



مقایسه تolerانس‌های ابعادی، هندسی و یکپارچگی سطح در فرآیندهای سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ روی قطعه‌کار چندلایه (ساندویچی) فولادی

ناصر پارساخو¹، بهزاد جباری‌پور^{2*}، احسان شکوری³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران

* تهران، صندوق پستی 1483766957، beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 فروردین 1400

داوری اولیه: 18 اردیبهشت 1400

پذیرش: 31 مرداد 1400

کلیدواژگان:

سوراخ‌کاری، فرزکاری مارپیچ

یکپارچگی سطح

تولرانس ابعادی

تولرانس هندسی

در حال حاضر در فرآیندهای ساخت و مونتاژ مجموعه‌های صنعتی چندلایه (ساندویچی) با جنسهای مختلف، مانند قالب‌سازی و یا فیکسچرسازی، ابتدا باید قطعات مونتاژ و سپس سوراخ‌کاری هم‌زمان شوند، در غیر این صورت دقت مورد نظر ابعادی یا هندسی حاصل نمی‌گردد. برای ایجاد این سوراخ‌ها عمدتاً از فرآیندهای سوراخ‌کاری متداول استفاده می‌شود که به علت شکل هندسی و صفر بودن سرعت برشی در نوک مته، موجب تغییر شکل پلاستیک شدید در موضع برش می‌شود. استفاده از روش سوراخ‌کاری متداول ممکن است باعث تنزل دقت‌های ابعادی، هندسی و همچنین یکپارچگی سطح دیواره داخلی سوراخ‌ها شود. برای کاهش مشکلات ذکر شده یکی از راهکارهای نسبتاً نوینی که برای سوراخ‌کاری پیشنهاد می‌شود، روش فرزکاری مارپیچ است. در پژوهش جاری، برای مقایسه قابلیت‌ها، مزایا و معایب این دو روش مختلف سوراخ‌کاری، مجموعاً 18 آزمایش سوراخ‌کاری با استفاده از روش‌های سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ و با در نظر گرفتن 2 پارامتر متغیر سرعت برشی و سرعت پیشروی (هر کدام در 3 سطح) بر روی قطعه‌کار ساندویچی چندلایه فلزی که دارای 3 لایه مختلف فولادی MO40، 304L و CK45 است، انجام گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، می‌توان بیان داشت جهت حصول به تولرانس‌های ابعادی (اندازه قطر سوراخ) و هندسی (گردی مقطع سوراخ) مطلوب، فرآیند سوراخ‌کاری متداول عملکرد بهتری نسبت به روش فرزکاری مارپیچ داشته است، ولی از نظر رسیدن به زبری سطح کمتر و یکپارچگی سطح مطلوب‌تر (عیوب سطحی کمتر)، روش فرزکاری مارپیچ، عملکرد بهتری نسبت به سوراخ‌کاری متداول داشته است.

Comparison of Dimensional, Geometrical Tolerances and Surface Integrity in Conventional Drilling and Helical Milling Processes on Steel Multi-layer (Sandwich) Workpiece

Naser Parsakhoo¹, Behzad Jabbaripour^{2*}, Ehsan Shakouri¹

1- Department of Mechanical Engineering, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1483766957, Tehran, Iran, beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 10 April 2021

First Decision: 8 May 2021

Accepted: 22 August 2021

Keywords:

Drilling, Helical Milling

Surface Integrity

Dimensional Tolerance

Geometrical Tolerance

Abstract

At present, in the processes of manufacturing and assembling multi-layer (sandwich) industrial complexes with different materials, such as mold or fixture production, firstly the parts must be assembled and then drilled simultaneously; otherwise, the desired dimensional or geometrical accuracy will not be achieved. To make these holes, conventional drilling processes are mainly used, which due to the geometric shape and zero cutting speed at the drill tip, cause severe plastic deformation in the cutting zone. The use of conventional drilling process may reduce the dimensional and geometrical accuracy as well as the surface integrity of the inner wall of the holes. To reduce the mentioned problems, one of the relatively new methods proposed for drilling is the helical milling technique. In the present study, in order to compare the capabilities, advantages and disadvantages of these two different drilling methods, a total of 18 drilling tests using conventional drilling and helical milling processes and considering 2 variable parameters of cutting speed and feed rate (each in 3 levels) on metal multi-layer (sandwich) workpiece with 3 different layers of steel including MO40, 304L and CK45 was performed. Based on the obtained results, it can be stated that in order to achieve the desired dimensional (hole diameter) and geometrical (hole roundness) tolerances, the conventional drilling process has a better performance than the helical milling method, but in terms of achieving less surface roughness and better surface integrity (less surface imperfections), helical milling method has better performance than conventional drilling.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Naser Parsakhoo, Behzad Jabbaripour, Ehsan Shakouri, Comparison of Dimensional, Geometrical Tolerances and Surface Integrity in Conventional Drilling and Helical Milling Processes on Steel Multi-layer (Sandwich) Workpiece, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 51- 62, 2021 (in Persian)

1- مقدمه

بیشتر از بخش CFRP بود. تغییرات تolerانس گردی سوراخ در ورودی لایه CFRP به‌طور قابل توجهی بیش از حد تolerانس مجاز است. با افزایش سرعت اسپیندل، قطر سوراخ افزایش یافت و گردی سوراخ بخش CFRP را بدتر کرد، درحالی‌که در بخش آلیاژ Ti بهبود یافت.

ویدال و همکاران [5] در تحقیقی با بررسی اثرات سایش ابزار در فرزکاری مارپیچ خشک آلیاژ Ti6Al4V، بیان نمودند که افزایش درجه حرارت ناشی از اصطکاک تولید شده توسط لبه ابزار در سرعت بالا باعث می‌شود که سایش به روش چسبندگی و انتشار در لبه برنده افزایش یابد. سرعت برشی بالاتر، کیفیت سطح سوراخ ناشی از آسیب حرارتی را بدتر می‌کند و سرعت برشی پایین‌تر، باعث افزایش احتمال آسیب مکانیکی به ابزار می‌شود.

وانگ و همکاران [6] فرآیند فرزکاری مارپیچ را بر روی کامپوزیت CFRP/Ti انجام دادند. مشاهده شد که Ti تاثیر کمی بر روی نیروهای برشی و کیفیت سطح داشته است، در حالی که به‌طور عمده منجر به افزایش دما در موضع برش گردیده است. این امر سبب کاهش استحکام و چسبندگی فاز ماتریس کامپوزیت CFRP گردید و عیوب زیادی را بر روی لایه‌های الیاف نزدیک به دهانه سوراخ‌ها ایجاد نمود. آنها اظهار داشتند که عیوب زیرسطحی مهمترین فاکتور برای ارزیابی کیفیت سوراخ‌کاری CFRP می‌باشد.

سعادت‌بخش و همکاران [7] تolerانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ‌کاری در فرآیند فرزکاری مارپیچ فولاد آلیاژی AISI4340 را بررسی نمودند. همچنین اثر استفاده از دو روش روان‌کاری با حداقل سیال برشی و فرزکاری خشک را بررسی نمودند. نتایج نشان داد روان‌کاری با حداقل سیال و روغن پایه گیاهی بهترین عملکرد روان‌کاری را در مقایسه با استفاده از روغن معدنی و ماشین‌کاری خشک از خود نشان داد. افزایش عمق برش محوری برخلاف اثر آن بر روی تolerانس‌های ابعادی، باعث کاهش تolerانس‌های هندسی سوراخ تولیدی شده و میزان تأثیرگذاری آن بر روی تolerانس‌های استوانه‌ای دو برابر تolerانس‌های گردی بود.

ملازمضانی و همکاران [8] در تحقیقی با استفاده از فرآیند فرزکاری مارپیچ بر روی فولاد سخت شده D2، سوراخ‌هایی ایجاد نمودند. ابزار مورد استفاده کاربیدی اینسرتی با پوشش TiCN بوده است. ماشین‌کاری در حالت خشک صورت گرفت و زبری سطح و سایش ابزار مورد مطالعه قرار گرفتند. مشاهده شد که با افزایش سرعت برشی در این نوع فولاد (52 HRC)، زبری سطح کاهش می‌یابد، اما در مقابل سایش ابزار به مقدار قابل توجهی افزایش یافت.

در فرآیند فرزکاری مارپیچ سه نوع حرکت همزمان، شامل چرخش ابزار فرز به دور محور خود، چرخش حول دایره مسیر مارپیچ و حرکت محوری وجود دارد. شکل 1 سینماتیک فرزکاری مارپیچ را نشان می‌دهد. پیشروی در فرزکاری مارپیچ دارای سه مؤلفه است؛ سرعت پیشروی محوری به ازای هر دندان، سرعت پیشروی مماس بر لبه برشی و سرعت پیشروی مماس بر دایره مارپیچ. قطر سوراخ را می‌توان با تغییر قطر این مسیر مارپیچ تعیین کرد، در واقع در فرآیند فرزکاری مارپیچ برخلاف سوراخ‌کاری معمولی، قطر اسمی سوراخ نهایی ترکیبی از قطر ابزار فرز و قطر مسیر مارپیچ است [1، 2].

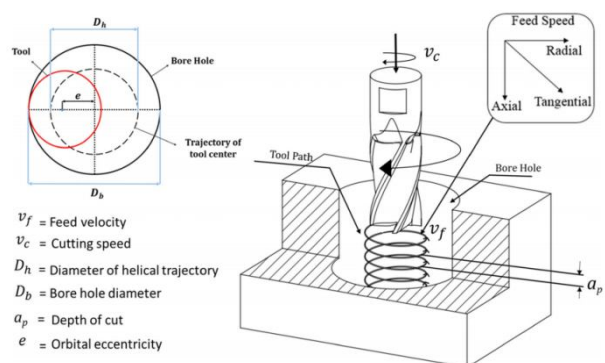


Fig. 1 3-D schematic of tool motion in helical milling process [3]

شکل 1 شماتیک سه‌بعدی حرکت ابزار در فرآیند فرزکاری مارپیچ [3]

سعادت‌بخش و همکاران [3] بر روی زبری سطح و تolerانس‌های ابعادی و هندسی در فرزکاری مارپیچ فولاد AISI 4340 تحقیق کردند. آنها اظهار داشتند که سرعت برشی بیشترین تأثیر را بر روی دقت گردی سوراخ دارد. افزایش عمق برش محوری، برخلاف اثر منفی آن بر اندازه قطر سوراخ، منجر به کاهش تolerانس هندسی سوراخ گردید. افزایش سختی قطعه‌کار باعث انحراف ابزار می‌شود و در نتیجه تأثیر منفی بر روی تolerانس‌های ابعادی و هندسی می‌گذارد.

لان ژو و همکاران [4] تغییرات گردی دهانه سوراخ را در سوراخ‌کاری به روش فرزکاری مارپیچ بدون استفاده از سیستم خنک‌کاری بر روی CFRP/Ti [4]¹ بررسی نمودند. آنها مشاهده کردند که قطر سوراخ در خروجی CFRP همیشه حداکثر مقدار را دارد و می‌توان با کنترل سرعت دوران ابزار باعث کاهش آن شد و نسبت قطر سوراخ به قطر ابزار، تأثیر زیادی بر روی تغییرات گردی دهانه سوراخ CFRP نسبت به لایه تیتانیوم دارد. آنها بیان داشتند که تغییرات اندازه قطر سوراخ در بخش آلیاژ Ti

¹ Carbon fiber-reinforced plastic titanium alloy

2- مواد، تجهیزات و طراحی آزمایشات

قطعه‌کار چندلایه (ساندویچی) فلزی که دارای لایه اول (لایه بالایی)، فولاد MO40، لایه دوم (لایه میانی)، فولاد 304L و لایه سوم (لایه پایینی)، فولاد CK45 می‌باشد، به صورت یک قطعه مرکب با ابعاد $170 \times 170 \times 45$ mm×mm×mm، در آزمایش‌های سوراخ‌کاری مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که ضخامت هر کدام از این لایه‌های فولادی بعد از سایش شدن (فرزکاری و سنگ‌زنی) 15mm می‌باشد. قطعه‌کار چندلایه (ساندویچی)، در شکل 2 نشان داده شده است.

لایه اول یا لایه بالایی فولاد MO40 یا 1/7225 می‌باشد. این نوع فولادهای کروم-مولیبدن‌دار، مقاوم در برابر حرارت تا دمای $500-600$ °C درجه سانتی‌گراد با حفظ استحکام و مقاومت به سایش می‌باشند. دو عنصر کروم و مولیبدن برای بالا بردن مقاومت این فولاد در مقابل خزش به کار می‌رود. خواص مکانیکی این نوع فولاد در جدول 1 آورده شده است.

لایه دوم یا لایه میانی فولاد زنگ نزن 304L (Stainless steel 304L) یا 1/4306 است که یکی از پرکاربردترین انواع فولادهای زنگ‌نزن می‌باشد و در دسته فولاد زنگ‌نزن آستنیتی قرار می‌گیرد. خواص مکانیکی این نوع فولاد در جدول 2 آورده شده است.

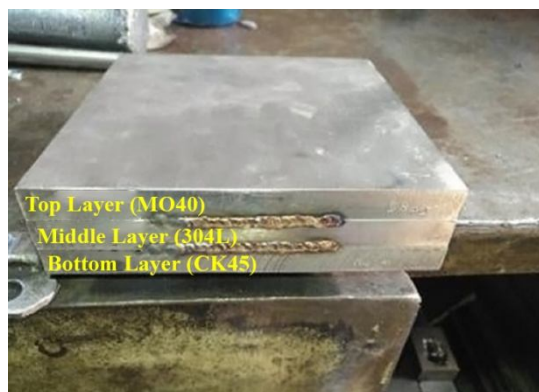


Fig. 2 Multi-layer (Sandwich) steel workpiece for drilling tests
شکل 2 قطعه‌کار چندلایه (ساندویچی) فولادی جهت آزمایش‌های سوراخ‌کاری

جدول 1 خواص مکانیکی فولاد MO40 [10]

استاندارد DIN	حداکثر استحکام کششی (MPa)	سختی (HB)
1/7225	1640	510

لایه سوم یا لایه پایینی فولاد CK45 یا 1/1191 است که یک نوع فولاد کربن متوسط می‌باشد و جزو فولادهای مهندسی

یانگ و همکاران [9] فرآیند فرزکاری مارپیچ معکوس را بر روی کامپوزیت CFRP مطالعه نمودند و هدفشان بررسی تغییرات میزان تورق لایه‌ها بوده است. آنها اظهار داشتند که در این فرآیند با معکوس کردن کنترل شده جهت پیشروی در حین فرآیند فرزکاری مارپیچ برای لحظاتی، استحکام ماده جدا نشده افزایش می‌یابد و تغییر شکل ناخواسته توسط نیروی محوری کاهش می‌یابد. در این فرآیند با معکوس کردن جهت پیشروی میزان تورق به طور محسوسی کاهش یافت و کیفیت دهانه ورودی و خروجی سوراخ‌ها نیز بهبود قابل توجهی یافتند. مدتهاست که در فرآیندهای سوراخ‌کاری از روش‌های سنتی استفاده می‌گردد که در برخی موارد دارای کیفیت مناسبی از نظر تیرانس‌های ابعادی، هندسی، زبری و یکپارچگی سطح نمی‌باشد. به همین دلیل محققین برای بهبود شرایط، در پی روش‌های نوین می‌باشند. یکی از راهکارهای نسبتاً جدید، فرزکاری مارپیچ می‌باشد که ممکن است موجب بهبود دقت در قطر سوراخ‌ها، گردی مقطع سوراخ‌ها و استوانه‌ای بودن دیواره داخلی سوراخ‌ها نسبت به روش سوراخ‌کاری متداول شود. در این روش قطر سوراخ را می‌توان با تغییر قطر مسیر مارپیچ حرکت ابزار تعیین کرد. با توجه به میزان اهمیت کیفیت و دقت سوراخ‌کاری در قطعات صنعتی، لازم است تا فرآیند فرزکاری مارپیچ با روش سوراخ‌کاری متداول مقایسه شود.

در این تحقیق با تغییر پارامترهای ورودی سرعت برشی و سرعت پیشروی ابزار، پارامترهای خروجی تیرانس ابعادی قطر سوراخ، تیرانس گردی مقطع سوراخ، زبری سطح و توپوگرافی سطح دیواره داخلی سوراخ‌های ایجاد شده بر روی قطعه‌کار چندلایه (ساندویچی) آلیاژهای مختلف فولادی بررسی می‌شوند. بر اساس آخرین اطلاعات نویسندگان تحقیق جاری، تاکنون گزارش مستندی در زمینه انجام و خصوصاً مقایسه تکنیکهای سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ بر روی قطعه‌کار چندلایه (ساندویچی) فلزی از جنس آلیاژهای مختلف فولادی ارائه نشده است.

در تحقیق جاری، جهت سوراخ‌کاری قطعه‌کار ساندویچی سه‌لایه فولادی، قابلیت‌ها و محدودیت‌های فرآیندهای فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری متداول با تغییر دو پارامتر ورودی سرعت برشی و سرعت پیشروی و چگونگی تأثیر آنها بر روی تیرانس ابعادی قطر سوراخ، تیرانس‌های هندسی گردی مقطع سوراخ، زبری و توپوگرافی سطح دیواره داخلی سوراخ‌ها بررسی و مقایسه می‌شود.

قبل از مته اصلی (21 mm) ابتدا مته مرغک و سپس پیش مته 15 mm استفاده شده است.

در فرآیند فرزکاری مارپیچ، ابزار اینسرتی استفاده شده است. در هر کدام از تستهای فرزکاری مارپیچ، یک اینسرت جدید استفاده گردید. هولدر ابزار فرز انگشتی به قطر 12 mm با برند تجاری DEREK و با کد شناسایی 300R-C12-12-130-1TQW بوده است و اینسرت ابزار فرز مورد استفاده APKT IC 928 با برند تجاری ISCAR بوده است.

برای اندازه‌گیری تلرانس‌های ابعادی و هندسی در این تحقیق از دستگاه CMM با برند تجاری PICO و مدل SEIT 1909 ساخت کشور آلمان با قطر پراب 5 mm از نوع تماسی استفاده گردید که در شکل 3 نحوه و محل اندازه‌گیری تلرانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ‌های ایجاد شده، بر روی ماشین CMM نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری زبری سطح دیواره داخلی سوراخ‌های ماشین‌کاری شده، از دستگاه زبری‌سنج با برند تجاری Mitutoyo و مدل SURFTEST 402 ساخت کشور ژاپن با دقت $0/001\mu\text{m}$ میکرومتر استفاده گردید. لازم به ذکر است در هر یک از سوراخ‌ها (لایه‌های فولادی)، 3 مرتبه زبری‌سنجی به عمل آمد و مقدار میانگین، به عنوان زبری سطح آن سوراخ (لایه فولادی) گزارش شده است. در تحقیق جاری برای بررسی توپوگرافی سطح دیواره داخلی سوراخ‌های ماشین‌کاری شده، از میکروسکوپ نوری با برند تجاری Olympus و مدل BX51M استفاده شده است.

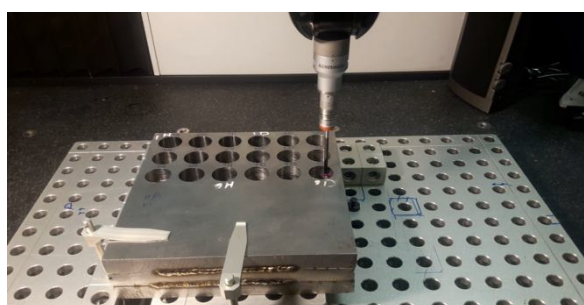


Fig. 3 CMM probe during measuring of tolerances on machined holes

شکل 3 پراب دستگاه CMM در حال اندازه‌گیری تلرانسی بر روی سوراخ‌های ماشین‌کاری شده

در این پژوهش دو پارامتر سرعت پیشروی (f) و سرعت برشی (v_c) به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته شدند و پارامترهای خروجی تلرانس ابعادی قطر سوراخ، تلرانس هندسی گردی مقطع سوراخ، زبری سطح و همچنین توپوگرافی سطح

برای ساخت انواع قطعات و سازه‌ها است. از ویژگی‌های اصلی این فولاد می‌توان به قابلیت ماشینکاری و مقاومت کششی بالا اشاره کرد. خواص مکانیکی این نوع فولاد در جدول 3 آورده شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی فولاد 304 L [11]

استاندارد DIN	حداکثر استحکام کششی (MPa)	سختی (HB)
1/4306	485	201

جدول 3 خواص مکانیکی فولاد CK45 [12]

استاندارد DIN	حداکثر استحکام کششی (MPa)	سختی (HB)
1/1191	620	235

تمامی سطوح این سه نوع فولاد به کمک فرزکاری، کف‌تراشی و جهت انطباق کامل و دقیق بر روی همدیگر، سنگ‌زنی شدند و پس از نشانیدن بر روی همدیگر و مهار به کمک گیره‌های مناسب، با سیم جوش ER309 که مناسب برای جوشکاری فولادهای غیر هم‌جنس می‌باشد، به روش جوشکاری TIG^1 ، از چهار پهلو (کناره‌ها) جوشکاری شدند تا نهایتاً یک قطعه کار چندلایه (ساندویچی) فولادی برای تست‌های ماشین‌کاری (سوراخ‌کاری و فرزکاری مارپیچ) به دست آید.

آزمایش‌های سوراخ‌کاری و فرزکاری مارپیچ با استفاده از ماشین فرز CNC سه محوره Deckel Maho DMU 80 T که دارای حداکثر دوران اسپیندل کنترلر هایدن‌هاین 426 که دارای حداکثر دوران اسپیندل 8000 دور بر دقیقه می‌باشد، انجام گردیده است. مشخصات ابزارهای مورد استفاده در طی فرآیند سوراخ‌کاری متداول (اعم از مته مرغک، پیش مته و مته اصلی) مطابق جدول 4 است.

جدول 4 مشخصات ابزارهای مورد استفاده در طی فرآیند سوراخ‌کاری متداول

نوع ابزار	قطر (mm)	طول مارپیچ (mm)	زاویه رأس (°)	جنس	نام تجاری
مته مرغک	4x10	4	118	HSS-E	MAKINA TAKIM-B00010110400
پیش مته	15	169	135	HSS-E	MAKINA TAKIM-B00005001500
مته اصلی	21	93	135	HSS-Co	NACNI-GTS

از آنجا که قطر مورد نظر در سوراخ‌کاری نهایی 21mm میلی‌متر بوده است، برای تمامی تست‌های سوراخ‌کاری متداول و

¹ Tungsten inert gas

دیواره داخلی سوراخ‌ها بررسی شدند.

سوراخ، زبری سطح و همچنین توپوگرافی سطح دیواره داخلی سوراخ‌ها می‌باشند. محل اندازه‌گیری پارامترهای خروجی در قطعه‌کار ساندویچی از نظر ارتفاع و جنس هر لایه به شرح ذیل است، لازم به ذکر است که فواصل اشاره شده در ادامه، از سطح فوقانی قطعه‌کار مرکب سنجیده شده است:

- نقطه 7/5 mm وسط لایه بالایی (دهانه ورودی سوراخ) از جنس MO40.
- نقطه 22/5 mm وسط لایه میانی از جنس 304L.
- نقطه 37/5 mm وسط لایه پایینی (دهانه خروجی سوراخ) از جنس CK45.

3-1- مقایسه تلرانس ابعادی قطر سوراخ‌ها

اندازه ابعادی قطر سوراخ را می‌توان مهم‌ترین پارامتر در بررسی دقت سوراخ ماشین‌کاری شده عنوان کرد. در این تحقیق، در هر دو فرآیند سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ، هدف ایجاد سوراخی به قطر 21 mm می‌باشد. در شکل‌های 4- الف و 4- ب، نمودارهای اثرات اصلی²، متغیرهای ورودی سرعت برشی، سرعت پیشروی و جنس قطعه‌کار بر روی تلرانس ابعادی اندازه‌گیری شده قطر سوراخ‌ها (نسبت به قطر نامی 21 mm) به ترتیب در فرآیندهای سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ ارائه شده است. لازم به ذکر است که این نمودارها با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب 19 به دست آمده‌اند.

اثرات سرعت برشی بر روی تلرانس ابعادی قطر در فرآیند سوراخ‌کاری متداول، در شکل 4- الف نشان داده شده است. با افزایش سرعت برشی، دما افزایش می‌یابد و به تبع آن نرخ انبساط و انقباض بین ابزار و دیواره سوراخ افزایش می‌یابد. زمانی که ابزار از سوراخ ایجاد شده خارج می‌گردد، اثرات این انبساط و انقباض در سوراخ باقی مانده و در نتیجه تلرانس اندازه قطر سوراخ افزایش می‌یابد.

بزرگ‌ترین مشکل سوراخ‌کاری متداول وابستگی سرعت برشی به شعاع مقطع ابزار برش و صفر بودن آن در نوک ابزار است. این ویژگی با بالا بردن نیروی محوری برشی، می‌تواند شرایط نامطلوبی از جمله انحراف ابزار و کاهش دقت ابعادی سوراخ را به همراه داشته باشد [13]. یکی از علل اصلی تغییر قطر سوراخ در عمق‌های مختلف در هر دو فرآیند فرزکاری مارپیچ و خصوصاً سوراخ‌کاری متداول، خیز ابزار³ می‌باشد [2]. همان‌طور که در شکل 4- الف نشان داده شده است. سرعت

در هر یک از فرآیندهای فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری متداول، تعداد 9 عدد سوراخ و مجموعاً 18 عدد سوراخ طراحی و اجرا (ماشین‌کاری) شده است. فاکتورها و سطوح طراحی شده برای آزمایش‌های ماشین‌کاری در جدول 5 به تفکیک هر فرآیند ارائه شده است. نکته بسیار مهم و کلیدی در طراحی این سطوح آزمایشات، این بوده است که سرعت‌های برشی و پیشروی مندرج، بر اساس میزان حداقل و حداکثر بازه سرعت‌های برشی و پیشروی پیشنهاد شده در کاتالوگ شرکت‌های سازنده ابزارها انتخاب و استفاده شده‌اند تا نتایج حاصل، جامع و کاربردی باشد. روش خنک‌کاری در هر دو فرآیند ماشین‌کاری، تر (روش آب صابون) بوده است. عمق برش محوری به مقدار 0/15 mm میلی‌متر بر دور در تمام آزمایشات فرزکاری مارپیچ به‌طور ثابت در نظر گرفته شده است. جهت ایجاد شرایط یکسان تست، در تست‌های سوراخ‌کاری متداول، طول بیرون آمده مت¹ مشابه هم و ثابت و همچنین در تست‌های انجام شده در فرآیند فرزکاری مارپیچ نیز طول بیرون آمده هولدر فرز نیز مشابه هم و ثابت، تنظیم شده‌اند.

جدول 5 سطوح سرعت‌های برشی و پیشروی در تست‌های سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ

Table 5: The levels of cutting speed and feed rate in drilling and helical milling tests

فاکتورها	سرعت برشی VC (m/min)	سرعت پیشروی (f)
سطح 1	4	0/1 fr (mm/rev)
سطح 2	13	0/23 fr (mm/rev)
سطح 3	22	0/36 fr (mm/rev)
سطح 1	80	0/05 fza (mm/tooth)
سطح 2	140	0/13 fza (mm/tooth)
سطح 3	200	0/21 fza (mm/tooth)

3- ارائه نتایج

در این بخش بررسی و مقایسه پارامترهای خروجی برای سوراخ‌های ایجاد شده به دو روش سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ انجام شده است. این پارامترهای خروجی، تلرانس ابعادی اندازه قطر سوراخ، تلرانس هندسی گردی مقطع

² Main effects plot

³ Tool deflection

¹ Tool overhang

است. در ادامه، با افزایش نرخ پیشروی از 0/13 mm/tooth تا 0/21 mm/tooth مشاهده می‌شود که تolerانس ابعادی قطر سوراخ کاهش یافته است.

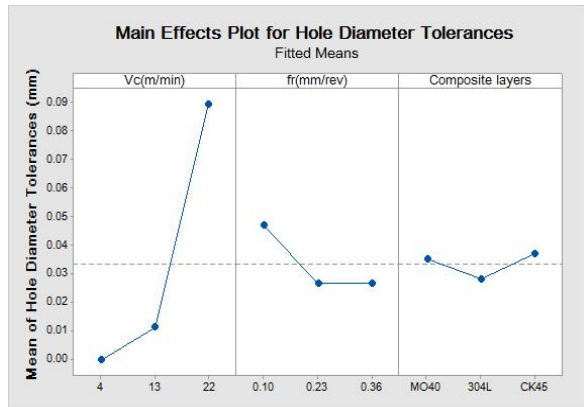


Fig. 4 a: Drilling process

شکل 4 الف: فرآیند سوراخ‌کاری متداول

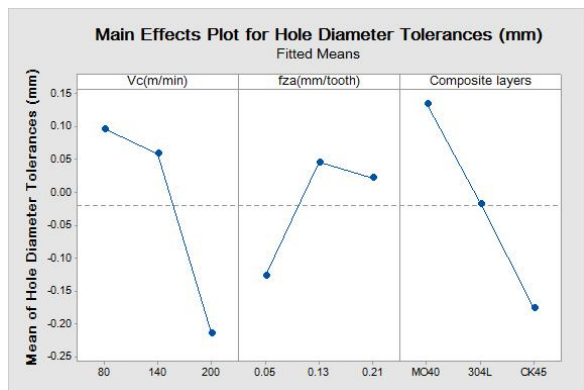


Fig. 4 b: Helical milling process

شکل 4 ب: فرآیند فرزکاری مارپیچ

Figure 4: The effects of cutting speed, feed rate and layers material on the diameter dimension tolerance

شکل 4 اثر سرعت برشی، سرعت پیشروی و جنس لایه‌ها بر روی تolerانس اندازه قطر

با افزایش سختی قطعه‌کار، اندازه قطر سوراخ تا حدودی بالاتر می‌رود، که علت را می‌توان در افزایش استحکام ماده و همچنین افزایش نیروهای ماشینکاری دانست [15]. علاوه بر این، نفوذپذیری کمتر ابزار در داخل قطعه‌کار سخت‌تر، موجب دویدگی³ بیشتر ابزار شده و انحرافات ابعادی را افزایش می‌دهد [7]. همان‌طور که در شکل 4-ب دیده می‌شود، در لایه بالایی MO40 که دارای سخت‌ترین جنس و بیشترین استحکام کششی است، مقادیر تolerانس ابعادی مثبت هستند که به معنای بیشتر بودن قطر واقعی سوراخ نسبت به قطر نامی سوراخ (21 mm) است، در حالی که در لایه پایینی CK45 که نسبت به MO40

پیشروی نسبتاً کم 0/10 میلی‌متر بر دور مته، منجر به افزایش اصطکاک و نرخ سایش ابزار (همراه با نوعی صدای سوت در هنگام براده‌برداری) می‌گردد که این امر باعث افزایش تolerانس اندازه قطر سوراخ می‌گردد. سپس با افزایش سرعت پیشروی به مقدار 0/23 mm/rev، تolerانس اندازه قطر سوراخ به کمترین مقدار رسیده است. با زیاد شدن نرخ پیشروی، ضخامت براده نتراشیده¹ و به سبب آن نیروی برشی اعمالی بر مته افزایش می‌یابد. این افزایش نیرو، انحراف ابزار و در نتیجه دورتر شدن قطر واقعی از قطر نامی سوراخ را در پی دارد.

در سوراخ‌کاری متداول، افزایش سختی و حداکثر استحکام کششی قطعه‌کار باعث افزایش نیروی محوری و گشتاور پیچشی اعمالی به مته و به دنبالش تشدید نرخ سایش مته می‌شود. این عوامل باعث افزایش خیز و انحراف مته می‌گردد [14]. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد در قطعه‌کار ساندویچی فولادی، مته از لایه بالایی (دهانه ورودی) از جنس MO40 که دارای سختی 510HB برینل و حداکثر استحکام کششی 1640 MPa است، وارد لایه میانی از جنس 304L که دارای سختی 201 HB برینل و استحکام کششی 485 MPa است می‌شود و در نهایت ابزار با عبور از لایه پایینی (دهانه خروجی) از جنس CK45 که دارای سختی 235 HB و استحکام کششی 620 MPa است، خارج می‌گردد. همان‌طور که در شکل 4-الف، قابل مشاهده است کمترین تolerانس ابعادی اندازه قطر سوراخ متعلق به لایه میانی از جنس 304L می‌باشد که دلیل آن سختی و استحکام کششی کمتر این نوع فولاد نسبت به جنس لایه‌های بالایی و پایینی می‌باشد.

نمودارهای موجود در شکل 4-ب، اثر تغییرات سرعت برشی، سرعت پیشروی و جنس قطعه‌کار را بر روی تolerانس اندازه قطر سوراخ، در فرآیند فرزکاری مارپیچ نشان داده است.

در فرزکاری مارپیچ، با افزایش سرعت برشی، دما در موضع برش به شدت افزایش می‌یابد و باعث نرم‌تر شدن ماده قطعه‌کار² می‌گردد [14]، این نرم‌تر شدن ماده منجر به کاهش نیروهای برشی و اصطکاک بین سطوح تماس ابزار و قطعه‌کار می‌شود که منجر به کاهش تolerانس ابعادی می‌گردند.

مطابق شکل 4-ب، با افزایش نرخ پیشروی از 0/05 mm/tooth تا 0/13 mm/tooth، تolerانس ابعادی قطر سوراخ به دلیل افزایش سطح مقطع براده نتراشیده و به دنبالش افزایش نیروهای ماشین‌کاری، ارتعاش ابزار و نهایتاً انحراف ابزار، افزایش یافته

¹ Uncut chip thickness

² Material softening

³ Run out

می‌یابد که منجر به کاهش تolerانس گردی می‌گردد. با افزایش مجدد سرعت برشی از 140 m/min تا 200 m/min، خطای گردی سوراخ‌ها افزایش می‌یابد.

با افزایش سرعت پیشروی ابزار فرز از 0/05 mm/tooth تا 0/13 mm/tooth، با افزایش نیروهای برشی، تolerانس گردی سوراخ‌ها افزایش داشته است ولی با افزایش پیشروی از 0/13 mm/tooth تا 0/21 mm/tooth، احتمالاً به دلیل اصطکاک بیشتر و افزایش شدید دما، ماده قطعه‌کار نرم‌تر و نیروهای ماشین‌کاری کاهش می‌یابند که منجر به کاهش تolerانس گردی سوراخ‌ها شده است.

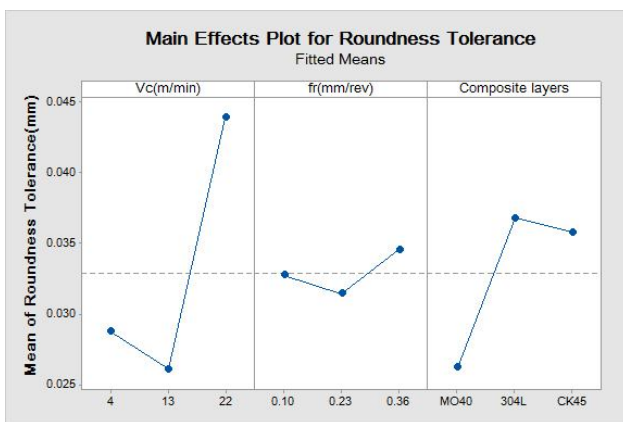


Fig. 5 a: Drilling process

شکل 5 الف: فرآیند سوراخ‌کاری متداول

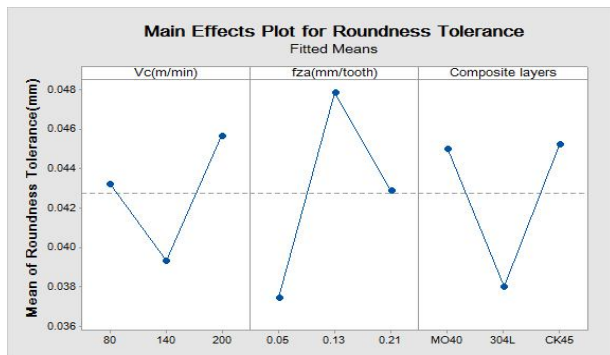


Fig. 5 b: Helical milling process

شکل 5 ب: فرآیند فرزکاری مارپیچ

Fig. 5 The effects of cutting speed, feed rate and layers material on the roundness tolerance

شکل 5 اثر سرعت برشی، سرعت پیشروی و جنس لایه‌ها بر روی تolerانس گردی

مشاهده می‌شود که کمترین تolerانس گردی سوراخ‌ها در لایه میانی قطعه‌کار ساندویچی از فولاد 304L ایجاد شده است که علتش سختی و استحکام کششی کمتر این نوع فولاد نسبت به جنس لایه‌های بالایی و پایینی قطعه‌کار می‌باشد.

سختی و استحکام کششی کمتری دارد، مقادیر تolerانس ابعادی منفی هستند که به معنای کمتر بودن قطر واقعی نسبت به قطر نامی سوراخ (21 mm) است.

2-3- مقایسه تolerانس گردی سوراخ‌ها

تolerانس هندسی گردی¹، میزان انحراف از دایره‌ای بودن، در مقطع سوراخ را به صورت کمی بیان می‌کند.

همان‌طور که در شکل 5- الف مشاهده می‌شود، در فرآیند سوراخ‌کاری متداول، در سرعت برشی 4 m/min، به علت کلاف (فتیله) شدن شدید براده‌ها به دور مته در حین آزمایشات، امکان نفوذ موثر سیال خنک‌کار به موضع برش کاهش یافته، در نتیجه دما و اصطکاک افزایش می‌یابد و باعث افزایش تolerانس گردی می‌گردد. سپس با افزایش سرعت برشی تolerانس گردی کاهش یافته است. زمانی که سرعت برشی از 13 m/min به 22 m/min افزایش می‌یابد، دما در موضع برش نیز افزایش می‌یابد. در سرعت‌های برشی بالا راندمان خنک‌کاری به علت نداشتن زمان کافی جهت نفوذ به موضع تماس ابزار- قطعه‌کار کاهش می‌یابد که این امر موجب تشدید گرا دیان دمایی و افزایش انقباض ماده قطعه‌کار می‌شود که منجر به افت دقت گردی (افزایش خطای عدم گردی) می‌گردد [16].

اثرات سرعت پیشروی، در شکل 5- الف نشان داده شده است. سرعت پیشروی نسبتاً کم 0/10 mm/rev مته منجر به افزایش اصطکاک و نرخ سایش ابزار می‌گردد که این امر باعث افزایش تolerانس گردی سوراخ می‌گردد. سپس با افزایش سرعت پیشروی به مقدار 0/23 mm/rev، تolerانس گردی مقطع سوراخ به کمترین مقدار می‌رسد. با افزایش سرعت پیشروی مته از مقدار 0/23 mm/rev تا 0/36 mm/rev، نیروهای ماشین‌کاری افزایش و افزایش خطای عدم گرد بودن را در پی خواهد داشت.

مطابق شکل 5- الف، کمترین تolerانس گردی در لایه بالایی یا دهانه ورودی سوراخ از فولاد MO40 می‌باشد و به تدریج که مته از لایه بالایی به لایه میانی قطعه‌کار ساندویچی وارد می‌شود، طول درگیر مته با دیواره داخلی سوراخ افزایش می‌یابد. افزایش عمق سوراخ‌کاری همراه با ورود مته به لایه‌های میانی و پایینی قطعه‌کار ساندویچی، به طور نسبی خروج از مرکز (خیز) مته نسبت به محور سوراخ‌کاری را افزایش می‌دهد.

مطابق شکل 5- ب، در فرزکاری مارپیچ، با افزایش سرعت برشی از مقدار 80 m/min تا 140 m/min، به دلیل افزایش دما و نرم‌تر شدن ماده قطعه‌کار، نیروهای ماشین‌کاری کاهش

1 Roundness (Circularity)

مطابق شکل 6- الف، بیشترین زبری سطح در لایه پایینی از جنس CK45 رخ می‌دهد. با وجود اینکه این لایه نه بیشترین مقدار سختی و نه بیشترین مقدار استحکام کششی را دارا است. علت اصلی بیشتر بودن زبری سطح سوراخ در این لایه این است که با توجه به اینکه پایین‌ترین لایه قطعه‌کار، طول و سطح درگیر مته با قطعه‌کار در این لایه بیشترین حد ممکن است و این منجر به افزایش ارتعاشات مته می‌شود که نهایتاً سبب افزایش زبری سطح می‌گردد.

همان‌طور که در شکل 6- ب دیده می‌شود، با افزایش سرعت برشی از 80 m/min تا 140 m/min، زبری سطح تغییر چندانی ندارد ولی با افزایش سرعت برشی از 140 m/min تا 200 m/min، به دلیل افزایش سرعت دوران اسپیندل (فرز) و اینکه ابزار فرز در هنگام ورود به هر لایه از فولاد با خواص مکانیکی متفاوت، متحمل ضربه و تنش عرضی می‌گردد، لذا ارتعاشات، نوسانات و ناپایداری ابزار فرز افزایش یافته است که منجر به زبرتر شدن سطح حاصل از ماشین‌کاری می‌گردد.

همان‌طور که در شکل 6- ب مشاهده می‌شود کمترین میزان زبری سطح حاصل از ماشین‌کاری مربوط به لایه میانی از جنس فولاد 304L است که دلیل سختی و استحکام کششی کمتر این نوع فولاد نسبت به جنس فولاد لایه‌های بالایی و پایینی قطعه‌کار ساندویچی می‌باشد.

3-4- تعیین حالات بهینه در فرآیندهای سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ

در این بخش برای اینکه بتوان حالت بهینه (سرعت برشی و سرعت پیشروی) در هر کدام از دو فرآیند سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ را بر اساس مشخصات خروجی اندازه‌گیری شده تولرانسهای ابعادی قطر، هندسی گردی و زبری سطح تعیین نمود، از الگوریتم بهینه‌سازی نرم‌افزار¹ مینی‌تب 19 استفاده شده است. لازم به ذکر است، همان‌طور که در جدول 5 طراحی آزمایشات نشان داده شده است، در هر دو فرآیند سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ، روش طراحی آزمایش، عاملی کامل² بوده است. در این نرم‌افزار پس از آنالیز مقادیر خروجی اندازه‌گیری شده نسبت به پارامترهای برشی ورودی، امکان تعیین حالت بهینه برای این فرآیندها وجود دارد.

برای متغیر زبری سطح، حالت بهینه کمترین مقدار و برای متغیرهای تولرانس ابعادی و هندسی، به دلیل اینکه این مقادیر

3-3- مقایسه زبری سطح دیواره داخلی سوراخ‌ها

همان‌طور که در شکل 6- الف مشاهده می‌شود، در سوراخ‌کاری متداول، افزایش سرعت برشی به ازای قطر ثابت ابزار، به مفهوم افزایش سرعت دوران مته می‌باشد. با وارد شدن مته داخل سوراخ و انجام براده‌برداری به ازای سرعتهای برشی بیشتر، با توجه به اینکه عمق کلی سوراخ در قطعه‌کار نسبتاً زیاد (نزدیک به 50 mm) است و مته باید از سه جنس مختلف فولادی عبور کند تا سوراخ‌کاری تکمیل شود، دامنه ارتعاش و ناپایداری مته افزایش یافته است. افزایش ارتعاشات مته منجر به زبرتر شدن سطح حاصل از ماشین‌کاری می‌گردد.

مطابق شکل 6- الف، با افزایش سرعت پیشروی مته، نیروی برشی افزایش می‌یابد و تغییر شکل پلاستیک شدید در موضع برش رخ می‌دهد. با افزایش نرخ پیشروی، براده‌های حاصل از ماشین‌کاری بزرگتر و گاهی پیوسته‌تر می‌شود که با توجه به عبور براده‌ها از فضای مارپیچی مته و برخورد آن با دیواره داخلی سوراخ، باعث افزایش زبری سطح سوراخ تولید شده می‌گردد.

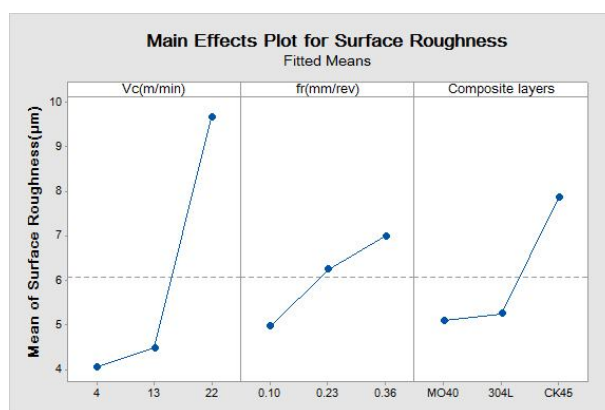


Fig. 6 a: Drilling process

شکل 6 الف: فرآیند سوراخ‌کاری متداول

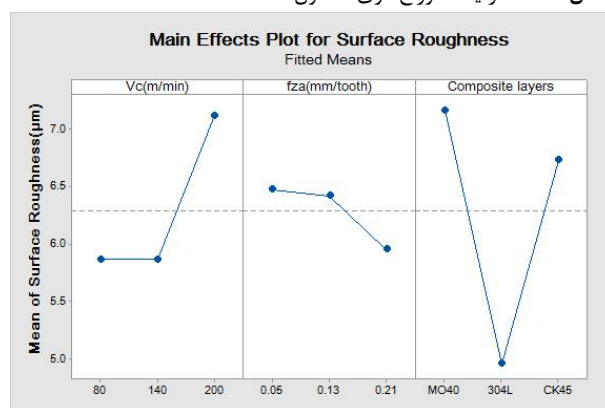


Fig. 6 b: Helical milling process

شکل 6 ب: فرآیند فرزکاری مارپیچ

Fig. 6 The effects of cutting speed, feed rate and layers material on the surface roughness

شکل 6 اثر سرعت برشی، سرعت پیشروی و جنس لایه‌ها بر زبری سطح

¹ Response optimizer

² Full factorial

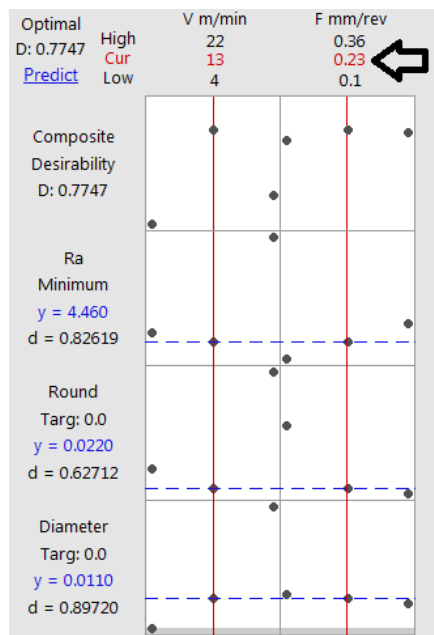


Fig. 7 a: Drilling process

شکل 7 الف: فرآیند سوراخ‌کاری متداول

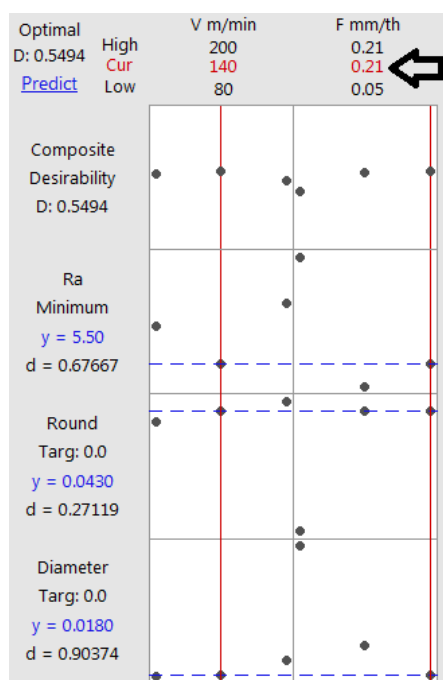


Fig. 7 b: Helical milling process

شکل 7 ب: فرآیند فرزکاری مارپیچ

Fig. 7 The optimum conditions based on dimensional and roundness tolerances and surface roughness

شکل 7 حالات بهینه بر اساس تolerانس‌های ابعادی و گردی و زبری سطح

3-5- مقایسه توپوگرافی سطح دیواره داخلی سوراخ‌ها

در این بخش به منظور مطالعه توپوگرافی (بافت) سطح دیواره داخلی سوراخ‌های ایجاد شده، سوراخ‌ها با استفاده از وایرکات به صورت عرضی برش خورده و توپوگرافی یا بافت سطحی داخل سوراخ‌ها توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. برای

هم دارای علامت مثبت بوده‌اند و هم علامت منفی، هدف¹ بهینه‌سازی نزدیکترین مقدار به عدد صفر تعیین شده است که این نکته، در سمت چپ نمودارهای 7- الف و 7- ب نیز قابل مشاهده است. همچنین در این فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از نرم افزار مینی‌تپ، ضروری بود تا به میزان اهمیت مشخصات خروجی، وزن² تخصیص می‌یافت و چون در این تحلیل، برای نویسندگان، هر سه مشخصه خروجی به یک اندازه اهمیت داشتند، ضریب وزنی هر سه، مقدار 1 تعیین و تنظیم گردید.

لازم به ذکر است که در بهینه‌سازی، برای تک به تک 18 سوراخ ایجاد شده توسط فرآیندهای فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری متداول، ابتدا مقادیر میانگین زبری سطح و تolerانس‌های ابعادی و هندسی برای هر سه لایه فولادی مختلف، محاسبه و سپس این مقادیر خروجی میانگین برای سوراخ‌ها، جهت تعیین حالات بهینه استفاده و آنالیز شده است.

حالت ماشین‌کاری (متغیرهای برشی) بهینه برای هر دو فرآیند سوراخ‌کاری و فرزکاری، در بخش بالای نمودارهای 7- الف و 7- ب به رنگ قرمز نمایش داده شده است که برای تشخیص بهتر نیز، فلشی در کنار این پارامترهای برشی بهینه، درج شده است.

همان‌طور که در تصویر 7- الف مشاهده می‌شود در فرآیند سوراخ‌کاری متداول، سرعت برشی بهینه 13 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی بهینه 0/23 میلی‌متر بر دور بوده است. به ازای این شرایط برشی، مقادیر مشخصات خروجی بهینه همزمان، زبری سطح 4/46 میکرومتر، تolerانس گردی 0/0220 میلی‌متر و تolerانس ابعادی 0/0110 میلی‌متر بوده است.

همان‌طور که در شکل 7- ب مشاهده می‌شود، در حالت فرزکاری مارپیچ، سرعت برشی بهینه 140 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی بهینه 0/21 میلی‌متر بر دندانانه بوده است. به ازای این شرایط برشی، مقادیر مشخصات خروجی بهینه همزمان، زبری سطح 5/50 میکرومتر، تolerانس گردی 0/0430 میلی‌متر و تolerانس ابعادی 0/0180 میلی‌متر بوده است.

به ازای این حالات بهینه تعیین شده در هر دو فرآیند فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری متداول، می‌توان دید که هر سه مقدار خروجی زبری سطح، تolerانس‌های ابعادی قطر و هندسی گردی در سوراخ‌کاری متداول، کمتر از مقادیر خروجی بهینه متناظر در فرزکاری مارپیچ است. به بیان ساده‌تر، حالت بهینه سوراخ‌کاری متداول از نظر هر سه مشخصه خروجی اندازه‌گیری شده، نسبت به حالت بهینه فرزکاری مارپیچ برتری دارد.

¹ Target
² Weight

ابزار بیشتر است. دلیل دیگر این است که در سوراخ‌کاری متداول براده‌هایی پیوسته‌تر و بزرگتر تولید شده که تنها مسیر خروج آنها شیارهای مارپیچ مته است. این براده‌ها به دلیل پدیده کرنش‌سختی، گاه‌سختی بیشتری نسبت به سطح قطعه‌کار پیدا می‌کنند. بنابراین براده‌ها در این فضای محدود، سطح داخلی سوراخ را خراشیده و عیوب سطحی متعددی ایجاد می‌کنند. در حالی که در فرزکاری مارپیچ، رد و اثر کمتری از ابزار به واسطه درگیری تدریجی و منقطع ابزار با سطح سوراخ به وجود می‌آید. علاوه بر این، متغیر بودن ضخامت براده جدا نشده، موجب تشکیل براده‌هایی کوچک‌تر و منفصل‌تر در فرزکاری می‌گردد. این براده‌ها با داشتن فضای آزاد بیشتر برای خروج (به دلیل کوچکتر بودن قطر ابزار نسبت به قطر سوراخ در فرآیند فرزکاری مارپیچ)، برخورد کمتری با دیواره داخلی سوراخ داشته و تخلیه آنها راحت‌تر خواهد بود. در نتیجه بافت سطحی یکنواخت‌تر و عیوب سطحی کمتری در فرزکاری مارپیچ به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل‌های 8 و 9 دیده می‌شود، در همه موارد، بافت سطحی لایه میانی 304 L نسبت به دو لایه دیگر دارای عیوب کمتری است که دلیلش کمتر بودن سختی و استحکام کششی نسبت به جنس فولادی لایه‌های پایینی و بالایی می‌باشد.

ثبت تصاویر از بزرگنمایی 100 برابر استفاده شده است. در بررسی تصاویر توپوگرافی سطح در این بخش، دو حالت برای مقایسه در نظر گرفته شده است، بر اساس جدول طراحی آزمایشات (جدول 5)، حالت اول شرایطی است که کمترین مقادیر سرعت برشی و سرعت پیشروی برای هر دو فرآیند سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ انتخاب شده است. دوم، شرایطی است که بیشترین مقادیر سرعت برشی و سرعت پیشروی برای هر دو فرآیند، مد نظر قرار گرفته است. تصاویر توپوگرافی سطح دیواره داخلی سوراخ‌ها به تفکیک نوع فرآیند سوراخ‌کاری (سوراخ‌کاری متداول و فرزکاری مارپیچ) و جنس هر لایه فولادی (MO40, 304L, CK45) از قطعه‌کار ساندویچی، در شکل‌های 8 و 9 ارائه شده است. با توجه به تصاویر 8 و 9 مشاهده می‌شود که در سوراخ‌کاری متداول، خراش‌ها، حفره‌ها، ترک‌ها، شیارها، پارگی سطحی، ناهمواری‌ها و به‌طور کلی عیوب سطحی بیشتری نسبت به حالت فرزکاری مارپیچ بر روی سطح دیواره داخلی سوراخ‌ها وجود دارد. این موضوع به واسطه دو دلیل عمده است. نخست آن‌که در سوراخ‌کاری متداول تماس بین ابزار و قطعه‌کار پیوسته بوده است. از این رو تغییر شکل پلاستیک شدیدتر و مقاومت در برابر نفوذ ابزار به درون ماده بیشتر است. بنابراین ارتعاش و ناپایداری

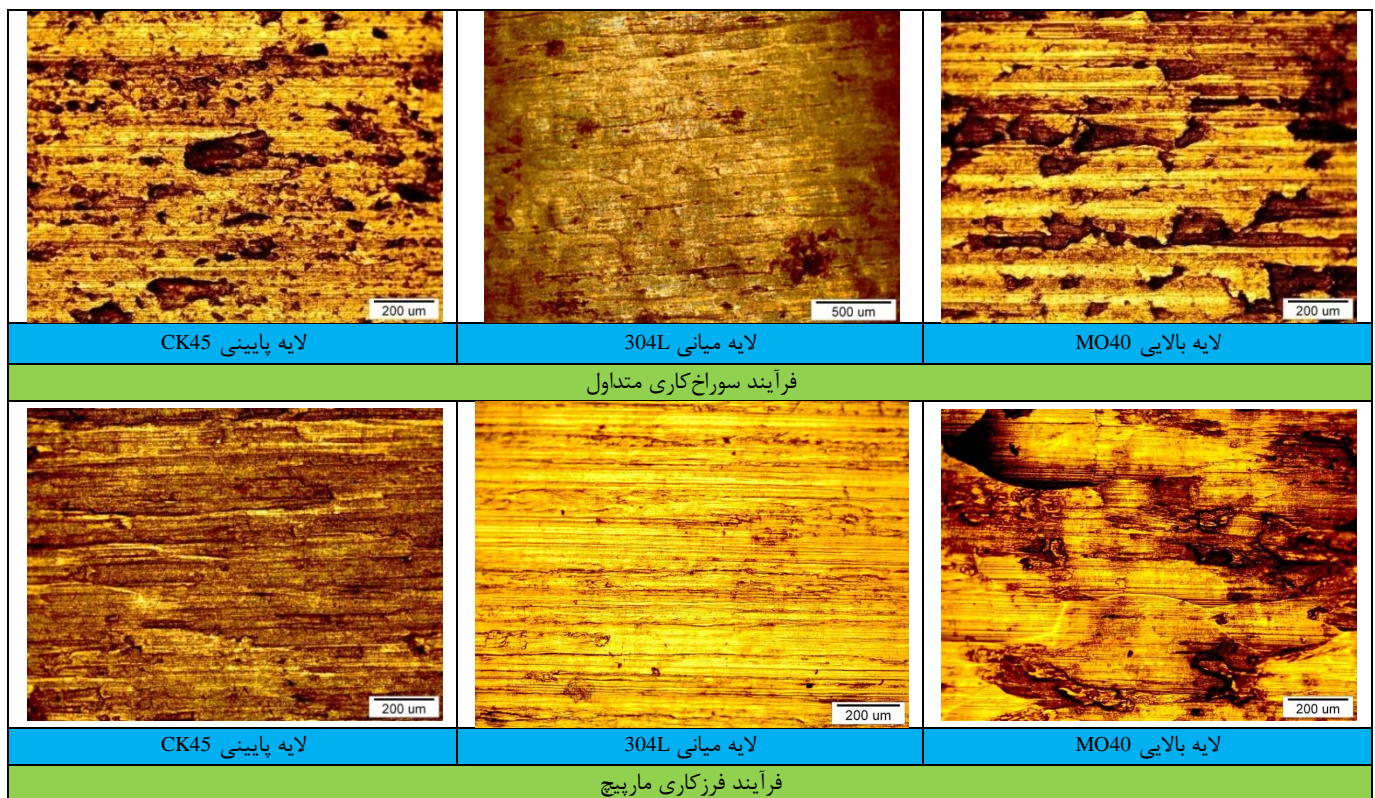


Fig. 8 Surface topography at the inner wall of the holes for the minimum levels of cutting speed and feed rate

شکل 8 توپوگرافی سطح دیواره داخلی سوراخ‌ها به ازای حالت کمترین مقادیر سرعت برشی و سرعت پیشروی

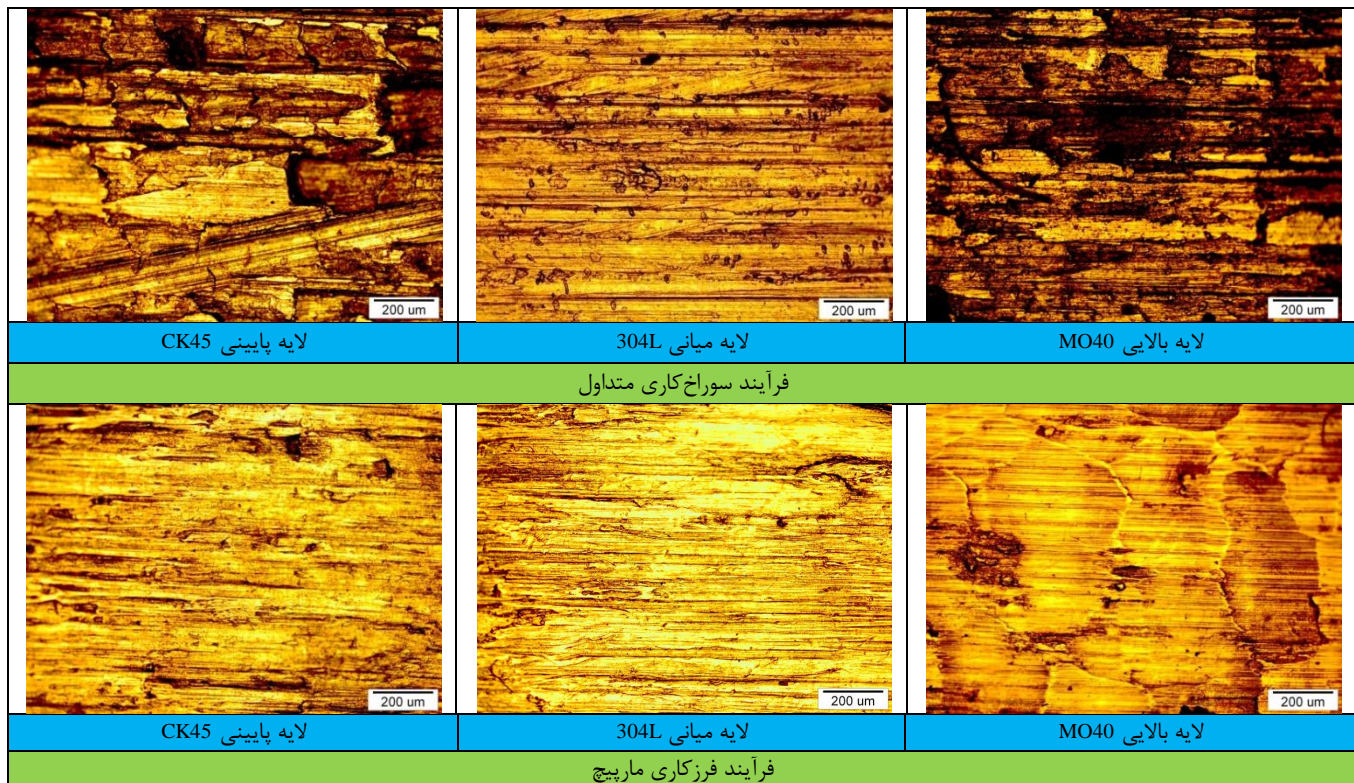


Fig. 9 Surface topography at the inner wall of the holes for the maximum levels of cutting speed and feed rate

شکل 9 توپوگرافی سطح دیواره داخلی سوراخ‌ها به ازای حالت بیشترین مقادیر سرعت برشی و سرعت پیشروی

با مقایسه تمام تصاویر توپوگرافی دیده می‌شود که بافت تمامی لایه‌های بالایی MO40 دارای بیشترین تراکم عیوب سطحی می‌باشند که دلیلش بیشترین استحکام کششی و سختی در بین لایه‌ها است و در هر دو روش سوراخ‌کاری و فرزکاری، در هنگام براده‌برداری از این لایه، ابزار بیشترین نیروی برشی و گشتاور پیچشی را تحمل می‌کند و تحت تنش مکانیکی و حرارتی بیشتری قرار می‌گیرد که سبب تنزل یکپارچگی سطح در لایه MO40 می‌شود. در لایه پایینی CK45 اگر چه سختی و استحکام آن نسبت به سایر جنسها در حد متوسط است، ولی با توجه به اینکه ابزار در هنگام عبور از این لایه در دهانه خروجی سوراخ قرار دارد، سطح درگیرش با قطعه‌کار بیشترین حالت است لذا نوک برنده ابزار خصوصا در سوراخ‌کاری، متحمل خیز قابل توجهی می‌شود که این مطلب نیز افزایش عیوب یکپارچگی سطح را بر روی لایه پایینی CK45 ایجاد می‌کند، با این حال، میزان، گستردگی و تعدد عیوب، باز هم نسبت به لایه بالایی MO40 کمتر می‌باشد.

در سوراخ‌کاری با افزایش سرعت پیشروی، تلرانس اندازه قطر سوراخ از $0/045$ mm به $0/025$ mm کاهش و در واقع دقت افزایش یافته است. در فرزکاری مارپیچ با افزایش سرعت پیشروی، تلرانس اندازه قطر سوراخ از $0/14$ mm به $0/05$ mm افزایش یافته است.

- اثر افزایش سرعت برشی و سرعت پیشروی بر روی دامنه تغییرات تلرانسی اندازه قطر سوراخ در سوراخ‌کاری متداول، مطلوب‌تر از فرآیند فرزکاری مارپیچ می‌باشد.

- در هر دو فرآیند با افزایش سرعت برشی، تلرانس گردی افزایش یافته است. محدوده تغییرات تلرانس گردی در سوراخ‌کاری از $0/026$ mm الی $0/044$ mm و در فرزکاری از $0/039$ mm الی $0/046$ mm می‌باشد.

- در هر دو فرآیند با افزایش سرعت پیشروی، تلرانس گردی سوراخ افزایش یافته است. محدوده تغییرات تلرانس گردی سوراخ در فرآیند سوراخ‌کاری متداول از $0/032$ mm الی $0/035$ mm و در فرآیند فرزکاری مارپیچ از $0/037$ mm الی $0/048$ mm می‌باشد.

- اثر افزایش سرعت برشی بر روی تلرانس گردی سوراخ در

4- نتیجه‌گیری

- در سوراخ‌کاری متداول با افزایش سرعت برشی، تلرانس اندازه قطر سوراخ از 0 mm الی $0/09$ mm افزایش می‌یابد؛ ولی در فرزکاری مارپیچ با افزایش سرعت برشی، تلرانس قطر سوراخ از

- 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.
- [3] M.H. Saadatbakhsh, H. Imani, M.H. Sadeghi, Experimental study of surface roughness and geometrical and dimensional tolerances in helical milling of aisi 4340, *Mechanical engineering* 93: 4063-4074, 2017.
- [4] L. Zhou, Ke, H. Dong, Z. Chen, K. Gao, Hole diameter variation and roundness in dry orbital drilling of CFRP/Ti stacks, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 1-14, 2016.
- [5] S.R. Fernández-Vidal, P. Mayuet, A. Rivero, J. Salguero, I. del Sol, M. Marcos, Analysis of the effects of tool wear on dry helical milling of Ti6Al4V alloy, *Procedia Eng.* 132 :593-599. 2015.
- [6] B. Wang, Y. Wang, H. Zhao, L. Sun, M. Wang, X. Kong, Effect of a Ti alloy layer on CFRP hole quality during helical milling of CFRP/Ti laminate, *Composite Structures*, 252: 112778-112788, 2020.
- [7] M.H. Saadatbakhsh, A. Rasti, M.H. Sadeghi, H. Hassanpour, A. R. Omiddodman, Empirical study of dimensional and geometrical tolerances in helical milling of AISI 4340 steel, *Modares mechanical engineering*.14 :119-126, 2015.
- [8] N. Molla Ramezani, A. Rasti, M.H. Sadeghi, B. Jabbaripour, M. Rezaei Hajideh, Experimental study of tool wear and surface roughness on high speed helical milling in D2 steel, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, 15, No. 13, 194-198, 2015 (in Persian).
- [9] G. Yang, Z. Dong, S. Gao, Y. Bao, R. Kang, D. Guo, A novel reverse helical milling process for reducing push-out delamination of CFRP, *Composite Structures*, 253: 112670-112680, 2020.
- [10] <https://iran-mavad.com/mo40-بررسی-فولاد-mo40.html>
- [11] <http://www.packmangroup.com/content/1691/304>
+فولاد+زنگ+نزن+نوع
- [12] <http://www.otaisteel.com/astm1045-carbon-steel-g10450-din-ck45-w-nr-1-1191-jis-s45c-sheet-plate/>
- [13] H. Tönshoff, W. Spintig, W. König, A. Neises, Machining of holes developments in drilling technology, *CIRP Annals-Manufacturing technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 551-561, 1994.
- [14] Ji. Chunhui, Li. Yonghang, Q. Xuda, Q. Zhao, D. Sun, Y. Jin, 3D FEM simulation of helical milling hole process for titanium alloy Ti-6Al-4V, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 81:1733-1742, 2015.
- [15] J. L. S. Ribeiro, S.B. Diniz, J.C.C. Rubio, A.M. Abrão, Dimensional and geometric deviations induced by milling of annealed and hardened AISI H13 tool steel, *American Journal of Materials Science*, Vol. 2, No. 1, pp. 14-21, 2012.
- [16] 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.
- فرآیند فرزکاری، مطلوب‌تر از سوراخ‌کاری و تأثیر افزایش سرعت پیشروی بر تلرانس گردی در سوراخ‌کاری، مطلوب‌تر از فرزکاری مارپیچ می‌باشد.
- در هر دو فرآیند سوراخ‌کاری و فرزکاری با افزایش سرعت برشی، زبری سطح افزایش یافته است که دامنه تغییرات زبری در سوراخ‌کاری از $4/1 \mu\text{m}$ الی $9/8 \mu\text{m}$ و در فرزکاری از $5/8 \mu\text{m}$ الی $7/3 \mu\text{m}$ می‌باشد.
- در سوراخ‌کاری متداول با افزایش سرعت پیشروی، زبری سطح از $4/9 \mu\text{m}$ الی $7 \mu\text{m}$ افزایش پیدا کرده، در حالی که در فرزکاری مارپیچ با افزایش پیشروی، زبری سطح از $6/4 \mu\text{m}$ الی $5/9 \mu\text{m}$ کاهش داشته است.
- در سوراخ‌کاری متداول، خراشها، حفره‌ها، ترک‌ها، شیارها، پارگی سطحی، ناهمواری‌ها و به طور کلی عیوب سطحی بیشتری نسبت به حالت فرزکاری مارپیچ بر روی سطح دیواره داخلی سوراخ‌ها وجود دارد.
- هم در فرزکاری و هم در سوراخ‌کاری، بافت سطحی لایه میانی L 304 نسبت به دو لایه دیگر دارای عیوب کمتر و یکپارچگی سطح بهتری می‌باشد. در حالی که بافت سطحی لایه‌های بالایی MO40 دارای بیشترین تعداد و تراکم شیار، خراش، حفره و پارگی سطحی می‌باشند.
- در حالت بهینه سوراخ‌کاری متداول، هر سه مقدار مشخصات خروجی زبری سطح، تلرانس‌های ابعادی قطر و هندسی گردی کمتر از مقادیر خروجی بهینه متناظر در فرآیند فرزکاری مارپیچ است. به بیان ساده‌تر، حالت بهینه سوراخ‌کاری متداول از نظر هر سه مشخصه خروجی اندازه‌گیری شده، نسبت به حالت بهینه فرزکاری مارپیچ برتری دارد.
- به طور کلی، جهت حصول به تلرانس‌های ابعادی و هندسی مطلوب، سوراخ‌کاری عملکرد بهتری نسبت به فرزکاری مارپیچ داشته است ولی از نظر رسیدن به زبری سطح کمتر و یکپارچگی سطح مطلوب‌تر، فرزکاری مارپیچ، عملکرد بهتری نسبت به سوراخ‌کاری متداول داشته است. از دیگر امتیازات فرزکاری مارپیچ، نیاز به تنوع و هزینه کمتر ابزارهای مورد استفاده است، در حالی که در فرآیند سوراخ‌کاری، نیاز به استفاده از مته مرغک و پیش‌مته (ها) به غیر از مته اصلی است.

5- مراجع

- [1] R.B.D. Pereira, L.C. Brandão, A.P. Paiva, J.R. Ferreira, J. P. Davim, A review of helical milling process, *International journal of machine tools and manufacture* 120: 27-48, 2017.
- [2] D. Olvera, L. N. L. de Lacalle, G. Urbikain, A.