



بررسی اثر زبری سطح بر عمر خستگی در فرایند سوراخ کاری فولاد سخت

امیر راستی¹، محمدحسین صادقی^{2*}، سینا صباغی فرشی¹

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استاده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* sadeghim@modares.ac.ir 14115-143 صندوق پستی تهران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این پژوهش اثر زبری سطح بر عمر خستگی در فرایند سوراخ کاری فولاد AISI4340 مورد بررسی قرار گرفت. سه روش ایجاد سوراخ شامل سوراخ کاری سنتی با و بدون پیش‌مته و فرزکاری ماریچ به کارگرفته شدند. به منظور مطالعه اثر زبری سطح و پارامترهای فرایند بر استحکام خستگی، دو پارامتر اصلی برش شامل سرعت برشی (V_c) و نرخ پیشروی (f_z) با استفاده از طرح آزمایش رویه پاسخ در 5 سطح تغییر داده شدند. 5 پارامتر اصلی پروفیل زبری سطح R_z، R_t، R_a، R_q و R_{sm} برای هر آزمایش اندازه‌گیری شدند، سپس عمر نمونه‌ها با استفاده از آزمون‌های خستگی به دست آمد. با در نظر گرفتن آزمایش‌های اعتبارسنجی 13 آزمون خستگی برای هر راهبرد سوراخ کاری انجام گرفت (مجموع 39 آزمون خستگی). نتایج نشان داد که روی سطح سوراخ ایجاد شده توسط فرایند سوراخ کاری سنتی، اثراتی از مسیر ابزار، خراش‌های ناشی از برخورد براده‌ها و اثر شخم‌زنی به وجود می‌آید. این اثرات در سایر فرایندها ناچیز بود. بر همین اساس نیز بیشترین زبری سطح به ترتیب در فرایندهای سوراخ کاری سنتی، سوراخ کاری با پیش‌مته و فرایند فرزکاری ماریچ مشاهده گردید. مدل تخمین عمر براساس معیار زبری R_z با خطای میانگین 4.4% بهترین تخمین عمر خستگی را دارا بود. در واقع عمر خستگی وابستگی بیشتری به اختلاف ارتفاع پستی و بلندی ماکزیمی دارد که در مجاور هم هستند. همچنین مشاهده شد که در توسعه مدل تخمین عمر خستگی قطعات سوراخ‌دار استفاده از مدلی بر پایه پارامتر زبری سطح در مقایسه با پارامترهای برش ماکزیمم خطای تخمین عمر خستگی را از 16.4% به 7.5% درصد کاهش می‌دهد.</p>	<p>مقاله پژوهشی کامل دریافت: 11 آبان 1396 پذیرش: 21 آذر 1396 ارائه در سایت: 08 دی 1396 کلید واژگان: سوراخ کاری عمر خستگی زبری سطح بافت سطح</p>

Evaluation of Surface Roughness Effect on Fatigue Life in Drilling of Hardened Steel

Amir Rasti, Mohammad Hossein Sadeghi*, Sina Sabbaghi Frashi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, sadeghim@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 November 2017
Accepted 12 December 2017
Available Online 29 December 2017

Keywords:

Drilling
Fatigue Life
Surface Roughness
Surface Texture

ABSTRACT

In this study, the effect of surface roughness on fatigue life was investigated in drilling process of AISI4340 steel. Three hole making methods including drilling with and without pre-drill and helical milling were utilized. In order to study the effect of surface roughness and process parameters on fatigue strength, the two main cutting parameters including cutting speed (V_c) and feed rate (f_z) were changed at 5 levels using the response surface method. Five main parameter of surface roughness profile including R_z , R_t , R_a , R_q , and R_{sm} were measured in each experiment. Then, the fatigue life of specimens were obtained using fatigue tests. Regarding the validation experiments, 13 fatigue tests were carried out for each drilling strategy (39 fatigue tests totally). Investigation of surface texture showed the signs of the tool path, scratches by the chip collisions and ploughing on whole surfaces in the conventional drilling. These effects were negligible in other processes. Accordingly, the highest roughness was observed in conventional drilling, drilling with pre-drill and helical milling processes respectively. Also, the fatigue life estimation model based on R_z had the best estimation with an average error of 4.4%. In fact, the fatigue life is more dependent on the difference between adjacent peaks and valleys. It was also observed that a model based on the roughness parameter will decrease the maximum prediction error of the fatigue life from 16.4% to 7.5% compared to a model based on the cutting parameters.

1- مقدمه

اصلی‌ترین خاصیت مکانیکی تأثیرپذیر از عملیات ماشین‌کاری به‌شمار می‌رود [1].

فرایند سوراخ‌کاری یکی از مراحل حساس و پایانی در تولید قطعات صنعتی است که در حدود 25% زمان کل تولید قطعه را به خود اختصاص می‌دهد [2]. روش‌های مختلفی برای ایجاد سوراخ وجود دارند که در نوع

سطح ایجاد شده در فرایندهای مختلف ماشین‌کاری دارای ترک‌ها و عیوب کوچکی است. با توجه به جوانه‌زنی ترک‌های خستگی از سطح آزاد قطعه، استحکام خستگی وابستگی زیادی به اندازه این ناپیوستگی‌ها و کیفیت سطح حاصل از فرایند ماشین‌کاری دارد. در واقع استحکام خستگی به عنوان

Please cite this article using:

A. Rasti, M. H. Sadeghi, S. Sabbaghi Frashi, Evaluation of Surface Roughness Effect on Fatigue Life in Drilling of Hardened Steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 103-110, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نویچ و همکاران [8] در مقاله‌ای مروری اثر پارامترهای مختلف زبری را بر عمر خستگی مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد که در پژوهش‌های مختلف نتایج مختلف و گاهی متضادی در زمینه برقراری رابطه‌ای قابل اطمینان میان پارامترهای مختلف زبری و عمر خستگی وجود دارد. در دماهای بالاتر از 400 درجه سانتی‌گراد نیز به واسطه آزاد شدن تنش‌های سطحی و تغییر محل رشد ترک از سطح به عمق قطعه، اثر زبری بر عمر خستگی کاهش یافت.

اندروز و سیتوگلو [9] مدلی ریاضی جهت تخمین اثر پروفیل زبری سطح بر عمر خستگی را توسعه دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که عمر خستگی تابعی از میانگین ارتفاع پیک‌های پروفیل زبری است. هر چه انحراف معیار این پارامتر بیشتر بود، نتایج عمر خستگی نیز دارای پراکندگی بیشتری بودند.

سیبل و گایر [10] استحکام خستگی را نسبت به بیشترین عمق شیارهای سطحی (R_v) در فولادهای مختلف مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که در مقادیر بالاتر از عمق شیار بحرانی کاهش حد خستگی با $\log R_v$ متناسب است.

بایومی و عبداللطیف [11] نشان دادند که معیارهای R_a و R_q تأثیر بیشتری بر آستانه عمر خستگی در آلیاژ آلومینیوم تراش کاری شده دارند. اثر پارامترهای هیبریدی مانند R_{Aq} (مجذور مربعات شیب) و R_{sm} (فاصله بین پیک‌های محلی و دره‌ها) بر آستانه خستگی کمتر از پارامترهای دامنه بودند. لورانت و همکاران [12] پیشنهاد کردند که نه تنها ارتفاع شیارها، بلکه شکل آن‌ها نیز روی اثر تمرکز تنش سطح فرزکاری شده مؤثر بوده و تحت شرایط دینامیکی می‌تواند سبب جوانه‌زنی و رشد ترک شوند.

دیچ و همکاران [13] عمق بیشینه ناپوستگی‌های سطحی را به عنوان معیار اصلی اندازه‌گیری عملکرد خستگی و عمق میانگین و فاصله میانگین موتیف‌های^۱ زبری را به عنوان پارامترهای ثانویه دانستند.

استوت [14] در تحقیقی نشان داد که فرایندهای ماشین کاری سبب تولید سطوح غیرگوسی (عدم تقارن^۲، $R_{sk} \neq 0$ و درجه اوج نمودار، $R_{sk} \neq 3$) شده و درجه اوج نقش مهم‌تری در کنترل عمر خستگی دارد.

وزیری [15] اثر زبری را بر عمر خستگی قطعات جدار نازک در فرایند تراش کاری بررسی کرده و نشان داد که در این نوع قطعات اثر تمرکز تنش ناشی از زبری سطح تأثیر بیشتری بر عمر قطعه داشته و این تأثیر را با $\log R_z$ متناسب دانست.

مطالعه پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که هنوز پارامتر زبری مناسبی جهت تعیین ضریب اصلاحی اثر زبری سطح بر عمر خستگی تعیین نشده و این پارامتر وابستگی زیادی به فرایند و جنس قطعه کار دارد. هدف پژوهش حاضر برقراری رابطه‌ای میان زبری سطح، پارامترهای فرایند سوراخ کاری و عمر خستگی فولاد سخت کاری شده AISI4340 است. بر این اساس ابتدا بافت سطح ایجاد شده توسط فرایندهای مختلف ایجاد سوراخ شامل سوراخ کاری سنتی با و بدون پیش‌مته و فرزکاری مارپیچ با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در ادامه با استفاده از انجام آزمون‌های خستگی اثر زبری سطح و پارامترهای برش بر استحکام خستگی بررسی شده و مناسب‌ترین مدل زبری جهت تخمین عمر قطعه انتخاب می‌گردد.

2- مواد و تجهیزات مورد استفاده

سه روش ایجاد سوراخ شامل فرزکاری مارپیچ و سوراخ کاری سنتی با و بدون

براده برداری و نحوه درگیری ابزار و قطعه کار با یکدیگر متفاوت هستند. برش ماده در فرایند سوراخ کاری سنتی با استفاده از زاویه براده منفی و اعمال فشار بالا صورت می‌گیرد و حرارت ناحیه برش نیز بالاست. راهبرد دیگری که اخیراً برای ایجاد سوراخ مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از فرایند فرزکاری مارپیچ است. برای ایجاد سوراخ با استفاده از این روش از ابزار فرزی با قطری کوچک‌تر از قطر سوراخ استفاده می‌شود. در این روش ابزار دارای سه نوع حرکت هم‌زمان شامل چرخش ابزار به دور محور خود، چرخش حول محور مسیر مارپیچ و حرکت محوری است [3].

در فرایند سوراخ کاری به واسطه تماس پیوسته ابزار با قطعه کار، ارتعاش و خیز ابزار مته در حین فرایند و برخورد براده‌های پیوسته خروجی از ناحیه برش، پستی و بلندی‌هایی روی سطح به وجود می‌آید. این عیوب و ناپوستگی‌های سطحی به دلیل ایجاد تمرکز تنش بالا می‌توانند موضع مناسبی برای جوانه‌زنی ترک‌های خستگی باشند [4]. به واسطه وجود تمرکز تنش در محل سوراخ‌های ایجاد شده در قطعه کیفیت سطح این فیچر به صورت دوچندان روی عمر خستگی تأثیر می‌گذارد.

امروزه تلاش بر این است تا به منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه، آزمایش‌های تجربی را کاهش داده و استحکام خستگی را براساس داده‌های موادی یا فرایندی محاسبه کرد. در مدل‌های اولیه و متداول اثر زبری سطح روی عمر خستگی توسط پارامتر زبری سطح میانگین حسابی R_a در نظر گرفته شده است، اما پراکندگی نسبتاً زیادی در تخمین عمر خستگی با استفاده از ضریب اصلاحی R_a گزارش شده و اعتبار این پارامتر را زیر سؤال برده است [5]. به همین دلیل محققان پارامترهای مختلف زبری سطح را به عنوان ضرایب اصلاح حد خستگی پیشنهاد داده‌اند. زبری سطح به چند شکل اندازه‌گیری می‌شود. اصلی‌ترین پارامترهای بیان زبری براساس استاندارد ISO 13565-2 به صورت زیر قابل دسته‌بندی است [6].

- پارامترهای دامنه^۱ پروفیل زبری در طول نمونه برداری^۲ (قله‌ها و دره‌ها)^۳
 - بیشینه ارتفاع (R_z) - بیشترین عمق دره (R_v)
 - بیشترین ارتفاع قله (R_p)
 - پارامترهای دامنه پروفیل زبری در طول اندازه‌گیری^۴ (قله‌ها و دره‌ها)
 - بیشینه ارتفاع (R_t)
 - پارامترهای دامنه پروفیل زبری در طول نمونه برداری (میانگین ارتفاع^۵)
 - انحراف میانگین حسابی (R_a) - ریشه میانگین مربعات انحراف (R_q)
 - پارامترهای هندسی پروفیل زبری در طول نمونه برداری
 - انحراف از توزیع نرمال^۶ (R_{sk}) - تیزی ارتفاع^۷ (R_{ku})
 - میانگین عرض المان‌ها (R_{sm}) - مجذور مجموع مربعات شیب (R_{Aq})
- در ادامه برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی اثر کیفیت سطح بر عمر خستگی در فرایندهای ماشین کاری مورد بررسی قرار گرفته است.

لیو و همکاران [7] اثر کیفیت سطح سوراخ باز را با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود روی عمر خستگی قطعاتی از جنس 2A12T4 مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با بزرگ‌تر شدن اندازه عیوب سطحی عمر خستگی سوراخ نیز کمتر می‌شود.

¹ Amplitude Parameters

² Sampling Length

³ Peaks and Valleys

⁴ Measuring Length

⁵ Average of Ordinates

⁶ Skewness

⁷ Kurtosis

⁸ Motif Method

⁹ Skewness

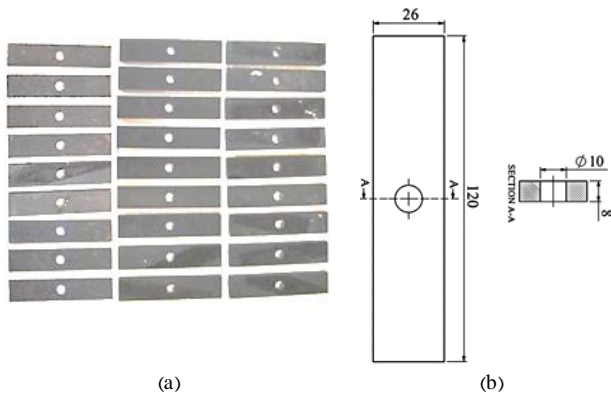


Fig. 3 a- fatigue test specimens, b- specimens dimensions

شکل 3 الف- نمونه‌های تست خستگی، ب- ابعاد نمونه‌ها

مکانیکی به کار رفته جهت بستن فک‌ها و اعمال نیرو به صورت هیدرولیکی بوده و مقدار جابه‌جایی و نیرو توسط رایانه کنترل می‌شود.

3- روش انجام آزمایش

در این پژوهش سه روش ایجاد سوراخ شامل سوراخ کاری سنتی با و بدون پیش‌مته و فرزکاری مارپیچ به کار گرفته شدند. به منظور مطالعه اثر زبری سطح روی استحکام خستگی و همچنین بررسی تأثیر پارامترهای فرایندهای ایجاد سوراخ، دو پارامتر اصلی برش شامل سرعت برشی (V_c) و نرخ پیشروی (f_z) در 5 سطح تغییر داده شدند. جدول 1 پارامترهای مورد بررسی به همراه مقادیر مربوطه را در راهبردهای مختلف ایجاد سوراخ نشان می‌دهد.

به منظور حصول نتایج قابل اطمینان و کاهش حجم آزمایش‌ها بدون از دست دادن دقت، طرح آزمایش براساس روش فاکتوریل 2^k (k تعداد متغیرها) و با طراحی چرخشی مرتبه 2 (CCD^2) به روش سطوح پاسخ انجام گرفت. این روش جزء قدیمی‌ترین و پر کاربردترین روش‌های طرح‌ریزی آزمایش است. با این روش می‌توان بهتر و واضح‌تر تغییرات خروجی را نسبت به پارامترهای ورودی نشان داد و اثر انحنای⁶ تأثیر هر پارامتر را بررسی کرد [16]. در مجموع، 9 تست خستگی با فرض عدم تکرار نقطه مرکزی برای هر راهبرد سوراخ کاری انجام گرفت (مجموع 27 تست خستگی) (جدول 2).

زبری‌سنجی در مسیری به طول 4 میلی‌متر (با طول نمونه‌برداری⁷ 0.8

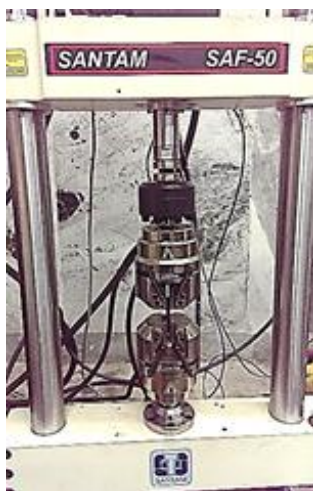


Fig. 4 SANTAM universal test machine used for fatigue tests

شکل 4 دستگاه تست اونیورسال سنتام مورد استفاده در آزمون‌های خستگی

پیش‌مته، در این پژوهش به کار گرفته شدند. تمامی آزمایش‌ها توسط ماشین فرز کنترل عددی سه محوره مدل VMC850 با کنترلر فانوک¹ و حداکثر دوران اسپیندل 8000 دوربر دقیقه انجام شد، همچنین از ابزار فرز انگشتی سرتخت کاربایدی با قطر 6 میلی‌متر برای فرزکاری مارپیچ و از مته‌های کاربایدی با قطر 6 و 10 میلی‌متر با روکش TiN ساخت شرکت هلیکس² برای سوراخ کاری سنتی استفاده شد (شکل 1). هدف در تمامی آزمایش‌ها ایجاد سوراخی راه‌بدر و با قطر نامی 10 میلی‌متر بود. در حالت سوراخ کاری سنتی با پیش‌مته، ابتدا سوراخ اولیه‌ای توسط مته با قطر 6 میلی‌متر ایجاد گردیده و سوراخ نهایی با مته قطر 10 میلی‌متر زده شد. جنس ماده قطعه‌کار در این تحقیق فولاد AISI4340 بود. به منظور دستیابی به سختی 450 ویکرز، ابتدا دمای نمونه‌ها توسط کوره به آرامی تا 870 درجه سانتی‌گراد بالا برده شد و تا آستنیت‌شدن کامل در این دما نگهداری گردید. سپس با استفاده از حمام روغن دما تا حدود 100 درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. نتیجه این عملیات حرارتی تشکیل ساختاری متشکل از تیغه‌های مارتنزیتی با جهت‌گیری اتفاقی و ضخامت تقریبی 0.5 میکرومتر بود. ایجاد سوراخ به سه روش سوراخ کاری سنتی با و بدون پیش‌مته و فرزکاری مارپیچ روی نمونه‌های تست خستگی انجام شد. شکل 2 چیدمان آزمایش سوراخ کاری به روش سنتی و شکل 3 نمونه‌های تست خستگی و ابعاد آن‌ها را نشان می‌دهد.

زبری سطح تمامی سوراخ‌های ایجاد شده با استفاده از دستگاه زبری‌سنج مارسرف³ مدل PS1 با دقت 0.001 میکرومتر، طول کورس ماکزیمم 17.5 میلی‌متر و بیشینه رنج اندازه‌گیری 350 میکرومتر اندازه‌گیری شد. این دستگاه قابلیت ثبت پروفیل زبری در طول بازه اندازه‌گیری و محاسبه 24 پارامتر زبری سطح را براساس استاندارد داراست.

تست‌های خستگی نیز توسط دستگاه خستگی محوری 5 تن ساخت شرکت سنتام⁴ با ماکزیمم فرکانس 100 هرتز انجام گردید. این دستگاه مطابق شکل 4 دارای فک پایینی ثابت و فک بالایی متحرک است. سیستم



Fig. 1 Carbide drills and end mill used in tests

شکل 1 مته‌ها و فرز انگشتی کاربایدی مورد استفاده در آزمایش‌ها



Fig. 2 Drilling of fatigue test specimens

شکل 2 سوراخ کاری نمونه‌های تست خستگی

⁵ Central Composite Design

⁶ Curvature

⁷ Sampling Length

¹ Fanuc

² HELIX

³ Marsurf

⁴ SANTAM

جدول 3 مقادیر زبری سطح اندازه گیری شده و عمر خستگی به دست آمده در روش های مختلف ایجاد سوراخ

Table 3 Measured surface roughness and fatigue life values in different drilling strategies

شماره آزمایش	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)	R_{sm} (μm)	تعداد سیکل تا شکست
سوراخ کاری سنتی						
1	3.15	2.74	12.80	22.36	10	293627
2	4.39	4.43	20.10	27.10	340	222829
3	3.42	3.32	13.60	21.10	7.8	331079
4	5.60	5.18	25.50	32.50	227	153551
5	3.08	2.55	14.60	21.60	179	292523
6	4.29	4.29	18.60	24.80	206	268563
7	5.65	5.80	23.40	30.00	248	201783
8	4.45	3.96	21.90	29.00	219	214659
9	5.99	6.15	26.80	33.60	233	145126
سوراخ کاری با پیش مته						
10	1.55	2.10	11.80	22.60	274	385450
11	2.42	3.01	13.50	19.20	171	398171
12	2.03	2.67	12.50	21.10	240	406161
13	3.66	4.82	20.40	28.40	247	316875
14	1.86	2.49	10.30	17.60	108	408765
15	2.58	2.79	10.60	18.60	160	434101
16	3.83	4.60	19.50	25.80	287	337543
17	2.57	3.24	16.10	17.20	209	409239
18	3.70	4.67	22.20	26.50	339	283867
فرزکاری ماریچ						
19	0.56	0.84	3.64	12.60	305	319535
20	1.02	1.03	5.57	7.09	214	311522
21	0.84	1.13	2.53	6.79	136	328548
22	1.97	3.30	15.70	22.90	303	280431
23	0.88	0.60	0.92	1.83	72	374430
24	0.92	2.12	6.10	8.42	249	316914
25	1.92	2.27	12.30	17.70	205	259335
26	1.04	1.55	4.85	12.70	158	319327
27	2.36	5.13	17.30	25.20	374	221761

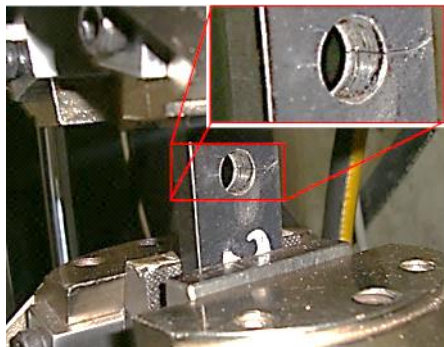


Fig. 5 Fatigue cracked specimen under dynamic loading

شکل 5 نمونه دارای ترک خستگی حین بارگذاری دینامیک

قرار گرفت. وجود انحنای داخلی آن مهم ترین محدودیت در بررسی بافت سطح جدار داخلی سوراخ بوده که عکس برداری را بسیار دشوار می کند. شکل 6 بافت سطح سوراخ های ایجاد شده در آزمایش های 2، 11 و 20 را نشان می دهد.

مشاهده می شود که در استراتژی سوراخ کاری سنتی بدون پیش مته علاوه بر اثر مسیر ابزار، خراش های نامنظم به وجود آمده در اثر برخورد براده های خروجی و اثر شخم زنی روی سطح سوراخ مشهود است (شکل 6-a). مطابق شکل 6-b به واسطه پایین تر بودن نرخ براده برداری در فرایند سوراخ کاری با پیش مته، برخورد براده ها کمتر بوده و رد ابزار روی سطح به

جدول 1 پارامترهای اصلی فرایندهای ایجاد سوراخ به همراه سطوح تغییرات

Table 1 Hole making parameters with their levels

سطح	پارامتر برش	استراتژی سوراخ کاری
2	V_c (m/min)	سوراخ کاری سنتی
1	f_z (mm/tooth)	سوراخ کاری با پیش مته
0	V_c (m/min)	فرزکاری ماریچ
-1	f_z (mm/tooth)	
-2	a_p (mm)	

جدول 2 ماتریس طراحی آزمایش ها به روش رویه پاسخ

Table 2 Design matrix of experiments by RSM method

شماره آزمایش	V_c	f_z
1	0	-2
2	-1	-1
3	1	-1
4	-2	0
5	2	0
6	0	0
7	-1	1
8	1	1
9	0	2

میلی متری) روی سطح سوراخ انجام گرفت و تمامی پارامترهای زبری قابل اندازه گیری توسط دستگاه ثبت شدند. از این بین پارامترهای زبری با درجه معنی داری بالاتر شامل ماکزیمم ارتفاع پروفیل در طول نمونه برداری (R_z)، ماکزیمم ارتفاع پروفیل در طول کل اندازه گیری (R_t)، انحراف میانگین حسابی پروفیل در طول نمونه برداری (R_a)، ریشه انحراف میانگین مربعات پروفیل در طول نمونه برداری (R_q) و عرض میانگین اجزای پروفیل (R_{sm}) مورد بررسی قرار گرفتند، سپس نمونه ها تحت نیروی متناوب سینوسی با اندازه بیشینه 40 کیلونیوتن نسبت بار $R = P_{max}/P_{min} = -1$ و فرکانس 15 هرتز قرار گرفتند.

4- نتایج و بحث

براساس طرح آزمایش صورت گرفته در مجموع 27 آزمون خستگی صورت گرفت. جدول 3 مقادیر زبری سطح اندازه گیری شده براساس 5 پارامتر مختلف زبری را به همراه تعداد سیکل شکست نمونه ها نشان می دهد. شکل 5 نمونه آزمایش شماره 27 را حین آزمون خستگی نشان می دهد. تقریباً در تمامی آزمایش ها ترک خستگی در یک سمت سوراخ رشد کرده و تا سطح جانبی قطعه امتداد پیدا کرد. پس از رشد ترک در یک سمت شکست ترد در طرف دیگر و در اثر کاهش سطح مقطع به وقوع پیوست. در ادامه بافت سطح سوراخ های ایجاد شده توسط فرایندهای مختلف با یکدیگر مقایسه می شود. پس از آن دقت مدل های زبری مختلف در تخمین زبری با یکدیگر مقایسه شده و بهترین معیار زبری انتخاب می گردد. در نهایت اثر پارامترهای برش روی بهترین معیار زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته و مدلی جهت تخمین عمر قطعه براساس پارامترهای برش ارائه می گردد.

4-1- بافت سطح

سوراخ های ایجاد شده به منظور مطالعه بهتر تغییرات سطحی به صورت عرضی برش خورده و بافت سطح سوراخ توسط دوربین استریو¹ مورد بررسی

¹ Stereoscope

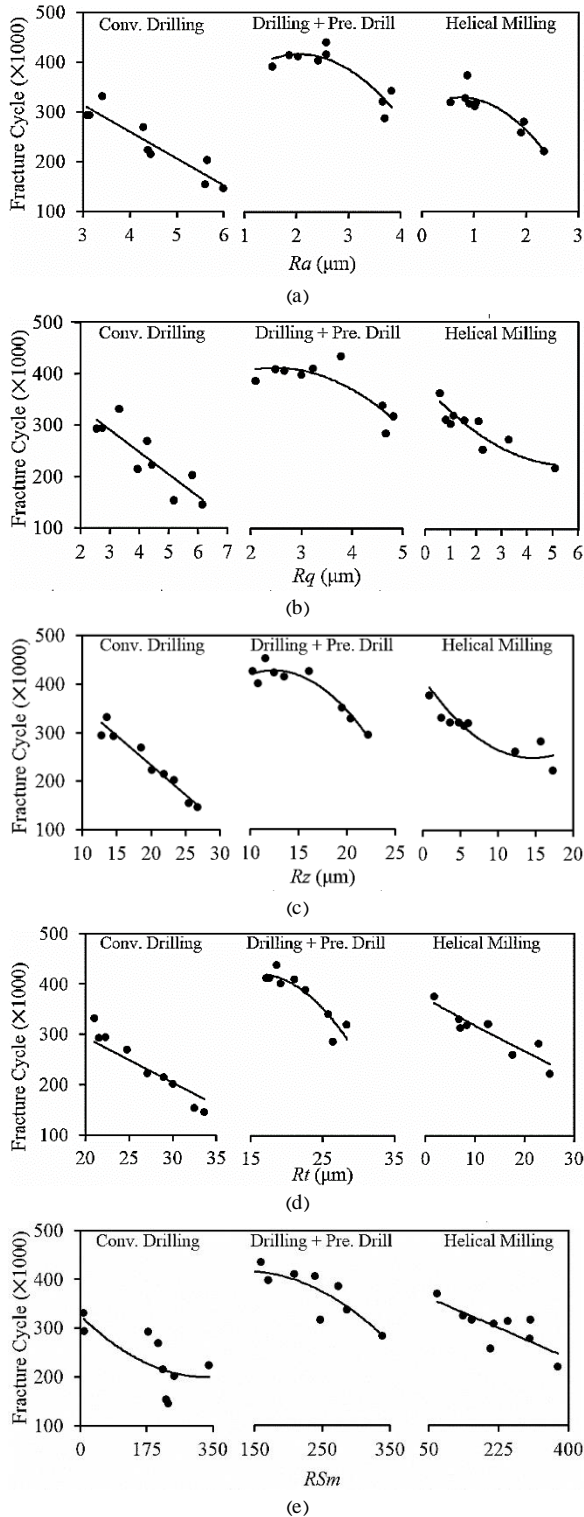


Fig. 7 Variations of fatigue life versus surface roughness base on a- R_a , b- R_q , c- R_z , d- R_t , e- R_{sm}

شکل 7 تغییرات عمر خستگی با اندازه زبری سطح براساس پارامترهای الف- R_a ، ب- R_q ، ج- R_z ، د- R_t ، ه- R_{sm}

مسیر اندازه گیری بیان می کنند.

این اندازه گیری روی پروفیل زبری مربوط به آزمایش شماره 2 نشان داده شده است (شکل 8). در این پروفیل R_t براساس اختلاف ارتفاع بزرگترین پیک در SL4 و عمیق ترین شیار در ناحیه SL2 محاسبه می گردد. این

صورت خطوط مایل و موازی مشخص است.

در استراتژی فرزکاری مارپیچ رد ابزار کمتری به واسطه درگیری تدریجی و منقطع ابزار با سطح سوراخ به وجود می آید. علاوه بر این متغیر بودن ضخامت براده نتراشیده موجب تشکیل براده هایی کوچک و منفصل می شود. این براده ها با داشتن فضای آزاد بیشتر برای خروج برخورد کمتری با دیواره سوراخ داشته و تخلیه آن ها سریع تر خواهد بود. در نتیجه براساس شکل 6-c بافت سطحی یکنواخت و هموار در فرایند فرزکاری مارپیچ به دست می آید.

4-2- مقایسه پارامترهای زبری در تخمین عمر خستگی

شکل 7 تغییرات عمر شکست نمونه ها را نسبت به 5 پارامتر زبری سطح و در روش های سوراخ کاری مورد مطالعه نشان می دهد. هر نمودار شامل 9 آزمایش است که سیکل شکست را در هر زبری نشان می دهد. منحنی های برازش شده نیز برای هر 9 آزمایش در شکل 7 مشخص است.

مشاهده می شود که با افزایش زبری سطح (در پارامترهای مختلف زبری)، عمر خستگی در تمامی فرایندها کاهش می یابد. در واقع بیشتر شدن عیوب و ناپوستگی های سطحی می تواند با ایجاد تمرکز تنش بالاتر عمر جوانه زنی ترک خستگی را به شدت کاهش دهد، همچنین روند تغییرات عمر قطعه با زبری در روش سوراخ کاری سنتی تقریباً خطی بوده که خود می تواند ناشی از تأثیرپذیری بیشتر عمر خستگی نسبت به زبری سطح در مقادیر بالاتر آن باشد. از سوی دیگر بیشترین میزان پراکندگی نتایج در نمودارهای مربوط به پارامتر R_{sm} یافت گردید. به منظور ارائه رابطه ای میان زبری سطح و عمر خستگی نمونه های سوراخ کاری شده، منحنی رگرسیونی¹ توسعه داده شد و ثوابت آن با استفاده از روش حداقل مربعات² به دست آمد. ضرایب در این روش به نحوی تغییر می کنند تا مجموع مربعات باقی مانده نسبت به مدل اصلی کمینه گردد.

برای مقایسه مدل های فیت شده با یکدیگر و انتخاب بهترین پارامتر زبری جهت تخمین عمر خستگی از پارامتر ضریب تعیین³ (R^2) بهره گرفته شد. این پارامتر آماری بیان گر میزان نزدیک بودن داده ها به منحنی رگرسیون است. براساس معادلات رگرسیون توسعه داده شده (جدول 4) و مقایسه مقادیر R^2 مشاهده می شود که پارامتر ماکزیمم ارتفاع پروفیل (R_z) بهترین منحنی را با بیشترین مقدار R^2 نتیجه می دهد. در واقع با وجود این که هر دو پارامتر R_t و R_z بیانگر ماکزیمم ارتفاع پروفیل زبری هستند، اما بازه اندازه گیری آن ها متفاوت است. R_z بیشترین اختلاف ارتفاع برآمدگی و عمق فرورفتگی را در طول نمونه برداری⁴ (SL) و R_t همین ارتفاع را در طول کل

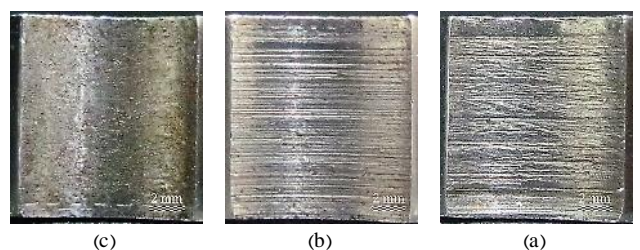


Fig. 6 Holes surface texture in levels of $V_c = -1$ and $f_z = -1$ in a- drilling, b- drilling with pre-drill, c- helical milling

شکل 6 بافت سطح سوراخ های ایجاد شده در سطوح $V_c = -1$ و $f_z = -1$ در الف- سوراخ کاری، ب- سوراخ کاری با پیش مته، ج- فرزکاری مارپیچ

¹ Regression
² Least Square Method
³ Coefficient of Determination
⁴ Sampling Length

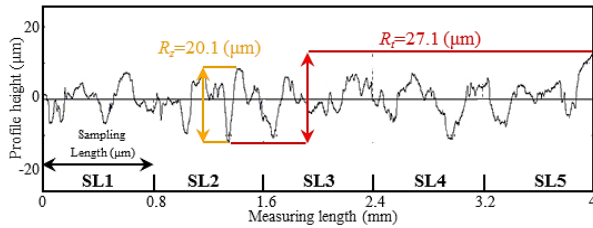


Fig. 8 Roughness profile of experiment No. 2

شکل 8 پروفیل زبری آزمایش شماره 2

جدول 5 مقادیر زبری و عمر خستگی به دست آمده در آزمایش‌های اعتبارسنجی

Table 5 Measured surface roughness and fatigue life values in validation tests

شماره آزمایش	R_a (µm)	R_q (µm)	R_z (µm)	R_t (µm)	R_{sm} (µm)	تعداد سیکل تا شکست
سوراخ کاری سنتی						
1	4.23	4.32	19.30	23.11	256	246330
2	4.11	3.90	17.99	25.20	241	251436
3	4.43	4.31	17.51	24.50	132	281328
4	4.44	3.54	19.83	24.62	194	248659
سوراخ کاری با پیش‌مته						
1	2.48	3.45	10.98	18.60	134	439642
2	2.68	3.75	12.00	21.35	86	429765
3	2.53	3.30	12.50	21.30	109	425098
4	2.60	3.58	10.60	24.11	113	418862
فرزکاری ماریچ						
1	1.06	2.41	6.30	8.65	206	304210
2	0.83	2.13	5.33	7.96	221	317238
3	0.79	2.20	7.10	8.57	295	303434
4	0.90	1.80	5.72	9.40	331	312341

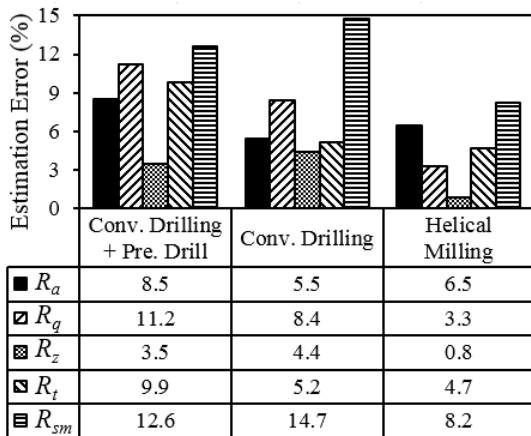


Fig. 9 Average errors in estimation of the fatigue life by various roughness parameters in different hole making strategies

شکل 9 مقادیر خطای میانگین به دست آمده در تخمین عمر خستگی براساس پارامترهای مختلف زبری و در فرایندهای مختلف ایجاد سوراخ

ناپایداری این فرایند بالاتر است [17].

دلیل دیگر را می‌توان ناشی از ماهیت تشکیل براده و تخلیه آن از موضع برش دانست. در سوراخ کاری سنتی براده‌هایی پیوسته و بزرگ‌تر تولید شده که تنها مسیر خروج آن‌ها شیار ماریچ مته است. این براده‌های خروجی داغ و برنده به دلیل تغییرات حرارتی تحت نوعی عملیات حرارتی قرار گرفته که سبب افزایش سختی آن‌ها نسبت به قطعه‌کار می‌شود [18]؛ بنابراین براده‌ها در این فضای محدود سطح سوراخ را خراشیده و زبری سطح را می‌افزایند.

جدول 4 معادلات رگرسیونی تخمین عمر خستگی براساس معیارهای مختلف زبری و در فرایندهای مختلف ایجاد سوراخ

Table 4 Regression equations for estimation of fatigue life based on various roughness parameters in different hole making strategies

فرایند سوراخ کاری	معادله رگرسیون	R^2
سوراخ کاری سنتی	$N/1000 = -50.561 R_a + 460$	0.85
	$N/1000 = -51.841 R_q + 460$	0.71
	$N/1000 = -11.416 R_z + 460$	0.94
	$N/1000 = -8.4687 R_t + 460$	0.83
	$N/1000 = 0.0012 R_{sm}^2 - 0.799 R_{sm} + 330$	0.52
سوراخ کاری با پیش‌مته	$N/1000 = -15.882 R_a^2 + 37.787 R_a + 400$	0.73
	$N/1000 = -10.484 R_q^2 + 31.339 R_q + 400$	0.81
	$N/1000 = -0.5687 R_z^2 + 7.74 R_z + 400$	0.89
	$N/1000 = -0.4406 R_t^2 + 8.8404 R_t + 400$	0.84
	$N/1000 = -0.0024 R_{sm}^2 + 0.4748 R_{sm} + 400$	0.71
فرزکاری ماریچ	$N/1000 = -19.899 R_a^2 - 4.9306 R_a + 350$	0.80
	$N/1000 = -0.3441 R_q^2 - 23.134 R_q + 350$	0.77
	$N/1000 = -0.0035 R_z^2 - 6.2933 R_z + 350$	0.84
	$N/1000 = -0.0852 R_t^2 - 2.3142 R_t + 350$	0.80
	$N/1000 = 0.0012 R_{sm}^2 - 0.9595 R_{sm} + 450$	0.51

درحالی است که اندازه R_z برابر است با اختلاف ارتفاع قله و دره در ناحیه SL2. معناداری بیشتر پارامتر R_z در تخمین عمر خستگی نشان‌دهنده آن است که اختلاف ارتفاع پستی و بلندی ماکزیممی که در فاصله نزدیک به یکدیگر قرار دارند دارای بیشترین تأثیر و اهمیت در تعیین عمر خستگی هستند. پس از R_z پارامترهای R_a و R_t بهترین رابطه را با عمر خستگی برخوردار بودند.

به منظور اعتبارسنجی نتایج و مدل‌های رگرسیونی توسعه داده شده، 4 نمونه با استفاده از سطوح میانی سرعت برشی و نرخ پیشروی (0 و 0) و برای هر کدام از روش‌های ایجاد سوراخ تهیه شد. پس از اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ها تحت آزمون خستگی قرار گرفتند.

جدول 5 مقادیر پارامترهای زبری سطح و عمر خستگی را در آزمایش‌های اعتبارسنجی نشان می‌دهد. با جای‌گذاری این مقادیر زبری در فرمول‌های تخمین عمر به دست آمده در جدول 4 و مقایسه آن با مقادیر واقعی عمر خستگی، خطای پارامترهای مختلف زبری در تخمین عمر محاسبه شدند. مقادیر خطای میانگین 4 نمونه برای هر فرایند در شکل 9 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در آزمایش‌های اعتبارسنجی نیز مدل مربوط به R_z دارای خطای میانگین کمتر از 4.4% و خطای ماکزیمم 7.5% بود. همچنین مدل مربوط به R_a در تمامی فرایندها دارای خطای تقریباً یکسانی است. بیشترین خطا مربوط به تخمین عمر خستگی در فرایند سوراخ کاری سنتی و با استفاده از پارامتر R_{sm} مشاهده شد (14.7%).

3-4- اثر پارامترهای برش روی زبری سطح و عمر خستگی

شکل 10 تأثیر پارامترهای برش روی زبری سطح R_z سوراخ‌های ایجاد شده توسط راهبردهای مختلف را نشان می‌دهد. بر این اساس و در شرایط برش یکسان بیشترین مقادیر زبری به ترتیب در فرایندهای سوراخ کاری سنتی، سوراخ کاری با پیش‌مته و فرزکاری ماریچ مشاهده می‌شود. این موضوع به واسطه دو دلیل عمده است. نخست آن‌که در سوراخ کاری سنتی تماس بین ابزار و قطعه‌کار پیوسته بوده و حالت برابرداری شبیه مکانیزم شخم‌زنی است. از این رو تغییر شکل شدیدتر و مقاومت در برابر نفوذ ابزار به ماده بیشتر خواهد بود؛ بنابراین نیروهای ماشین کاری نیز بالاتر بوده و به تبع آن دامنه ارتعاش و

دیگر در این نمودارها وجود پستی و بلندی‌ها در روش‌های سوراخ کاری با پیش‌مته و فرزکاری ماریج است. در واقع این پستی و بلندی‌ها بیان‌گر اثر غیرخطی پارامترهای برش بر زبری سطح در این فرایندهاست. وجود چنین رابطه غیرخطی در پژوهش‌های پیشین نیز مشاهده شده است [24,23].

براساس تحلیل آماری فرمولی تجربی برای تخمین زبری سطح R_z براساس پارامترهای برش در فرایندهای سوراخ کاری سنتی، سوراخ کاری با پیش‌مته و فرزکاری ماریج به صورت روابط (1) توسعه داده شد.

$$R_{z-drilling} = 18.123 - 0.332 V_c + 66 f_z \quad (1)$$

$$R_{z-pre\ drill} = 14.486 - 0.274 V_c + 50.666 f_z \quad (2)$$

$$R_{z-helical} = 3.546 - 0.133 V_c + 151.541 f_z \quad (3)$$

با جای‌گذاری روابط (1) در معادلات تخمین عمر خستگی برحسب زبری R_z (جدول 4) روابط (4) به دست می‌آید.

$$N_{-drilling} / 1000 = 3.79 V_c - 753.456 f_z + 253.108 \quad (4)$$

$$N_{-pre\ drill} / 1000 = 2.394 V_c - 442.637 f_z + 15.790 V_c \times f_z - 0.043 V_c^2 - 1459.9 f_z^2 + 392.783 \quad (5)$$

$$N_{-helical} / 1000 = 0.840 V_c - 957.454 f_z + 0.141 V_c \times f_z - 0.0000619 V_c^2 - 80.376 f_z^2 + 327.640 \quad (6)$$

با استفاده از این روابط می‌توان عمر خستگی را براساس پارامترهای برش در فرایند سوراخ کاری فولاد سخت تخمین زد. به منظور ارزیابی روابط (4) مقادیر پارامترهای برش تست‌های اعتبارسنجی (جدول 5) در این معادله‌ها جای‌گذاری شد و عمر خستگی تخمینی با نتایج تجربی مقایسه گردید. جدول 6 مقادیر پارامترهای برش، عمر تجربی و عمر تخمینی توسط روابط (4) را در آزمایش‌های اعتبارسنجی نشان می‌دهد. مقادیر خطا در تمامی آزمایش‌ها و برای هر فرایند در شکل 11 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در تخمین عمر با استفاده از پارامترهای برش، میانگین و بیشینه خطا در تمامی آزمایش‌ها به ترتیب 6.9% و 16.4% بود. در واقع این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عدد زبری در مقایسه با مقادیر پارامترهای برش، عمر خستگی را بهتر و با خطای کمتری محاسبه می‌کند.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر زبری سطح ایجاد شده در فرایندهای مختلف ایجاد سوراخ بر عمر خستگی مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع 39 آزمون خستگی روی

جدول 6 مقادیر پارامترهای برش و عمر خستگی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های اعتبارسنجی

Table 6 Cutting parameters and measured fatigue life in validation tests

شماره آزمایش	V_c (m/min)	f_z (mm/tooth)	تعداد سیکل تا شکست تجربی	تعداد سیکل تا شکست تخمینی
سوراخ کاری سنتی				
1			246330	
2	25	0.15	251436	235221
3			281328	
4			248659	
سوراخ کاری با پیش‌مته				
1			439642	
2	25	0.15	429765	385988
3			425098	
4			418862	
فرزکاری ماریج				
1			304210	
2	60	0.08	317238	301402
3			303434	
4			312341	

در فرایند سوراخ کاری با پیش‌مته به واسطه کمتر بودن نرخ براده‌برداری و نیروهای برش این اثرات خفیف‌تر بوده و زبری سطح بهتری نیز قابل دستیابی است. در روش فرزکاری ماریج نیز فرایند براده‌برداری به صورت منقطع بوده و عمق برش نیز بسیار کم است؛ بنابراین مؤلفه‌های نیرو در این استراتژی نزدیک به هم و بسیار پایین است [17]. در نتیجه ضخامت براده نتراشیده¹ متغیر بوده و براده‌هایی منفصل و کوچک در این فرایند تشکیل می‌شوند [19]. این براده‌های ریز به دلیل حرکت خارج از مرکز و ماریج ابزار، فضای آزاد بیشتری برای خروج دارند. در نتیجه تماس براده با دیواره سوراخ کمتر و تخلیه آن سریع‌تر است. در مقایسه با روش‌های فرزکاری، سوراخ کاری سنتی کارسختی بیشتری روی سطح سوراخ ایجاد می‌کند [20]. زمانی که این کارسختی بالاتر با صافی سطح مناسبی ترکیب شود (یعنی در روش سوراخ کاری با پیش‌مته) بیشترین عمر خستگی حاصل می‌گردد.

براساس شکل 10 افزایش سرعت برشی، زبری سطح را در فرایندهای سوراخ کاری سنتی، سوراخ کاری با پیش‌مته و فرزکاری ماریج به ترتیب 10.9، 10.1 و 14.8 میکرومتر کاهش می‌دهد. این بهبود زبری سطح را می‌توان ناشی از کاهش نیروی برش به واسطه افزایش درجه حرارت و نرم‌شدن ماده در سرعت‌های برشی بالاتر دانست [21]. عامل دیگر افزایش زبری سطح در فرایند سوراخ کاری، برخورد براده تولیدی با سطح ماشین‌کاری‌شده در هنگام خروج است. با افزایش سرعت برشی، تماس براده با سطح ماشین‌کاری‌شده کاهش یافته و زبری سطح متعاقباً بهبود می‌یابد [22].

علاوه بر این بالاترین نرخ پیشروی، زبری سطح را به اندازه 14، 10.4 و 13.7 میکرومتر افزایش می‌دهد. این کاهش کیفیت سطح را می‌توان ناشی از افزایش ضخامت براده تغییرشکل‌نیافته و درپی آن افزایش نیروهای برش دانست. این دو پارامتر اثرگذاری نزدیکی روی زبری سطح داشتند. با این حال تداخل آن‌ها براساس نتایج تحلیل آماری دارای اثر معنی‌داری نبود. نکته

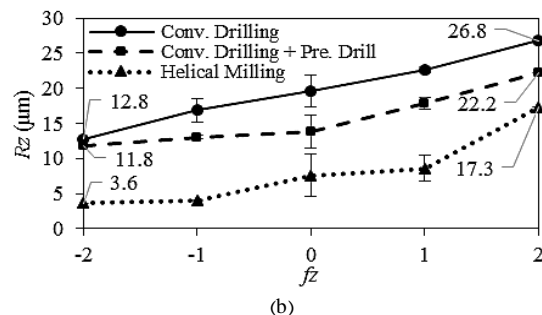
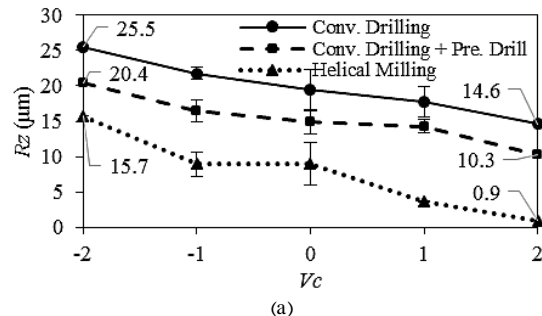


Fig. 10 Variations of surface roughness versus cutting speed and feed rate in different drilling strategies

شکل 10 تغییرات زبری سطح براساس سرعت برشی و نرخ پیشروی در استراتژی‌های مختلف ایجاد سوراخ

¹ Undeformed Chip Thickness

- [4] R. M'Saoubi, J. Outeiro, H. Chandrasekaran, O. Dillon Jr, I. Jawahir, A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products, *Sustainable Manufacturing*, Vol. 1, No. 1-2, pp. 203-236, 2008.
- [5] W. Huang, J. Zhao, A. Xing, G. Wang, H. Tao, Influence of tool path strategies on fatigue performance of high-speed ball-end-milled AISI H13 steel, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-10, 2017.
- [6] L. De Chiffre, P. Lonardo, H. Trumpold, D. Lucca, G. Goch, C. Brown, J. Raja, H. N. Hansen, Quantitative characterisation of surface texture, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 49, No. 2, pp. 635-652, 2000.
- [7] J. Liu, Z. Yue, Y. Liu, Surface finish of open holes on fatigue life, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 47, No. 1, pp. 35-45, 2007.
- [8] D. Novovic, R. Dewes, D. Aspinwall, W. Voice, P. Bowen, The effect of machined topography and integrity on fatigue life, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 2, pp. 125-134, 2004.
- [9] S. Andrews, H. Sehitoglu, A computer model for fatigue crack growth from rough surfaces, *Fatigue*, Vol. 22, No. 7, pp. 619-630, 2000.
- [10] E. Siebel, Influence of surface roughness on the fatigue strength of steels and non-ferrous alloys, *Engineers Digest*, Vol. 18, No. 1, pp. 109-112, 1957.
- [11] M. R. Bayoumi, A. Abdellatif, Effect of surface finish on fatigue strength, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 51, No. 5, pp. 861-870, 1995.
- [12] G. Leverant, B. Langer, A. Yuen, S. Hopkins, Surface residual stresses, surface topography and the fatigue behavior of Ti-6Al-4V, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 10, No. 2, pp. 251-257, 1979.
- [13] M. Dietzsch, K. Papenfuß, T. Hartmann, The MOTIF-method (ISO 12085)—a suitable description for functional, manufacturing and metrological requirements, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, No. 5, pp. 625-632, 1998.
- [14] K. Stout, Surface measurements and their relevance in manufacturing, *Production Engineer*, Vol. 59, No. 5, pp. 17-22, 1980.
- [15] S. M. Vaziri, The Investigation of Fatigue Failure of Machined Thin Walled Structures, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 11-19, 2013. (in Persian فارسی)
- [16] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, pp. 300-350, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [17] M. H. Saadatbakhsh, A. Rasti, M. H. Sadeghi, H. Hassanpour, A. R. Omidodman, Compare and study of hole quality characteristics in helical milling and conventional drilling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 332-338, 2015. (in Persian فارسی)
- [18] K. Giasin, S. Ayvar-Soberanis, Microstructural investigation of drilling induced damage in fibre metal laminates constituents, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 97, No. 1, pp. 166-178, 2017.
- [19] B. Denkena, D. Boehnke, J. Dege, Helical milling of CFRP-titanium layer compounds, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 64-69, 2008.
- [20] A. Rasti, S. Sabbaghi Farshi, M. H. Sadeghi, H. Imani, Study of microhardness variations in hole making processes on 4340 steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 423-430, 2017. (in Persian فارسی)
- [21] M. H. Saadatbakhsh, H. Imani, M. H. Sadeghi, S. S. Farshi, Experimental study of surface roughness and geometrical and dimensional tolerances in helical milling of AISI 4340 alloy steel, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93, No. 9-12, pp. 4063-4074, 2017.
- [22] M. A. Xavier, M. Adithan, Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel, *Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 900-909, 2009.
- [23] R. B. D. Pereira, L. C. Brandão, A. P. de Paiva, J. R. Ferreira, J. P. Davim, A review of helical milling process, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 120, No. 1, pp. 27-48, 2017.
- [24] A. Omidodman, H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, M. H. Saadatbakhsh, Evaluation of workpiece hardness and cutting parameters effects on cutting force and surface roughness in drilling using vegetable-based cutting fluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 265-271, 2014. (in Persian فارسی)

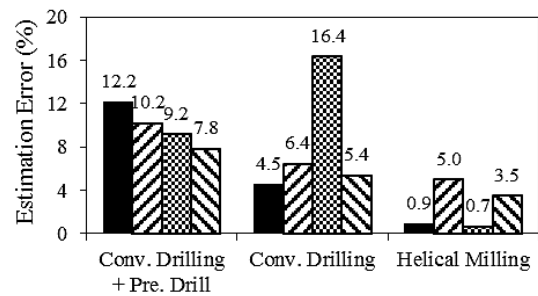


Fig. 11 Values of errors in estimation of the fatigue life using cutting parameters in different hole making strategies

شکل 11 مقادیر خطای به دست آمده در تخمین عمر خستگی براساس پارامترهای برش در فرایندهای مختلف ایجاد سوراخ

نمونه‌ها انجام گرفت. مهم‌ترین نتایج این پژوهش در ادامه آمده است.

- 1- بافت سطح سوراخ‌های ایجاد شده توسط روش‌های مختلف نشان داد که در سوراخ کاری سنتی اثر مسیر ابزار، خراش‌های ناشی از برخورد براده‌ها و اثر شخم زنی روی سطح سوراخ مشهود است. این اثرات در فرایند سوراخ کاری با پیش‌مته و فرز کاری ماریچ نیز ناچیز بود.
- 2- R_z بهترین پارامتر برای بیان اثر زبری بر عمر خستگی شناخته شد. در واقع عمر خستگی وابسته به اختلاف ارتفاع پستی و بلندی ماکزیمی است که در فاصله‌ای نزدیک به هم قرار دارند. نتایج تست‌های اعتبارسنجی نیز بیانگر خطای میانگین 4.4% مدل R_z در تخمین عمر خستگی بود.
- 3- بیشترین مقادیر زبری سطح به ترتیب در فرایندهای سوراخ کاری سنتی، سوراخ کاری با پیش‌مته و فرز کاری ماریچ مشاهده گردید. این موضوع به واسطه نیروهای برش بالاتر و ماهیت تخلیه براده از موضع برش است.
- 4- نتایج مدل‌های تخمین عمر ارائه شده نشان داد که استفاده از مدلی براساس عدد زبری، در مقایسه با پارامترهای برش، ماکزیم خطای تخمین عمر خستگی را از 16.4% به 7.5% کاهش می‌دهد.

6- مراجع

- [1] J. P. Davim, *Machining of Hard Materials*, pp. 20-50, London: Springer Science & Business Media, 2011.
- [2] P. Zhang, N. Churi, Z. J. Pei, C. Treadwell, Mechanical drilling processes for titanium alloys: A literature review, *Machining Science and Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 417-444, 2008.
- [3] M. H. Sadeghi, M. H. Saadatbakhsh, A. Rasti, H. Hassanpour, A. Omidodman, Empirical study of dimensional and geometrical tolerances in helical milling of 4340 steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 119-126, 2014. (in Persian فارسی)