Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 58(3) (2026) 349-366
DOI: 10.22060/mej.2026.25853.7974

Experimental Investigation of the Effects of Micro-Texture Geometrical Parameters on Tool Wear and Hole Burr Formation in Aluminum Drilling Using a Textured Drill

Zahra BayazGhorbani[1], Mohammad Mahdi Abootorabi[1] *, Ali Akbar Jafari KhosroAbadi [2]

[1] Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
[2] Department of Statistics, Yazd University, Yazd, Iran.

ABSTRACT: Burrs can prevent the proper assembly of components. Industrial manufacturers employ secondary operations to remove burrs, which increases both production time and manufacturing costs. Several factors contribute to burr formation, with tool wear being one of the factors responsible for burr formation on drilled components. Micro- and Nano-texturing of cutting tools is a novel approach for addressing the problems of hole burr formation and tool wear. In this study, micro-grooves with widths ranging from 200 to 400 µm, inter-groove spacings of 200 to 400 µm, and orientation angles relative to the cutting edge ranging from 0° to 90° were fabricated on the flank surface of a drill. The effects of micro-groove geometry on tool wear and hole burr formation were investigated. Statistical analysis showed that increasing the micro-groove width and inter-groove spacing from 200 to 400 µm reduced tool wear. Furthermore, as the micro-groove orientation angle increased from 0° to 90°, tool wear initially increased and then decreased. Increasing the inter-groove spacing from 200 to 400 µm and the micro-groove orientation angle relative to the cutting edge from 0° to 90° resulted in an increase in burr width.

Review History:

Received: May, 16, 2026
Revised: Aug. 09, 2026
Accepted: Sep. 09, 2026
Available Online: Sep. 18, 2026

Keywords:

Drilling
Textured Tool
Tool Wear
Burr
Aluminum

1- Introduction

Cutting fluids are widely used in many machining processes to reduce friction, extend tool life, and decrease machining temperature. However, their use not only increases production costs but can also adversely affect human health and the environment [1]. Micro- and nano-texturing of cutting tools is a recent technique for improving the machinability of aluminum alloys. This approach can reduce cutting temperature and friction, improve tool life, and decrease burr formation on the workpiece [2].

Salem et al. [3] investigated the effect of micro-texture geometry on tool wear during turning of AISI 1045 steel. They reported that all textured tools exhibited lower wear than the untextured tool. Agari et al. [4] investigated micro-grooves and micro-dimples on turning tools during machining of AISI 1014 steel and reported lower wear for textured tools. Yang et al. [5] investigated groove width during milling of Al7Ni17Cr0 alloy and reported lower wear for textured tools than for the untextured tool. Sristi and Zaman [6] reported that tool texturing generally improves tool durability, reduces cutting temperature, and enhances lubrication performance. They emphasized that texture dimensions, shape, position, distance from cutting edges, density, and orientation affect machining performance. Ullah et al. [7] identified burr formation as a common and problematic defect in micro-drilling, with burr size and shape affected by the drill, workpiece material, cutting parameters, and drill geometry. Öztürk and Kadir [8] fabricated micro-grooves on different regions of a twist drill and reported improved drilling performance for grooves on the flank face.

The present study investigates the effects of micro-groove geometry fabricated on the flank face of a drill on tool wear and hole-exit burr width during drilling of an aluminum alloy. Micro-groove width, inter-groove spacing, and orientation angle relative to the drill cutting edge are considered as the principal geometrical parameters.

2- Experimental Setup

Uncoated white HSS-G type N twist drills were used for drilling the aluminum alloy. Parallel, perpendicular, and inclined micro-grooves relative to the cutting edge were fabricated on the drill flank face. Micro-groove width and inter-groove spacing were each varied at three levels of 200, 300, and 400 µm, while the orientation angle relative to the cutting edge was set at 0°, 45°, and 90°. Figure 1 shows a representative drill before and after machining.

Drilling experiments were conducted using the experimental conditions specified in the study. Tool wear was evaluated on the flank face, and burr width was measured at the exit edge of the drilled hole. Three holes were produced

*Corresponding author's email: abootorabi@yazd.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

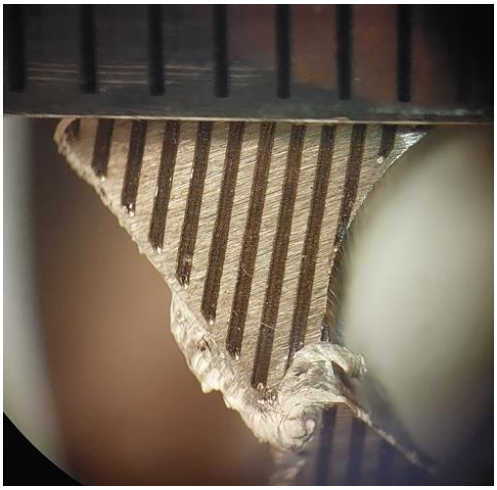


Fig. 1. An example of a drill bit after creating micro-grooves on the flank face, after machining.

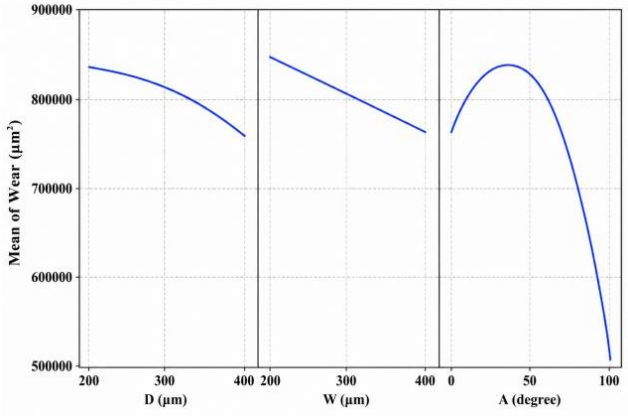


Fig. 1.Effect of the spacing between micro-grooves (D), width of the micro-grooves (W), and the orientation angle of the micro-grooves relative to the cutting edge of the drill (A) on the drill wear.

using each textured drill, and the mean value of the three measurements was used for evaluation. An optical microscope and image analysis were employed for quantitative assessment of wear and burr geometry.

3- Experimental Results and Discussion

Figure 2 presents the effects of inter-groove spacing (D), micro-groove width (W), and micro-groove orientation angle relative to the drill cutting edge (A) on tool wear. Increasing the inter-groove spacing from 200 to 400 µm reduced tool wear. Compared with the un-textured tool, the mean wear reduction was 48.7%, 51.4%, and 54.0% for inter-groove spacings of 200, 300, and 400 µm, respectively.

Increasing the micro-groove width from 200 to 400 µm also reduced flank-face wear. The mean wear reduction relative to the untextured tool was 48.3%, 51.9%, and 53.5% for groove widths of 200, 300, and 400 µm, respectively. Flank-face wear increased slightly as the orientation angle increased from 0° to 45° and then decreased from 45° to 90°. The increase from 0° to 45° was not statistically significant and may be attributed to laser fabrication error. Wear reductions of 47.7%, 44.8%, and 66.5% relative to the conventional drill were obtained for micro-grooves parallel, inclined, and perpendicular to the cutting edge, respectively.

Figure 3 illustrates the effects of the input parameters on the burr width at the hole-exit edge. Compared with the untextured tool, burr width was reduced by 42.7%, 42.2%, and 36.7% for inter-groove spacings of 200, 300, and 400 µm, respectively. Increasing the inter-groove spacing and the micro-groove orientation angle generally increased burr width.

4- Conclusions

This study investigated the effects of micro-groove geometrical parameters fabricated on the drill flank face on tool wear and burr formation during drilling of an aluminum alloy. Micro-groove width, inter-groove spacing, and orientation angle relative to the drill cutting edge were considered as input parameters, while flank-face wear and hole-exit burr width were considered as output responses.

The results showed that increasing micro-groove width from 200 to 400 µm and inter-groove spacing from 200 to 400 µm reduced tool wear. Increasing the orientation angle from 0° to 45° increased tool wear, whereas a further increase from 45° to 90° reduced wear. Increasing groove width from 200 to 300 µm reduced exit-edge burr width, while a further increase from 300 to 400 µm increased burr width. Burr width remained approximately constant as spacing increased from 200 to 300 µm and increased when spacing increased from 300 to 400 µm. Increasing the orientation angle also increased exit-edge burr width.

This study is among the early investigations of the effects of micro-groove geometry and texture density on drilling performance. The findings indicate that identifying an optimum texture geometry for different drilling conditions requires further investigation and provides opportunities for future research.

References

[1] M.A. Makhesana, K. Patel, N. Ghetiya, R. Binali, M. Kuntoğlu, Evaluation of drilling and hole quality characteristics in green machining aluminium alloys: A new approach towards green machining, Journal of Manufacturing Processes, 129 (2024) 176-186.

[2] D.Y. Pimenov, M. Kiran, N. Khanna, G. Pintaude,

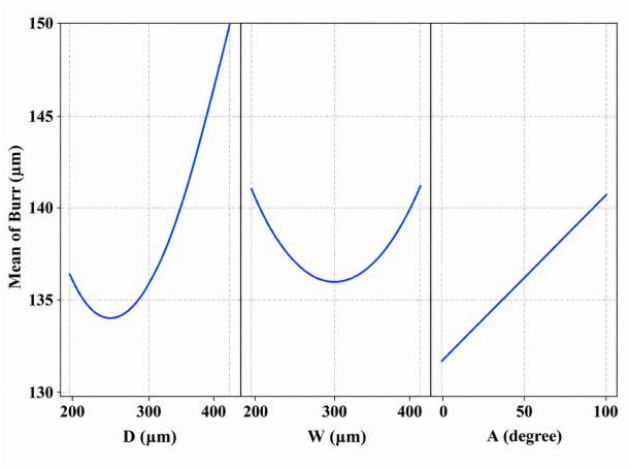


Fig. 3. Variations of the average burr width at the exit edge of the hole with respect to the spacing (D), width (W), and orientation angle (A) of the micro-grooves

M.C. Vasco, L.R.R. da Silva, K. Giasin, Review of improvement of machinability and surface integrity in machining on aluminum alloys, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 129(11) (2023) 4743-4779.

[3] A. Salem, H. Hegab, H.A. Kishawy, Experimental investigation of the derivative cutting when machining AISI 1045 with micro-textured cutting tools, Metals, 13(9) (2023) 1587.

[4] S.R. Agari, A. Lakshmikanthan, C.P. Selvan, K.S.V. Sekar, Improvement in the Machining Processes by Micro-Textured Tools during the Turning Process, Engineering Proceedings, 61(1) (2024) 2.

[5] L. Yang, W. Ma, F. Gao, S. Xi, Effect of groove width on micromachine groove texture tribology characteristics of 0Cr17Ni7Al, Coatings, 12(8) (2022) 1221.

[6] N.A. Sristi, P.B. Zaman, A review of textured cutting tools' impact on machining performance from a tribological perspective, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 133(9) (2024) 4023-4057.

[7] S. Ullah, Z. Liang, Y. Ma, S. Xing, Y. Du, M. Zhou, J. Xu, T. Zhou, X. Wang, A comprehensive review of mechanical micro-drilling: Toward a tool-process-quality framework from tool fabrication to micro-hole quality, Journal of Materials Research and Technology, 42 (2026) 10550-10587.

[8] E. Öztürk, K. Kadir, Drilling performance of micro-textured twist drill bit for TI-6AL-4V alloy: validated FEM and statistical approaches, Journal of Manufacturing Processes, 115 (2024) 342-351.

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۸، شماره ۳، سال ۱۴۰۵، صفحات ۳۴۹ تا ۳۶۶
DOI: 10.22060/mej.2026.25853.7974

بررسی تجربی تأثیر پارامترهای هندسی میکرو طرح بر سایش ابزار و پلیسه سوراخ در فرآیند سوراخکاری آلومینیوم با مته طرح‌دار

زهرا بیاض قربانی[۱]، محمدمهدی ابوترابی[۱*]، علی‌اکبر جعفری خسروآبادی[۲]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
۲- دانشکده آمار، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

خلاصه: پلیسه‌ها مانع از مونتاژ صحیح قطعات می‌شوند. تولیدکنندگان صنعتی از عملیات‌های ثانویه برای حذف پلیسه‌ها استفاده می‌کنند که زمان و هزینه تولید را افزایش می‌دهد. عوامل متعددی باعث ایجاد پلیسه‌ها می‌شوند. سایش ابزار یکی از عوامل ایجاد پلیسه روی قطعات سوراخکاری-شده است. طرح‌دار کردن ابزار برش در مقیاس میکرو و نانو ایده‌ای جدید برای حل مشکل پلیسه سوراخ‌ها و سایش ابزار است. در این پژوهش، میکروشیارهایی با عرض ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، فاصله بین میکروشیارها ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر و زاویه قرارگیری نسبت به لبه برنده بین ۰ تا ۹۰ درجه بر روی سطح آزاد مته ایجاد و تأثیر هندسه میکروشیار بر سایش ابزار و پلیسه سوراخ بررسی شده‌است. علاوه‌براین، بهینه‌سازی پارامترهای هندسی میکروشیار برای داشتن کمترین سایش و پلیسه به‌صورت جداگانه و همچنین بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن هم‌زمان این دو پارامتر خروجی، با روش سطح پاسخ انجام شده‌است. تحلیل آماری نشان می‌دهد که با افزایش عرض میکروشیار و فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر سایش ابزار کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش زاویه قرارگیری میکروشیار از صفر تا ۹۰ درجه، سایش ابزار ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر و افزایش زاویه قرارگیری میکروشیار نسبت به لبه برنده از صفر تا ۹۰ درجه باعث افزایش عرض پلیسه شده‌است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۲۷

کلمات کلیدی:
سوراخکاری
ابزار طرح‌دار
سایش ابزار
پلیسه
آلومینیوم

۱- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم به‌دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی و رسانایی حرارتی بالا به‌طور گسترده در اغلب صنایع مانند خودروسازی و هوافضا استفاده می‌شوند. علی‌رغم این ویژگی‌های مفید، به‌دلیل سهولت واکنش شیمیایی با جنس‌های مختلف ابزار و نرم بودن نسبی آلومینیوم، سوراخکاری آن‌ها اغلب دشوار و پر از چالش است. یکی از راه‌های افزایش قابلیت ماشینکاری آلیاژهای آلومینیوم استفاده از سیالات برشی است [۱]. سیالات برشی در بسیاری از روش‌های ماشینکاری برای کاهش اصطکاک، افزایش عمر ابزار و کاهش دمای ماشینکاری استفاده می‌شوند؛ اما استفاده از آن‌ها، علاوه‌بر افزایش هزینه تولید بر سلامتی انسان و محیط زیست اثر نامطلوب دارد [۲]. یکی از تکنیک‌های جدید برای افزایش قابلیت ماشینکاری آلیاژهای آلومینیوم، فناوری طرح‌دار کردن ابزار برش در مقیاس میکرو و نانو است که باعث کاهش دمای برش، کاهش اصطکاک، کاهش سایش ابزار و کاهش ایجاد پلیسه روی قطعه‌کار شده‌است [۱]. در سال‌های اخیر بیشترین تحقیقات منتشر شده در زمینه ماشینکاری با ابزارهای طرح‌دار مربوط به فرآیند تراشکاری بوده‌است. در ادامه تعدادی از این تحقیقات ارائه شده‌اند. در مورد سوراخکاری با مته‌های طرح‌دار تاکنون مطالعات کمی انجام شده‌است. یکی از دلایل این موضوع، سختی ایجاد میکروطرح روی مته است.

سالم و همکاران [۳] با ایجاد میکروشیارهایی با عرض‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰ میکرومتر و فاصله بین میکروشیارهای ۳۰، ۴۵ و ۹۰ میکرومتر روی ابزار تراش، تأثیر هندسه میکروطرح بر سایش ابزار در فرآیند تراشکاری فولاد AISI 1045 را بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که سایش ابزار در تمام ابزارهای طرح‌دار نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته‌است. ابزار با عرض میکروشیار ۴۵ میکرومتر و فاصله بین میکروشیارهای ۳۰ میکرومتر کمترین سایش ابزار را در مقایسه با سایر ابزارها داشته‌است. ارولکیروباکاران و همکاران [۴] تأثیر ابزارهای میکروطرح‌دار بر سایش سطح ابزار را در

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: abootorabi@yazd.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

فرآیند تراشکاری آلیاژ Ti-6Al-4V بررسی کردند. آن‌ها با ایجاد میکروشیار موازی و عمود نسبت به لبه برش روی سطح براده ابزار و انجام آزمایش‌های تجربی گزارش کردند که ابزار با میکروطرح عمود بر لبه برش کمترین میزان سایش را نسبت به ابزارهای دیگر دارد و نسبت به ابزار بدون طرح، سایش را به میزان ۵۰/۷ درصد کاهش می‌دهد. زی و همکاران [۵] برای بررسی اثرات میکروطرح‌ها بر سایش ابزار، میکروشیارهای مورب و عمود نسبت به لبه برش را روی سطح براده ابزار تراشکاری ایجاد کردند. آن‌ها گزارش کردند که استفاده از ابزارهای میکروطرح‌دار نسبت به ابزار بدون طرح باعث ایجاد سایش کمتری روی سطوح براده و آزاد ابزار می‌شود. ابزار با میکروشیار مورب باعث کاهش ۶/۷ درصد سایش ابزار نسبت به ابزار بدون طرح شده‌است.

آگری و همکاران [۶] با ایجاد میکروشیار و میکرو گودال روی سطح براده ابزار تراش تأثیر ابزار طرح‌دار بر سایش ابزار را در طول فرآیند تراشکاری فولاد AISI 1014 بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که سایش ابزار در ابزارهای طرح‌دار نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته و ابزار میکروشیاردار با کاهش قابل توجه سایش ابزار، عملکرد بهتری نسبت به ابزار با میکروگودال از خود نشان داده‌است. یانگ و همکاران [۷] تأثیر عرض شیار بر سایش ابزار در فرآیند فرزکاری آلیاژ 0Cr17Ni7Al را بررسی کردند. آن‌ها با ایجاد شیارهایی با عرض ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸و ۱ میلی‌متر روی ابزار فرز و انجام آزمایش‌های تجربی گزارش کردند که سایش در تمام ابزارهای طرح‌دار نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته‌است. سایش ابزار با افزایش عرض شیار از ۰/۴تا ۰/۶ میلی‌متر کاهش و از ۰/۶ تا ۱ میلی‌متر افزایش یافته‌است. نیکت و ساموئل [۸] با استفاده از یک ابزار مته جدید و ایجاد میکروطرح در قسمت شیار و حاشیه ابزار مته، نیروی پیشروی را تحت شرایط روانکاری خشک، تر و روانکاری کمینه بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که ابزار با میکروطرح در قسمت حاشیه مؤثرتر از ابزار با میکروطرح در قسمت شیار و ابزار بدون میکروطرح عمل می‌کند. کاهش نیروی پیشروی با ابزار طرح‌دار در حالت روانکاری خشک ۱۰ تا ۱۲ درصد، در حالت روانکاری تر ۱۵ تا ۲۰ درصد و در حالت روانکاری کمینه ۱۵ تا ۱۹ درصد گزارش شده‌است. نیکت و ساموئل در پژوهشی دیگر [۹] برای بررسی اثر مته های طرح‌دار بر سوراخکاری با نسبت طول به قطر بالا، بافت‌هایی به شکل حفره‌های دایروی روی قسمت حاشیه و شیار ابزار مته ایجاد کردند و آزمایش‌های تجربی را در حالت خشک، تر و روانکاری کمینه انجام دادند. آن‌ها گزارش کردند که ابزار طرح‌دار در شرایط تر بهترین عملکرد را در مقایسه با حالت‌های دیگر داشته و باعث کاهش ۱۷ درصدی نیروی پیشروی و ۲۷ درصدی گشتاور شده‌است. علاوه‌بر این، ابزار طرح‌دار در مقایسه با ابزار بدون طرح باعث کاهش ۵۴ درصدی ارتفاع پلیسه سوراخ شده‌است. لینگ و همکاران [۱۰] اثر میکرو طرح بر چسبندگی بین مته و قطعه‌کار و عمر ابزار را در فرآیند سوراخکاری بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که ایجاد طرح در حاشیه مته روشی مفید برای کاهش چسبندگی و افزایش عمر ابزار است.

سریستی و زمان [۱۱] با بررسی جامع پژوهش‌های پیشین در خصوص ابزارهای طرح‌دار بیان کردند که طرح‌دار کردن ابزار برش به‌طور کلی باعث ارتقای دوام ابزار، کاهش دمای برش و بهبود عملکرد روانکاری می‌شود. آن‌ها همچنین بیان کردند که تراکم بافت ابزار نقش حیاتی در تأثیرگذاری بر نیروهای برشی دارد. آن‌ها در این تحقیق جامع به این نتیجه رسیدند که به‌طور کلی، میزان اثر ابزارهای برشی طرح‌دار در بهبود عملکرد فرآیندهای ماشینکاری به پارامترهای هندسی مانند ابعاد، شکل، موقعیت، فاصله از لبه‌های برشی، چگالی و جهت این طرح‌ها بستگی و بررسی اثر هندسه طرح‌ها اهمیت زیادی دارد. بهینه‌سازی پارامترهای هندسی طرح‌های ایجاد شده روی ابزارها برای رسیدن به بهترین عملکرد تریبولوژیکی ابزارهای برش نیز بسیار مهم ارزیابی شده‌است. اولاه و همکاران [۱۲] تشکیل پلیسه را یکی از رایج‌ترین و مشکل‌سازترین عیوب هندسی در فرآیند میکروسوراخکاری معرفی کردند. سایز و شکل پلیسه‌ها تحت تأثیر مته، جنس قطعه‌کار و پارامترهای برشی است و هندسه مته از عوامل مهم اثرگذار بر تشکیل پلیسه معرفی شده‌است. علاوه‌بر این، در بررسی جامع سایش ابزار در فرآیند میکروسوراخکاری در این مقاله مروری، نویسندگان فاکتورهای هندسی ابزار مته را از مهمترین عوامل مؤثر بر سایش ابزار ارزیابی و تحقیقات بیشتر در این زمینه برای کاهش سایش ابزار را پیشنهاد کردند. اوزتورک و کدیر [۱۳] با ایجاد میکروشیار روی سطح آزاد، شیار و حاشیه ابزار مته و سوراخکاری آلیاژ Ti-6Al-4V در حالت خشک، عملکرد میکروشیارها را بر نیروی پیشروی، گشتاور و دمای ابزار بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که ابزار با میکروشیار روی سطح آزاد مته نسبت به بقیه حالت‌ها، باعث بهبود عملکرد سوراخکاری شده‌است. در این پژوهش، ابزار با میکروشیار روی سطح آزاد و حاشیه مته و بدون طرح در قسمت شیار مته به‌عنوان ابزار بهینه معرفی شده و استفاده از آن در مقایسه با ابزار بدون طرح، نیروی پیشروی را ۵۱ درصد، گشتاور را ۲۰/۵ درصد و دمای ابزار را ۲۳/۴ درصد کاهش داده‌است.

برای افزایش بازدهی فرآیند سوراخکاری، افزایش عمر ابزار و حل مشکل پلیسه سوراخ ضرورت دارد. سایش ابزار مهم‌ترین عامل مؤثر بر عمر ابزار برشی است. در روش‌های سنتی ماشینکاری، برای کاهش سایش

و افزایش عمر ابزار، از سیالات برشی جهت روغن‌کاری و خنک‌کاری منطقه ماشینکاری استفاده می‌شود. سیالات برشی تأثیر نامطلوبی بر سلامتی انسان و محیط زیست دارند، بنابراین استفاده از روش‌های جدید برای کاهش مصرف سیالات برشی ضروری است. پلیسه ایجاد شده روی لبه سوراخ نیز باعث کاهش کارایی فرآیند سوراخکاری و ایجاد مشکل در عملیات مونتاژ قطعات می‌شود. برای غلبه بر این مشکلات، در سال‌های اخیر از ابزارهای میکروطرح‌دار در فرآیندهای ماشینکاری ازجمله سوراخکاری استفاده شده است. طرح‌دار کردن ابزارها باعث کاهش مساحت تماس براده با ابزار و بهبود ویژگی‌های تریبولوژیکی سطح می‌شود. در تحقیقات پیشین مرتبط با فرآیند سوراخکاری، معمولاً تأثیر میکروطرح‌های ایجاد شده روی حاشیه و شیار مارپیچ ابزار مته بر سایش ابزار، پلیسه سوراخ و دما بررسی و به تأثیر میکروطرح‌های ایجاد شده روی سطح آزاد ابزار مته کمتر پرداخته شده‌است. در این پژوهش تأثیر هندسه میکروطرح ایجاد شده روی سطح آزاد مته در سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم بر سایش ابزار و عرض پلیسه سوراخ بررسی شده‌است. علاوه‌بر این، در تحقیقات پیشین به تأثیر هندسه و تراکم میکروطرح‌ها بر سایش ابزار و عرض پلیسه کمتر پرداخته شده و به طور خاص، فرآیند سوراخکاری در حالت بدون روانکار (ماشینکاری خشک) کمتر موضوع تحقیقات مرتبط با استفاده از ابزارهای میکروطرح‌دار در ماشینکاری بوده‌است. عرض میکروطرح‌ها، فاصله بین میکروطرح‌ها و زاویه قرارگیری میکروطرح‌ها نسبت به لبه مته، هندسه میکروطرح را مشخص می‌کند که در تحقیق حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

۲- تنظیم تجربی

برای انجام آزمایش‌های تجربی از مته HSS-G سفید نوع N و بدون پوشش برای سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم استفاده شد. مشخصات مته مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی عبارت است از: قطر اسمی ۱۰/۵میلی‌متر، طول کلی ۱۳۳ میلی‌متر، طول فاز ۸۷ میلی‌متر، زاویه رأس ۱۱۸ درجه و زاویه مارپیچ ۲۵ درجه. سوراخکاری با استفاده از ماشین فرز CNC عمودی مدل MAHO MH 700C ساخت کشور آلمان انجام شد. پارامترهای ثابت ماشینکاری که با انجام آزمایش‌های اولیه مشخص شدند عبارتند از: سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۱۵ میلی‌متر بر دور و عمق سوراخ ۴۰ میلی‌متر. لازم به ذکر است که این مقادیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی مته بیش از مقادیر مورد استفاده هنگام کارهای صنعتی انتخاب شده‌اند تا سایش مته در این کار تحقیقاتی زودتر اتفاق افتد و حالت‌های

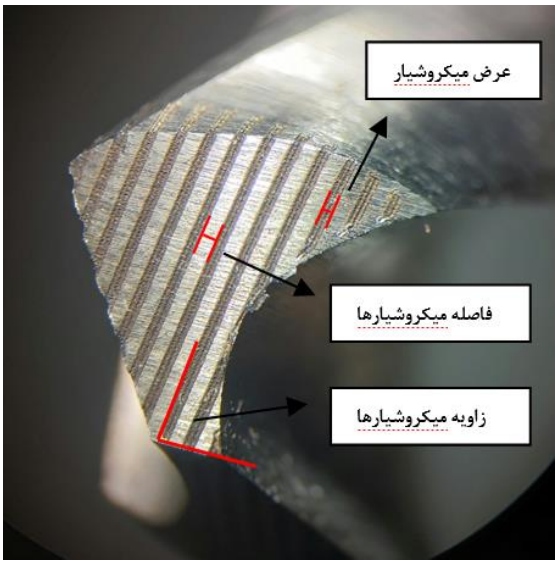
جدول ۱. پارامترهای فرآیند میکرو حکاکی لیزر روی سطح مته.

Table 1. Parameters of the laser micro-engraving process on the drill surface.

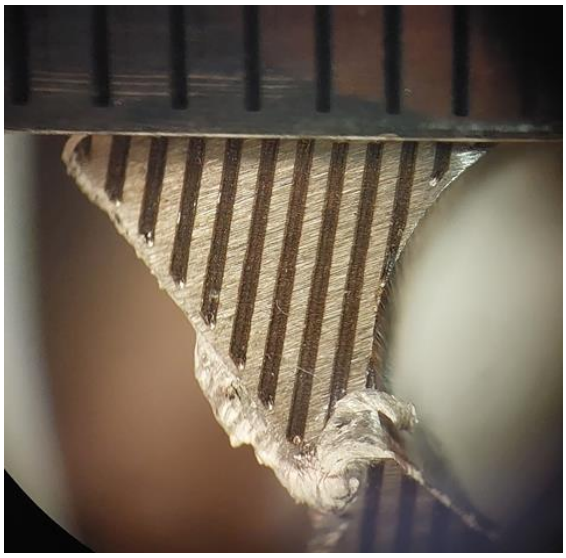
پارامتر	مقدار	واحد
سرعت پیشروی	۱۰۰۰	mm/s
میزان فرکانس	۲۰	KHz
میزان قدرت	۸۰	٪

مختلف با یکدیگر مقایسه شود. آزمایش‌های تجربی به‌صورت خشک روی قطعه‌کار از جنس آلیاژ آلومینیوم با سطح مقطع مستطیل به طول ۱۴۰، عرض ۱۰۰ و ضخامت ۴۰ میلی‌متر انجام شده‌است.

برای رفع آلودگی سطحی و چربی‌زدایی، ابزارهای خام درون محلول اتانول با خلوص ۹۶ درصد قرار گرفتند. میکرو شیارهای موازی، عمود و مورب نسبت به لبه برنده ابزار مته و تغییر ابعاد آن‌ها در سه سطح، هندسه و تراکم میکروشیار را مشخص می‌کند. به‌دلیل توانایی محدود لیزر در دسترس، میکروشیارهای ایجاد شده با عرض‌های کمتر از ۲۰۰ میکرومتر کیفیت قابل قبولی نداشتند. عرض میکرو شیار و فاصله بین میکرو شیارها در سه سطح ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومتر و زاویه قرارگیری نسبت به لبه برنده ابزار مته در سه سطح ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه تعیین شده‌است. در انتخاب این سطوح برای عرض میکرو شیار و فاصله بین میکرو شیارها، علاوه بر توجه به مطالعات قبلی در زمینه ماشینکاری با ابزارهای میکرو طرح‌دار، ایده استفاده از حداقل مقادیر و ایجاد طرح‌های ظریف‌تر در نظر بوده‌است. برای ایجاد میکروشیار روی سطح آزاد مته، از روش میکرولیزر سطح استفاده شد. پارامترهای فرآیند میکرو حکاکی لیزر در جدول ۱ ذکر شده‌است. برای انتخاب پارامترهای فرآیند حکاکی لیزر، ابتدا میکروشیارهایی با پارامترهای حکاکی مختلف ازجمله پارامترهای ذکرشده در جدول ۱ بر روی ابزار مته ایجاد شد. سپس عرض و فاصله بین میکروشیارها با استفاده از آنالیز تصاویر میکروسکوپی و نرم افزار ImageJ اندازه‌گیری و با مقادیر اسمی مورد نظر در آزمون‌های تجربی یعنی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومتر مقایسه شد. ابعاد میکروشیارها در حالت ذکر شده در جدول ۱ نسبت به سطوح دیگر کمترین خطا را داشتند. پارامترهای جدول ۱ برای تمام آزمایش‌ها ثابت بوده‌است. بعد از فرآیند میکرو حکاکی لیزر، برای از بین بردن دوده حاصل از میکرو لیزر سطح و شست‌وشوی مته، ابزارهای برش به مدت ۱۰ دقیقه داخل ظرف حاوی اتانول



(الف)



(ب)

شکل ۱. نمونه‌ای از مته بعد از ایجاد میکروشیار روی سطح آزاد قبل و بعد از ماشینکاری، الف) قبل از انجام آزمایش و ب) بعد از انجام آزمایش.

Fig. 1. An example of a drill bit after creating micro-grooves on the flank face, before and after machining: a) before the experiment, and b) after the experiment.

۹۶ درصد به‌صورت غوطه‌ور قرار داده شده‌اند. شکل ۱ یک نمونه از مته بعد از ایجاد میکروشیار در حالت‌های قبل و بعد از ماشینکاری را نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری میزان سایش سطح آزاد ابزار برشی و پلیسه لبه خروجی سوراخ با استفاده از آنالیز تصاویر گرفته‌شده توسط میکروسکوپ نوری انعکاسی دو چشمی مدل NSZ-606 ساخت شرکت ژنوس چین که با نام استریومیکروسکوپ شناخته می‌شود و نرم‌افزار ImageJ انجام شد. هنگام تصویربرداری توسط میکروسکوپ به‌منظور تعریف مقیاس اندازه‌گیری در نرم‌افزارImageJ، از خط‌کش اندازه‌گیری استفاده شده‌است (شکل ۲). در نرم‌افزار ImageJ فاصله دو خط از خط‌کش ۱۰۰۰ میکرومتر تعریف شد. برای اندازه‌گیری سایش ابزار، کروکی ناحیه ساییده شده مشخص شد و نرم‌افزار با توجه به مقیاس تعریف شده، میزان سایش سطح ابزار را بر حسب μm^2 محاسبه کرد. عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ نیز با خط به نرم‌افزار معرفی شد و نرم‌افزار با توجه به مقیاس از قبل تعریف شده، عرض پلیسه را بر حسب μm اندازه‌گیری کرد (شکل۳). برای اندازه‌گیری و بررسی پلیسه از معیارهای مختلفی نظیر ارتفاع، عرض یا ضخامت ریشه پلیسه استفاده می‌شود [۹]. در مطالعه حاضر، عرض پلیسه مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

جدول ۲ پارامترهای ورودی آزمایش‌های تجربی و طراحی آزمایش را نشان می‌دهد. طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار مینی تب و روش باکس‌بنکن انجام شده‌است. تعداد آزمایش‌های تجربی انجام‌شده با ابزار طرح‌دار در مجموع ۱۵ عدد و آزمایش شماره ۱۶مربوط به ابزار بدون طرح است. روش باکس–بنکن یکی از روش‌های طراحی سطح پاسخ است که به‌دلیل طراحی متوازن و متعامد خود، توانایی تفکیک و برآورد دقیق اثرات متقابل را با حداقل تعداد آزمایش دارد. استفاده از روش باکس–بنکن برای طراحی آزمایش به‌دلیل کاهش تعداد آزمایش‌ها و مدل‌سازی دقیق‌تر اثرات متقابل در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته‌است. در هر آزمایش، ابزار برش جدید سه سوراخ روی قطعه‌کار ایجاد کرده‌است. شکل ۴ قطعه‌کار آلومینیومی بعد از انجام فرآیند سورخکاری را نشان می‌دهد. سایش مته پس از ایجاد این سه سوراخ اندازه‌گیری و میانگین عرض پلیسه لبه انتهایی سه سوراخ به عنوان میزان پلیسه در هر آزمایش ثبت شد.

۳- نتایج تجربی و بحث

۳- ۱- سایش ابزار

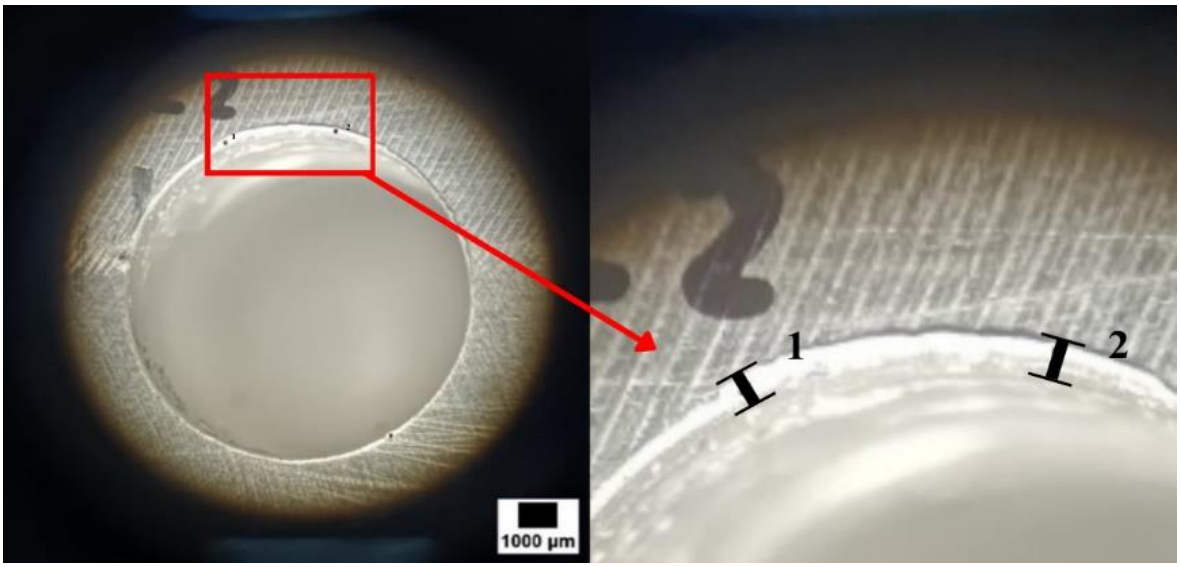
جدول ۳ میزان سایش سطح آزاد ابزار مته پس از هر آزمایش تجربی و شکل ۵ تأثیر فاصله بین میکروشیارها (D)، عرض میکروشیار (W) و زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده مته (A) بر سایش سطح مته را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول ۳ و شکل ۵، با افزایش فاصله بین

الف)

ب)

شکل ۲. تصویر محل سایش ابزار زیر میکروسکوپ نوری و نحوه اندازهگیری مساحت سایش؛ الف) ابزار بدون طرح و ب) ابزار میکروشیاردار عمود نسبت به لبه برش با عرض میکروشیار۴۰۰ و فاصله بین میکروشیارهای ۳۰۰ میکرومتر.

Fig. 2. Optical microscope image of the tool wear area and the method of measuring the wear area: a) non-patterned tool, and b) tool with micro-grooves perpendicular to the cutting edge (micro-groove width: 400 µm, spacing between micro-grooves: 300 µm).



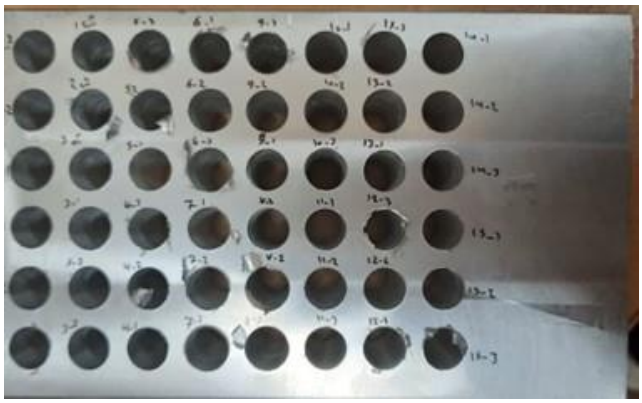
شکل ۳. تصویر عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ زیر میکروسکوپ نوری و نحوه اندازهگیری عرض پلیسه.

Fig. 3. Optical microscope image of the burr width at the exit edge of the hole and the method of measuring the burr width.

جدول ۲. پارامترهای ورودی و طراحی آزمایشهای تجربی

Table 2. Input parameters and design of experiments

شماره آزمایش	عرض میکروشیارها (µm)	فاصله بین میکروشیارها (µm)	زاویه میکروشیار نسبت به لبه‌برش (درجه)
۱	۲۰۰	۴۰۰	۴۵
۲	۲۰۰	۳۰۰	۹۰
۳	۳۰۰	۴۰۰	۰
۴	۴۰۰	۳۰۰	۹۰
۵	۳۰۰	۳۰۰	۴۵
۶	۳۰۰	۲۰۰	۰
۷	۳۰۰	۳۰۰	۴۵
۸	۳۰۰	۳۰۰	۴۵
۹	۳۰۰	۲۰۰	۹۰
۱۰	۴۰۰	۲۰۰	۴۵
۱۱	۴۰۰	۳۰۰	۰
۱۲	۴۰۰	۴۰۰	۴۵
۱۳	۳۰۰	۴۰۰	۹۰
۱۴	۲۰۰	۳۰۰	۰
۱۵	۲۰۰	۲۰۰	۴۵



شکل ۴. قطعه‌کار آلومینیومی بعد از انجام آزمونهای سوراخکاری.

Fig. 4. Aluminum workpiece after performing the drilling tests.

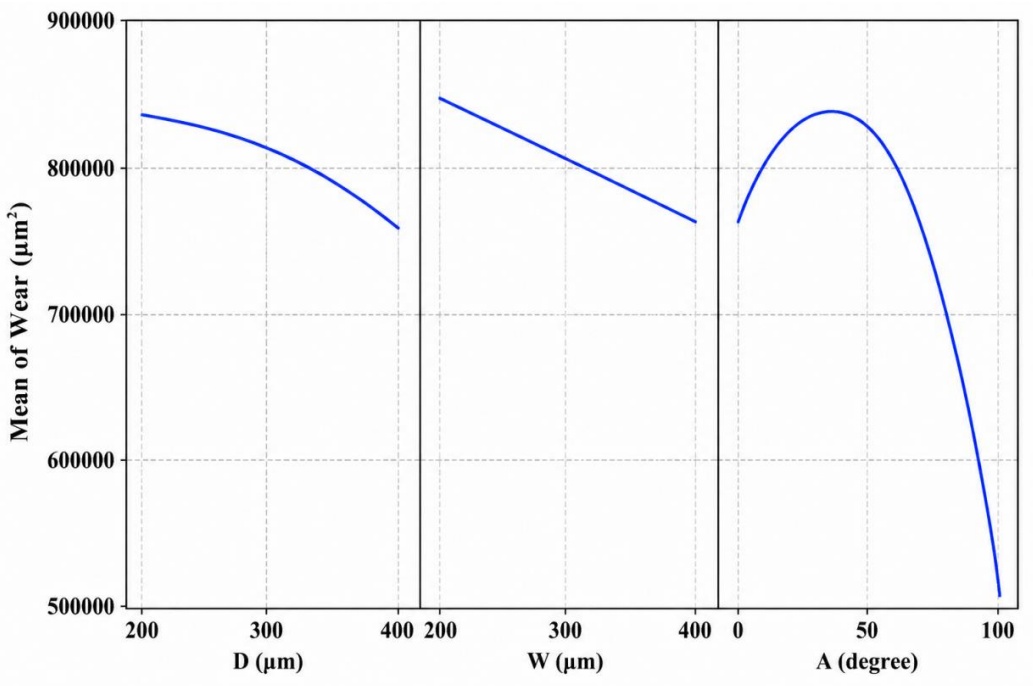
میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، سایش ابزار کاهش پیدا کرده‌است. میانگین سایش در ابزار با فاصله بین میکرو شیارهای ۲۰۰ میکرومتر ۴۸/۷٪، ۳۰۰ میکرومتر ۵۱/۴٪ و ۴۰۰ میکرومتر ۵۴٪ نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته‌است.

لیو و همکاران [۱۴] با ایجاد میکروشیار روی سطح آزاد ابزار، تأثیر عرض میکروشیار، فاصله بین میکروشیارها و فاصله میکروشیار از لبه برش را بر سایش ابزار در فرآیند برش سرامیک سبز بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که ابزار با فاصله میکروشیار بیشتر، مقاومت به سایش بهتری دارد که با نتایج پژوهش حاضر همسو است. موسوی و همکاران [۱۵] نیز با ایجاد میکروشیار روی سطح ابزار تنگستن کارباید، تأثیر فاصله بین میکروشیارها روی سایش ابزار را در فرآیند تراشکاری خشک آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که افزایش فاصله بین میکروشیارها باعث افزایش سایش ابزار می‌شود که با نتایج پژوهش حاضر همسو نیست. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش و مقایسه آن‌ها با مراجع ذکر شده قبلی نشان می‌دهد که در مورد اثر فاصله بین میکروشیارها بر سایش ابزار نمی‌توان با انجام آزمایش‌های محدود روی یک جنس قطعه‌کار نتیجه کلی گرفت. به عبارت دیگر ممکن است با تغییر مقادیر فاصله بین میکروشیارها و همچنین جنس ابزار و قطعه‌کار، نتایج به‌دست آمده متفاوت از نتایجی باشد که در آزمایش‌های تجربی پژوهش حاضر به‌دست آمده‌است. لازم به ذکر است که موسوی و همکاران [۱۵] آزمایش‌ها را در حالت تراشکاری با روانکاری کمینه نیز انجام دادند. هنگام استفاده از روانکاری کمینه، با افزایش فاصله بین میکروشیارها و کاهش تعداد آن‌ها در واحد سطح، سیال برشی کمتری به ناحیه برش تزریق می‌شود و کیفیت براده‌برداری را کاهش و سایش ابزار را افزایش می‌دهد؛ به‌عبارت دیگر، اثر میکروطرح‌ها هنگام ماشینکاری کاهش می‌یابد. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، آن‌ها افزایش سایش ابزار با افزایش فاصله بین میکروشیارها در ماشینکاری خشک را نیز مشاهده کردند ولی دلیلی برای این اتفاق ذکر نشده‌است.

جدول ۳. مقادیر سایش سطح آزاد مته.

Table 3. Values of the flank wear of the drill

شماره آزمایش	سایش سطح آزاد (μm^2)
۱	۳۸۴۵۷۸
۲	۶۰۸۲۲۳
۳	۷۵۸۴۲۶
۴	۳۳۶۴۹۹
۵	۷۰۳۶۸۳
۶	۷۰۶۵۳۸
۷	۷۹۵۶۶۵
۸	۹۳۳۱۶۱
۹	۳۸۳۸۶۶
۱۰	۹۱۹۸۴۵
۱۱	۵۴۴۷۳۸
۱۲	۹۱۳۱۳۲
۱۳	۶۲۷۵۶۷
۱۴	۱۰۴۱۰۰۵
۱۵	۹۸۴۰۰۶
۱۶	۱۴۵۸۲۳۸



شکل ۵. تأثیر فاصله بین میکروشیارها(D)، عرض میکروشیارها(W) و زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده مته(A) بر سایش مته.

Fig. 5. Effect of the spacing between micro-grooves (D), width of the micro-grooves (W), and the orientation angle of the micro-grooves relative to the cutting edge of the drill (A) on the drill wear.

در سوراخ‌کاری خشک، ابزار تحت بارهای مکانیکی و ضربه‌های ناشی از خروج براده قرار دارد. در فاصله ۲۰۰ میکرون دیواره‌های بین میکروشیارها بسیار نازک هستند. نسبت ارتفاع به پهنای این دیواره‌ها به‌گونه‌ای است که تحت تنش‌های شدید برشی دچار دفرمه شدن میکروسکوپی یا خمیدگی لبه‌ها می‌شوند. این تغییر شکل‌های ریز، پایداری هندسی ابزار را به‌هم زده و منجر به شکست‌های موضعی ریز در لبه میکروشیارها می‌شود که سایش ابزار را تسریع می‌کند. در فاصله ۴۰۰ میکرون، پهنای دیواره‌ها دو برابر می‌شود و گشتاور اینرسی مقاوم دیواره در برابر خم شدن افزایش می‌یابد. در نتیجه، دیواره‌ها صلبیت ساختاری بیشتری پیدا می‌کنند و لبه‌های میکروشیار در برابر بارهای ضربه‌ای کاملاً پایدار می‌مانند. علاوه‌بر این، در فاصله ۲۰۰ میکرون تعداد میکروشیارها در واحد سطح بسیار زیاد می‌شود. تعداد زیاد میکروشیار یعنی تعداد لبه‌های تیز بیشتر که با قطعه‌کار درگیر می‌شوند. این لبه‌های تیز در لحظات اولیه تماس، مثل دندانه‌های اره عمل کرده و تنش تماسی بسیار بالایی ایجاد می‌کنند که سایش چسبنده اولیه را بالا می‌برد. افزایش فاصله به ۴۰۰ میکرون، یک سطح تماس هموارتر و پهن‌تر ایجاد می‌کند که فشار عمودی قطعه را بدون ایجاد تمرکز تنش‌های موضعی شدید تحمل می‌کند.

با توجه شکل ۵، با افزایش عرض میکروشیار از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، سایش سطح آزاد ابزارکاهش پیدا می‌کند. میانگین سایش در ابزار با عرض میکروشیارهای ۲۰۰ میکرومتر ۴۸/۳٪، ۳۰۰ میکرومتر ۵۱/۹٪ و ۴۰۰ میکرومتر ۵۳/۵٪ نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته‌است. لیو و همکاران [۱۴] گزارش کردند که با افزایش عرض میکروشیار، سایش ابزار کاهش پیدا می‌کند که نتایج آن‌ها با نتایج پژوهش حاضر همسو است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که افزایش عرض میکروشیار در کنار افزایش فاصله میکروشیارها نسبت به هم در سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم باعث کاهش سایش مته شده‌است و می‌تواند در کارهای صنعتی مورد توجه قرار گیرد.

در سوراخ‌کاری بدون روان‌کار، هیچ جریانی از مایع وجود ندارد تا ذرات میکروسکوپی فرسایشی و ریز براده‌ها را از ناحیه تماس بشوید و خارج کند. این ذرات به ناچار بین سطح آزاد مته و دیواره سوراخ گیر می‌افتند و سایش شدید ایجاد می‌کنند. در عرض ۲۰۰ میکرون، میکروشیارها به‌سرعت توسط این ذرات پر و متراکم می‌شوند. پس از پر شدن میکروشیار، این ذرات فشرده‌شده خودشان مثل یک ابزار ساینده علیه مته عمل می‌کنند. در عرض ۴۰۰ میکرون ظرفیت حجمی میکروشیارها افزایش می‌یابد. این فضا اجازه می‌دهد ذرات ساینده بدون متراکم شدن و ایجاد فشار اضافه، به داخل

میکروشیار سقوط کنند و از سطح تماس واقعی خارج شوند. همچنین در سوراخکاری بدون روان‌کار، حرارت زیادی در محل برش تولید می‌شود که فلز قطعه‌کار را به حالت خمیری نزدیک می‌کند. این امر باعث می‌شود فلز قطعه‌کار به سطح آزاد مته جوش بخورد و پدیده لبه انباشته رخ دهد. افزایش عرض میکروشیار به ۴۰۰ میکرون، مساحت سطح تماس واقعی را به میزان مؤثری کاهش می‌دهد. کاهش سطح تماس یعنی کاهش نقاطی که پتانسیل جوش خوردن موضعی فلز به ابزار را دارند. در نتیجه، چسبندگی فلز کاهش یافته و وقتی لبه‌های چسبیده کنده می‌شوند، ذرات کمتری از بدنه ابزار را با خود جدا می‌کنند. در سوراخ‌کاری خشک، تنها عامل خنک‌کننده، هوای اطراف است. علت دیگر کاهش سایش در عرض میکروشیار ۴۰۰ میکرون این است که این میکروشیارها به عنوان کانال‌های مینیاتوری هوا عمل می‌کنند. در سرعت‌های دورانی بالا، گردش این میکروشیارهای پهن‌تر باعث ایجاد اغتشاشات ریز در جریان هوا در ناحیه تماس می‌شود. این جریان هوای آشفته، گرما را بهتر از سطح آزاد مته دور می‌کند و مانع از نرم شدن حرارتی لبه مته می‌شود.

برای بررسی تأثیر زاویه قرارگیری میکروشیار نسبت به لبه برنده بر سایش سطح مته، آزمایش‌های تجربی با استفاده از ابزار میکروشیاردار موازی، مورب و عمود نسبت به لبه برنده انجام شده‌است. با توجه به شکل ۵ ، سایش سطح آزاد ابزار با افزایش زاویه از ۰ تا ۴۵ درجه اندکی افزایش و از ۴۵ تا ۹۰ درجه کاهش پیدا می‌کند. افزایش سایش از ۰ تا ۴۵ درجه معنادار نیست و می‌تواند ناشی از خطای ایجاد میکروشیارها توسط لیزر باشد، بنابراین می‌توان گفت افزایش زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده اثر مثبتی روی سایش سطح آزاد ابزار دارد. چانگ و همکاران [۱۶] با ایجاد میکروشیارهای موازی، مورب و عمود نسبت به لبه برش ابزار فرز، تأثیر جهت قرارگیری میکروشیار نسبت به لبه برش را بر سایش ابزار در فرآیند میکروفرزکاری بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که ابزار با میکروشیار عمود نسبت به لبه برش بیشترین مقاومت در برابر سایش را از خود نشان داده‌است. نتایج آن‌ها با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. سایش در ابزار با میکروشیار موازی نسبت به لبه برنده ۴۷/۷٪، مورب نسبت به لبه برنده ۴۴/۸٪ و عمود نسبت به لبه برنده به میزان ۶۶/۵٪ نسبت به ابزار معمولی کاهش یافته‌است. سایش کمتر در حالت عمود، می‌تواند به دلیل انتقال بیشتر گرما از ناحیه برشی و کاهش چسبندگی بین ابزار و قطعه‌کار باشد. آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در انجام آزمون‌ها به‌عنوان قطعه‌کار، یک فلز نرم و شکل‌پذیر با دمای ذوب پایین است. مته HSS مورد استفاده نیز در ماشینکاری خشک به سرعت داغ می‌شود. ترکیب حرارت بالا و فشار زیاد باعث می‌شود آلومینیوم به سطح مته بچسبد. در حالت میکروشیار موازی با لبه برش، جهت حرکت مته روی دیواره سوراخ، عمود بر میکروشیارها است. میکروشیارهای موازی مانند دام عمل کرده و آلومینیوم را به دام می‌اندازد. آلومینیوم داخل میکروشیارها متراکم و منجمد می‌شود و لبه انباشه[1] ایجاد می‌کند. هنگام جدا شدن این لبه انباشته، ذراتی نیز از بدنه مته جدا می‌شود. به‌عبارت دیگر، مکانیزم سایش چسبنده باعث افزایش سایش در این حالت است. همچنین میکروشیارهای موازی با لبه برنده مانند یک سد حرارتی عمل می‌کنند و مانع از انتقال حرارت کافی از لبه برنده به بدنه مته می‌شوند. این پدیده باعث افزایش حرارت در ناحیه لبه برنده و درنتیجه، افزایش تغییرشکل یا سایش ابزار می‌شود. در حالت عمود به لبه برش، میکروشیارها هم‌راستا با جهت لغزش مته روی دیواره قطعه‌کار و حرکت براده قرار دارند. بنابراین مانعی برای حرکت ذرات برش یافته آلومینیوم وجود ندارد و مساحت تماس واقعی و درنتیجه، اصطکاک کاهش پیدا می‌کند. همچنین در حالت میکروشیارهای عمود بر لبه برنده، میکروشیارهای عمودی باعث انتقال حرارت بیشتر از لبه برنده به بدنه مته می‌شود و دمای محل برش را کاهش می‌دهد. کاهش حرارت در ناحیه لبه برنده باعث کاهش سایش ابزار می‌شود.

۳- ۱- ۱- بهینه سازی سایش ابزار

هدف از بهینه‌سازی سایش ابزار، کمینه کردن مقدار آن است. در این تحقیق برای بهینه‌سازی از نرم‌افزار مینی‌تب و روش بهینه‌سازی سطح پاسخ استفاده شده‌است. استفاده از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی، به دلیل وجود اثرات متقابل توصیه می‌شود؛ زیرا روش سطح پاسخ با برازش یک مدل درجه‌کامل (شامل جمله‌های خطی، متقابل و درجه‌دو) قادر است سطح بهینه را در حضور برهم‌کنش‌های پیچیده بیابد. روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی قادر به یافتن نقطه بهینه در فضای پیوسته متغیرها با دقت بالا و هزینه محاسباتی کمتر نسبت به روش‌های گرادیانی است. در این پژوهش، عرض میکروشیارها، فاصله بین میکروشیارها و زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برش به عنوان متغیر مستقل و سایش سطح آزاد ابزار به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده‌است. در جدول ۴ مقادیر بهینه پیش‌بینی شده برای پارامترهای ورودی و سایش پیش‌بینی‌شده ابزار ارائه شده‌است.

با توجه به جدول۴، مقادیر ارائه شده برای حالت بهینه در بین ۱۵ آزمایش اصلی نیست. کمترین میزان سایش ابزار اندازه‌گیری‌شده ۳۳۶۴۹۹ میکرومتر

1. Built up edge (BUE)

جدول ۴. مقادیر بهینه پارامترهای ورودی و سایش ابزار پیش‌بینی شده با روش سطح پاسخ.

Table 4. Optimal values of the input parameters and the predicted tool wear using the response surface methodology.

عرض میکروشیار (µm)	فاصله بین میکروشیارها (µm)	زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده (درجه)	سایش سطح آزاد ابزار (μm^2)
۲۰۰	۴۰۰	۹۰	۳۲۶۵۸۵

مربع و مربوط به آزمایش شماره ۴ با عرض میکروشیار ۴۰۰ و فاصله بین میکروشیارهای ۳۰۰ میکرومتر با زاویه عمود نسبت به لبه برنده است. با انجام آزمایش بهینه می‌توان به سایش سطح ۳۲۶۵۸۵ میکرومترمربع رسید که نسبت به ابزار معمولی سایش ابزار را به میزان ۷۷/۶ درصد بهبود می‌دهد.

۳- ۲- پلیسه سوراخ

با پیشروی مته داخل سوراخ، دمای برش افزایش پیدا می‌کند. افزایش دمای برش در سمت خروجی سوراخ باعث ایجاد پلیسه بزرگ‌تر نسبت به لبه ورودی می‌شود [۹]. به این دلیل در پژوهش حاضر با آزمایش‌های تجربی انجام‌شده با استفاده از ابزارهای میکرو طرح‌دار و معمولی، عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ مورد بررسی قرار گرفته‌است. جدول ۵ میانگین عرض پلیسه لبه خروجی سوراخ پس از هر آزمایش تجربی را نشان می دهد. شکل ۶ تأثیر پارامترهای ورودی بر عرض پلیسه لبه خروجی را نشان می دهد.

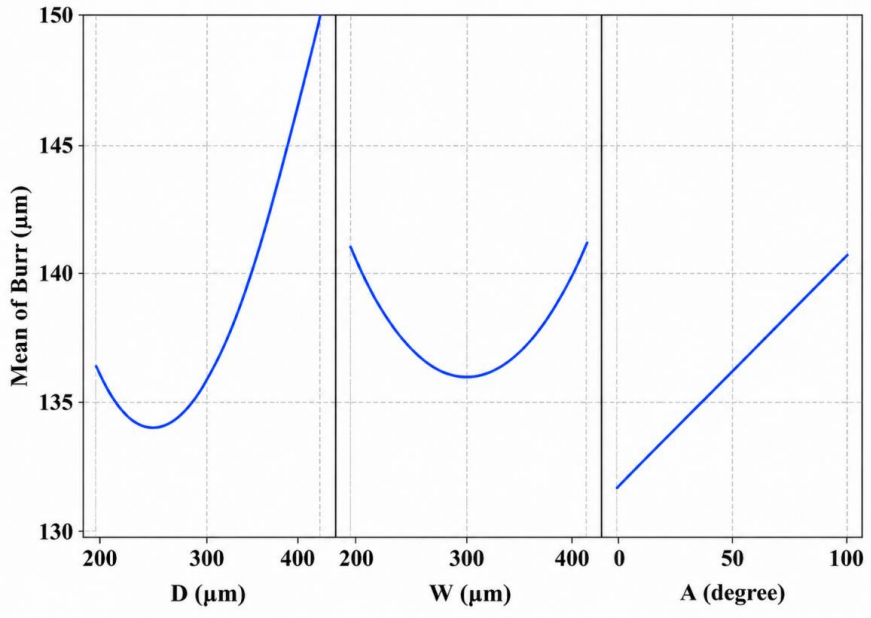
میزان عرض پلیسه در ابزار با فاصله بین میکروشیارهای ۲۰۰ میکرومتر ۴۲/۷ ٪، ۳۰۰ میکرومتر ۴۲/۲٪ و ۴۰۰ میکرومتر ۳۶/۷٪ نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته‌است. با توجه به شکل ۶ تقریباً می‌توان گفت با افزایش فاصله بین میکروشیارها میزان عرض پلیسه نیز افزایش پیدا می‌کند. هنگام میکروطرح‌دار کردن سطح ابزار چندین عامل تغییر می‌کند که تعامل بین آن‌ها مشخص می‌کند که خروجی‌های فرآیند چگونه تغییر می‌کند. با زیاد شدن فاصله میکروشیارها از یکدیگر، میزان تماس قطعه‌کار/ ابزار افزایش می‌یابد. ولی از طرفی کاهش تعداد طرح‌ها بر واحد سطح، به دلیل مداخله کمتر روی ابزار در مواردی باعث کاهش پدیده تضعیف مکانیکی ابزار می‌شود که در ابزارهای طرح‌دار قابل مشاهده است. با زیاد شدن فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر، این تغییرات سطح تماس و میزان تضعیف مکانیکی ابزار یکدیگر را خنثی کرده‌اند و میزان پلیسه تقریباً ثابت مانده‌است. ولی افزایش فاصله بین میکروشیارها از ۳۰۰ به ۴۰۰ میکرون، از طریق دو مکانیسم همزمان به کاهش عرض پلیسه خروجی کمک می‌کند. هنگامی که مته در سوراخ پیشروی می‌کند، سطح آزاد مته به دیواره داخلی سوراخ ساییده می‌شود. این تماس مداوم، تنش برشی زیادی به دیواره وارد کرده و فلز را به سمت پایین (مسیر خروج) فشار می‌دهد. این فلزات رانده‌شده، در نهایت به حجم پلیسه خروجی اضافه می‌شوند. در فاصله ۳۰۰ میکرون دیواره‌های بین میکروشیارها نازک هستند، سریع‌تر تحت اصطکاک تغییر شکل می‌دهند، داغ می‌شوند و ضریب اصطکاک بالایی ایجاد می‌کنند که جریان فلز دیواره به سمت خروجی را تشدید می‌کند. در فاصله ۴۰۰ میکرون دیواره‌های پهن‌تر صلبیت خود را حفظ کرده، دفرمه نمی‌شوند و به دلیل توزیع بهتر تنش تماسی، ضریب اصطکاک کمتری دارند؛ در نتیجه، تنش برشی مماس کاهش یافته و فلز کمتری به سمت خروجی سوراخ جریان می‌یابد. پلیسه خروجی زمانی تشکیل می‌شود که فلز انتهای سوراخ، تحت بارهای مکانیکی و حرارتی شدید، رفتار انعطاف‌پذیر پیدا کرده و به جای برش خوردن، خم شود. در فاصله ۳۰۰ میکرون دیواره‌های نازک بین میکروشیارها حرارت را در خود محبوس می‌کنند و نوک ابزار به شدت داغ می‌شود. این حرارت به لبه انتهایی قطعه‌کار منتقل شده، آن را نرم و شکل‌پذیر می‌کند و عرض پلیسه افزایش می‌یابد. در فاصله ۴۰۰ میکرون دیواره‌های پهن‌تر حرارت را به عمق مته هدایت می‌کنند. با خنک‌تر ماندن ابزار، دمای قطعه‌کار در لبه خروجی پایین‌تر می‌ماند؛ بنابراین به جای کش آمدن و خم شدن پلاستیک، با مکانیزم برش تمیز جدا می‌شود و عرض پلیسه کاهش می‌یابد.

میانگین عرض پلیسه در مقادیر مختلف عرض میکروشیار به یکدیگر نزدیک است. با توجه به شکل ۶ نحوه رفتار پلیسه با تغییر عرض میکروشیار نشان می‌دهد که با تغییر هندسه میکروشیارها ممکن است پارامترهای خروجی به‌صورت خطی و یکنواخت تغییر نکنند. به عبارت دیگر، ممکن است تغییر هندسه میکروشیار تا جایی باعث افزایش بازدهی فرآیند شود و بیش از آن، از بازدهی بکاهد. در این مورد خاص، با افزایش عرض میکروشیار

جدول ۵. میانگین عرض پلیسه اندازه‌گیری شده سوراخ‌ها در آزمایش‌های تجربی.

Table 5. Average measured burr width of the holes in the experimental tests.

شماره آزمایش	عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ (µm)				
	سوراخ اول	سوراخ دوم	سوراخ سوم	میانگین سه سوراخ	انحراف استاندارد
۱	۲۹۲	۸۰	۱۸۴	۱۸۵	۱۰۶/۰۱
۲	۲۴۷	۱۱۵	۲۰۴	۱۸۹	۶۷/۳۲
۳	۱۴۶	۱۷۴	۱۴۸	۱۵۶	۱۵/۶۲
۴	۱۶۴	۱۴۲	۸۲	۱۲۹	۴۲/۴۴
۵	۱۲۴	۱۴۷	۱۱۰	۱۲۷	۱۸/۶۸
۶	۱۳۵	۱۱۹	۱۸۹	۱۴۸	۳۶/۶۸
۷	۱۰۷	۱۶۳	۱۹۴	۱۵۵	۴۴/۰۹
۸	۱۰۲	۱۶۰	۱۱۹	۱۲۷	۲۹/۸۲
۹	۱۸۰	۹۲	۱۳۱	۱۳۴	۴۴/۰۹
۱۰	۱۶۱	۱۲۹	۲۱۹	۱۷۰	۴۵/۶۲
۱۱	۱۴۷	۱۳۱	۱۵۹	۱۴۶	۱۴/۰۵
۱۲	۱۲۶	۱۴۶	۱۳۵	۱۳۶	۱۰/۰۲
۱۳	۱۲۲	۱۴۰	۱۴۱	۱۳۴	۱۰/۶۹
۱۴	۷۵	۱۰۳	۱۲۹	۱۰۲	۲۷/۰۱
۱۵	۱۰۴	۸۹	۱۱۲	۱۰۲	۱۱/۶۸
۱۶	۸۲	۳۲۸	۳۱۳	۲۴۱	۱۳۷/۹۰



شکل ۶. تغییرات میانگین عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ نسبت به فاصله(D)، عرض(W) و زاویه قرارگیری (A) میکروشیار.

Fig. 6. Variations of the average burr width at the exit edge of the hole with respect to the spacing (D), width (W), and orientation angle (A) of the micro-grooves

از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرون، فضای کافی برای به دام انداختن ذرات فرسایشی ساینده فراهم می‌شود و اصطکاک روی سطح آزاد مته را کاهش می‌دهد. کاهش اصطکاک یعنی تولید حرارت کمتر؛ بنابراین، فلز خروجی سوراخ دچار نرمی حرارتی شدید نمی‌شود و با حفظ سختی خود، به صورت شکننده بریده می‌شود که نتیجه آن کاهش عرض پلیسه است. با افزایش بیشتر عرض میکروشیار تا ۴۰۰ میکرومتر، یک پدیده مکانیکی بر مزایای تریبولوژیکی غلبه می‌کند. با عریض‌تر شدن میکروشیارها، مساحت دیواره‌هایی که وظیفه تحمل نیروهای عمودی قطعه‌کار را دارند کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، تنش تماسی و فشار موضعی روی دیواره‌ها زیاد می‌شود. این فشار شدید مکانیکی در لحظه خروج مته از سوراخ، به عنوان یک نیروی متمرکز بر لبه انتهایی سوراخ عمل کرده و آن را به سمت بیرون هل می‌دهد و باعث افزایش تغییر شکل پلاستیک و بزرگتر شدن عرض پلیسه می‌شود. مشاهده نحوه اثر فاصله بین میکروشیارها بر میزان پلیسه نیز همانند اثر عرض میکروشیار نشان می‌دهد که بهینه‌سازی هندسی میکروطرح‌ها اهمیت زیادی دارد. به‌نظر می‌رسد که در نهایت برای هر فرآیند برش خاص با جنس قطعه‌کار خاص، باید مقادیر بهینه هندسی میکروطرح‌ها را به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد.

با توجه به شکل ۶ با افزایش زاویه میکروشیار نسبت به لبه برش، میزان عرض پلیسه اندکی افزایش پیدا می‌کند. با افزایش زاویه قرارگیری میکروشیارها، میزان تلاقی طرح‌ها با لبه برشی بیشتر شده و باعث تضعیف مکانیکی و کاهش طول مؤثر لبه برش می‌شود. این پدیده در نهایت باعث می‌شود که مقداری از ماده به‌جای بریده شدن، تغییر شکل پلاستیک پیدا کند و منجر به افزایش مقدار پلیسه شود.

۳- ۲- ۱- تحلیل واریانس عرض پلیسه

به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسی میکروشیار بر عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ، تحلیل واریانس برای عرض پلیسه در جدول ۶ ارائه شده‌است. در این تحلیل، مقایسه انحراف کل نمونه ها با استفاده از آزمون T و تعیین سطح معناداری نیز با استفاده از P-مقدار انجام شده‌است. P- مقدار کمتر از ۰/۰۵، به عنوان پارامتر معنادار در نظر گرفته شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود P - مقدار برای پارامترهای عرض میکروشیار و فاصله بین میکروشیارها از ۰/۰۵ کمتر است و می‌توان نتیجه گرفت که این دو پارامتر بر میزان عرض پلیسه تأثیر معنادار دارند. مقدار R^2 برای تابع پاسخ عرض پلیسه، ۷۳/۶ درصد به دست آمده‌است که نشان دهنده دقت مناسب تابع پاسخ است. در قسمت اثرات متقابل، تعامل دوتایی فاصله و عرض میکروشیارها بسیار نزدیک به آستانه معناداری است ولی سایر تعاملات دوتایی متقابل اثر معنادار ندارند. علاوه براین، اثر متقابل سه‌طرفه بین عرض، فاصله و زاویه بر متغیر وابسته معنادار است (t = -3.052, p = 0.016). این بدان معناست که اثر متقابل بین عرض و فاصله به سطح زاویه نیز بستگی دارد. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که تفسیر اثرات اصلی پارامترهای ورودی به تنهایی کافی نیست و باید تعاملات آنها نیز مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۶. آنالیز واریانس برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی میکروشیار بر عرض پلیسه.

Table 6. Analysis of variance (ANOVA) for investigating the effect of the geometric parameters of the micro-grooves on the burr width.

منبع تغییرات	برآورد	خطای استاندارد	آماره t	p-مقدار
ثابت	-۱۸۴/۲۷۲	۹۴/۷۲۲	-۱/۹۴۵	۰/۰۸۸
عرض میکروشیار	۰/۹۱۵	۰/۲۷۸	۳/۲۹۵	۰/۰۱۱
فاصله بین میکروشیارها	۰/۷۶۰	۰/۳۱۱	۲/۴۴۶	۰/۰۴۰
زاویه قرارگیری میکروشیار	۰/۴۳۰	۰/۶۷۵	۰/۶۳۷	۰/۵۴۲
فاصله × عرض	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	-۲/۲۵۵	۰/۰۵۴
فاصله × زاویه	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۱/۷۱۸	۰/۱۲۴
فاصله × عرض × زاویه	$۱/۹۸۱\times۱۰^{-۵}$	۰/۰۰۰	-۳/۰۵۲	۰/۰۱۶

جدول ۷. مقادیر بهینه به دست آمده از روش سطح پاسخ و عرض پلیسه پیشبینی شده.

Table 7. Optimal values obtained from the response surface methodology and the predicted burr width.

عرض میکروشیار (µm)	فاصله بین میکروشیارها (µm)	زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده (درجه)	عرض پلیسه (µm)
۲۰۰	۲۰۰	۰	۷۹

مقدار R^2 تعدیل شده[1] برابر با 53.74% است؛ یعنی این مدل حدود ۵۴٪ از تغییرات متغیر هدف را توضیح می‌دهد. این مقدار نشان دهنده آن است که مدل قابل قبول ولی دارای بیش‌برازش است، زیرا تعداد نمونه‌های جمع‌آوری شده کم و تعداد متغیرهای در نظر گرفته شده زیاد است. برای بررسی اینکه آیا مانده‌ها[2] دارای توزیع نرمال هستند یا خیر، آزمون‌های کلموگروف–اسمیرنوف و شاپیرو–ویلک انجام شده‌است. مقدار آماره کلموگروف–اسمیرنوف برابر با ۰/۱۷۲ با p–مقدار ۰/۲ و مقدار آماره شاپیرو–ویلک برابر با ۰/۹۶۴ با p–مقدار ۰/۷۶۹ به‌دست آمد. این مقادیر نشان می‌دهد که مانده‌ها دارای توزیع نرمال هستند.

برای بررسی نرمال بودن مانده‌ها، نمودار احتمال نرمال مانده‌ها و برای بررسی واریانس مانده‌ها، نمودار مانده‌ها در مقابل مقادیر برازش شده مورد بررسی قرار گرفت. این نمودارها نرمال بودن مانده‌ها را مورد تأیید قرار می‌دهد و نشان می دهد که مانده‌ها دارای واریانس ثابت هستند.

۳– ۲– ۲– بهینه سازی عرض پلیسه

هدف از بهینه‌سازی عرض پلیسه، کمینه کردن مقدار آن است. عرض میکروشیارها، فاصله بین میکروشیارها و زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده به‌عنوان متغیر مستقل و عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده‌است. در جدول ۷ مقادیر بهینه پیش‌بینی شده برای پارامترهای ورودی و عرض پلیسه پیش‌بینی شده ارائه شده‌است.

مقادیر ورودی پیش‌بینی شده بهینه در بین ۱۵ عدد آزمایش اصلی نیست. کمترین میزان اندازه‌گیری شده عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ ۱۰۲ میکرومتر و مربوط به آزمایش شماره ۱۴ با عرض میکروشیار ۲۰۰ و فاصله بین میکروشیارهای ۳۰۰ میکرومتر با زاویه صفر درجه نسبت به لبه برنده و آزمایش شماره ۱۵ با عرض میکروشیار ۲۰۰ و فاصله بین میکروشیارهای ۲۰۰ میکرومتر با زاویه ۴۵ درجه نسبت به لبه برنده است. با انجام آزمایش در شرایط بهینه می‌توان به عرض پلیسه ۷۹ میکرومتر رسید که نسبت به سوراخ ایجاد شده توسط ابزار معمولی، به میزان ۶۷/۲ درصد کاهش می‌یابد.

۳– ۲– ۳– بهینه سازی هم‌زمان سایش ابزار و عرض پلیسه

به‌دلیل اهمیت هم‌زمان هر دو پارامتر خروجی در این تحقیق یعنی سایش ابزار و عرض پلیسه، بهینه‌سازی چند هدفه با هدف به حداقل رساندن هم‌زمان این دو پارامتر خروجی نیز با روش سطح پاسخ انجام شده‌است. جدول ۸ مقادیر بهینه پارامترهای ورودی و مقادیر پیش‌بینی شده سایش سطح آزاد ابزار و عرض پلیسه هنگام استفاده از این سطوح بهینه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که پارامترهای بهینه به‌دست آمده در جدول ۸ متفاوت از جداول ۴ و ۷ است که بهینه‌سازی تک هدفه انجام شده‌بود.

۴– نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر پارامترهای هندسی میکروشیازهای ایجاد شده روی سطح آزاد مته بر سایش ابزار و پلیسه در فرآیند سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم بررسی شده‌است. سه پارامتر عرض میکروشیار، فاصله بین میکروشیارها و زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده مته به‌عنوان پارامترهای ورودی و سایش سطح آزاد مته و پلیسه لبه خروجی سوراخ به‌عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته شده‌است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش عرض میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر و همچنین با افزایش فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، سایش ابزار کاهش یافته‌است. افزایش زاویه قرارگیری میکروشیار نسبت به لبه مته از صفر تا ۴۵ درجه باعث افزایش و از ۴۵ تا ۹۰ درجه باعث کاهش سایش ابزار

1. Adjusted R^2
2. Residuals

جدول ۸. مقادیر بهینه به دست آمده از بهینه‌سازی چند هدفه و سایش ابزار و عرض پلیسه پیش‌بینی شده.

Table 7. Optimal values obtained from multi-objective optimization and the predicted tool wear and burr width.

عرض میکروشیار (µm)	فاصله بین میکروشیارها (µm)	زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده (درجه)	سایش سطح آزاد ابزار (μm^2)	عرض پلیسه (µm)
۴۰۰	۳۱۷	۹۰	۵۴۰۶۴۴	۱۱۶

شده‌است. برای رسیدن به کمترین میزان سایش سطح ابزار، باید از ابزار با عرض میکروشیار ۲۰۰ میکرومتر، فاصله بین میکروشیارهای ۴۰۰ میکرومتر و زاویه قرارگیری عمود بر نوک مته استفاده کرد که نسبت به ابزار بدون طرح، سایش مته را به میزان ۷۷/۶ درصد بهبود می دهد. همچنین با افزایش عرض میکروشیار از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر، عرض پلیسه لبه خروجی سوراخ کاهش و با افزایش از ۳۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر عرض پلیسه افزایش یافته‌است. با افزایش فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر عرض پلیسه ثابت است و با افزایش از ۳۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، عرض پلیسه افزایش یافته‌است. افزایش زاویه قرارگیری میکروشیار نسبت به لبه برنده مته نیز باعث افزایش عرض پلیسه لبه خروجی سوراخ شده‌است. برای رسیدن به کمترین میزان عرض پلیسه باید از ابزار با عرض و فاصله بین میکروشیارهای ۲۰۰ میکرومتر و موازی با لبه برنده مته استفاده کرد که عرض پلیسه را نسبت به ابزار بدون طرح به میزان ۶۷/۲ درصد بهبود می‌دهد.

پژوهش حاضر جزء اولین مطالعات منتشر شده در زمینه بررسی اثر هندسی و تراکم میکروشیار ایجاد شده روی مته بر فرآیند سوراخکاری است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که یافتن هندسه بهینه طرح برای حالت‌های مختلف سوراخکاری نیاز به انجام پژوهش‌های بیشتری در این زمینه دارد و می‌تواند موضوع تحقیقات زیادی در آینده باشد. تحقیق حاضر دارای محدودیت‌هایی است که در مطالعات آینده باید مورد توجه قرار گیرد. یکی از این محدودیت‌ها، عدم اندازه‌گیری و بررسی اثر عمق میکروطرح‌ها است که می‌تواند روی نتایج اثرگذار باشد. استفاده از سایر طرح‌ها مخصوصاً طرح‌های ایده گرفته شده از طبیعت یا بایوطرح‌ها و همچنین انجام آزمایش روی جنس‌های مختلف قطعه‌کار باعث گسترش دانش در زمینه سوراخکاری با ابزارهای طرح‌دار می‌شود. از دیگر محدودیت‌های پژوهش حاضر، عدم بررسی نیروی برشی و دمای ماشینکاری و همچنین زمان ماشینکاری (یا تعداد سوراخ ایجادشده) محدود است. علاوه‌بر این‌ها، آزمون‌های تحقیق حاضر با پارامترهای ماشینکاری ثابت انجام شده‌است و استفاده از سرعت دورانی مته، نرخ پیشروی، قطر مته و عمق سوراخ‌های مختلف در سوراخکاری با ابزار طرح‌دار باعث می‌شود نتایج جامع‌تری به دست آید. در کنار این پیشنهادات، استفاده از هندسه و جنس‌های مختلف مته، انجام آزمون‌ها در حالت‌های روانکاری کمینه و معمولی (یا مرطوب) و بررسی اثر تراکم میکروطرح‌های ایجادشده روی حاشیه و سطح مارپیچ مته نیز می‌تواند در تحقیقات آینده مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

منابع

[1] D.Y. Pimenov, M. Kiran, N. Khanna, G. Pintaude, M.C. Vasco, L.R.R. da Silva, K. Giasin, Review of improvement of machinability and surface integrity in machining on aluminum alloys, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 129(11) (2023) 4743-4779.

[2] M.A. Makhesana, K. Patel, N. Ghetiya, R. Binali, M. Kuntoğlu, Evaluation of drilling and hole quality characteristics in green machining aluminium alloys: A new approach towards green machining, Journal of Manufacturing Processes, 129 (2024) 176-186.

[3] A. Salem, H. Hegab, H.A. Kishawy, Experimental investigation of the derivative cutting when machining AISI 1045 with micro-textured cutting tools, Metals, 13(9) (2023) 1587.

[4] D. Arulkirubakaran, V. Senthilkumar, V. Kumawat,

[11] N.A. Sristi, P.B. Zaman, A review of textured cutting tools' impact on machining performance from a tribological perspective, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 133(9) (2024) 4023-4057.

[12] S. Ullah, Z. Liang, Y. Ma, S. Xing, Y. Du, M. Zhou, J. Xu, T. Zhou, X. Wang, A comprehensive review of mechanical micro-drilling: Toward a tool-process-quality framework from tool fabrication to micro-hole quality, Journal of Materials Research and Technology, 42 (2026) 10550-10587.

[13] E. Öztürk, K. Kadir, Drilling performance of micro-textured twist drill bit for TI-6AL-4V alloy: validated FEM and statistical approaches, Journal of Manufacturing Processes, 115 (2024) 342-351.

[14] Y. Liu, J. Deng, W. Wang, R. Duan, R. Meng, D. Ge, X. Li, Effect of texture parameters on cutting performance of flank-faced textured carbide tools in dry cutting of green Al2O3 ceramics, Ceramics International, 44(11) (2018) 13205-13217.

[15] S.H. Musavi, M. Sepehrikia, B. Davoodi, S.A. Niknam, Performance analysis of developed micro-textured cutting tool in machining aluminum alloy 7075-T6: assessment of tool wear and surface roughness, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 119(5) (2022) 3343-3362.

[16] W. Chang, J. Sun, X. Luo, J.M. Ritchie, C. Mack, Investigation of microstructured milling tool for deferring tool wear, Wear, 271(9-10) (2011) 2433-2437.

Effect of micro-textured tools on machining of Ti–6Al–4V alloy: an experimental and numerical approach, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 54 (2016) 165-177.

[5] J. Xie, M.-J. Luo, J.-L. He, X.-R. Liu, T.-W. Tan, Micro-grinding of micro-groove array on tool rake surface for dry cutting of titanium alloy, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13(10) (2012) 1845-1852.

[6] S.R. Agari, A. Lakshmikanthan, C.P. Selvan, K.S.V. Sekar, Improvement in the Machining Processes by Micro-Textured Tools during the Turning Process, Engineering Proceedings, 61(1) (2024) 2.

[7] L. Yang, W. Ma, F. Gao, S. Xi, Effect of groove width on micromachine groove texture tribology characteristics of 0Cr17Ni7Al, Coatings, 12(8) (2022) 1221.

[8] S. Niketh, G. Samuel, Drilling performance of micro textured tools under dry, wet and MQL condition, Journal of Manufacturing Processes, 32 (2018) 254-268.

[9] S. Niketh, G. Samuel, Surface textured drill tools—An effective approach for minimizing chip evacuation force and burr formation during high aspect ratio machining of titanium alloy, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 143(4) (2021) 041005.

[10] T.D. Ling, P. Liu, S. Xiong, D. Grzina, J. Cao, Q.J. Wang, Z.C. Xia, R. Talwar, Surface texturing of drill bits for adhesion reduction and tool life enhancement, Tribology Letters, 52(1) (2013) 113-122.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. BayazGhorbani, M. M. Abootorabi, A. A. Jafari KhosroAbadi , Experimental Investigation of the Effects of Micro-Texture Geometrical Parameters on Tool Wear and Hole Burr Formation in Aluminum Drilling Using a Textured Drill, Amirkabir J. Mech Eng., 58(3) (2026) 349-366.

DOI: 10.22060/mej.2026.25853.7974