شده قادر به اعمال تنش کاملاً معکوس شونده در بازه 50 تا 800 مگاپاسکال در سرعت دورانی 500 تا 3000 دور در دقیقه می‌باشد. نمونه‌ها تحت تنش 360 مگاپاسکال و کمتر از استحکام کششی این نوع فولاد و در فرکانس استاندارد تست خستگی مور یعنی 1750 دور در دقیقه مورد تست قرار گرفتند. همچنین زبری سطح هریک از نمونه‌های تولید شده توسط دستگاه زبری سنج پرتومتر<sup>2</sup> در طول معیار 5.6 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در انتها تصاویری از سطح مقطع قطعه‌کارها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>3</sup> (SEM) برای تعیین ضخامت لایه HAZ و تراکم ترک‌ها تهیه گردید.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- تأثیر شدت جریان جرقه بر روی تراکم ترک‌های منطقه متأثر از

##### حرارت و مقاومت به خستگی فولاد آلیاژی 16MnCr5

شکل 4 رابطه بین شدت جریان جرقه و مقاومت به خستگی فولاد آلیاژی 16MnCr5 را نمایش می‌دهد، روشن است که افزایش شدت جریان جرقه مقاومت به خستگی را کاهش می‌دهند. علت این امر را این گونه می‌توان توجیه نمود که افزایش انرژی جرقه توسط افزایش پارامترهای ماشین کاری



Fig. 2 A. prepared steel specimen for fatigue test. B. Copper electrode that used for machining

شکل 2 A: نمونه فولاد آلیاژی ماشین کاری شده به روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی جهت انجام تست خستگی. B: ابزار مسی برای ماشین کاری تخلیه الکتریکی

جدول 3 مقادیر پارامترهای بکار رفته در روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی

Table 3 EDM parameters used for examination

شماره آزمایش	ولتاژ (V)	زمان روشنی پالس (μs)	شدت جریان جرقه (A)
1	120	25	8
2	120	100	8
3	120	400	8
4	120	25	16
5	120	100	16
6	120	400	16
7	120	25	32
8	120	100	32
9	120	400	32

<sup>1</sup> R. R. Moore fatigue test

<sup>2</sup> Perthometer M2 (Mahr)

<sup>3</sup> Scanning electron microscopy

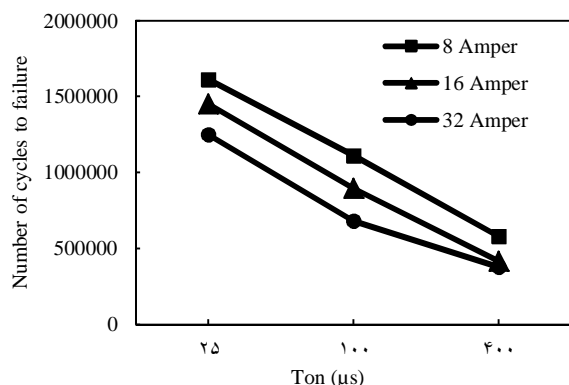


Fig. 6 The relationship between pulse time and fatigue life of 16MnCr5 alloy steel

شکل 6 رابطه بین مدت زمان روشنی پالس و مقاومت به خستگی فولاد آلیاژی 16MnCr5

نتیجه مقاومت به خستگی کاهش می‌یابد [13].

### 3-3- تأثیر شدت جریان جرقه و مدت زمان روشنی پالس بر روی زبری سطح فولاد آلیاژی 16MnCr5

شکل 7 رابطه بین پارامترهای ماشین کاری و زبری سطح فولاد آلیاژی 16MnCr5 را نمایش می‌دهد. قابل مشاهده است که با افزایش شدت جریان جرقه و مدت زمان روشنی پالس زبری سطح افزایش پیدا می‌کند [11]. این امر ناشی از این است که با افزایش پارامترهای ماشین کاری در ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی انرژی هر جرقه بیشتر می‌شود و در نتیجه حجم مذاب به ازای هر پالس جرقه بیشتر شده و در اثر جوشش حجمی مقدار بیشتری از مذاب به بیرون چاله پرتاب می‌شود، که باعث می‌شود عمق چاله‌ها بعد از انجماد بیشتر شده و در نتیجه زبری سطح قطعات ماشین کاری شده در فرایند تخلیه الکتریکی بیشتر شود [15]. شکل 8 پروفایل کمترین زبری سطح در حالت شدت جریان الکتریکی 8 آمپر و زمان روشنی 25 میکرو ثانیه و بیشترین زبری سطح در شدت جریان الکتریکی 32 آمپر و زمان روشنی 400 میکرو ثانیه نشان می‌دهد. نقاط گود موجود در پروفایل محل تمرکز تنش و همچنین نقاط ابتدایی شروع ترک‌های ریز می‌باشند که در کاهش مقاومت به خستگی نقش بسزایی دارند و هر چه عمق این چاله‌ها افزایش پیدا کند، نیروهای وارد شده تمرکز بیشتری در این نقاط داشته و باعث تسریع رشد ترک خستگی می‌شوند [12].

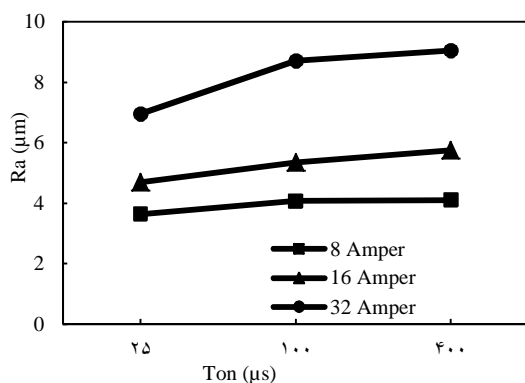


Fig. 7 The relationship between pulse time and roughness of 16MnCr5 alloy steel

شکل 7 رابطه بین پارامترهای ماشین کاری و زبری سطح فولاد آلیاژی 16MnCr5

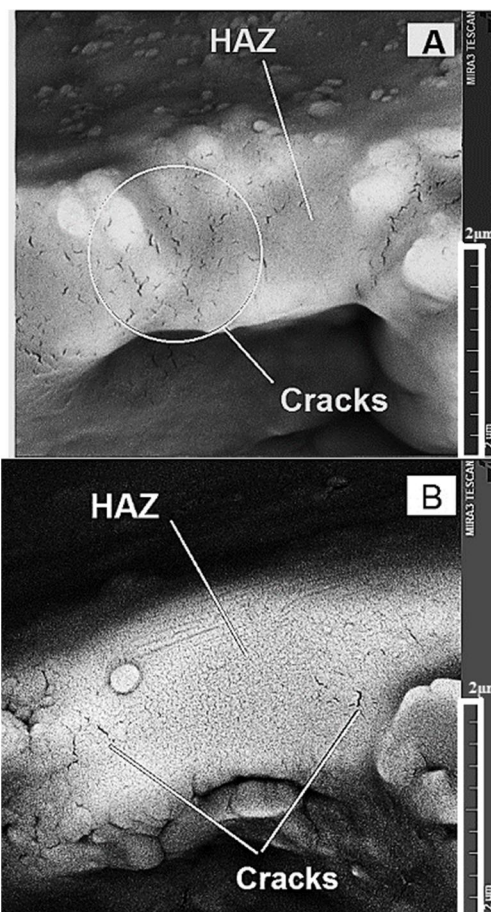


Fig. 5 SEM images showing HAZ region of samples. A. pulse current 32A and pulse time 400μs. B. pulse current 8A and pulse time 100μs

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از منطقه HAZ: A. تصویر از سطح مقطع شکست قطعه کار ماشین کاری شده با شدت جریان جرقه 32A و مدت زمان روشنی پالس 400μs. B. تصویر از سطح مقطع شکست قطعه کار ماشین کاری شده با شدت جریان جرقه 8A و مدت زمان روشنی پالس 100μs

شرایط برای رشد ترک خستگی هموارتر می‌شود و در نتیجه مقاومت به خستگی کاهش می‌یابد [13].

### 3-2- تأثیر مدت زمان روشنی پالس بر روی ضخامت منطقه متأثر از حرارت و مقاومت به خستگی فولاد آلیاژی 16MnCr5

شکل 6 رابطه بین مدت زمان روشنی پالس و مقاومت به خستگی فولاد آلیاژی 16MnCr5 را نمایش می‌دهد، با افزایش پارامتر مدت زمان روشنی پالس مقاومت خستگی قطعه کارها کمتر شده و سریعتر دچار شکست خستگی می‌شوند. عامل این رفتار را بدین صورت می‌توان توجیه نمود که هر چه زمان روشنی پالس افزایش پیدا می‌کند انرژی حرارتی ناشی از جرقه فرصت بیشتری را برای انتقال به عمق پیدا می‌کند. ضخامت ناحیه متأثر از حرارت به دلیل اعمال حرارت به مدت طولانی‌تر افزایش یافته که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی شکل 5 این افزایش ضخامت قابل مشاهده است. همان‌گونه که در بخش 3-1 نیز به آن اشاره شد، ترک خستگی در قطعات ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی از منطقه HAZ شروع به رشد می‌کند، به فلز پایه رسیده و منجر به شکست نهایی می‌شود. هر چه ضخامت لایه HAZ بیشتر باشد، تعداد ترک‌های موجود در سطح افزایش پیدا کرده و به دنبال آن شرایطی ایده‌آل برای رشد ترک خستگی ایجاد می‌شود و در



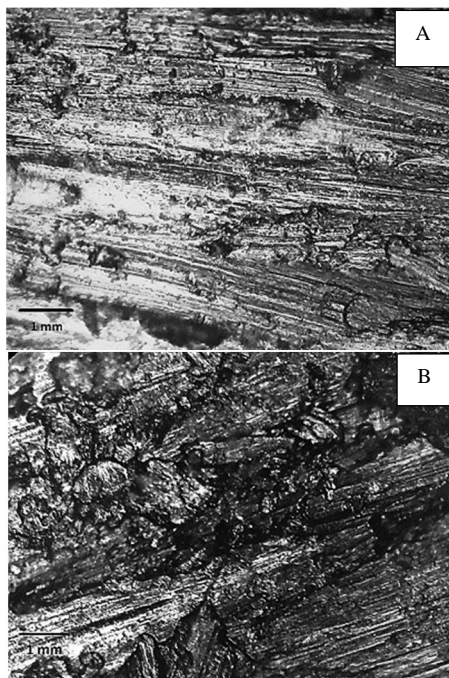
ماشین کاری شده مقاومت به خستگی کاهش پیدا می کند [8,6]. علت این پدیده را اینگونه می توان روشن نمود که شکست ناشی از خستگی در قطعات فولادی دارای دو مرحله می باشد. مرحله اول تشکیل ترک های ریز در سطوح خارجی و داخلی قطعات در اثر اعمال بارهای دوره ای و مرحله دوم رشد و گسترش این ترکها تا زمانی که منجر به شکست خستگی شود. از آنجا که در سطوح شکل داده شده توسط فرایند تخلیه الکتریکی همواره ترک های ریز موجود می باشد [9] شکست ناشی از خستگی به یک مرحله یعنی تنها به مرحله رشد ترک محدود می شود که منجر به کاهش عمر خستگی قطعات می گردد. شکل 10 تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری میزان تفاوت در دانسیته ترک را در شرایط ماشین کاری مختلف نمایش می دهد که نمایانگر وجود دانسیته ترک بیشتر در انرژی جرقه بالا می باشد.

**جدول 4** مقادیر عمر خستگی و زبری سطح بدست آمده در شرایط مختلف

ماشین کاری تخلیه الکتریکی

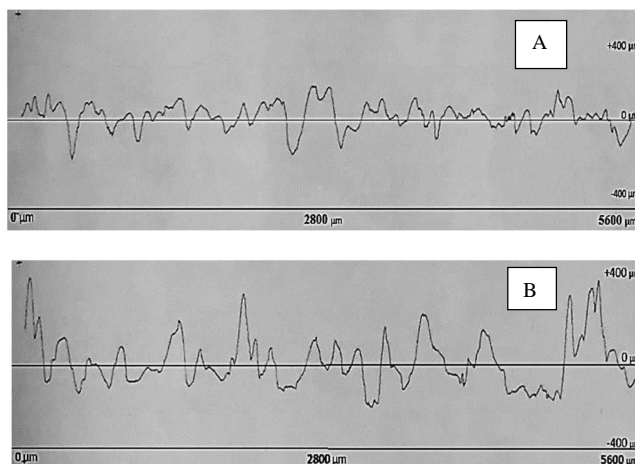
**Table 4** Results of fatigue life and roughness in different settings

شماره آزمایش	عمر خستگی میانگین (NF)	زبری سطح میانگین ( $\mu\text{m}$ )
1	1,611,090	3.646
2	1,452,816	4.080
3	1,248,486	4.109
4	1,112,443	4.705
5	895,570	5.349
6	681,400	5.747
7	579,963	6.954
8	416,710	8.719
9	377,000	9.047



**Fig. 10** Optical microscope images of electro discharge machined surfaces. A: sample machined with 8A pulse current and 25μs pulse time. B: sample machined with 32A pulse current and 400μs pulse time.

**شکل 10** الف: سطح نمونه ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی (شدت جریان 8 آمپر و مدت زمان روشنی 25 میکرو ثانیه). ب: سطح نمونه ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی (شدت جریان 32 آمپر و مدت زمان روشنی 400 میکرو ثانیه).



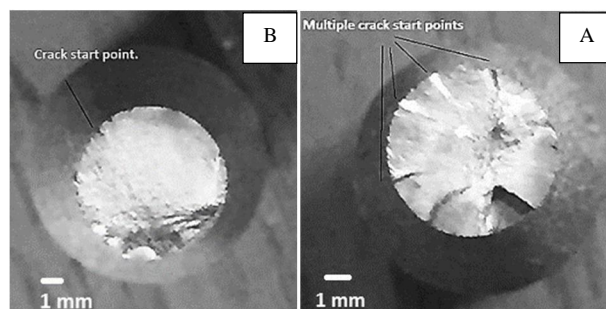
**Fig. 8** Roughness profile of samples. A. sample machined with 8A pulse current and 25μs pulse time. B. sample machined with 32A pulse current and 100μs pulse time.

**شکل 8** پروفایل زبری سطح نمونه ها. A: نمونه 1 (مدت زمان روشنی پالس 25 میکرو ثانیه و شدت جریان جرقه 8 آمپر). B: نمونه 9 (مدت زمان روشنی پالس 400 میکرو ثانیه و شدت جریان جرقه 32 آمپر).

با مقایسه دو مقطع شکست ناشی از خستگی در دو حالت بیشترین و کمترین زبری سطح به این نتیجه می رسیم که ترک ناشی از خستگی در سطوح با زبری کمتر، از یک نقطه آغاز می شود، یعنی محل رشد ترک اصلی وجود دارد ولی در سطوح با تراکم ترک بالا و زبری بیشتر، آغاز ترک ناشی از خستگی ممکن است از چند نقطه مختلف آغاز گردد و منجر به شکست سریع تر قطعات شود. این مطلب در شکل 9 نشان داده شده است. به نظر می رسد علت این امر وجود دانسیته ترک بالا و زیاد بودن عمق چاله های تشکیل شده پس از انجماد در ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی باشد که موجب می گردد سطح دارای چندین نقطه تمرکز تنش بوده و هر کدام از این نقاط به نوبه خود محل رشد ترک جداگانه ای شده و در کاهش مقاومت به خستگی نقش ایفا کنند.

### 3-4- تأثیر زبری سطح ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی بر روی مقاومت به خستگی فولاد آلیاژی 16MnCr5

جدول 4 میانگین مقاومت به خستگی و میانگین زبری سطح فولاد آلیاژی 16MnCr5 پس از سه بار تکرار در هر سطح از ماشین کاری تخلیه الکتریکی را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود رابطه معکوس بین زبری سطح و مقاومت به خستگی وجود دارد و با افزایش زبری سطح سطوح



**Fig. 9** Cross-section of samples after fatigue. A. Sample with maximum roughness. B. Sample with minimum roughness

**شکل 9** سطح مقطع نمونه ها پس از شکست خستگی. A: نمونه با کمترین زبری سطح. B: نمونه با بیشترین زبری سطح

## 4- نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر پارامترهای فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی مقاومت به خستگی فولاد آلیاژی 16MnCr5 بصورت تجربی بررسی شده و نتایج زیر حاصل شد:

- با افزایش شدت جریان جرقه و مدت زمان روشنی پالس، مقاومت به خستگی قطعات کاهش می یابد.
- بیشترین مقاومت به خستگی مربوط به شدت جریان جرقه 8 آمپر و مدت زمان روشنی پالس 25 میکرو ثانیه و کمترین مقاومت به خستگی مربوط به شدت جریان جرقه 32 آمپر و مدت زمان روشنی پالس 400 میکرو ثانیه می باشد.
- با افزایش تراکم ترک های موجود در سطح قطعات و ضخامت منطقه HAZ میزان مقاومت به خستگی کاهش می یابد.
- با افزایش زبری سطح قطعات، مقاومت به خستگی آنها کاهش می یابد. با توجه به میزان تفاوت زبری در سطح نمونه ها، مقاومت به خستگی نمونه ها با کمترین زبری سطح، 3 تا 5 برابر بیشتر از مقاومت به خستگی نمونه با بیشترین زبری سطح می باشد.

## 5- فهرست علائم

A	آمپر
NF	تعداد دوران قبل شکست خستگی
R <sub>a</sub>	زبری سطح (μm)
T <sub>on</sub>	مدت زمان روشنی پالس (μs)
V	ولت

## علائم یونانی

μm	میکرومتر
μs	میکروثانیه

## 6- مراجع

- [1] S. Singh, A. Bhardwaj, Review to EDM by Using Water and Powder-Mixed Dielectric Fluid, *International Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 84–113, 2011.
- [2] N. Mohd Abbas, Darius G. Solomon, Md. Fuad Bahari, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 7, pp. 1214–1228, 2007.
- [3] 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, No. 1, pp. 162–167, 2006.
- [4] S. Kumar, R. Singh, T.P. Singh, B.L. Sethi, Surface modification by electrical discharge machining: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, PP. 3675–3687, 2009.
- [5] S. Rajendran, K. Marimuthu, M. Sakthivel, Study of Crack Formation and Resolidified Layer in EDM Process on T90Mn2W50Cr45 Tool Steel, *Journal of Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 28, No. 6, pp. 664–669, 2013.
- [6] K. Abhay, Jha, K. Sreekumar, P.P. Sinha, Role of electro-discharge machining on the fatigue performance of 15–5PH stainless steel component, *Journal of Engineering Failure Analysis*, Vol. 17, No. 5, pp. 1195–1204, 2010.
- [7] H.T.Lee, T.Y.Tai, Relationship between EDM parameters and surface crack formation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 3, pp. 676–683, 2003.
- [8] T.Y. Tai, S.J. Lu, Improving the fatigue life of electro-discharge-machined SDK11 tool steel via the suppression of surface cracks, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, No. 3, pp. 433–438, 2009.
- [9] O.A. Abu Zeid, On the effect of electro discharge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 68, No. 1, pp. 27–32, 1997.
- [10] M. Todd Mower, Degradation of titanium 6Al–4V fatigue strength due to electrical discharge machining, *International Journal of Fatigue*, Vol. 64, No. 3, pp. 84–96, 2014.
- [11] M. Kiyak, O. Çakır, Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 191, No. 1, pp. 141–144, 2007.
- [12] Y.H. Guu, Max Ti-Kuang Hou, Effect of machining parameters on surface textures in EDM of Fe-Mn-Al alloy, *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 466, No. 1, pp. 61–67, 2007.
- [13] Xiao-lei Xu, Zhi-wei Yu, Yu-zhou Gao, Micro-cracks on electro-discharge machined surface and the fatigue failure of a diesel engine injector, *Journal of Engineering Failure Analysis*, Vol. 32, No. 1, pp. 124–133, 2013.
- [14] MAE-R Merdan, RD. Amell. The surface integrity of a die steel after electrodischarge machining: (I) structure, composition, and hardness, *Journal of Surface Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 158–164, 1989.
- [15] M. Shabgard, B. khorozadeh, b. sadizadeh, h.kakoulvand, Comprative study of the effect of ultrasonic vibration of workpiece in the electrical discharge machining, *Journal of modares mechanical engineering*, Vol. 13, pp. 48–55, 2013. (in Persian)