



مطالعه تجربی تolerانس های ابعادی و هندسی سوراخ تولید شده در فرآیند برقوزنی سخت فولاد ابزار AISI D2

حجت الله رنجبر^۱، محمدحسین صادقی^{۲*}، هادی ایمانی^۱، امیر راستی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، sadeghim@modares.ac.ir

چکیده

صنعت جدید اغلب به تولید تعداد زیادی از سوراخ ها با دقت ابعادی و هندسی مطلوب و تolerانس های بسته تر برای مونتاژ دقیق نیاز دارد. این نیازها تنها با سوراخ کاری سنتی نمی تواند برآورده شود. برقوزنی می تواند یکی از اقتصادی ترین روش ها برای ایجاد یک سوراخ دقیق با استفاده از ابزار برقوی چند لبه باشد. هدف اصلی از فرآیند ماشین کاری دقیق حداقل کردن انحراف های ابعادی و هندسی است. این مقاله به بررسی تolerانس های ابعادی و هندسی سوراخ استوانه ای برقوشده با استفاده از برقوی کاربیدی با پوشش TiAlN روی فولاد ابزار AISI D2 سخت شده (تمپر شده و کوئینچ شده) در شرایط برش (سرعت دورانی اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش شعاعی) مختلف می پردازد. در این تحقیق ۱۸ آزمایش با در نظر گرفتن ۳ سطح سرعت دورانی، ۳ سطح نرخ پیشروی و ۲ سطح عمق برش شعاعی روی نمونه های مکعبی با سختی ۵۵ راکولسی انجام گرفته است. نتایج آزمایش ها نشان داد که بهترین کیفیت هندسی می تواند در حالت بهینه و در نظر گرفتن تمامی پارامترها با بیشینه کردن پارامترهای برشی به دست آید. در مورد تolerانس ابعادی دقیق ترین قطر سوراخ برقو شده در سرعت دورانی و عمق برش بالاتر و کمترین پیشروی به دست آمد.

کلید واژگان: برقوزنی، تolerانس های ابعادی و هندسی، فولاد سخت کاری شده D2

The experimental study of the dimensional and geometrical tolerances of the hole produced by the hard reaming process on the tool made of AISI D2

Hojjatollah Ranjbar, Mohammad Hosein Sadeghi *, Hadi Imani, Amir Rasti

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115 - 143 Tehran, Iran, sadeghim@modares.ac.ir

ABSTRACT

The modern industry requires the producing high numbers of holes with dimensional and geometrical accuracy and tight tolerances for the accurate assembly. These requirements cannot be achieved with traditional drilling. The reaming process can be one of economical methods for making an accurate hole by the multi-flute reamer. The main purpose of accurate machining process is minimizing the dimensional and geometrical deviations. In this paper, the dimensional and geometrical tolerances of cylindrical hole that is reamed by the TiAlN coated carbide reamer on the hardened tool steel AISI D2 (tempered and quenched) has been investigated in the different cutting conditions (spindle speed, feed rate and radial cutting depth). Eighteen experiments with considering 3 levels of spindle speed, 3 levels of feed rates and 2 levels of radial cutting depths are done on the cubic work pieces with the hardness of 55 HRC. The results of the experiments demonstrated that the best geometrical quality can be achieved in the optimum conditions and considering all of parameters by maximizing these parameters. With regarding to dimensional tolerances, the most accurate diameter of the hole is achieved by higher spindle speed and cutting depth and lowest feed.

Keywords: Dimensional and Geometrical Tolerances, D2 Hardened Steel, Reaming.

از سوی دیگر، قطعات مهندسی جدید اغلب دارای هندسه پیچیده ای بوده و دارای تعداد زیادی سوراخ به منظور استفاده در مجموعه های مونتاژی دقیق هستند [۲]. تolerانس های ابعادی و هندسی یکی از مهم ترین مشخصه های این قطعات می باشند که علاوه بر جنبه های ظاهری محصول، عملکرد محصول را نیز تحت تأثیر خود قرار می دهند [۳]. پیچیدگی های قطعات، ترکیبات ریزساختار و سختی بالا در برخی از قطعات با عملکرد ویژه و خطاهای متعدد احتمالی در آن ها باعث شده است که تلاش برای تضمین نسبی برآورده کردن نیازهای تolerانسی مجموعه های مکانیکی به یکی از دشوارترین چالش های طراحان و تولیدکنندگان این مجموعه ها تبدیل گردد.

۱- مقدمه

فولاد AISI D2 از نوع فولاد ابزار سردکار پرکربن و پرکرم بوده و از عناصر آلیاژی مانند مولیبدن و وانادیم تشکیل شده است. این فولاد به دلیل سختی زیاد، استحکام فشاری بالا، مقاومت به سایش خوب و پایداری بالا در سخت کاری، کاربردهای گسترده ای در صنایع مختلف ساخت دارد [۱]. ماشین کاری سنتی این فولاد معمولاً در حالت آنیل یا نرماله انجام شده و بعد از انجام عملیات حرارتی، قطعات سنگ زده می شوند. با استفاده از روش ماشین کاری سخت می توان این مراحل اضافی را حذف نمود و بهره وری را افزایش داد. همچنین استفاده از این روش موجب کاهش زمان و هزینه فرآیند شده و سطح مطلوبی را به دست می دهد.

Please cite this article using:

H. Ranjbar, M.H. Sadeghi, H. Imani, A. Rasti, The Experimental Study of the Dimensional and Geometrical Tolerances of the Hole Produced by the Hard Reaming Process on the Tool Steel AISI D2, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp.280-284, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در سوراخ‌کاری سنتی^۱ با مته‌های مارپیچ معمولی، به دلیل محدودیت‌هایی مانند ازدیاد نرخ براده‌برداری^۲، بالا بودن نیرو و حرارت تولیدی و همچنین صفر بودن سرعت برشی در نوک ابزار، دستیابی به سوراخی باکیفیت و دقت بالا دشوار است [۴]. سوراخ‌کاری در مقایسه با دیگر فرآیندهای ماشین‌کاری با چالش‌های فنی زیادی روبرو است. با نزدیک شدن به مرکز ابزار، برآیند سرعت‌های برشی به صفر میل می‌کند و براده برداری شباهت زیادی با فرآیند اکستروژن^۳ داشته و به‌جای برش ماده قطعه‌کار به بیرون از مرکز ابزار، سیلان می‌یابد. در این حالت خروج براده^۴ و پراکندگی حرارت بسیار سخت می‌شود. علاوه بر این اصطکاک بین مته، براده و قطعه‌کار می‌تواند به‌اندازه کافی بالا باشد و تأثیر منفی بر روی دقت ابعادی و پرداخت سطح سوراخ ماشین‌کاری شده داشته باشد [۵]. در بسیاری از موارد فرآیند سوراخ‌کاری به‌تنهایی نمی‌تواند دقت و کیفیت مطلوب را برآورده سازد، از این‌رو نیاز است تا با فرآیند نهایی دیگری همراه شود. از جمله فرآیندهای تکمیلی که برای رسیدن به‌اندازه نهایی سوراخ مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان به سنگ‌زنی^۵، هونینگ^۶ و برق‌قوئی^۷ اشاره کرد که در این میان سنگ‌زنی و هونینگ در بیشتر موارد باعث افزایش زمان و هزینه ساخت می‌شوند [۶]. در عمل، اکثر سوراخ‌ها با مته‌های مارپیچ ایجادشده و در مرحله بعد می‌توان از فرآیند برق‌قوئی با استفاده از یک ابزار یکپارچه، برای ایجاد تعدادی از سوراخ‌های بزرگ‌تر استفاده کرد.

برق‌قوئی یکی از روش‌های مرسوم پرداخت سوراخ و یک فرآیند ماشین‌کاری دقیق است که می‌تواند تیرانس‌های بسته‌تر و کیفیت سطح بالایی را ایجاد کند [۷]. تعیین پارامترهای برق‌قوئی صحیح برای ایجاد سوراخ‌هایی با مشخصات کیفی خوب در فولاد آلیاژی D2 معمولاً به علت قابلیت سختی استثنایی، مقاومت سایشی بالا و بدتراش بودن مشکل است و در برخی موارد شکست ابزار و عدم دقت ابعادی و هندسی را باعث می‌شود.

محققان بسیاری در زمینه کیفیت سطح سوراخ و تیرانس‌های ابعادی و هندسی در فرآیند برق‌قوئی مطالعاتی انجام داده‌اند. بزرا و همکاران [۶] به بررسی تیرانس‌های ابعادی و هندسی روی آلیاژ ریخته‌گری شده سیلیکون آلومینیوم پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و هندسه ابزار بر روی فرآیند برق‌قوئی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از ابزار برقی با تعداد لبه‌های بیشتر، شیارهای مستقیم و حاشیه باریک، در عمق برش کم، سرعت برشی پایین و نرخ پیشروی بالا بهترین کیفیت سوراخ را نتیجه می‌دهد. لئوناردو و همکاران [۳] به بررسی قابلیت‌های فرآیند برق‌قوئی روی فولاد ضدزنگ آستنیتی با ابزار برقی از جنس فولاد تندبر پرداختند. مشخص شد که فرآیند برق‌قوئی در سرعت برشی و نرخ پیشروی پایین و عمق برش کم، سوراخی با انحراف ابعادی کمتری ایجاد می‌کند. اسچوزر و همکاران [۸] تأثیر هندسه ابزار برقی، روی کیفیت سوراخ گایدهای سوپاپ از جنس فولاد آلیاژی زینتر شده^۸ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش ناحیه تماس لبه برش ثانویه ابزار با سطح قطعه‌کار، تیرانس راستی را بهبود می‌بخشد. ژیانگ پین و همکاران [۴] فرآیند برق‌قوئی را روی آلیاژ AISI12 و با استفاده از برق‌قوئی چند بلوری الماسه^۹ را

مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، گشتاور، نیروی برشی، قطر و تیرانس استوانه‌ای بودن سوراخ مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که با افزایش سرعت برشی و کاهش نرخ پیشروی، نیرو و گشتاور برشی کاهش می‌یابد. همچنین در این حالت سوراخی با بالاترین دقت به دست آمد. وانگ و همکاران [۹] رابطه‌ی بین نیروها و پارامترهای برش را با استفاده از الگوریتم تغییر شکل یافته فوری در برق‌قوئی آلیاژ ریخته‌گری آلومینیوم ZL1402 مورد بررسی قرار دادند. نتایج به این صورت بود که مقادیر بالای نرخ پیشروی و سرعت برشی پایین نیروهای کمتری را فراهم می‌کند. در نهایت با بهینه کردن پارامترهای برق‌قوئی، رابطه‌ای برای نیروهای برشی و تیرانس استوانه‌ای سوراخ برقی شده فراهم کردند. چیفر و همکاران [۳] ثابت کردند که با استفاده از حداقل مقدار روان‌کار عملکرد کیفی بالایی از دقت ابعادی و هندسی سوراخ و همچنین صافی سطح بالایی به دست می‌آید. اونیک و همکاران [۱۰] یک مدل مکانیکی توسعه داده شده به منظور پیش‌بینی نیروی برش و انحراف ابزار برقی استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که نوسان اسپیندل، کج بودن زاویه موقعیت‌دهی اسپیندل و خروج از محوری محور ابزار و سوراخ تأثیر قابل‌توجهی روی نیروهای شعاعی می‌گذارد و این نیروهای شعاعی همبستگی نزدیکی با کیفیت سوراخ تولیدی دارد. اوگو و همکاران [۱۱] با بررسی پارامترهای برش در برق‌قوئی چدن خاکستری به این نتیجه رسیدند که سرعت برش بیشترین تأثیر را روی دقت ابعادی سوراخ برقی شده دارد. توفیق‌یان و همکاران [۱۲] از یک مدل شبه استاتیک توسعه یافته در برق‌قوئی به منظور بررسی اثرات پارامترهای ابزار و برش روی فرم سوراخ استفاده کردند و آن‌ها همچنین دریافتند که زاویه‌ی گام متغیر (زاویه‌ی بین دندانه‌های برقی) بر پایداری فرآیند برق‌قوئی برای به دست آوردن کیفیت سطحی بالا تأثیر می‌گذارد.

در این پژوهش به بررسی و مقایسه اثر پارامترهای برش روی دقت سوراخ تولید شده در فرآیند برق‌قوئی روی فولاد سخت D2 در حالت خشک پرداخته شده است. به همین منظور، با کمک روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل^{۱۰} عملکرد پارامترهای عمق برش، سرعت دورانی اسپیندل و نرخ پیشروی روی دقت ابعادی و هندسی سوراخ مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش

قطعه‌کار مورد آزمایش فولاد ابزار سردکار D2 به صورت نمونه‌های مکعبی شکل با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰ میلی‌متر به عنوان ماده‌ی قطعه‌کار مورد استفاده گردید. شکل ۱ تصویری از سوراخ‌های برقی شده بر روی قطعه‌کار مورد نظر را نشان می‌دهد. ماده‌ی قطعه‌کار با سختی متوسط ۵۵ راکول‌سی، کوئینچ شده^{۱۱} و تمپر شده^{۱۲} به کار برده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ نشان داده شده است.

آزمایش‌های برق‌قوئی با استفاده از ماشین کنترل عددی سه محوره کنترل همزمان مدل VMC850 ساخت کشور آلمان با ماکزیمم دوران اسپیندل ۸۰۰۰ دور بر دقیقه صورت گرفت. از دو مته کاربیدی با پوشش TiAlN با قطرهای متوسط ۹/۸ و ۹/۹ میلی‌متر برای ایجاد سوراخ اولیه استفاده شد. سوراخ‌کاری با سرعت ۳۰ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۰۲ میلی‌متر بر دور انتخاب گردید.

برق‌قوئی استفاده شده از نوع کاربیدی شش لبه با پوشش TiAlN، زاویه مارپیچ صفر (برق‌قوئی با شیار مستقیم بهترین دقت و نیروی محوری کمتری را باعث

1. Traditional Drilling
2. Removal Rate
3. Extrusion
4. Chip
5. Grinding
6. Honing
7. Reaming
8. Sintered
9. PCD

10. Full Factorial
11. Quenched
12. Tempered

جدول ۲ مشخصات هندسی ابزار برقو			
هندسه ابزار	اندازه‌ها	هندسه ابزار	اندازه‌ها
قطر (mm)	۱۰	زاویه ماریج (درجه)	۰
طول ابزار (mm)	۱۱۰	زاویه آزاد (درجه)	۱۲
تعداد شیارها	۶	زاویه چمفر (درجه)	۴۵
زاویه براده (درجه)	۱۵	طول چمفر (mm)	۱

۳- طراحی آزمایش

در این پژوهش شرایط برق‌زنی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. ۳ پارامتر متغیر فرآیند و تأثیر آن‌ها روی پارامترهای قطر سوراخ، دایره‌ای و استوانه‌ای محاسبه شد. پارامترهای متغیر فرآیند شامل پیشروی (f)، سرعت دورانی اسپیندل (n) و عمق برش شعاعی (a_e) می‌باشند. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش فاکتوریل کامل صورت گرفت. سرعت دورانی و نرخ پیشروی در ۳ سطح و عمق برش شعاعی در ۲ سطح انتخاب شدند. در جدول ۳ مقادیر و سطوح تعریف شده از متغیرهای فرآیند آمده است.

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در کل ۱۸ آزمایش با ۲ بار تکرار به منظور مقایسه‌ی آن‌ها از نظر اندازه اسمی، تلرانس گردی و تلرانس استوانه‌ای انجام شد. جدول ۴ شرایط تست‌ها و میانگین خروجی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳ پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آن‌ها			
فاکتورها	سطوح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
عمق برش شعاعی (a_e) (mm)	۰/۰۵	۰/۱	-
نرخ پیشروی (f) (mm/rev)	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱
سرعت اسپیندل (n) (rpm)	۱۲۰	۱۵۰	۱۸۰

جدول ۴ پارامترهای متغیر آزمایش به همراه خروجی‌های اندازه‌گیری شده							
$Test\ Nu$	n (rpm)	f (mm/rev)	a_e (mm)	قطر سوراخ (mm)	تلرانس گردی (mm)	تلرانس استوانه‌ای (mm)	
۱	۱۲۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۱۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۴۶	۰/۰۱۲۱	
۲	۱۲۰	۰/۰۲	۰/۱	۱۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۷۴	
۳	۱۲۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۱۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۱۱	
۴	۱۲۰	۰/۰۵	۰/۱	۱۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۶۸	
۵	۱۲۰	۰/۱	۰/۰۵	۱۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۸۱	
۶	۱۲۰	۰/۱	۰/۱	۱۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۵۲	
۷	۱۵۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۱۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۹۸	
۸	۱۵۰	۰/۰۲	۰/۱	۱۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۷۵	
۹	۱۵۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۱۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۸۳	
۱۰	۱۵۰	۰/۰۵	۰/۱	۱۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۷۱	
۱۱	۱۵۰	۰/۱	۰/۰۵	۱۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۷۸	
۱۲	۱۵۰	۰/۱	۰/۱	۱۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۵۳	
۱۳	۱۸۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۱۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۷۳	
۱۴	۱۸۰	۰/۰۲	۰/۱	۱۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۶۲	
۱۵	۱۸۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۱۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۷۸	
۱۶	۱۸۰	۰/۰۵	۰/۱	۱۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۵۱	
۱۷	۱۸۰	۰/۱	۰/۰۵	۱۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۹۵	
۱۸	۱۸۰	۰/۱	۰/۱	۱۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۳۶	

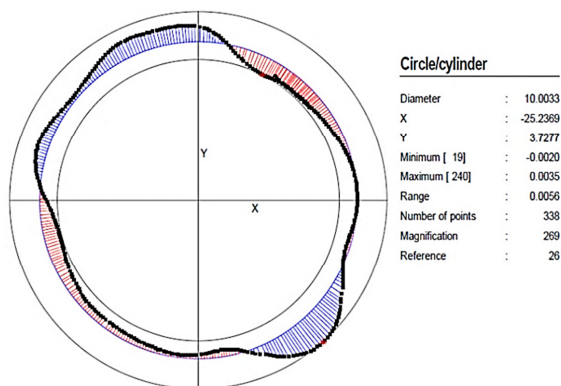
می‌شود [۶] و سایر مشخصات ذکر شده در جدول ۲ است. برقو در یک هولدر ابزار ۱۰ SK40× Rohm با حداکثر خروج از محوری ۵ میکرومتر جا زده شد. تلرانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ تولیدی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مختصات ونزل^۱ ساخت آلمان اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری‌ها در سه مقطع از سوراخ به عمق ۲، ۵ و ۸ میلی‌متری از سطح قطعه‌کار صورت گرفت. به منظور افزایش دقت و به دست آوردن پروفیل سوراخ، در هر سطح مقطع به طور متوسط مختصات ۳۵۰ نقطه توسط پراب در هر دور گردش لمس و گردی محاسبه شد. سپس مینی‌بر اندازه‌گیری سه سطح، قطر سوراخ و استوانه‌ای محاسبه گردید. شکل ۲ تلرانس گردی، اندازه اسمی و محدوده خطا را در آزمایش شماره ۸ و در عمق ۸ میلی‌متری از سطح سوراخ را نشان می‌دهد که در نهایت متوسط مقدار سه مقطع اندازه‌گیری‌شده از هر سوراخ استوانه‌ای به عنوان پارامتر خروجی در جدول ۴ ثبت گردید.



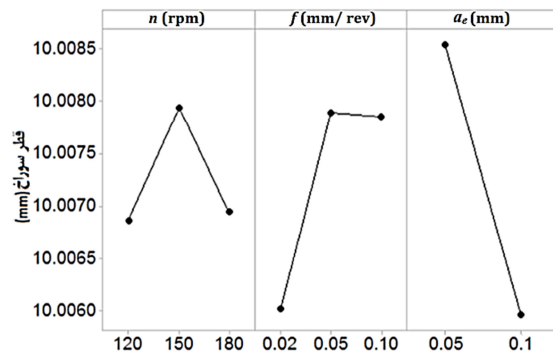
شکل ۱ نمایشی از سوراخ‌های تولیدی با استفاده از فرآیند برق‌زنی

جدول ۱ ترکیبات شیمیایی فولاد ابزار AISI D2

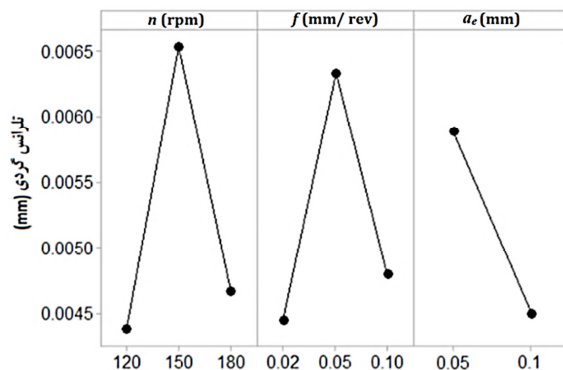
درصد عناصر	ترکیبات شیمیایی	درصد عناصر	ترکیبات شیمیایی
۰/۷۱	Mo	۱/۶	C
۰/۲۰	Ni	۰/۵۰	Si
۰/۰۱۵	Al	۰/۳۰	Mn
۰/۰۰۶	Cu	۰/۰۰۵	P
۰/۰۰۲	Co	۰/۰۲	W
۰/۸۰	V	۱۲	Cr



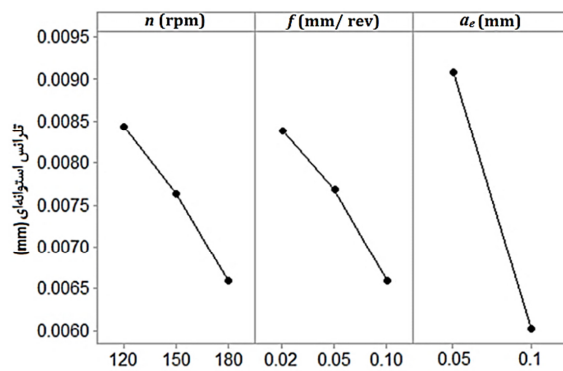
شکل ۲ تلرانس گردی در آزمایش شماره ۸ و ارتفاع ۸ میلی‌متری از سطح سوراخ



شکل ۳ نمودار تأثیر اصلی پارامترها بر قطر متوسط سوراخ



شکل ۴ نمودار تأثیر اصلی پارامترها بر تلرانس گردی



شکل ۵ نمودار تأثیر اصلی پارامترها بر تلرانس استوانه‌ای

سوراخ به دست آمد. زمان تماس طولانی ابزار و قطعه‌کار و کاهش ناحیه‌ی تماس لبه‌ی برش ثانویه و ماده‌ی قطعه‌کار هنگام برق‌قوئی در شرایط پیشروی پایین می‌تواند توضیحی برای کاهش تلرانس استوانه‌ای باشد. عمق برش شعاعی برای هر دو تلرانس استوانه‌ای و گردی همانند نرخ پیشروی با افزایش تماس ابزار و قطعه‌کار بهبود می‌یابد.

۵- نتایج

در این پژوهش فرآیند برق‌قوئی به عنوان روشی مطلوب و یک فرآیند تکمیلی به منظور ایجاد آخرین مرحله سوراخ‌کاری بر روی فولاد ابزار AISI D2 مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور با استفاده از روش طراحی آزمایش فاکتوریال کامل، اثر پارامترهای برشی شامل سرعت دورانی اسپیندل، پیشروی و عمق برشی شعاعی بر روی کیفیت سوراخ تولیدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش به صورت خلاصه در ادامه آمده است.

شکل ۳ اثرات سرعت دورانی، نرخ پیشروی و عمق برش شعاعی را بر روی قطر سوراخ به ترتیب بیان می‌کند. قطر سوراخ‌های اندازه‌گیری شده در تمامی حالت‌ها از قطر اسمی سوراخ (۱۰ میلی‌متر) بزرگ‌تر است. اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی قطر سوراخ‌ها ماکزیمم خطای ۲/۵ میکرون از اندازه اسمی را نشان می‌دهد. بهترین نتایج برای قطر سوراخ، هنگامی که سرعت دورانی و پیشروی کمینه و عمق‌های برش بالاتر استفاده شد، به دست آمد. در شکل ۳ مشاهده می‌کنید که قطر سوراخ با افزایش سرعت دورانی تا ۱۵۰ متر بر دقیقه زیاد می‌شود.

در سرعت‌های دورانی پایین‌تر فرآیند برش با لبه‌ی انباشته همراه است و این می‌تواند دلیلی برافزایش قطر سوراخ باشد و سرانجام با افزایش سرعت دورانی لبه‌ی انباشته از بین رفته و بهبودی دقت ابعادی سوراخ بر قو شده را در پی خواهیم داشت [۶]. در پژوهشی مشابه بعد از برق‌قوئی سوراخی به قطر ۱۲/۷ میلی‌متر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ با استفاده از برق‌قوئی با شیارهای مستقیم، ارتعاش ابزار و پدیده چتر از اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی دقت سوراخ معرفی شده است [۱۳]. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌کنید با زیاد شدن نرخ پیشروی، ضخامت براده‌ی جدا نشده افزایش یافته و به سبب آن نیروی هدایت‌کننده در راستای مسیر پیشروی ابزار از یاد می‌یابد. این افزایش نیرو انحراف ابزار و در نتیجه دورتر شدن قطر سوراخ از اندازه اسمی را در پی خواهد داشت.

برای عمق‌های برش پایین‌تر دقت ابعادی ضعیف‌تری برای سوراخ بر قو شده مشاهده شد. بدتر شدن دقت ابعادی سوراخ در عمق برش پایین می‌تواند به دلیل عکس‌العمل فشاری و رخ دادن پدیده له‌شدگی باشد.

در شکل ۴ تأثیر هر سه پارامتر مورد بررسی روی تلرانس گردی سوراخ مشاهده می‌شود. بهترین نتایج در کمترین سرعت دورانی و نرخ پیشروی (به ترتیب ۱۲۰ متر بر دقیقه و ۰/۰۲ میلی‌متر بر دور) و عمق برش بالاتر به دست آمد. تلرانس گردی میزان خروج از گردی در یک مقطع از سوراخ را به صورت عددی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود انحراف از گردی با افزایش سرعت دورانی تا ۱۵۰ متر بر دقیقه افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در ابتدا افزایش سرعت دورانی، افزایش ارتعاش ابزار را در هنگام برق‌قوئی در پی خواهد داشت و در سرعت‌های دورانی بالاتر حرارت بیشتری تولید شده و باعث نرم شدن ماده‌ی قطعه‌کار در ناحیه‌ی برش می‌شود. در نتیجه برش راحت‌تر و ارتعاش کاهش می‌یابد که این می‌تواند باعث بهبود در تلرانس گردی شود.

نرخ پیشروی بهینه در بهترین تلرانس گردی، حدود ۰/۰۲ میلی‌متر بر دور برای برق‌قوئی سوراخ به دست آمد. با افزایش نرخ پیشروی تا ۰/۰۵ میلی‌متر بر دور انحراف از گردی زیاد شده و در پیشروی‌های بالاتر تلرانس گردی بهبود یافت. در ابتدا با زیاد شدن پیشروی نیروی برق‌قوئی افزایش یافته و انحراف‌ها بیشتر می‌شود و در پیشروی‌های بالاتر ناحیه تماس بین لبه‌ی برش ثانویه و ماده‌ی قطعه‌کار افزایش یافته و تلرانس گردی بسته‌تری می‌تواند به وجود آید.

یک بهبود کلی با افزایش پارامترهای مورد بررسی روی تلرانس استوانه‌ای در شکل ۵ نمایان است. در واقع خطای استوانه‌ای نوعی تلرانس سه بعدی است که علاوه بر گردی مستقیم بودن سوراخ را نیز بررسی می‌کند. در سرعت‌های دورانی بالاتر همانند تلرانس گردی جدا شدن براده از قطعه‌کار راحت‌تر صورت گرفته و این می‌تواند دلیلی بر افزایش دقت ابعادی باشد. نرخ پیشروی بهینه در بهترین تلرانس استوانه‌ای، حدود ۰/۱ میلی‌متر بر دور برای برق‌قوئی

- ۱- فرآیند برقوزنی به عنوان یک روش مناسب به منظور دستیابی به مطلوب‌ترین تلرانس‌های ابعادی و هندسی برای تولید سوراخ در فولاد ابزار با سختی ۵۵ راکول‌سی به کار برده شد.
- ۲- در بین پارامترهای مورد بررسی، افزایش عمق برشی شعاعی باعث بهبودی تلرانس‌های ابعادی و هندسی شد.
- ۳- در تمامی حالت‌های مورد بررسی، پیشروی به عنوان تاثیرگذارترین پارامتر مشخص شد و در سرعت دورانی و پیشروی پایین‌تر قطر سوراخ به اندازه اسمی نزدیک‌تر و تلرانس گردی بسته‌تری مشاهده گردید.
- ۴- تلرانس استوانه‌ای با به کار بردن پارامترهای برشی بیشینه نتایج مطلوبی را دربرداشت.
- ۵- به طور کلی، در حالت بهینه و در نظر گرفتن تمامی پارامترها بهترین کیفیت هندسی با بیشینه کردن پارامترهای برشی به دست آمد.

۶- مراجع

- [1] A. Srithar, K. Palanikumar, B. Durgaprasad, Experimental Investigation and Surface roughness Analysis on Hard turning of AISI D2 Steel using Coated Carbide Insert, *Procedia Engineering*, Vol. 97, pp. 72-77, 2014 .
- [2] 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 .
- [3] L. De Chiffre, G. Tosello, M. Píška, P. Müller, Investigation on capability of the reaming process using minimal quantity lubrication, *CIRP journal of manufacturing science and technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 47-54, 2009 .
- [4] 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 .
- [5] J. A. Yang, V. Jaganathan, R. Du, A new dynamic model for drilling and reaming processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 2, pp. 299-311, 2002 .
- [6] A. Bezerra, A. Machado, A. Souza, E. Ezugwu, Effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 112, No. 2, pp. 185-198, 2001 .
- [7] P. Müller, G. Genta, G. Barbato, L. De Chiffre, R. Levi, Reaming process improvement and control: An application of statistical engineering, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 196-201, 2012 .
- [8] K. Schützer, M. Roth, E. Abele, T. Hauer, Experimental investigation of hole quality during reaming applications using multi-blade tools, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 36, No. 4, pp. 797-806, 2014 .
- [9] Y. Wang, X. Cui, H. Xu, K. Jiang, Cutting force analysis in reaming of ZL102 aluminium cast alloys by PCD reamer, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 5-8, pp. 1509-1516, 2013.
- [10] O. Bhattacharyya, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, Mechanistic model for the reaming process with emphasis on process faults, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 7, pp. 836-846, 2006 .
- [11] K. Ohgo, A. Satoh, T. Mizuno, T. Itoh, Relation between cutting conditions and precision in the reaming of gray iron castings, *Wear*, Vol. 52, No. 1, pp. 79-88, 1979.
- [12] S. Towfighian, K. Behdinan, M. Papini, Z. Saghir, P. Zalzal, J. de Beer, Finite element modeling of low speed reaming vibrations with reamer geometry modifications, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 18, No. 6, pp. 647-661, 2007 .
- [13] M. Soratgar, An analysis of the effectiveness of reaming as a secondary operation for hole production, 1987 .