



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

حجت‌الله 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

* sadeghim@modares.ac.ir، ۱۴۳-۱۴۱۵

چکیده

صنعت جدید اغلب به تولید تعداد زیادی از سوراخ‌ها با دقت ابعادی و هندسی مطلوب و تolerانس‌های بسته‌تر برای مونتاژ دقیق نیاز دارد. این نیازها تنها با سوراخ‌کاری سنتی نمی‌تواند برآورده شود. برقوزنی می‌تواند یکی از اقتصادی‌ترین روش‌ها برای ایجاد یک سوراخ دقیق با استفاده از ابزار برقوی چند لبه باشد. هدف اصلی از فرآیند ماشین‌کاری دقیق حداقل کردن انحراف‌های ابعادی و هندسی است. این مقاله به بررسی تolerانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ استوانه‌ای برقوشده با استفاده از برقوی کاربیدی یا 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 می‌پردازد. در این تحقیق ۱۸ آزمایش با در نظر گرفتن ۳ سطح سرعت دورانی، ۳ سطح نرخ پیشروی و ۲ سطح عمق برش شعاعی روی نمونه‌های مکعبی با سختی ۵۵ راکول‌سی انجام گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بهترین کیفیت هندسی می‌تواند در حالت پهنه و در نظر گرفتن تمامی پارامترها با بیشینه کردن پارامترهای برشی به دست آید. در مورد تolerانس ابعادی دقیق‌ترین قطر سوراخ برقوشده در سرعت دورانی و عمق برش بالاتر و کمترین پیشروی به دست آمد.

کلید واژگان: برقوزنی، تolerانس‌های ابعادی و هندسی، فولاد سخت‌کاری 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 پیچیده‌ای بوده و دارای تعداد زیادی سوراخ به منظور استفاده در مجموعه‌های مونتاژی دقیق هستند [۲]. تolerانس‌های ابعادی و هندسی یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های این قطعات می‌باشند که علاوه بر جنبه‌های ظاهری محصول، عملکرد محصول را نیز تحت تأثیر خود قرار می‌دهند [۳]. پیچیدگی‌های قطعات، ترکیبات ریزساختار و سختی بالا در برخی از قطعات با عملکرد ویژه و خطاهای متعدد احتمالی در آن‌ها باعث شده است که تلاش برای تضمین نسبی برآورده کردن نیازهای تolerانسی مجموعه‌های مکانیکی به یکی از دشوارترین چالش‌های طراحان و تولیدکنندگان این مجموعه‌ها 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 سخت‌کاری، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف ساخت دارد [۱]. ماشین‌کاری سنتی این فولاد معمولاً در حالت آنیل یا نرماله انجام شده و بعد از انجام عملیات حرارتی، قطعات سنگ زده می‌شوند. با استفاده از روش ماشین‌کاری سخت می‌توان این مراحل اضافی را حذف نمود و بهره‌وری را افزایش داد. همچنین استفاده از این روش موجب کاهش زمان و هزینه فرآیند شده و سطح مطلوبی را به دست می‌دهد.

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:

مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، گشتاور، نیروی برشی، قطر و تلرانس 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 فوریه در برق‌زنی 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 برق‌زنی، رابطه‌ای برای نیروهای برشی و تلرانس استوانه‌ای سوراخ برق‌زنی شده فراهم کردند. چیفر و همکاران [۳] ثابت کردند که با استفاده از حداقل مقدار روان کار 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 برق‌زنی 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 برق‌زنی چدن خاکستری به این نتیجه رسیدند که سرعت برش بیشترین تأثیر را روی دقت ابعادی سوراخ برق‌زنی شده دارد. توفیقیان و همکاران [۱۲] از یک مدل شبه استاتیک توسعه یافته در برق‌زنی به منظور بررسی اثرات پارامترهای ابزار و برش روی فرم سوراخ استفاده کردند و آن‌ها همچنین دریافتند که زاویه‌ی گام متغیر (زاویه‌ی بین دندانه‌های برق‌زنی) بر پایداری فرآیند برق‌زنی 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 برق‌زنی 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 $100 \times 100 \times 10$ میلی‌متر به عنوان ماده‌ی قطعه‌کار مورد استفاده گردید. شکل ۱ تصویری از سوراخ‌های برق‌زنی 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 برق‌زنی 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 کاربایدی 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.

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

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 با کیفیت 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 برق‌زنی^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 ایجاد شده و در مرحله بعد می‌توان از فرآیند برق‌زنی با استفاده از یک ابزار یکپارچه، برای ایجاد تعدادی از سوراخ‌های بزرگ‌تر استفاده کرد.

برق‌زنی یکی از روش‌های مرسوم پرداخت سوراخ و یک فرآیند ماشین‌کاری دقیق است که می‌تواند تلرانس‌های بسته‌تر و کیفیت سطح بالایی را ایجاد کند [۷]. تعیین پارامترهای برق‌زنی 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 تلرانس‌های ابعادی و هندسی در فرآیند برق‌زنی مطالعاتی انجام داده‌اند. بزرا و همکاران [۶] به بررسی تلرانس‌های ابعادی و هندسی روی آلیاژ ریخته‌گری شده سیلیکون آلومینیوم پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و هندسه ابزار برق‌زنی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از ابزار برق‌زنی 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 برق‌زنی روی فولاد ضدزنگ استنیتی با ابزار برق‌زنی از جنس فولاد تندبر پرداختند. مشخص شد که فرآیند برق‌زنی در سرعت برشی و نرخ پیشروی پایین و عمق برش کم، سوراخی با انحراف ابعادی کمتری ایجاد می‌کند. اسپوزور و همکاران [۸] تأثیر هندسه ابزار برق‌زنی، 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، تلرانس راستی را بهبود می‌بخشد. ژئی‌یانگ پین و همکاران [۴] فرآیند برق‌زنی را روی آلیاژ AISI12 و با استفاده از برق‌زنی چند بلوری الماسه^۹ را

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

اندازه‌ها	هندسه ابزار	اندازه‌ها	هندسه ابزار
۰	زاویه ماریچ (درجه)	۱۰	قطر (mm)
۱۲	زاویه آزاد (درجه)	۱۱۰	طول ابزار (mm)
۴۵	زاویه چمفر (درجه)	۶	تعداد شیارها
۱	طول چمفر (mm)	۱۵	زاویه براده (درجه)

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، تolerانس گردی و تolerانس 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)	تولرانس گردی (mm)	تولرانس 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

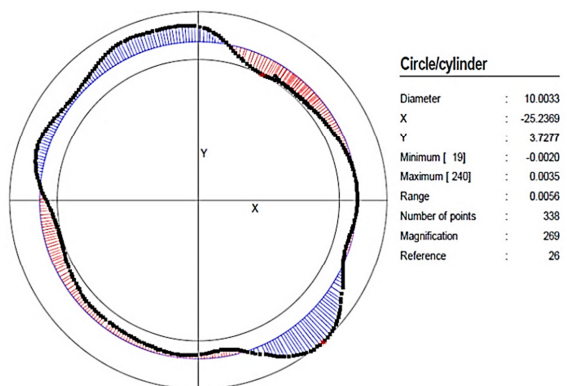
می‌شود [۶] و سایر مشخصات ذکر شده در جدول ۲ است. برقو در یک هولدر ابزار ۱۰ SK40x Rohm با حداکثر خروج از محوری ۵ میکرومتر جا زده شد. تolerانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ تولیدی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مختصات ونزل^۱ ساخت آلمان اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری‌ها در سه مقطع از سوراخ به عمق ۲، ۵ و ۸ میلی‌متری 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 تolerانس 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 اندازه‌گیری شده از هر سوراخ استوانه‌ای به عنوان پارامتر خروجی در جدول ۴ ثبت گردید.



شکل ۱ نمایی از سوراخ‌های تولیدی با استفاده از فرآیند برق‌زنی

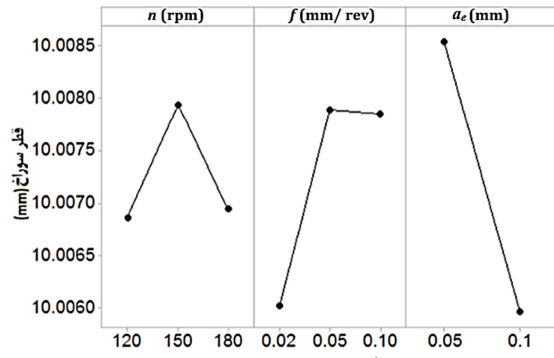
جدول ۱ ترکیبات شیمیایی فولاد ابزار AISI D2

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

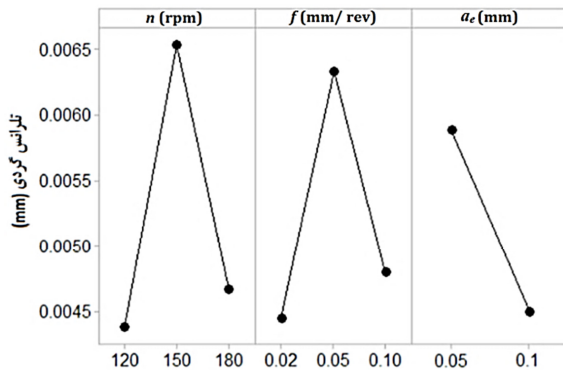


شکل ۲ تolerانس گردی در آزمایش شماره ۸ و ارتفاع ۸ میلی‌متری از سطح سوراخ

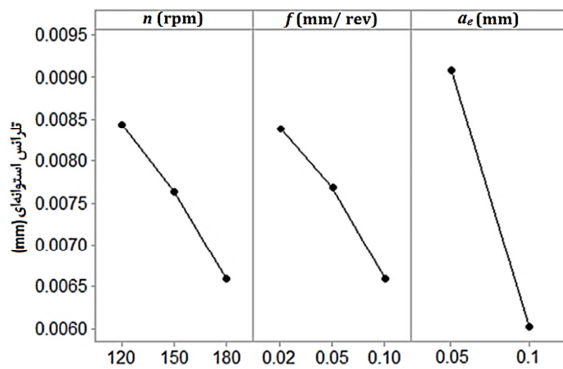
1. Wenzel



شکل ۳ نمودار تأثیر اصلی پارامترها بر قطر متوسط سوراخ



شکل ۴ نمودار تأثیر اصلی پارامترها بر تولانس گردی



شکل ۵ نمودار تأثیر اصلی پارامترها بر تولانس استوانه‌ای

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

۵- نتایج

در این پژوهش فرآیند برقوزنی به عنوان روشی مطلوب و یک فرآیند تکمیلی به منظور ایجاد آخرین مرحله سوراخ کاری 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 برقوزنی سوراخی به قطر ۱۲/۷ میلی‌متر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ با استفاده از برقویی 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 هدایت کننده در راستای مسیر پیشروی ابزار از دید 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 برقو 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 تولانس 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. تولانس 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 برقوزنی در پی خواهد داشت و در سرعت‌های دورانی بالاتر حرارت بیشتری تولید شده و باعث نرم شدن ماده‌ی قطعه کار در ناحیه‌ی برش می‌شود. در نتیجه برش راحت‌تر و ارتعاش کاهش می‌یابد که این می‌تواند باعث بهبود در تولانس گردی شود.

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

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

- 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. Piška, 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. Behdinin, M. Papini, Z. Saghri, 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 .