مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16، ص‌ص 332-338

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی و مقایسه مشخصه‌های کیفی سوراخ تولیدی در فرایند فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی

محمدحسین سعادت‌بخش[1]، امیر راستی[2]، محمدحسین صادقی[3*]، حامد حسن‌پور[2]، احمدرضا امیددودمان[1]

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 08 شهریور 1393
پذیرش: 07 آبان 1393
ارائه در سایت: 24 آبان 1393

کلید واژگان:
کیفیت سوراخ
فرزکاری مارپیچ
سوراخ‌کاری
تلرانس‌های ابعادی و هندسی

چکیده

روش فرزکاری مارپیچ به عنوان یکی از فرایندهای نوین برای تولید سوراخ با کیفیت بالا مطرح است. در این روش، ابزار فرز با حرکت روی یک مسیر مارپیچ، سوراخی با کیفیت و راندمان بالا تولید می‌کند. قطر سوراخ را می‌توان با تغییر قطر این مسیر مارپیچ تعیین کرد. با توجه به اهمیت کیفیت سوراخ در قطعات صنعتی، نیاز است تا این فرایند با روش سنتی ایجاد سوراخ مقایسه شود. به همین منظور، مقایسه فرایندی دو روش فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی در این تحقیق صورت پذیرفت. 8 آزمایش با درنظرگرفتن 2 سطح سرعت برشی و نرخ پیشروی روی نمونه‌هایی از جنس فولاد AISI 4340 با سختی 45 راکول‌سی انجام گرفت. نوع سیستم روان‌کاری با حداقل سیال برشی و دو نازل پاشش بود. از روان‌کار روغن معدنی برش بهران 11 با دبی روغن 100 میلی‌لیتر بر ساعت، و فشار هوا 4 بار در این سیستم استفاده شد. خروجی‌های مورد بررسی شامل نیروی ماشین‌کاری، زبری‌سطح، اندازه اسمی سوراخ، تلرانس گردی و استوانه‌ای بودند. بر اساس نتایج بدست آمده، سرعت برشی تنها پارامتری بود که اثر مثبتی بر تمامی معیارهای کیفیت سوراخ تولیدی داشت. از سوی دیگر، فارغ از پارامترهای برشی، فرایند فرزکاری مارپیچ، نیروهای ماشین‌کاری کمتر، زبری سطح پایین‌تر و تلرانس‌های هندسی مطلوب‌تری را نسبت به سوراخ‌کاری معمولی نتیجه داد.

Compare and study of hole quality characteristics in helical milling and conventional drilling

Mohammad H. Saadatbakhsh[1], Amir Rasti[1], Mohammad H. Sadeghi[1*], Hamed Hassanpour[1], Ahmad R. Omiddodman[1]

1- 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 30 August 2014
Accepted 29 October 2014
Available Online 15 November 2014

Keywords:
Hole Quality
Helical Milling
Drilling
Geometrical Dimensions and Tolerances

ABSTRACT

Helical milling is known as an innovative method for producing high quality holes. In this method, milling tool efficiently generates a high quality hole by moving along a helical path. The hole diameter can be adjusted through the diameter of this helical path. Regarding accuracy of hole in industrial parts, it is necessary to compare this method with conventional hole drilling. Therefore, in this study helical milling and conventional drilling have been compared. Eight experiments were conducted considering two levels of cutting speed and feed rate on the samples made of AISI 4340 steel at 45 HRC. Minimum quantity lubricant system with two nozzles was used. 100 ml/h of Behran-11 mineral oil at air pressure of 4 bar was employed in this system. Machining forces, surface roughness, nominal diameter, roundness, and cylindricity were output parameters. According to the obtained results, cutting speed was the only one with positive effect on all qualitative parameters of the machined holes. On the other hand, independency of cutting parameters, helical milling lessened machining forces, surface roughness, and geometrical tolerances in comparison with conventional drilling.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، فرایندهای ماشین‌کاری با عملکرد بالا[1] گسترش روزافزونی داشته‌اند. برای دستیابی به انعطاف‌پذیری بالای تولید و افزایش بهره‌وری، تکنولوژی به سمت یکپارچه‌سازی فرایندهای تولید در حال حرکت است.

برای مثال سنگ‌زنی جای خود را به ماشین‌کاری سخت داده است، بطوری که برخی از مراحل کاری در فرایند ساخت قطعات سخت (چند مرحله عملیات حرارتی و ماشین‌کاری) حذف شده، در عین حالی‌که محصولی با کیفیت بهتر و در زمان کمتر قابل تولید می‌باشد [1].

سوراخ‌کاری همواره از نظر کیفیت نهایی قطعه به لحاظ ماهیت عملکردی و مباحث انطباقی از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. در فرایند سوراخ‌کاری

1- High Performance Machining

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. H. Saadatbakhsh, A. Rasti, M. H. Sadeghi, H. Hassanpour, A. R. Omiddodman, 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)

Archive of SID
www.SID.ir

معمولی، ترکیبی از خشن‌تراشی با ابزار مته و سپس پرداخت‌کاری با ابزار برقو انجام می‌شود. با توجه به هندسه گوه‌ای شکل مته مارپیچ و صفر بودن سرعت برشی در نوک ابزار، فشار بالایی حین انجام عملیات برای شکافتن ماده و درگیری لبه برشی با قطعه‌کار به وجود می‌آید [2]. در واقع مکانیزم باربرداری با مته، باعث تغییر شکل پلاستیک شدید در موضع برش می‌شود که این امر، نیرو و اصطکاک را شدیداً بالا می‌برد.

در مورد سوراخ‌کاری معمولی فولاد سختی بالا تحقیقات اندکی انجام گرفته است که به ذکر نمونه‌ای از آن بسنده می‌شود. کلدول و همکارانش [3] پژوهشی در زمینه سوراخ‌کاری دو فولاد سخت‌شده H13 و D2 انجام دادند. ابزار کاربایدی با پوشش TiAlN به خوبی در عملیات سوراخ‌کاری قطعات با سختی بالای 50 راکول‌سی مورد استفاده قرار گرفت. تنها مشکل این فرایند، سایش ابزار مته در برش‌های طولانی به خاطر سختی بالای قطعات بود.

اخیراً روش فرزکاری مارپیچ[1] به عنوان فرایندی نوین در حوزه ماشین‌کاری با عملکرد بالا مطرح شده است. از ویژگی‌های برجسته این فرایند می‌توان به انعطاف‌پذیری بالای آن در تولید سوراخ با هر قطری و کاهش زمان تولید اشاره کرد. در این روش، طی چرخش حول مسیر مارپیچ به‌خاطر وجود فضای بیشتر، تماس کمتری بین ابزار و سطح قطعه‌کار به نسبت سوراخ‌کاری معمولی دارد. از این رو استفاده از فرزکاری مارپیچ در ساخت قطعات مورد کاربرد در صنایع مختلف، اعم از هوافضا، نیروگاهی و قالب‌سازی در حال گسترش است.

طی سال‌های اخیر، در خصوص استفاده از روش فرزکاری مارپیچ چندین پژوهش صورت گرفته است. دنکنا و همکارانش [4] فرایند فرزکاری مارپیچ را روی قطعه کامپوزیتی شامل تیتانیوم و فیبر انجام دادند و با تحلیل براده به این مهم رسیدند که در فرزکاری مارپیچ، ضخامت براده نتراشیده شده دارای رفتار سینوسی می‌باشد. در نتیجه براده‌های کوچک‌تری در این روش تولید می‌شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که به علت مکانیزم حرکتی سه جهته در فرزکاری مارپیچ، نیاز به ماشین‌ابزاری با صلبیت کافی بوده و فقدان این شرایط باعث به هم ریختن تلرانس‌ها و خطای ابعادی می‌شود. شان و همکارانش [5] مطالعاتی در زمینه افزایش عمق برش محوری (گام مارپیچ) فرزکاری مارپیچ انجام دادند و اذعان داشتند که طول مسیر ماشین‌کاری در فرایند فرزکاری مارپیچ بسیار بیشتر از سوراخ‌کاری معمولی است و با افزایش اندازه گام، طول این مسیر کاهش می‌یابد. نیروهای برشی و در پی آن لرزش و ارتعاشات ابزار نیز با افزایش گام مارپیچ بیشتر شد که این پدیده منجر به بدتر شدن کیفیت سوراخ گردید. لی و همکارانش [6] به بررسی کیفیت سوراخ در فرزکاری مارپیچ خشک آلیاژ Ti6Al4V پرداختند و گزارش کردند که بدترین کیفیت سوراخ در سوراخ‌کاری با ابزار ساییده شده به وجود می‌آید. علت این پدیده تولید حرارت بالاتر در استفاده از ابزار کندشده بود. در واقع با افزایش زمان ماشین‌کاری و به تبع آن با بالا رفتن سایش ابزار، کیفیت سطح نامطلوبی به وجود خواهد آمد. برینکسمیر و همکارانش [7] به تحلیل سینماتیک فرزکاری مارپیچ پرداختند و اعتقاد داشتند که تلرانس استوانه‌ای بودن و همچنین تلرانس‌های فرم با تعویض ابزارهای مته‌زنی، تغییر خواهند کرد. آن‌ها با توجه به کوچک بودن منطقه برش در فرزکاری مارپیچ و تقسیم آن به نواحی برش پیشانی و جانبی، احتمال تشکیل لبه انباشته[2] را کمتر دانستند. وانگ و همکارانش [8] به بررسی تحلیلی و تجربی نیروهای ماشین‌کاری در طول فرایند فرزکاری مارپیچ پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که با افزایش عمق برش، بار براده بیشتر شده و در نتیجه نیروهای ماشین‌کاری بالاتر می‌روند. همچنین با افزایش سرعت برشی، نیروهای برشی کاهش یافتند.

اما مطالعات محدودی در زمینه مقایسه فرایندی سوراخ‌کاری و فرزکاری مارپیچ انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. ایبر و همکارانش [9] به مقایسه تجربی دو فرایند فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی برای تولید سوراخ دقیق در فولاد ابزار AISI D2 با سختی بالا پرداختند. در فرزکاری مارپیچ، پروفیل سوراخ و زبری‌سطح دیواره آن، تا حدی بهبود یافت که نیاز به برقوزنی نداشت. همچنین نشان داده شد که پروفیل گردی در ابزار یکپارچه[3] بهتر از نوع اینسرتی[4] است. اُلورا و همکارانش [10] با مقایسه روش فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی روی آلیاژ تیتانیوم با ابزار سر کروی مشخص کردند که تلرانس ابعادی در حالت سوراخ‌کاری و تلرانس هم محوری در حالت فرزکاری مارپیچ نتایج بهتری را به همراه دارند. آن‌ها همچنین علت تغییر قطر سوراخ در ارتفاع‌های مختلف در هر دو فرایند را ناشی از خطای انحراف ابزار دانستند.

نکته مهم دیگر، نقش روانکار در فرایند تولید سوراخ است. غالباً در تولید سوراخ، به دلیل تماس مداوم ابزار با قطعه‌کار و فضای بسته ماشین‌کاری، مایعات برش با خاصیت روان‌کاری بالا به کار گرفته می‌شوند. از سوی دیگر، در ماشین‌کاری مواد سخت ماشین‌کاری شونده، علاوه بر تولید ذرات کاربید سخت، حرارت بالایی به وجود آمده که سایش ابزار را تشدید می‌کند. از این رو استفاده از سیستم‌های روان‌کاری کمینه[5] به عنوان جایگزین مناسبی برای سیال‌های برشی سنتی و در جهت جلوگیری از مشکلات گفته شده با هزینه به مراتب کمتر و کارآمدتر بیان می‌شود [11].

در همین زمینه ساساهارا و همکارانش [12] فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی را در حضور سیستم MQL روی آلیاژ آلومینیوم و با استفاده از روان‌کاری نیمه‌خشک انجام دادند و نتیجه گرفتند که در هنگام استفاده از یک نازل برای سیستم روان‌کاری، پروفیل مقطع دایره به یک‌طرف کشیده شده و در حالت دو نازله تلرانس‌های بهتری بدست خواهد آمد. همچنین نیرو، پلیسه، حرارت و پروفیل سوراخ تولیدی در حالت فرزکاری مارپیچ و با استفاده از روش MQL نتایج بهتری نسبت به سوراخ‌کاری معمولی داشته است.

بررسی‌های انجام شده نشان داد که تحقیقات کمی در زمینه مقایسه سوراخ‌کاری معمولی با فرایند نوین فرزکاری مارپیچ صورت گرفته است. بنابراین با توجه به اهمیت کیفیت سوراخ تولیدی در قطعات و مجموعه‌های صنعتی، نیاز است تا مزایا و محدودیت‌های این دو فرایند بررسی شود. از این‌رو در تحقیق حاضر، مقایسه تجربی مشخصه‌های خروجی ماشین‌کاری شامل نیرو، زبری سطح، تلرانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ با استفاده از فرایند فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی روی فولاد AISI 4340 به کمک سیستم روان‌کاری کمینه مورد مطالعه قرار گرفت. لازم به ذکر است که فرایند روان‌کاری با استفاده از دو نازل روغن‌پاش انجام گرفت. همچنین از روش فاکتوریل کامل بهره گرفته شد و اثر پارامترهای برشی بررسی شد.

2- مواد و تجهیزات مورد استفاده

در فرزکاری مارپیچ بر خلاف سوراخ‌کاری معمولی، قطر اسمی سوراخ نهایی ترکیبی از قطر ابزار و قطر مسیر مارپیچ است. شکل 1 سینماتیک فرزکاری

1- Helical Milling
2- Built-Up-Edge

3- Solid
4- Indexable
5- Minimum Quantity Lubrication(MQL)

www.SID.ir
Archive of SID

مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی را به تصویر کشیده است. در فرایند فرزکاری سه نوع حرکت همزمان، شامل چرخش ابزار به دور محور خود، چرخش حول دایره مسیر مارپیچ و حرکت محوری وجود دارد.

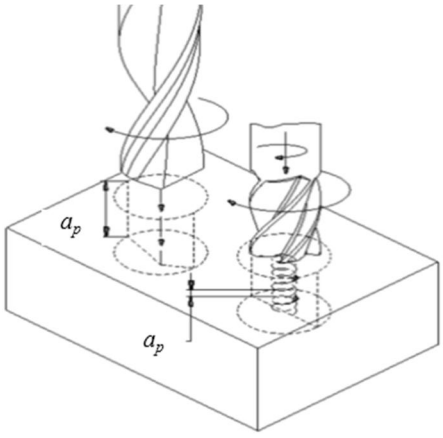
ماده‌ی بکار رفته در این پژوهش فولاد آلیاژی AISI 4340 با سختی 45 راکول‌سی بود. به‌منظور افزایش سختی، نمونه‌ها در کوره با دمای 870 درجه سانتی‌گراد آستنیته گشته، سپس به مدت 2 ساعت در دمای 425 درجه سانتی‌گراد برگشت داده شدند و در نهایت در حمام روغن به دمای محیط رسیدند. نمونه‌ها به شکل گرده فولادی با قطر 42 میلی‌متر و ارتفاع 15 میلی‌متر انتخاب شد.

تمامی آزمایش‌های فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری، روی دستگاه فرز سی‌ان‌سی[1] سه محوره کنترل همزمان مدل S1354A، با کنترلر میتسوبیشی[2] و حداکثر دوران اسپیندل 8000 دور بر دقیقه انجام شد. برنامه ماشین‌کاری توسط نرم افزار هایپرمیل[3] نوشته و وارد کنترلر دستگاه گردید.

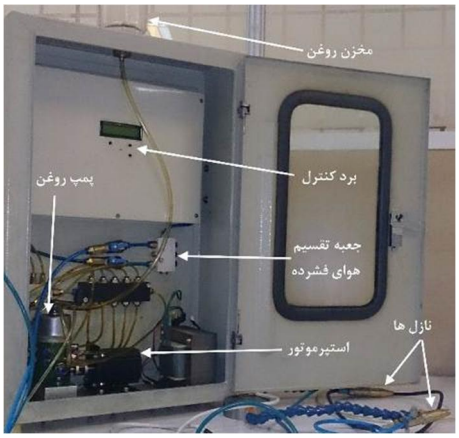
ابزار مته تنگستن کاربایدی با قطر 8 میلی‌متر برای انجام تست‌های سوراخ‌کاری و ابزار فرز از همان جنس، سرتخت یکپارچه‌ی 4 لبه، به قطر 6 میلی‌متر برای تست‌های فرزکاری مارپیچ استفاده شد. روکش هر دو ابزار TiAlN بود. به‌منظور مقایسه بهتر، جنس، روکش و شرکت سازنده‌ی هر دو ابزار یکسان می‌باشد. شایان ذکر است که نحوه انتخاب جنس و هندسه ابزارها با توجه به مطالعه‌ی پژوهش‌های پیشین و همچنین انجام آزمایش‌های اولیه صورت گرفته است.

نوع سیستم روان‌کاری MQL با دو نازل پاشش می‌باشد. از روان‌کار روغن معدنی برش بهران 11 با دبی روغن 100 میلی‌لیتر بر ساعت، و فشار هوا روی 4 بار در این سیستم استفاده شد. شکل 2 دستگاه MQL، شکل 3 نحوه قرارگیری وسایل آزمایش و همچنین شکل 4 و 5 به ترتیب تصویر چیدمان آزمایش در دو حالت فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی را نشان می‌دهد.

به‌منظور اندازه‌گیری نیروها، از دینامومتر کیستلر مدل 9255B استفاده شد. جهت انجام آزمایش‌ها در ابتدا سطح میز ماشین‌ابزار کاملاً تمیز و دینامومتر دقیقاً تنظیم و ساعت گردید. سپس کلیه اتصالات برقی سیستم برقرار شد و پس از آن عملیات کالیبراسیون دینامومتر انجام گرفت. سیگنال‌های ارسال‌شده از پیزوالکتریک دینامومتر، توسط دستگاه تقویت‌کننده، تقویت‌شده و به وسیله نرم‌افزار دینوور[4] تحلیل و نمایش داده



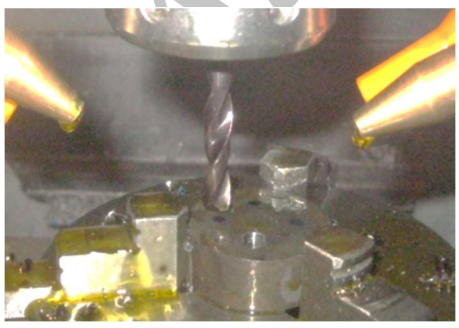
شکل 1 شماتیکی از فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی



شکل 2 نمایی از MQL بکار رفته در آزمایش‌ها

شکل 3 نمایی از چگونگی چیدمان وسایل آزمایش

شکل 4 نمایی از آزمایش‌های فرزکاری مارپیچ



شکل 5 نمایی از آزمایش‌های سوراخ‌کاری معمولی

می‌شوند. پس از انجام ماشین‌کاری، زبری دیواره داخلی سوراخ با استفاده از دستگاه زبری‌سنج ماهر[5] مدل PS1 اندازه‌گیری شد. زبری‌سنجی با 3 بار تکرار و در 4 ناحیه مختلف سوراخ انجام شد و میانگین به‌عنوان زبری‌سطح متوسط (R_a) ارائه گردید (شکل 6). برای اندازه‌گیری تلرانس‌ها نیز از دستگاه

1- CNC
2- Mitsubishi
3- Hypermill
4- Dynoware
5- Mahr

www.SID.ir
Archive of SID

اندازه‌گیری مختصات[1] مدل LH87 ساخت شرکت ونزل[1] استفاده گردید.

3- روش انجام آزمایش

فرایندهای فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی از لحاظ شکل و مشخصه‌های هندسی ابزار و همچنین پارامترهای برشی، تفاوت آشکاری با هم دارند. لذا نمی‌توان در شرایط باربرداری یکسانی، این دو فرایند را با هم مقایسه کرد [9، 10]. در گزارش حاضر، این دو فرایند در بهینه‌ترین حالت ماشین‌کاری خود با همدیگر از نقطه نظر کیفیت سوراخ تولیدی مقایسه شده‌اند.

به‌منظور بررسی و ارزیابی تأثیرگذاری پارامترها، از طراحی آزمایش فاکتوریل کامل بهره گرفته شده است. متغیرهای ورودی هر دو فرایند سرعت برشی (V_c) و سرعت پیشروی (f_z) بودند که هر کدام در دو سطح تغییر می‌کردند. در مجموع 8 آزمایش طرح‌ریزی و انجام شد. در جدول 1 مقادیر و سطوح متغیرهای هر دو فرایند به تفکیک آمده است.

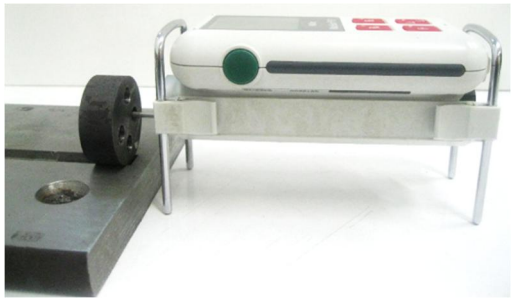
به منظور اطمینان از صحت نتایج، تمامی آزمایش‌ها با 3 مرتبه تکرار انجام گرفت و میانگین آن‌ها به‌صورت خروجی گزارش شد. جدول2 پارامترهای برشی به همراه تمام مقادیر خروجی را نشان می‌دهد. متغیرهای پاسخ 4 پارامتر نیرو (F)، زبری (Ra)، تلرانس ابعادی (اندازه اسمی) و تلرانس‌های هندسی (گردی و استوانه‌ای) بودند که در بخش 4 به تفکیک مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که عمق برش محوری در فرایند فرزکاری مارپیچ ثابت و برابر با 0/05 میلی‌متر درنظرگرفته شد.

4- نتایج و بحث

در این بخش، بررسی و مقایسه چهار خروجی آزمایش‌ها در دو فرایند صورت می‌گیرد.

4-1- نیروها و زمان ماشین‌کاری

مقایسه نیروهای برشی در جدول 2، حکایت از کاهش حدود 120 برابری نیروهای برش، در فرزکاری مارپیچ نسبت به سوراخ‌کاری معمولی دارد. این کاهش قابل توجه در اندازه نیروهای این فرایند را می‌توان در کاهش نرخ



شکل 6 نحوه اندازه‌گیری زبری سطح دیواره سوراخ

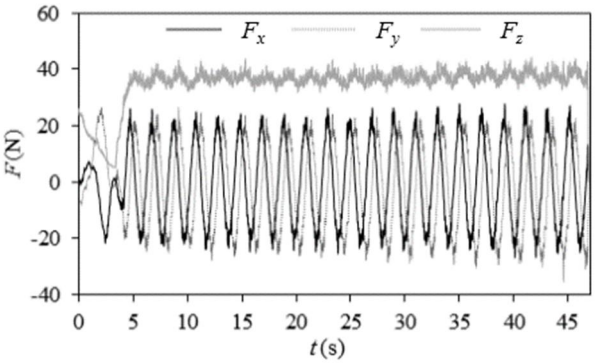
جدول 1 پارامترهای مورد بررسی و سطوح آن ها

فاکتورها	سوراخ‌کاری		فرزکاری مارپیچ	
	سطح 1	سطح 2	سطح 1	سطح 2
سرعت برشی (V_c) (m/min)	8	18	10	70
نرخ پیشروی (f_z) (mm/tooth)	0/15	0/25	0/03	0/09

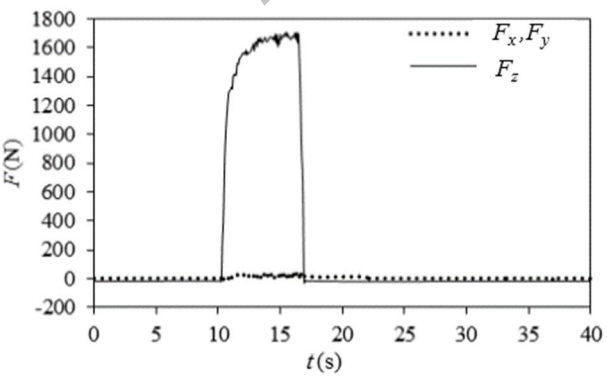
براده‌برداری ماده بر واحد زمان[2] و کمتر شدن سطح درگیری ابزار با قطعه‌کار دانست. در سوراخ‌کاری معمولی، تماس بین ابزار و قطعه پیوسته بوده و حالت باربرداری شبیه مکانیزم شخم‌زنی است. از این رو تغییرشکل، شدیدتر و مقاومت در برابر نفوذ ابزار به ماده بیشتر خواهد بود. در ادامه به منظور درک بهتر، نمونه‌ای از گراف نیروها در دو فرایند مورد مطالعه که از نرم‌افزار تحلیل آنلاین نیروهای ماشین‌کاری مستخرج شده، در شکل 7 و 8 آمده است. نکته‌ی قابل ملاحظه، تفاوت آشکار بین مولفه‌های نیرو در فرایند سوراخ‌کاری می‌باشد. این مطلب بیانگر آن است که مولفه نیروی عمودی در این فرایند، کار برش و پیشروی را انجام می‌دهد.

جدول 2 پارامترهای متغیر آزمایش به‌همراه خروجی‌های اندازه‌گیری شده

	شماره آزمایش	Vc	fz	F (N)	Ra (µm)	Ø (mm)	c (mm)	b (mm)
سوراخ‌کاری	1	8	0/15	3122	1/127	8/014	0/04	0/063
	2	8	0/25	6175	1/658	8/041	0/057	0/082
	3	18	0/15	1751	0/691	8/008	0/031	0/049
	4	18	0/25	2967	1/239	8/03	0/037	0/05
فرزکاری مارپیچ	1	10	0/03	50/58	0/586	8/047	0/033	0/043
	2	10	0/09	54/94	0/722	8/084	0/054	0/066
	3	70	0/03	39/37	0/336	8/012	0/019	0/025
	4	70	0/09	41/43	0/564	8/06	0/032	0/043



شکل 7 تغییرات نیروهای فرزکاری مارپیچ برای آزمایش 2



شکل 8 تغییرات نیروهای سوراخ‌کاری معمولی برای آزمایش شماره 3

1- Wenzel

2- Material Removal Rate

www.SID.ir

در نتیجه با توجه به بالا بودن مقدار نیروها، اگر بار وارده افزایش یابد، احتمال انحراف ابزار مته و یا شکست آن بیشتر می‌شود. این درحالی است که مولفه‌های نیرو در فرزکاری مارپیچ از لحاظ اندازه، بسیار کوچک‌تر بوده و همچنین مقادیری نزدیک به هم دارند. از این‌رو، فرایند فرزکاری مارپیچ دارای رژیم ماشین‌کاری پیوسته و یکنواختی می‌باشد.

لازم به ذکر است که زمان آزمایش‌های فرزکاری مارپیچ در این تحقیق بیشتر از سوراخ‌کاری معمولی است. علت این امر را می‌توان در ماهیت فرزکاری مارپیچ و طولانی‌تر بودن مسیر حرکت ابزار در این فرایند دانست. اما زمانی‌که تولید سوراخی با کیفیت بالا مدنظر باشد، با استفاده از این روش، دیگر نیازی به پیش‌مته‌زنی و برقوکاری نخواهد بود. همچنین عملیات باز و بستن ابزار و قطعه‌کار از ماشینی به ماشین دیگر حذف می‌گردد. در نتیجه زمان غیر ماشینکاری کاهش یافته و احتمال بروز خطای تلرانسی در تولید کم می‌شود. درواقع به کمک فرایند فرزکاری مارپیچ و تنها با استفاده از یک ابزار برشی، کل عملیات در یک مرحله قابل انجام است.

4-2- زبری سطح سوراخ

زبری سطح یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های تعیین کیفیت سطح قطعات است و نقش مهمی را در عملکرد آن‌ها تحت بارگذاری‌های دینامیکی ایفا می‌کند [13]. شکل 9 مقادیر زبری اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های مربوط به دو فرایند سوراخ‌کاری و فرزکاری مارپیچ را نشان می‌دهد. پر واضح است که تمامی مقادیر زبری در فرزکاری مارپیچ کمتر از سوراخ‌کاری است و در بهترین حالت، اختلاف 0/3 میکرونی بین مقادیر زبری قابل مشاهده است. دو دلیل عمده را می‌توان برای این اختلاف ذکر کرد. اول آن‌که نیروهای ماشین‌کاری در سوراخ‌کاری معمولی بیشتر بوده و به تبع آن دامنه ارتعاش و ناپایداری این فرایند بالاتر می‌باشد. دلیل دیگر، تفاوت دو روش در ماهیت تشکیل براده و تخلیه آن از محل برش است. درواقع، ضخامت براده نتراشیده[1] در فرزکاری مارپیچ متغیر بوده و به دنبال آن، براده‌هایی منفصل و کوچک تشکیل می‌شود [4]. این براده‌های ریز، به علت خارج از مرکز و مارپیچ بودن مسیر حرکت ابزار، فضای آزاد بیشتری برای خروج داشته، در نتیجه تماس براده با دیواره سوراخ کمتر و تخلیه آن سریع‌تر خواهد بود. از سوی دیگر همین فضای آزاد بیشتر نسبت به سوراخ‌کاری، باعث نفوذ راحت‌تر سیال به ناحیه برش شده و خنک‌کاری و روان‌کاری مطلوب‌تری صورت خواهد گرفت. اما سوراخ‌کاری معمولی، براده‌های پیوسته و بزرگ‌تری تولید می‌کند و تنها مسیر خروج آن‌ها، شیار مارپیچ مته است. بنابراین در این فضای محدود، براده‌های خروجی داغ و برنده، روی دیواره سوراخ کشیده شده و سطح ماشینکاری‌شده را می‌خراشند. همچنین در سوراخ‌کاری معمولی، نفوذ روان‌کار به ناحیه برش سخت‌تر بوده و اثر کمتری بر فرایند دارد.

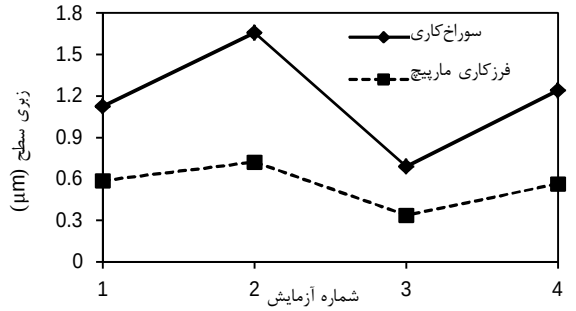
در هر دو فرایند، کمترین مقدار زبری مربوط به آزمایش شماره 3 (نرخ پیشروی کمینه و سرعت برشی بیشینه) و بیشترین زبری در آزمایش شماره 2 (نرخ پیشروی بیشینه و سرعت برشی کمینه) بدست آمد. مشاهده می‌شود که با افزایش پیشروی، ضخامت براده جدا نشده بیشتر و زبری سطح افزایش می‌یابد. با بالارفتن سرعت برشی نیز، حرارت منطقه برش بیشتر شده و با افت تنش سیلان، تغییرشکل و برداشت براده، راحت‌تر صورت می‌گیرد. ازاین‌رو سطح هموارتری بدست خواهد آمد.

شکل 10 توزیع زبری بدست آمده روی یک مسیر اندازه‌گیری را برای یک آزمایش در هر دو فرایند نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقادیر و نواسانات زبری برای سوراخ تولید شده به روش سوراخ‌کاری بالاتر از روش دیگر است. کیفیت سطح دیواره تولیدی با هر دو روش را می‌توان در شکل 11 نیز مشاهده کرد. شکل 11 (الف)، بدنه صیقلی و کیفیت بالای سطح بدست آمده در فرزکاری مارپیچ را نشان می‌دهد. شیارهای ایجادشده و کیفیت کمتر سوراخ‌کاری معمولی در اثر برخورد براده‌ها با دیواره سوراخ نیز در شکل 11 (ب) قابل مشاهده است.

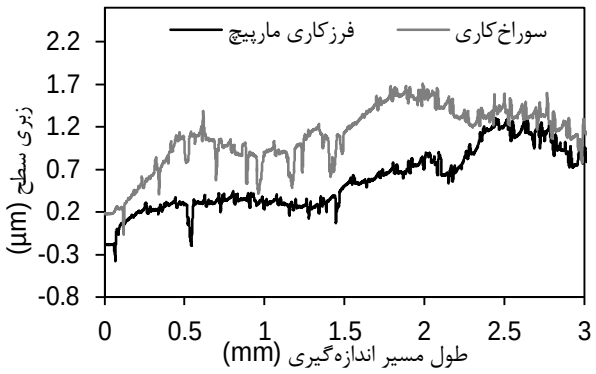
4-3- اندازه اسمی سوراخ

اندازه اسمی سوراخ را می‌توان مهم‌ترین پارامتر در بررسی کیفیت سوراخ عنوان کرد. شکل 12 مقایسه اندازه اسمی سوراخ را در دو فرایند و در آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد. هدف ایجاد سوراخی به قطر 8 میلی‌متر می‌باشد. مشاهده می‌شود که اندازه قطر سوراخ با توجه به شرایط برشی مختلف، در بازه بین 8 میلی‌متر تا 8/1 میلی‌متر متغیر است. در این شرایط آزمایش، روش سوراخ‌کاری معمولی، تلرانس ابعادی بهتری را نتیجه داد.

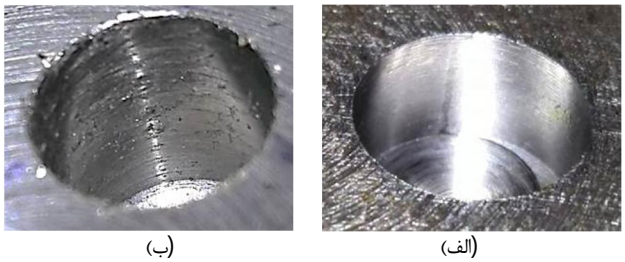
در فرایند فرزکاری مارپیچ، نیاز به حرکت همزمان هر سه محور ماشین‌ابزار است. درنتیجه لقی تمامی محورها روی همدیگر انباشته شده و اثر



شکل 9 زبری سطح اندازه‌گیری شده در تمامی آزمایش‌ها



شکل 10 پروفیل زبری سطح اندازه‌گیری شده در آزمایش شماره 1 برای هر فرایند



(ب) (الف)

شکل 11 نمایی از سوراخ تولیدی با استفاده از روش‌های الف) فرزکاری مارپیچ ب) سوراخ‌کاری معمولی

1- Undeformed Chip Thickness

www.SID.ir
Archive of SID

خود را بیشتر بر اندازه سوراخ تولیدی نشان می‌دهد [14،4]. بنابراین خطای ماشین‌ابزار بیشترین سهم را در تلرانس ابعادی قطعات تولیدشده داشته و انجام این روش، نیازمند ماشین‌ابزاری با صلبیت و دقت بالا می‌باشد. تحقیقات زیادی نیز در زمینه اصلاح مسیر حرکت ابزار و کاهش خطای فرایند توسط شیوه‌های نوین برنامه‌نویسی انجام شده است [15،16].

در آزمایش شماره 3 برای هر دو فرایند، افزایش سرعت برشی موجب بهبود تلرانس ابعادی قطعه‌کار شده و سوراخ دقیق‌تری تولید می‌کند. در واقع، از میان پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، سرعت برشی تنها پارامتری است که دارای چنین اثر مثبتی روی کیفیت سوراخ می‌باشد. افزایش این پارامتر موجب بالارفتن حرارت و نرم‌شدن ماده در ناحیه برش شده و بهبود تلرانس را به‌همراه دارد. اثر پیشروی در آزمایش شماره 3 همانند زبری سطح روی دقت سوراخ نیز به نحوی است که نرخ تغذیه بیشتر، باعث افزایش ضخامت براده نتراشیده شده و به‌موجب آن، نیروی هدایت‌کننده در راستای مسیر پیشروی ابزار ازدیاد می‌یابد. این افزایش نیرو، انحراف ابزار را در پی داشته و در نتیجه منجر به دورتر شدن قطر سوراخ از اندازه اسمی آن می‌شود [6].

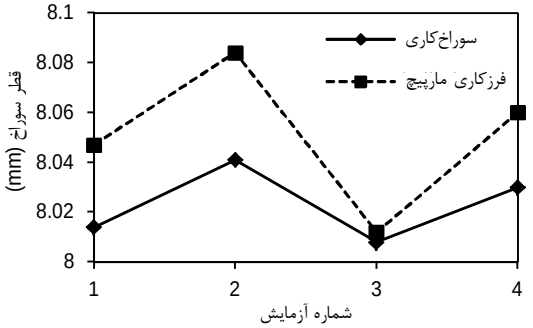
4-4- تلرانس گردی

تلرانس گردی میزان انحراف از دایره‌ای بودن، در مقطع سوراخ را به صورت عددی بیان می‌کند. شکل 13 نتایج این خروجی را برای تمامی آزمایش‌ها نشان می‌دهد. مشاهده شد که در این خروجی، فرایند فرزکاری مارپیچ دارای برتری نسبی است. نیروهای کمتر و سرعت برشی بالاتر در این روش، به ابزار اجازه می‌دهد تا پروفیل دایره‌ای مطلوبی را با کمترین ارتعاش و لرزش تولید کند. همچنین مشاهده می‌شود که روند تغییرات تلرانس گردی با نرخ پیشروی، مشابه تلرانس ابعادی می‌باشد.

4-5- تلرانس استوانه‌ای[1]

خطای استوانه‌ای‌بودن نوعی تلرانس سه‌بعدی است که علاوه بر گردی، پارامتر دیگری به نام مستقیم‌بودن[2] محور سوراخ را نیز شامل می‌شود. با توجه به شکل 14 و با مقایسه نتایج، می‌توان افزایش مقادیر تلرانس استوانه‌ای را نسبت به مقادیر تلرانس گردی مشاهده کرد. این افزایش، نشان‌دهنده تأثیر پارامترهای فرایند روی مستقیم‌بودن محور سوراخ است. شکل 14 همچنین نشان می‌دهد که در این خروجی نیز، فرزکاری مارپیچ از برتری قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.

در واقع در فرایند سوراخ‌کاری، ابزار مته به صورت یک تیر یک سر گیردار عمل می‌کند. به علت بالا بودن نیروها در این روش، نوک مته دچار



شکل 12 اندازه اسمی سوراخ اندازه‌گیری شده در تمامی آزمایش‌ها

خیز شده و حرکت دایره‌ای بزرگتر را طی می‌کند. در نتیجه سوراخ تولیدی مخروطی خواهد بود. در فرایند فرزکاری مارپیچ، به علت پایین بودن قابل توجه نیروها، خیز ابزار بسیار کمتر خواهد بود و در نتیجه مخروطی شدن سوراخ به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

از سوی دیگر، هر چه پیشروی مته مارپیچ در عملیات سوراخ‌کاری بیشتر شود، درگیری دیواره آن با سطح سوراخ بیشتر شده و کوچک‌ترین انحراف یا لرزشی موجب کاهش شدید کیفیت سطح می‌شود. در این زمان، مته به طور ناخواسته از دیواره باربرداری کرده و در برخی موارد حتی به قفل شدن و شکست ابزار منجر می‌شود. لنگی ماشین‌ابزار و صلبیت گیره نگهدارنده ابزار[3] نیز نقش اصلی را در این قضیه ایفا می‌کنند.

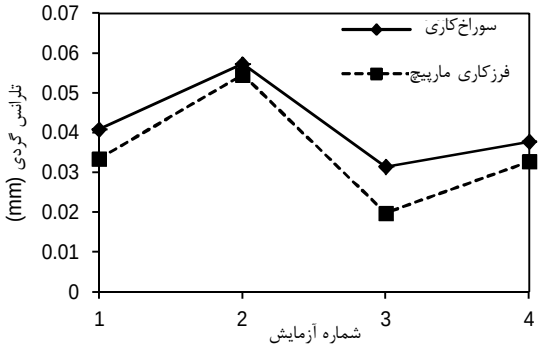
5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مقایسه فرایندی میان عملیات فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی به‌منظور تولید سوراخ روی قطعه‌ای از جنس فولاد AISI 4340 و در حضور سیستم روان‌کاری با حداقل سیال برشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش به صورت خلاصه در ادامه آمده است.

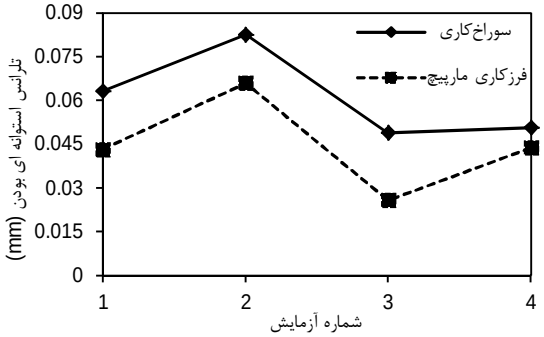
1- فرایند فرزکاری مارپیچ به عنوان یک تکنولوژی توانا برای تولید سوراخ در فولاد آلیاژی با سختی 45 راکول‌سی به کار گرفته شد. خروجی‌های مورد بررسی، تاییدی بر این مطلب هستند.

2- در بین عوامل بررسی‌شده، افزایش سرعت برشی به عنوان اصلی‌ترین پارامتر موثر بر کیفیت سوراخ موجب بهبود اندازه اسمی سوراخ شده و تنها پارامتر دارای اثر مثبت روی تمامی معیارهای کیفیت سوراخ تولیدی بود.

3- فارغ از پارامترهای برشی، فرزکاری مارپیچ زبری و بافت سطح بهتری را نسبت به سوراخ‌کاری معمولی داشت.



شکل 13 تلرانس گردی اندازه‌گیری شده در تمامی آزمایش‌ها



شکل 14 تلرانس استوانه‌ای اندازه‌گیری‌شده در تمامی آزمایش‌ها

1- Cylindricity
2- Straightness
3- Holder

www.SID.ir

4- نتایج بدست آمده از بررسی تلرانس‌ها نشان داد که تلرانس ابعادی در سوراخ‌کاری معمولی و تلرانس‌های هندسی در فرزکاری مارپیچ دارای وضعیت مطلوب‌تری هستند.

6- مراجع

[1] W. Grzesik, *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*: Elsevier, 2008.

[2] H. Tönshoff, W. Spintig, W. König, A. Neises, Machining of holes developments in drilling technology, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 43, No. 2, pp. 551-561, 1994.

[3] H. Coldwell, R. Woods, M. Paul, P. Koshy, R. Dewes, D. Aspinwall, Rapid machining of hardened AISI H13 and D2 moulds, dies and press tools, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 135, No. 2, pp. 301-311, 2003.

[4] 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.

[5] Y. Shan, N. He, L. Li, W. Zhao, X. Qin, Orbital milling hole of aerospace Al-alloy with big pitch, *Transactions of Tianjin University*, Vol. 17, pp. 329-335, 2011.

[6] H. Li, G. He, X. Qin, G. Wang, C. Lu, L. Gui, Tool wear and hole quality investigation in dry helical milling of Ti-6Al-4V alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-13, 2014.

[7] E. Brinksmeier, S. Fangmann, I. Meyer, Orbital drilling kinematics, *Production engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 277-283, 2008.

[8] H. Wang, X. Qin, C. Ren, Q. Wang, Prediction of cutting forces in helical milling process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 9-12, pp. 849-859, 2012.

[9] R. Iyer, P. Koshy, E. Ng, Helical milling: an enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 2, pp. 205-210, 2007.

[10] D. Olvera, L. N. L. de Lacalle, G. Urbikain, A. Lamikiz, P. Rodal, I. Zamakona, Hole making using ball helical milling on titanium alloys, *Machining Science and Technology*, Vol. 16, No. 2, pp. 173-188, 2012.

[11] M. Sadeghi, M. Haddad, T. Tawakoli, M. Emami, Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, No. 5-6, pp. 487-500, 2009.

[12] H. Sasahara, M. Kawasaki, M. Tsutsumi, Helical feed milling with MQL for boring of aluminum alloy, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 2, pp. 1030-1040, 2008.

[13] J. P. Davim, *Machining of hard materials*: Springer, 2011.

[14] H. Tonshoff, T. Friemuth, P. Andrae, M. Groppe, Circular Milling Replacing Drilling and Reaming, in *Proceeding of*.

[15] M.Vahebi, M.Habibi, B.Arezoo, Bias resulting from the deformation of the geometric errors of machine tools in the milling tools by changing the direction of three-axis machining, *Eleventh National Conference on Manufacturing Engineering*, Tabriz, Iran, 1389. (In persian)

[16] A.Vahdati, M.Hamedi, Identification and separation of all components of three-dimensional machining errors, *the second International Conference of Manufacturing Engineering,* Tehran, Iran, 1386. (In persian)

Archive of SID

www.SID.ir