

مطالعه‌ی عوامل مؤثر بر ارتعاشات یاتاقان هوایی در ماشین‌کاری نانومتریک

محمد آخوندزاده* (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز

مهرداد وحدتی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دوری ۲ - ۲۹، شماره ۲، ص. ۹-۳

از مهم‌ترین مباحث مورد مطالعه در ماشین‌های ابزار فوق دقیق می‌توان به ساختمان ماشین‌ابزار و سفتی‌های بالای آن، پایداری حرارتی و مکانیکی و مقادیر آن، ارتعاشات پایین، و محورهای حرکتی بسیار دقیق اشاره کرد. یکی از اجزای بسیار مهم در ماشین‌های ابزار فوق دقیق اسپیندل هوایی آن است که ارتعاشات آن مستقیماً بر کیفیت سطح ماشین‌کاری شده تأثیر دارد. از پارامترهای مؤثر بر ارتعاشات اسپیندل می‌توان به سرعت دورانی، نحوه‌ی تغذیه‌ی هوای فشرده، عوامل حوضچه‌ی هوایی، فشار هوای موجود در لقی هوا و... اشاره کرد. در این تحقیق پارامترهای شکل، اندازه، عمق و تعداد حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی مورد بررسی قرار گرفت. برای هریک از این پارامترها سه سطح در نظر گرفته شد. در مجموع تعداد ۲۴۳ آزمایش انجام گرفت که در هریک از آنها ابتدا اسپیندل‌های هوایی به کمک فرایندهای مختلف تولید ساخته شدند. برای بررسی ارتعاشات از دستگاه ۶۰ VibroTest استفاده شد. در پایان، با تحلیل نتایج آزمایشات با استفاده از DOE مشاهده شد که حوضچه‌های هوایی با مساحت 300 mm^2 و عمق 3 mm و تعداد ۲ در سرعت 1800 rpm دارای کم‌ترین مقدار ارتعاش‌اند. همچنین از لحاظ شکل، حوضچه‌های مدور و مستطیلی کم‌ترین مقدار ارتعاش را داشته‌اند.

واژگان کلیدی: ماشین‌کاری فوق دقیق، اسپیندل هوایی، نانوماشین‌کاری، حوضچه‌ی هوایی، ارتعاشات.

m.akhondzadeh@iauhvaz.ac.ir
vahdati@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

بالا و قابلیت سرعت چرخشی بالا برخوردارند. سختی اسپیندل آبرواستاتیک پایین‌تر از اسپیندل هیدرواستاتیک با روغن است، اما تغییر شکل حرارتی آن کم‌تر است.

وجود لایه‌ی هوا^۴ در اسپیندل هوایی فوایدی نظیر اصطکاک کم، تعریف دقیق محورها و فقدان سایش را ایجاد می‌کند. این لایه‌ی هوا مانع از تماس دو فلز با یکدیگر و در نتیجه سبب کاهش اصطکاک و حرارت و همچنین کاهش انتقال ارتعاش دستگاه به سطح قطعه‌کار می‌شود. هوا قبل از ورود به این فاصله، ابتدا وارد یک حوضچه می‌شود که سبب کاهش اثراتی همچون چکش هوایی^۵ می‌شود.

ارتعاشات پایین اسپیندل هوایی برای رسیدن به دقت‌های نانومتری بسیار مهم است. از پارامترهای مؤثر بر ارتعاشات اسپیندل می‌توان به سرعت دورانی، نحوه‌ی تغذیه‌ی هوای فشرده -- شامل قطر سوراخ تغذیه، عوامل حوضچه‌ی هوایی، فشار هوای موجود در فاصله بین روتور و استاتور و... -- اشاره کرد.

در این تحقیق اثر پارامترهای حوضچه‌ی هوایی -- یعنی شکل، اندازه، عمق و تعداد حوضچه‌ی هوایی -- و سرعت دورانی بر ارتعاشات اسپیندل هوایی بررسی شده است.

افزایش تقاضا برای ساخت دقیق قطعات رایانه‌یی، الکترونیکی، انرژی هسته‌یی^۱ و کاربردهای دفاعی منجر به پیدایش فرایندهای ماشین‌کاری فوق دقیق^۲ شده است. آینه‌های نوری^۳، دیسک‌های حافظه‌ی رایانه‌یی و غلتک‌های مربوط به ماشین‌های فتوکپی، با سطح پرداخت نانومتری و دقت شکل میکرونی یا زیر میکرونی از جمله‌ی این قطعات‌اند. مهم‌ترین ویژگی ماشین‌های فوق دقیق عبارت‌اند از: ساختمان ماشین‌ابزار با سختی بالا، فرکانس طبیعی بالا و خصوصیات میرایی (استهلاک) خوب، پایداری حرارتی و مکانیکی بالا، ارتعاشات پایین، محورهای حرکتی بسیار دقیق و کنترل با دقت بالا.

ماشین‌های فوق دقیق قسمت‌های حرکتی مهمی دارند: کشویی‌ها، اسپیندل هوایی و سیستم محرکه. اسپیندل یک عضو کلیدی ماشین‌ابزار فوق دقیق است، زیرا خطای حرکتی آن اثر مهمی بر کیفیت سطح و دقت قطعات ماشین‌کاری شده دارد. اسپیندل‌های استفاده‌شده در ماشین‌ابزارهای فوق دقیق غالباً از نوع آبرواستاتیک و هیدرواستاتیک هستند. هردو این اسپیندل‌ها از دقت حرکتی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۲/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۱/۳/۳، پذیرش ۱۳۹۱/۴/۲۵.

جدول ۱. سطوح انتخابی برای پارامترهای مورد تحقیق.

پارامترهای آزمایش					سطوح
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	
شکل حوضچه‌ی هوایی	اندازه حوضچه‌ی هوایی (mm ^۲)	عمق حوضچه‌ی هوایی (mm)	تعداد حوضچه‌ی هوایی	سرعت دورانی کله‌گی هوایی (rpm)	
مثلث	۴۰۰	۱	۲	۱۸۰۰	۱
مستطیل	۳۰۰	۳	۳	۲۵۵۶	۲
دایره	۲۰۰	۵	۴	۳۶۰۰	۳

۲. پیشینه‌ی تحقیق

در سال ۱۹۸۵ آثار تغییرات عمق حوضچه‌ی هوائی بر سختی، ظرفیت بار و آهنگ جریان یاتاقان هوائی بررسی شد.^[۱] یاتاقان مورد آزمایش دارای حوضچه‌هایی به شکل X و از جنس برنج بود. در سال ۲۰۰۰ تحقیقی درمورد طراحی یاتاقان‌های آبرواستاتیک به منظور کاربرد سیستم‌های ماشین ساخت با دقت نانومتر به عمل آمد.^[۲] در سال ۲۰۰۲ رفتار استاتیکی و پایداری دینامیکی یاتاقان‌های طولی آبرواستاتیک مستطیلی شیاردار تحلیل شد.^[۳] بر سطح این یاتاقان شیارهایی به شکل X وجود داشت و آنها با حل معادلات تعادل جریان برای شیارها، رفتار استاتیکی یاتاقان را تحلیل کردند. همچنین این یاتاقان ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصله شامل مقایسه‌ی توزیع فشار در یاتاقان شیاردار و بدون شیار، و بررسی اثر عرض‌ها و عمق‌های مختلف شیار بر ظرفیت بار، سختی و آهنگ جریان گاز در یاتاقان بود. در تحقیقی دیگر، محققین یک یاتاقان طولی آبرواستاتیک قوسی شکل با چهار شیار محوری و چهار شیار محیطی را به صورت نظری مورد بررسی قرار دادند.^[۴] در سال ۲۰۰۲ یک سیستم یاتاقان هوائی آبرواستاتیک با چندین میکروسوراخ ارائه،^[۵] و به جای استفاده از مواد متخلخل از چندین میکروسوراخ استفاده شد. این یاتاقان هم از طریق شبیه‌سازی و هم به صورت عملی مورد بررسی قرار گرفت.

پس از آن در سال ۲۰۰۳، محققین روشی برای ارزیابی دقت شعاعی اسپیندل هوائی هیدرواستاتیک با در نظر گرفتن حرکت شعاعی مرکز چرخش ارائه کردند.^[۶] در سال ۲۰۰۴ پایداری سیستم اسپیندل با یاتاقان‌های گرد گازی و محدودکننده‌های شیار غیریکنواخت مورد تحلیل و آزمایش قرار گرفت.^[۷] و با محدودکننده‌ی با شیار یکنواخت مقایسه شد. در سال ۲۰۰۹ تحقیقی درمورد اصلاح و بهینه‌سازی ابعاد شیارهای یاتاقان‌های گرد با شیارهای جناقی ارائه شد.^[۸] که به طراحی اسپیندل‌های دقیق با مشخصات خروج از مرکزیت بهبود یافته کمک می‌کرد.

در سال ۲۰۰۹ پژوهشگران تأثیر حوضچه‌های هوائی بر پایداری سیستم روتور-یاتاقان آبرواستاتیک را بررسی کردند.^[۹] آنها تأثیرات تعداد و مکان سوراخ‌های تغذیه را بر پایداری اسپیندل آبرواستاتیک، و با استفاده از معادله‌ی بی بعد رینولدز^۶ حاصل از ناویراستوکس^۷ و معادلات پیوستگی^۸ بررسی کردند. در سال ۲۰۱۰ یک کشویی خطی آبرواستاتیک با متعادل‌کننده‌ی فیزیکی گرد برای ماشین دریل PCB ارائه شد.^[۱۰] در تحقیق مذکور یک یاتاقان گازی مدور محدودکننده‌ی مرکب -- که سه شیار کم عمق مستقیم و قوسی شکل روی آن ماشین‌کاری شده بود -- با استفاده از معادلات تعادل جریان مورد تحلیل قرار گرفت و رفتارهای یاتاقان‌های هوائی طولی مدور شیاردار تشریح شد. همچنین پس از ساخت این دستگاه، آزمایشاتی روی آن انجام شد.

۳. روش تحقیق

۳.۱. طراحی

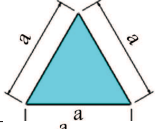
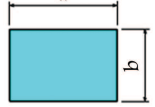
برای بررسی ارتعاشات اسپیندل هوائی پنج پارامتر شکل، اندازه، عمق و تعداد حوضچه‌ی هوائی و سرعت دورانی اسپیندل انتخاب شد. برای هر کدام از این پارامترها سه سطح یا حالت در نظر گرفته شد. در جدول ۱ سطوح انتخابی برای پارامترهای فوق ارائه شده، که در کل تعداد آزمایشات برابر ۲۴۳ آزمایش می‌شود.

از آنجا که سه شکل مختلف برای انجام آزمایشات در نظر گرفته شده و باید اندازه حوضچه برای این سه شکل یکسان باشد، از مساحت حوضچه برای پارامتر اندازه استفاده شد. (در جدول ۲ اندازه‌های انتخابی برای شکل‌های مورد نظر ارائه شده است). تعداد حوضچه‌های هوائی روی استاتورها برابر ۲، ۳ و ۴ حوضچه در نظر گرفته شد، که در فواصل زاویه‌ی مساوی در پیرامون استاتور قرار دارند.

برای سهولت در امر ساخت قطعات و راحتی انجام اندازه‌گیری‌ها، روتور به صورت خارجی در نظر گرفته شد، به طوری که روتور حول استاتور بچرخد. همچنین استاتور به صورت دو قطعه‌ی مجزا -- بوش استاتور و محور استاتور -- طراحی شد. پس از ساخت این دو قطعه، محور درون بوش پرس می‌شود. جنس بوش استاتور و روتور از فولاد ضد زنگ و محور استاتور از برنج انتخاب شد. اختلاف قطر داخلی روتور و قطر خارجی استاتور ۵۰ میکرون، یا به عبارتی دیگر ضخامت لایه هوا برابر ۲۵ میکرون انتخاب شد.

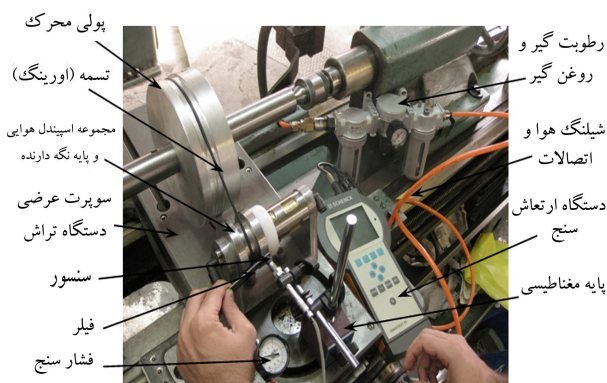
برای انجام آزمایشات و تأمین حرکت دورانی اسپیندل، دستگاه تراش انتخاب شد. بنابراین برای رسیدن به سرعت‌های مورد نظر، نسبت قطر پولی محرک به قطر روتور برابر ۳/۶ در نظر گرفته شد. برای انتقال حرکت دورانی پولی محرک به روتور و کمینه شدن تأثیر عدم توازی محورهای پولی محرک و روتور بر تعادل روتور از اورینگ

جدول ۲. ابعاد انتخابی شکل‌های مورد تحقیق برای حوضچه.

ابعاد حوضچه‌ی هوائی (mm)	شکل حوضچه‌ی هوائی
$a_1 = 30/4$ $a_2 = 26/3$ $a_3 = 21/5$	
$a_1 = 24/4, b_1 = 16/4$ $a_2 = 21/1, b_2 = 14/2$ $a_3 = 17/4, b_3 = 11/5$	
$r_1 = 11/3$ $r_2 = 9/75$ $r_3 = 8$	



شکل ۳. مجموعه استاتورهای ساخته شده.



شکل ۴. تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات.

لقی هوا؛ فشارسنج برای اطمینان از مقدار فشار هوای ورودی به استاتور؛ شیلنگ هوا برای انتقال هوای فشرده از رطوبت‌گیر به فشارسنج و استاتور؛ تسمه به منظور انتقال حرکت دورانی پولی محرک به روتور، کمپرسور هوا برای تأمین هوای فشرده در آزمایشات و مجموعه اندازه‌گیری ارتعاش متشکل از دستگاه ۶۰ VibroTest برای اندازه‌گیری و ثبت مقادیر ارتعاش؛ سنسور جابه‌جایی سنج IN-۰۸۵ برای اندازه‌گیری ارتعاش، پایه مغناطیس برای نگه‌داشتن سنسور؛ و فیلر ۱/۵ میلی‌متری برای تنظیم موقعیت سنسور نسبت به سطح روتور.

تنظیمات ضروری برای اندازه‌گیری با دستگاه ارتعاش‌سنج عبارت‌اند از:

نوع سنسور = IN-۰۸۵

دامنه‌ی اندازه‌گیری = peak (p)

واحد اندازه‌گیری = میکرون (μm)

فرکانس‌های حد بالا و حد پایین = ۱۰-۱۰۰۰ Hz

در شکل ۵ تنظیمات لازم برای دستگاه ارتعاش‌سنج ۶۰ VibroTest نشان داده شده است. سرعت‌هایی که باید با استفاده از اهرم‌های تنظیم سرعت روی دستگاه تراش تنظیم کرد تا به سرعت‌های دورانی ۲۵۵۶، ۱۸۰۰ rpm و ۳۶۰۰ رسید، به ترتیب عبارت‌اند از: ۵۰۰ rpm، ۷۱۰ rpm و ۱۰۰۰ rpm.

۴. نتایج

برای تحلیل مقادیر اندازه‌گیری شده، از روش طراحی آزمایشات (DOE)^۹ استفاده شد. این تحلیل با استفاده از نرم‌افزار MiniTab انجام گرفت. در جدول ۳ نتیجه‌ی

استفاده شد. همچنین مقدار فشار هوا برابر ۱/۵ bar و قطر روزنه‌های تغذیه هوا به درون حوضچه‌ها برابر ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای نگه‌داشتن مجموعه اسپیندل هوایی و انجام آزمایشات، یک پایه‌ی نگه‌دارنده طراحی شد که روی سوپرت عرضی دستگاه تراش نصب می‌شود.

۲.۳. ساخت

قطعات طراحی شده با استفاده از عملیات مختلف تولیدی ساخته شدند. از جمله این عملیات می‌توان به داخل‌تراشی و روتراشی بوش‌های فولادی، فرزکاری حوضچه‌ها با دستگاه فرز CNC، پلیسه‌گیری با سوهان، کف‌تراشی، روتراشی و سوراخ‌کاری محورهای برنجی و مونتاژ آنها درون بوش‌های فولادی، سوراخ‌کاری روزنه‌های تغذیه ۱ میلی‌متری، قلاویزکاری محل اتصال استاتور به پایه نگه‌دارنده، سنگ‌زنی سطح خارجی استاتورها و سطح داخلی روتور با دستگاه سنگ‌محور و پرداخت آنها با سمباده‌ی بسیار نرم اشاره کرد. شکل ۱ روتور را پس از تکمیل مراحل ساخت نشان می‌دهد. شکل ۲ نیز فرایند ماشین‌کاری حوضچه‌های هوایی را نشان می‌دهد. استاتورهای ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

۳.۳. تجهیزات آزمایش

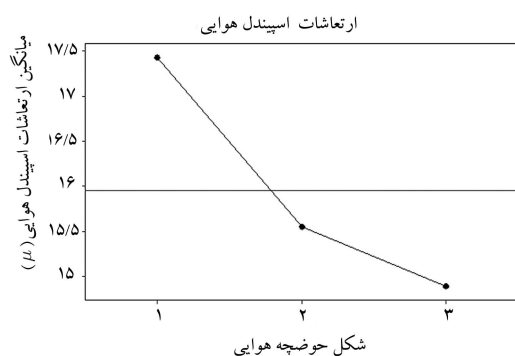
در شکل ۴ تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات نشان داده شده است. این تجهیزات عبارت‌اند از: اسپیندل هوایی و پایه‌ی نگه‌دارنده که قبلاً ساخته شدند؛ دستگاه تراش به منظور انجام آزمایش‌ها بر سوپرت عرضی آن (سوپرت فوقانی آن باز شد و به جایش پایه نگه‌دارنده نصب شد)؛ پولی انتقال دور جهت انتقال حرکت دورانی سه نظام دستگاه تراش به روتور؛ رطوبت‌گیر و روغن‌گیر برای گرفتن و جذب آب و سایر مایعات معلق در هوای فشرده ناشی از کارکردن کمپرسور و جلوگیری از ورود آنها به



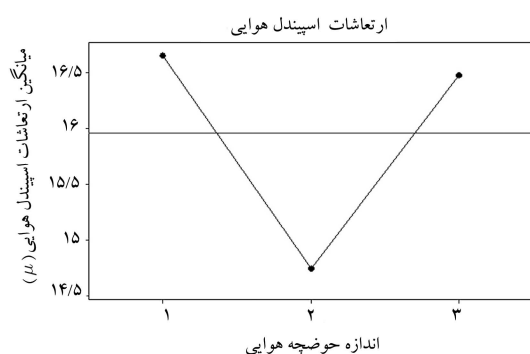
شکل ۱. روتور پس از تکمیل مراحل ساخت.



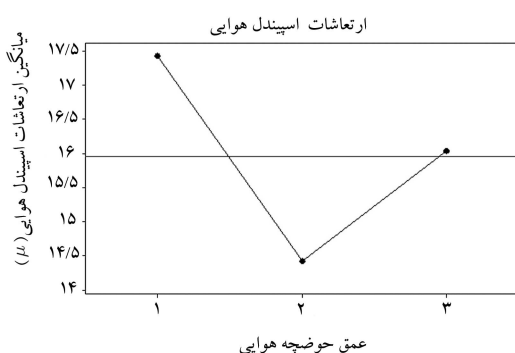
شکل ۲. فرایند ماشین‌کاری حوضچه‌های هوایی با فرز CNC.



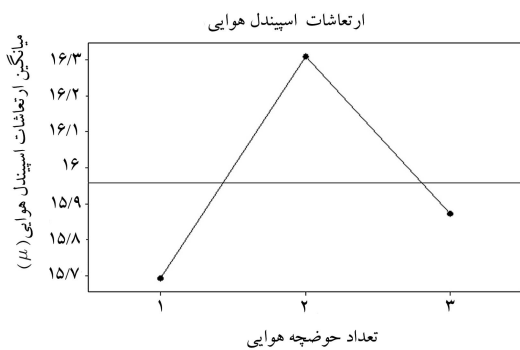
شکل ۶. نمودار اثر شکل حوضچه بر ارتعاشات اسپیندل هوابی.



شکل ۷. نمودار اثر اندازه حوضچه بر ارتعاشات اسپیندل هوابی.



شکل ۸. نمودار اثر عمق حوضچه بر ارتعاشات اسپیندل هوابی.



شکل ۹. نمودار اثر تعداد حوضچه بر ارتعاشات اسپیندل هوابی.



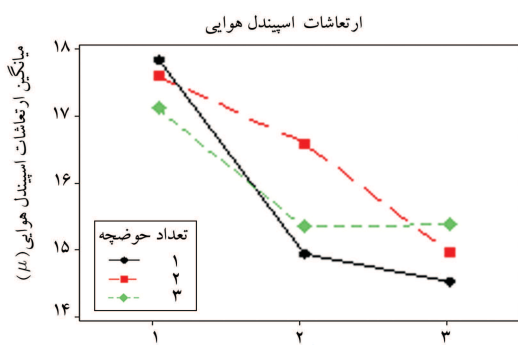
شکل ۵. تنظیمات محیط اندازه‌گیری مقدار ارتعاش در دستگاه ارتعاش‌سنج VibroTest ۶۰.

جدول ۳. آنالیز واریانس (ANOVA) نتایج آزمایشات.

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مجذور	F _۰	P-Value
A	۲۸۰٫۷۲۱	۲	۱۴۰٫۳۶۱	۲۶٫۵۱	۰٫۰۰۰
B	۱۸۱٫۲۵۵	۲	۹۰٫۶۲۷	۱۷٫۱۱	۰٫۰۰۰
C	۳۶۹٫۰۶۴	۲	۱۸۴٫۵۳۲	۳۴٫۸۵	۰٫۰۰۰
D	۱۶٫۳۰۸	۲	۸٫۱۵۴	۱٫۵۴	۰٫۲۱۷
E	۱۳۱٫۶۹۸	۲	۶۵٫۸۴۹	۱۲٫۴۴	۰٫۰۰۰
AB	۱۰۸۲٫۶۷۲	۴	۲۷۰٫۶۶۸	۵۱٫۱۱	۰٫۰۰۰
AC	۳۹۳٫۰۰۸	۴	۹۸٫۲۵۲	۱۸٫۵۵	۰٫۰۰۰
AD	۴۰٫۱۷۶	۴	۱۰٫۰۴۴	۱٫۹۰	۰٫۱۱۳
AE	۱۸٫۹۷۴	۴	۴٫۷۴۳	۰٫۹۰	۰٫۴۶۸
BC	۹۲٫۰۰۲	۴	۲۳٫۰۰۰	۴٫۳۴	۰٫۰۰۲
BD	۳۰٫۱۱۰	۴	۷٫۵۲۷	۱٫۴۲	۰٫۲۲۸
BE	۱۶٫۹۰۲	۴	۴٫۲۲۵	۰٫۸۰	۰٫۵۲۸
CD	۷۴٫۵۴۷	۴	۱۸٫۶۳۷	۳٫۵۲	۰٫۰۰۸
CE	۲۱٫۸۲۰	۴	۵٫۴۵۵	۱٫۰۳	۰٫۳۹۳
DE	۱۲٫۴۹۳	۴	۳٫۱۲۳	۰٫۵۹	۰٫۶۷۰
Error	۱۰۱۶٫۷۱۱	۱۹۲	۵٫۲۹۵		
Total	۳۷۷۸٫۴۵۹	۲۴۲			

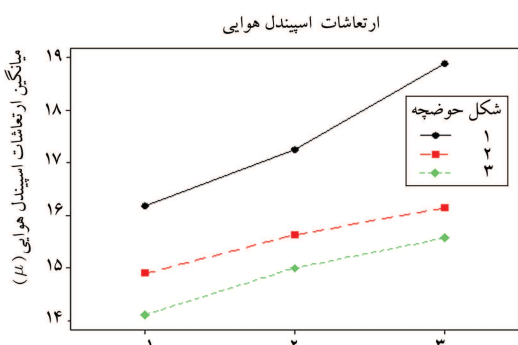
آنالیز واریانس (ANOVA) ^{۱۰} برای مقادیر جابه‌جایی اندازه‌گیری شده ارائه شده است. براساس نتیجه‌ی آنالیز واریانس، تمامی پارامترهای مورد تحقیق بر مقدار ارتعاش اسپیندل هوابی مؤثرند. برای پیدا کردن سطوحی از این پارامترها که در آن مقدار ارتعاش کم‌تر است، نمودارهای اثر اصلی ^{۱۱} و تعامل اثر ^{۱۲} پارامترهای مورد تحقیق به‌وسیله‌ی نرم‌افزار MiniTab رسم شد.

در شکل‌های ۶ تا ۱۰ به‌ترتیب اثر پارامترهای شکل، اندازه، عمق و تعداد حوضچه‌ی هوابی و سرعت دورانی روتور بر ارتعاشات اسپیندل هوابی نشان داده شده است. پس از مطالعه‌ی نمودار اثر شکل حوضچه‌ی هوابی بر ارتعاشات اسپیندل



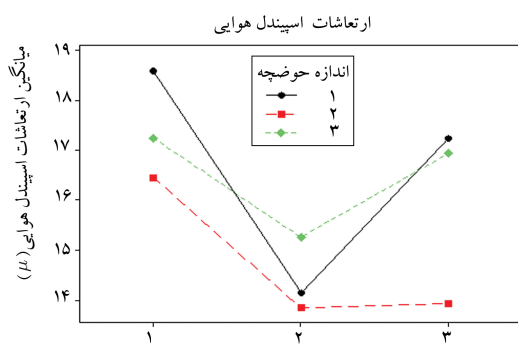
شکل حوضچه هوایی

شکل ۱۳. تعامل اثر بین شکل و تعداد حوضچه‌ی هوایی.



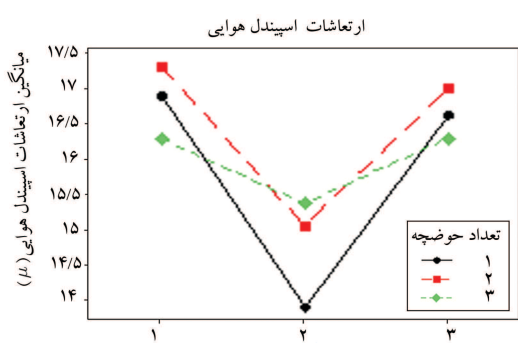
سرعت دورانی اسپیندل هوایی

شکل ۱۴. تعامل اثر بین شکل حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل هوایی.



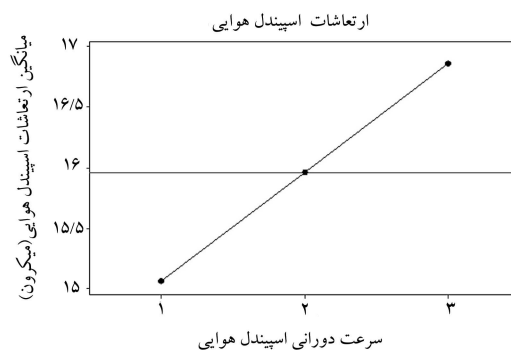
عمق حوضچه هوایی

شکل ۱۵. تعامل اثر بین اندازه و عمق حوضچه‌ی هوایی.



اندازه حوضچه هوایی

شکل ۱۶. تعامل اثر بین اندازه و تعداد حوضچه‌ی هوایی.



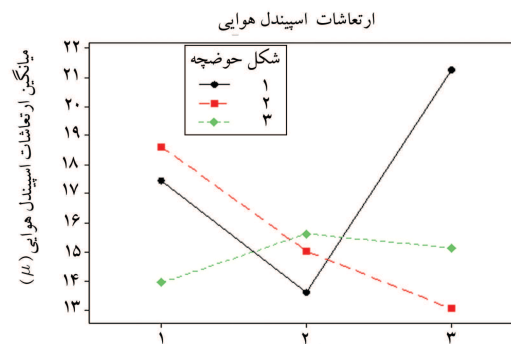
شکل ۱۰. نمودار اثر سرعت دورانی اسپیندل هوایی بر ارتفاعات آن.

هوایی می‌توان دریافت که کم‌ترین مقدار ارتفاع در حوضچه‌های مدور موجود است. نمودار اثر اندازه‌ی حوضچه‌ی هوایی بر ارتفاعات اسپیندل هوایی، کم‌ترین ارتفاع را در حوضچه‌های با مساحت 300 mm^2 نشان می‌دهد.

از نمودار اثر عمق حوضچه‌ی هوایی بر ارتفاعات اسپیندل هوایی می‌توان دریافت که حوضچه‌های با عمق ۳ میلی‌متر ارتفاعات کم‌تری دارند. از بررسی نمودار اثر تعداد حوضچه‌ی هوایی بر ارتفاعات اسپیندل هوایی نیز می‌توان دریافت که اسپیندل‌های با دو حوضچه ارتفاعات کم‌تری دارند.

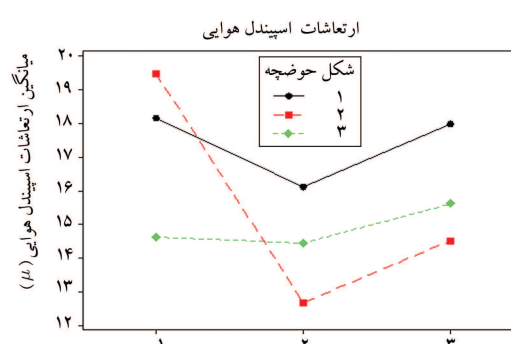
همچنین نمودار اثر سرعت دورانی اسپیندل هوایی بر ارتفاعات آن نشان می‌دهد که در سرعت دورانی پایین‌تر، ارتفاعات کم‌تری رخ داده و با افزایش سرعت دورانی، ارتفاعات اسپیندل هوایی نیز افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۱۱ تا ۲۰ به ترتیب نمودارهای تعامل اثر پارامترهای شکل و اندازه‌ی



اندازه حوضچه هوایی

شکل ۱۱. تعامل اثر بین شکل و اندازه حوضچه‌ی هوایی.



عمق حوضچه هوایی

شکل ۱۲. تعامل اثر بین شکل و عمق حوضچه‌ی هوایی.

حوضچه‌ی هوایی، شکل و عمق حوضچه‌ی هوایی، شکل و تعداد حوضچه‌ی هوایی، شکل حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل، اندازه و عمق حوضچه‌ی هوایی، اندازه و تعداد حوضچه‌ی هوایی، اندازه‌ی حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل، عمق و تعداد حوضچه‌ی هوایی، عمق حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل، و تعداد حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل بر ارتعاشات اسپیندل هوایی به تصویر درآمده‌اند.

براساس شکل ۱۱، کم‌ترین ارتعاش یا جابه‌جایی در حوضچه‌ی مستطیلی با مساحت 200 mm^2 و بیشترین مقدار آن در حوضچه‌ی مثلثی با مساحت 200 mm^2 رخ داده است. بررسی شکل ۱۲ نشان می‌دهد که حوضچه‌ی مستطیلی با عمق 3 mm کم‌ترین و حوضچه‌ی مستطیلی با عمق 1 mm بیشترین مقدار ارتعاش را دارند. در شکل ۱۳ کم‌ترین و بیشترین مقدار ارتعاش به ترتیب در حوضچه‌ی مدور با تعداد ۲ و حوضچه‌ی مثلثی با تعداد ۲ نشان داده شده است. با بررسی شکل ۱۴ حوضچه‌ی مدور با سرعت 1800 rpm و حوضچه‌ی مثلثی با سرعت 3600 rpm به ترتیب کم‌ترین و بیشترین مقدار ارتعاش را دارند.

شکل ۱۵، کم‌ترین مقدار ارتعاش را در حوضچه با مساحت 300 mm^2 و عمق 3 mm و بیشترین مقدار آن را در حوضچه با مساحت 400 mm^2 و عمق 1 mm نشان می‌دهد. با مطالعه‌ی شکل ۱۶ می‌توان نتیجه گرفت که حوضچه‌ی با مساحت 300 mm^2 و تعداد ۲ کم‌ترین و حوضچه‌ی با مساحت 400 mm^2 و تعداد ۳ بیشترین مقدار ارتعاش را دارد.

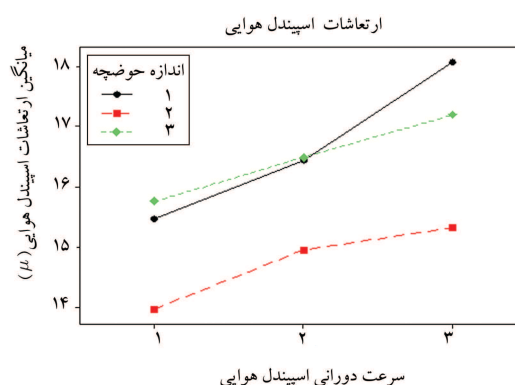
از بررسی شکل ۱۷ چنین استنتاج می‌شود که حوضچه‌ی با مساحت 300 mm^2 با سرعت 1800 rpm کم‌ترین، و حوضچه‌ی با مساحت 400 mm^2 با سرعت 3600 rpm بیشترین مقدار ارتعاش را دارد.

شکل ۱۸، حوضچه‌های با عمق 3 mm و تعداد ۳ را دارای کم‌ترین ارتعاش، و حوضچه‌های با عمق 1 mm و تعداد ۳ را دارای بیشترین ارتعاش نشان می‌دهد. از بررسی شکل ۱۹ می‌توان نتیجه گرفت که حوضچه‌های با عمق 3 mm در سرعت 1800 rpm و حوضچه‌های با عمق 1 mm در سرعت 3600 rpm به ترتیب کم‌ترین و بیشترین مقدار ارتعاش را دارند. با مطالعه‌ی شکل ۲۰ چنین استنتاج می‌شود که تعداد ۲ حوضچه با سرعت 1800 rpm و تعداد ۳ حوضچه در سرعت دورانی 3600 rpm به ترتیب کم‌ترین و بیشترین مقدار ارتعاش را دارند.

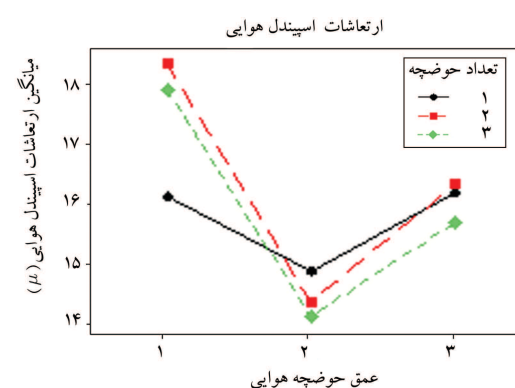
۵. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق عبارت‌اند از:

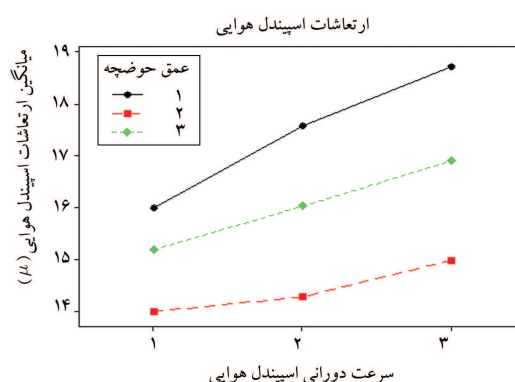
۱. براساس روش آزمایشات DOE تمامی پارامترهای مورد تحقیق بر ارتعاشات اسپیندل هوایی مؤثرند.
۲. نمودارهای اثر اصلی پارامترهای مورد آزمایش بر میزان ارتعاشات اسپیندل هوایی، حوضچه‌ی مدور، مساحت 300 mm^2 و عمق 3 mm و تعداد ۲ در سرعت 1800 rpm را دارای کم‌ترین مقدار ارتعاشات نشان می‌دهند.
۳. با توجه به نمودارهای اثر اصلی و تعامل اثر پارامترهای مورد مطالعه، عموماً حوضچه‌های هوایی با مساحت 300 mm^2 و عمق 3 mm و تعداد ۲ در سرعت 1800 rpm دارای کم‌ترین مقدار ارتعاش‌اند. همچنین از لحاظ شکل



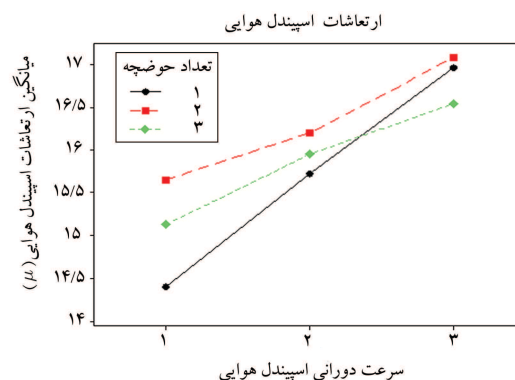
شکل ۱۷. تعامل اثر بین اندازه حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل هوایی.



شکل ۱۸. تعامل اثر بین عمق و تعداد حوضچه‌ی هوایی.



شکل ۱۹. تعامل اثر بین عمق حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل هوایی.



شکل ۲۰. تعامل اثر بین تعداد حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل هوایی.

اسپیندل هوایی با سه حوضچه‌ی مثلثی با مساحت 400 mm^2 و عمق 1 mm در سرعت دورانی بالا، بیشترین ارتعاش را دارند.

حوضچه‌ی هوایی، حوضچه‌های مدور و مستطیلی کم‌ترین مقدار ارتعاش را دارند.

۴. از مطالعه‌ی نمودارهای تعامل اثر پارامترهای مورد آزمایش، مشاهده می‌شود که در سرعت دورانی بالاتر (یعنی 3600 rpm)، اسپیندل هوایی با تعداد ۴ حوضچه‌ی هوایی دایروی با مساحت 300 mm^2 و عمق 3 mm از ارتعاشات کم‌تری برخوردار است.

۵. در مجموع، از مطالعه‌ی نمودارهای اثر اصلی و تعامل اثر پارامترهای مورد تحقیق،

تقدیر و تشکر

از معاونت و مدیریت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به جهت در اختیار قرار دادن کارگاه‌های ماشین‌ابزار و CNC آن واحد دانشگاهی تشکر می‌شود.

پانویست‌ها

1. nuclear energy
2. ultra precision machining (UPM)
3. optical mirrors
4. air gap
5. air hammer
6. Reynolds equation
7. Navier-Stokes
8. continuity equation
9. design of experiment (DOE)
10. analysis of variance (ANOVA)
11. main effect plot
12. interaction effect plot

منابع (References)

1. Boffey, D.A., Barrow, A.A. and Deardent, J.K. "Experimental investigation into the performance of an aerostatic industrial thrust bearing", *Tribology International*, **18**(3), pp. 165-168 (1985).
2. Stout, K.J. and Barrans, S.M. "The design of aerostatic bearings for application to nanometer resolution manufacturing machine systems", *Tribology International*, **33**, pp. 803-809 (2000).
3. Chen, M.F. and Lin, Y.T. "Static behavior and dynamic stability analysis of grooved rectangular aerostatic thrust bearings by modified resistance network method", *Tribology International*, **35**, pp. 329-338 (2002).
4. Chen, M.F., Chen, Y.P. and Lin C.D. "Research on the arc type aerostatic bearing for a PCB drilling station", *Tribology International*, **35**, pp. 235-243 (2002).
5. Kuang-Chao, F., Chi-Chung, H. and Jong-I, M. "Development of a multiple-microhole aerostatic air bearing system", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **12**, pp. 636-643 (2002).
6. Noguchi, S. and Miyaguchi, K. "An evaluation method of radial accuracy for hydrostatic air spindles considering radial movement of the rotating center", *Precision Engineering*, **27**, pp. 395-400 (2003).
7. Jung-Koo, P. and Kyung-Woong, K. "Stability analyses and experiments of spindle system using new type of slot-restricted gas journal bearings", *Tribology International*, **37**, pp. 451-462 (2004).
8. Hirayama, T., Yamaguchi, N., Sakai, S., Hishida, N., Matsuoka, T. and Yabe, H. "Optimization of groove dimensions in herringbone-grooved journal bearings for improved repeatable run-out characteristics", *Tribology International*, **42**, pp. 675-681 (2009).
9. Cheng-Hsien, C., Ding-Wen, Y., Yuan, K., Ren-Ming, H. and Shyh-Shyong, S. "Influence of orifices on stability of rotor-aerostatic bearing system", *Tribology International*, **42**, pp. 1206-1219 (2009).
10. Chen, M.F., Huang, W.L. and Chen, Y.P. "Design of the aerostatic linear guideway with a passive disk-spring compensator for PCB drilling machine", *Tribology International*, **43**, pp. 395-403 (2010).

STUDYING EFFECTIVE FACTORS ON AIR SPINDLE VIBRATIONS USING AIR PAD BEARING IN NANOMACHINING

M. Akhondzadeh(corresponding author)

m_akhondzadeh@iauhvaz.ac.ir

Dept. of Engineering

Islamic Azad University, Ahvaz Branch

M. Vahdati

vahdati@kntu.ac.ir

Dept. of Mechanical Engineering

K. N. Toosi University of Technology

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 3-9, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 10 May 2011; received in revised form 23 May 2012; accepted 15 July 2012.

Abstract

The increasing demand for precision manufacturing of components for computers, electronics, nuclear energy and defence applications has caused the appearance of ultra precision machining processes. Ultra precision machines are made in order to create very fine and accurate products. The main features of ultra precision machine tools can be classified as: High loop stiffness, high thermal and mechanical stability, low vibration, and high precision axis of motion. Guide ways, air spindles and drive systems are important parts of ultra precision machine tools. The air spindle is an important element of the ultra precision machine tool, whose vibrations directly affect the quality of the work surface. In order to achieve nanometer accuracy, the low vibration of the air spindle is vital. Pressurized air is injected into the gap of the spindle in order to make it operative. Some of the parameters affecting air spindle vibrations are rotational speed, the air compression method, input hole diameter, air pad conditions, and air gap pressure, etc. In this study, the air pad shape, size, depth and number, and rotational speed have been experimentally investigated. 3 levels are selected for each parameter in experiments. Totally, 243 experiments have been committed. For accomplishing these experiments, air spindles were made using various production processes. The VibroTest 60 was used for studying air spindle vibrations. Then, experiment results were analyzed by the design of experiment, DOE, method. The results show that the spindles with 2 air pads of 300 mm² area and 3 mm depth at low

rotational speed have minimum vibrations. Also, for air pad shape, circular and rectangular air pads have minimum vibrations.

Key Words: Ultra precision machining, air spindle, nanomachining, air pad, vibrations.