مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1394، دوره 15، شماره 1، ص‌ص 31-38

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود متمرکزکننده استوانه‌ای-مخروطی-استوانه‌ای با سطح مقطع دایره‌ای شکل: بکارگیری در فرآیند اصطکاک لغزشی به همراه ارتعاشات آلتراسونیک

داود شاهقلیان قهفرخی[1]، محمود سلیمی[2*]، محمود فرزین[3]

- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
*اصفهان، کدپستی 8415683111 ، salimi@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 24 مرداد 1393
پذیرش: 05 مهر 1393
ارائه در سایت: 01 آذر 1393

کلید واژگان:
متمرکزکننده استوانه‌ای-مخروطی-استوانه‌ای
شبیه‌سازی اجزاء محدود
ارتعاشات آلتراسونیک
فرآیند اصطکاک لغزشی

چکیده

زمانی که دو جسم روی سطح مشترکی لغزش می‌کنند بین آن‌ها اصطکاک به وجود می‌آید. با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به یکی از این دو جسم، نیروی اصطکاک بین دو جسم کاهش می‌یابد. این خاصیت دارای کاربردهای فراوانی در فرآیندهای شکل‌دهی و ماشین‌کاری داراست. برای تولید و انتقال ارتعاشات آلتراسونیک به ناحیه هدف نیاز به استفاده از اجزاء سیستم آلتراسونیک، شامل ژنراتور، ترانسدیوسر و متمرکزکننده می‌باشد. بخش مهمی از یک سیستم آلتراسونیک را متمرکزکننده تشکیل می‌دهد که مهمترین وظیفه آن انتقال ارتعاشات آلتراسونیک و تقویت دامنه ارتعاشات آلتراسونیک در خروجی خود می‌باشد. در این تحقیق متمرکزکننده آلومینیومی با هندسه استوانه‌ای-مخروطی-استوانه‌ای طراحی شد و در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس آنالیز مودال شده و سپس ساخته شد. فرکانس تشدید به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس 19976 هرتز می‌باشد. فرکانس تشدید به دست آمده از ژنراتور 19920 هرتز می‌باشد. نتایج به دست آمده، تطابق خوب بین نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود و نتایج تجربی را نشان می‌دهد. اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود با نتایج تجربی کمتر از یک درصد می‌باشد. همچنین یک مجوعه متمرکزکننده- قطعه کار جهت به کارگیری در فرآیند اصطکاک به همراه آلتراسونیک طراحی و ساخته شد و سپس گیره‌بندی و ابزار نگهدارنده برای ابزار ارتعاشی به گونه‌ای طراحی شد که بتوان آن را برروی دستگاه تراش نصب کرد و اندازه‌گیری نیروی اصطکاک هنگام اعمال ارتعاشات آلتراسونیک را ممکن باشد.

Experimental Study and finite element simulation of Cylindrical-conical-cylindrical horns with Circular cross-section:Application on ultrasonic vibrations Sliding friction process

Davoud Shahgholian Ghahfarokhi[1], Mahmoud Salimi[1*], Mahmoud Farzin[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
* P.O.B. *8415683111, Isfahan , salimi@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 August 2014
Accepted 27 September 2014
Available Online 22 November 2014

Keywords:
Cylindrical-conical-cylindrical horns
FEM simulation
Ultrasonic vibration
Process sliding friction

ABSTRACT

When two bodies slide on each other, friction is created. By superposing ultrasonic oscillation to one of the bodies, the friction force is reduced .This phenomenon is widely used in metal forming and metal cutting. For the production and transmission of ultrasonic vibrations to a target it is necessary to use an ultrasonic system, the components of which are a generator, a transducer and a horn. Horn constitutes an important part of the Ultrasonic systems. The main task of the horn is to transmit the ultrasonic vibrations and amplify the ultrasonic vibration amplitude at the output. In this study, an Aluminum horn was designed in cylindrical-conical-cylindrical shape geometry and analyzed by the finite-element method(FEM), and manufactured using the Abaqus software. The resonance frequency obtained in Abaqus was equal to 19976 Hz. The resonance frequency obtained from the generator was equal to 19920 Hz. Hence very good agreement exists between the experimental result and the FEM simulation. The difference between the finite element simulation results and the experimental ones is less than one percent. Moreover, a horn–workpiece assembly for applying the ultrasonic sliding friction was designed and manufactured. Then the fixture and the tool holder clamp were designed for the vibrating tool so that it can be installed on a milling machine and the friction force measurement is possible while the ultrasonic vibrations are applied.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

D. Shahgholian Ghahfarokhi, M. Salimi, M. Farzin, Experimental Study and finite element simulation of Cylindrical-conical-cylindrical horns with Circular cross-section:Application on ultrasonic vibrations Sliding friction process, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 1, pp. 31-38, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.31.7]

1- مقدمه

به امواجی که فرکانس نوساناتش بیشتر از 20 کیلو هرتز باشد، امواج آلتراسونیک می‌گویند این امواج دارای دامنه کم و فرکانس نوسانات بالایی می‌باشند که دارای کاربردهای گوناگونی در فرآیندهای شکل‌دهی و ماشین کاری می باشد.

نوسانات آلتراسونیک بین دو جسم همانند یک روانکار جامد عمل می کند و باعث کاهش نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی می‌شود به همین دلیل کاربردهای بسیاری در فرآیندهای شکل‌دهی دارا می‌باشندکه در این زمینه تحقیقات فراوانی انجام گرفته است.

موروکاوا و جین [1] به بررسی کاهش نیروی موردنیاز در فرآیند کشش سیم پرداختند. هانگ و همکاران [2] یک تحلیل عددی برای فرآیند کله‌زنی با امواج آلتراسونیک ارائه کردند.اکبری موسوی و همکاران [3] کاهش 30 درصدی در نیروی اصطکاک در فرایند اکستروژن توأم با آلتراسونیک را نشان دادند. رایدل [4] کاهش 37 درصدی در نیروی شکل‌دهی در فرآیند کشش عمیق در حضور نوسانات آلتراسونیک را نشان دادند.ژائو و همکاران [5] به تأثیر نوسانات بر روی فرایند فشار در ابعاد میکرو پرداختند. افتخارشهری و همکارن[6] به بررسی تحلیلی و عددی برای فرآیند هیدروفرمینگ لوله در حضور ارتعاشات آلتراسونیک پرداختند.

استفاده از ارتعاشات در فرآیندهای گوناگون ماشینکاری نیز مورد توجه محققین قرار گرفته است. از این روش در فرآیندهای ماشینکاری نظیر تراشکاری[1]، سوراخکاری[2]، فرزکاری[3]، برقوکاری[4] و سنگ زنی[5] استفاده شده و اثرات مثبت این روش مورد تأیید قرار گرفته است. استفاده از ارتعاشات در ماشین‌کاری از جمله فناوری‌های جدیدی است که در آن ارتعاشات طولی با بسامد بالا و دامنه کوچک به ابزار اعمال می‌گردد به طوری که درگیری ابزار با قطعه‌کار قطع و وصل می‌گردد. محققین مزایای بسیاری از جمله بهتر شدن صافی سطح، کاهش یا حذف پلیسه و بهبود در عدم تشکیل لبه انباشته را ذکر کرده‌اند. این روش ماشین‌کاری در فرآیندهای مهم ماشین‌کاری که در بالا ذکر شد، استفاده شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

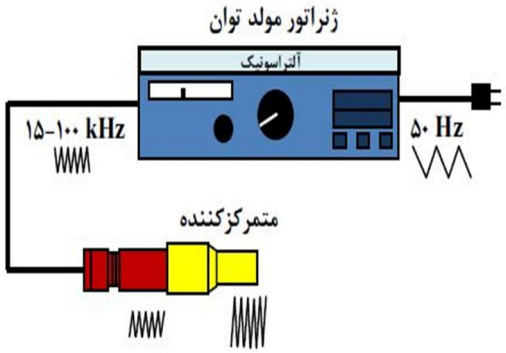
شاموتو و موریواکی فرآیند برش ارتعاشی را در دوجهت تحت عنوان ماشین‌کاری ارتعاشی بیضوی انجام دادند. از نتایج کار آن‌ها کاهش ضخامت براده و کاهش نیروی برشی بود[7-10]. بابیتسکی و آتساشیو تحلیل غیرخطی به صورت ارتعاش ضربه‌ای برروی فرآیند ماشین‌کاری همراه با آلتراسونیک انجام دادند آن‌ها نشان دادند که با اعمال مود ارتعاش ضربه‌ای بر قطعه کار، تغییرات زیادی بر ویژگی‌های دینامیکی ماشین کاری در این فرآیند حاصل می‌شود[11]. ایچیدا و همکارانش با ساخت مکانیزم ماشین‌کاری آلتراسونیک قطعات تخت، نحوه باربرداری قطعات را مورد بررسی داد. وی نشان داد که مهم‌ترین عامل باربرداری پدیده کاویتاسیون می‌باشد. وی تأثیر پارامترهایی مانند گپ‌هوایی و زمان ماشین‌کاری را برروی باربرداری مطالعه نمود. طبق گزارشات ارائه شده با افزایش گپ‌هوایی و کاهش زمان ماشین‌کاری، میزان باربرداری کاهش می‌یابد[12]. کوردو و همکارانش ، ابزاری برای ماشینکاری قطعات به کمک ارتعاشات آلتراسونیک معرفی نمود[13]. هوچنگ و کو از ماشین‌کاری آلتراسونیک برای پرداخت قالب‌های فولادی استفاده کرد. او در پژوهش خود با طراحی ابزاری سخت و نصب آن برروی ماشین کنترل عددی از ارتعاشات برای باربرداری استفاده نمود. دستیابی به صافی سطحی در حدود 0/7 میکرومتر از دست‌آوردهای این فرآیند بوده است[14]. مولیک و پاندی از ارتعاشات آلتراسونیک در پرداختکاری سایشی به کمک میدان مغناطیسی استفاده کردند. دراین مطالعه کاهش نیروهای اعمالی به سطح از جمله اثرات، ارتعاشات وارده به قطعه کار گزارش شده است[15].

زمانی که سطوح برروی یکدیگر حرکت می‌کنند بین آن‌ها اصطکاک دینامیکی به وجود می‌آید، اگر به یکی از دو جسمی که بر روی یکدیگر حرکت می‌کنند نوسانات آلتراسونیک دهیم تحقیقات نشان می‌دهد که باعث کاهش نیروی اصطکاک می‌گردد.

لیتمن و همکاران به صورت تئوری و تجربی [16, 17] تأثیر نوسانات آلتراسونیک را برروی ضریب اصطکاک در جهت طولی و جهت عرضی بررسی کردند و رابطه بین سرعت نسبی دو جسم و ضریب اصطکاک به دست آوردند. کومار و هاچینگز [18] نیز به صورت تجربی تأثیر نوسانات را در جهت طولی و عرضی بررسی کرد و بیان کردند که نوسانات طولی تأثیر بیشتری در کاهش نیروی اصطکاک نسبت به نوسانات عرضی دارد. پوپوف و همکاران [19] نیز به صورت تجربی تأثیر نوسانات را برای گستره‌ای از مواد بررسی کرد و بیان کردند که این نوسانات تأثیر کمتری برروی مواد نرم نسبت به مواد ترد داراست. دانگ و داپینیو [20] یک مدل الاستیک-پلاستیک ازتغییر شکل زبری‌ها در حضور نوسانات آلتراسونیک در جهت طولی و عرضی ارائه کردند.

همانگونه که دیده شد ارتعاشات آلتراسونیک دارای کاربردهای مفید بسیاری از جمله کاهش نیروی اصطکاک، کاهش نیروی شکل دهی،کاهش انرژی وپرداخت سطح بهتر می‌باشد. اما برای تولید و انتقال امواج آلتراسونیک به ابزار یا قطعه کار موردنظر، نیاز به طراحی، کاربرد و استفاده از تجهیزات خاصی می‌باشد. در شکل 1 مجموعه از یک سیستم آلتراسونیک نشان داده شده است[21]. اجزاء سیستم آلتراسونیک شامل ژنراتور مولد توان، ترانسدیوسر و متمرکزکننده (هورن) می‌باشد. ژنراتور مولد توان ولتاژ فرکانس برق شهری (50 Hz) را به ولتاژ فرکانس بالا (10-100 kHz) تبدیل می‌کند. ولتاژ فرکانس بالا جهت تحریک مکانیکی ترانسدیوسر استفاده می‌شود. ترانسدیوسر آلتراسونیک انرژی الکتریکی دریافت شده از ژنراتور را به نوسانات مکانیکی تبدیل می‌کند. سپس ارتعاشات مکانیکی انتهای ترانسدیوسر توسط متمرکزکننده به قطعه یا ابزار موردنظر انتقال می‌یابد[22].

بخش مهمی از یک سیستم آلتراسونیک، تمرکز دهنده یا انتقال دهنده ارتعاشات به ابزار است که با توجه به شرایط مسئله طراحی می‌گردد. تمرکز دهنده نقش انتقال انرژی و تمرکز آن بر یک حجم کوچک را دارد و دارای



شکل 1 شماتیک یک سیستم آلتراسونیک[21]

1- Turning
2- Drilling
3- Milling
4- Reaming
5- Grinding

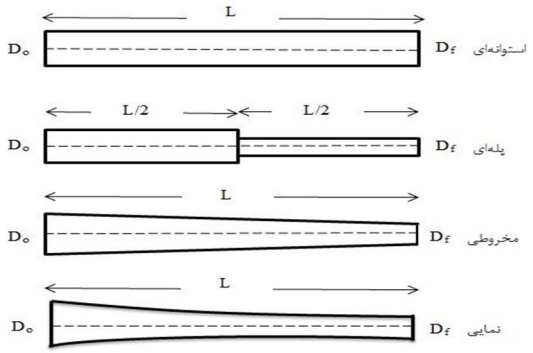
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.31.7]

اشکال ویژه‌ای است. علاوه بر آن متمرکزکننده، دامنه نوسانات ورودی را بزرگ نمایی کرده تا دامنه نوسان در خروجی متمرکزکننده برای انجام عملیات موردنظر در حد کافی تقویت شده باشد.

وبستر معادله ارتعاشی را برای مود طولی به‌دست آورد و سپس آن را برای متمرکزکننده نمایی حل کرد. گرین و جیبو با استفاده از این معادله توزیع تنش را در یک نمونه آزمایشی به دست آورد [23]. معادله وبستر برای تحلیل متمرکزکننده‌هایی که از شکل‌های ساده تشکیل شده بودند مورد استفاده قرار گرفت و پشکوسکی آن را برای یک متمرکزکننده پنج المانی (دو مخروط و سه استوانه) حل کرد[24]. برای رسیدن به شرایط ارتعاشی مورد نظر می‌توان با ترکیب متمرکزکننده‌های ساده به متمرکزکننده‌های ترکیبی دست یافت. در سال 1995 امین و همکارانش برای رسیدن به دامنه ارتعاش مورد نظرمتمرکزکننده سه المانی (ترکیبی از استوانه و مخروط) را پیشنهاد دادند[25]. شریت و همکارانش متمرکزکننده تاخورده برای جاهایی که محدودیت فضا وجود دارد، طراحی کردند[26].دانگمینگ و ینگ روش شبکه را برای طرای متمرکزکننده به کاربردند[27]. بانگستون و همکارانش از آنالیز اجزاء محدود جهت بهینه سازی شکل متمرکز کننده ارتعاشی و ایجاد تطابق امپدانسی با هوای محیط استفاده کردند[28]. لی و هونگ مدلی جهت آنالیز دینامیکی متمرکزکننده ارائه نمودند[29]. یاداوا و همکارانش پروسه آنالیز المان محدود یک متمرکزکننده ارتعاشی برای فرآیند ماشین‌کاری چرخشی به همراه آلتراسونیک را ارائه کردند[30]. معمار و همکارانش به طراحی و ساخت متمرکزکننده نمایی به منظور اندازه گیری ویژگی های فراصوتی محصولات کشاورزی پرداختند[31]. امینی و همکارانش چندین طرح مختلف متمرکزکننده را برای فرآیند تراشکاری به همراه آلتراسونیک ارائه کردند.آنها به این نتیجه رسیدند که محل اتصال ابزار به متمرکزکننده نقش بسیار مهمی در عملکرد سیستم دارا می‌باشد[32]. امامی و صادقی یک متمرکزکننده نمایی با سطح مقطع مستطیلی برای فرآیند سنگ زنی شبیه سازی کردند و نشان دادند که اختلاف بین نتایج شبیه سازی با نتایج تحلیلی کم می‌باشد[21].

متمرکزکننده‌ها عموماً در چهار دسته کلی دسته‌بندی می‌شوند: استوانه‌ای، پله‌ای، مخروطی و نمایی(شکل 2) .هر یک از این متمرکزکننده‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند.

متمرکزکننده استوانه‌ای[1] به لحاظ ساخت نسبت به دیگر طرح‌ها ساده‌تر می‌باشد و به لحاظ سادگی در شکل و ساخت در جایی که نیاز به تقویت دامنه ارتعاش نباشد بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع متمرکزکننده به دلیل عدم تغییرات سطح مقطع از استحکام کافی برخوردار بوده و



شکل 2 انواع شکل متمرکزکننده[24]

1- Cylindrical Horn

ارتعاشات را خوب منتقل می‌کند. اما همان‌گونه که گفته شد این نوع متمرکزکننده ارتعاشات را فقط منتقل کرده و دامنه موج تولیدی در انتهای هورن با دامنه موج تولید شده توسط ترانسدیوسر مساوی می‌باشد[25].

متمرکزکننده پله‌ای[2] یک متمرکزکننده دو المانی می‌باشد که المان دوم آن با استفاده از ایجاد یک پله طراحی می‌گردد. پله ایجاد شده باعث تغییر ناگهانی سطح مقطع شده و تمرکز تنش شدیدی ایجاد خواهد کرد. همچنین تغییر سطح مقطع ناگهانی باعث برگشت درصدی از موج تولید شده توسط ترانسدیوسر به خود ترانسدیوسر شده که باعث افزایش دمای مجموعه می‌شود. مزیت آن نسبت به متمرکزکننده استوانه‌ای تقویت دامنه ارتعاش می‌باشد. به دلیل تغییر ناگهانی سطح مقطع نسبت به متمرکزکننده‌های دیگر از ضریب تقویت دامنه بزرگ‌تری برخوردار است[25]. ضریب تقویت[3]از تقسیم دامنه خروجی به دامنه ورودی به دست می‌آید[33].

متمرکزکننده‌های مخروطی[4] و نمایی[5] نسبت به دو متمرکزکننده قبلی عملکرد بهتری دارند و به صورت گسترده در صنعت استفاده می‌شوند این دو متمرکزکننده به دلیل عدم بازگشت امواج تولیدی، سیستم را از نظر شرایط دمایی در حالت ایده‌آل نگه می‌دارند.

تنش‌های اعمالی به متمرکزکننده نباید از استحکام تسلیم جنس مورد استفاده تجاوز نمایدتنش اعمال شده به متمرکزکننده پله‌ای و نمایی نسبت به دو متمرکزکننده استوانه ای و مخروطی بیشتر می‌باشد[25].

همانگونه که در ابتدای این تحقیق اشاره شد با اعمال نوسانات آلتراسونیک به یکی از دو جسم درگیر، باعث کاهش نیروی اصطکاک بین دو جسم می‌گردد که این خاصیت دارای کاربردهای صنعتی فراوانی می‌باشد. هدف این تحقیق طراحی، شبیه سازی اجزاء محدود و ساخت یک متمرکزکننده برای انتقال ارتعاشات آلتراسونیک از ترانسدیوسر به قطعه درگیر در فرآیند اصطکاک لغزشی می‌باشد. شکل متمرکزکننده استفاده شده در این تحقیق به صورت ترکیبی از متمرکزکننده استوانه و مخروطی در نظر گرفته شد. تا هم دارای مزایای متمرکزکننده استوانه‌ای و هم دارای مزایای متمرکزکننده مخروطی باشد. به عبارت دیگر شکل در نظر گرفته شده باعث تقویت دامنه در خروجی، انتقال خوب ارتعاشات و توزیع یکنواخت‌تر تنش می‌باشد.

2- انتخاب روش طراحی متمرکزکننده در این تحقیق

سه روش عمده و مهم برای طراحی متمرکزکننده وجود دارد که عبارتند از روش تحلیلی، روش تجربی و آزمایشگاهی و روش عددی.

روشی تحلیلی روشی است که بر اساس حل معادله موج پایه‌گذاری شده است. در این روش ابتدا ساده‌سازی‌هایی از جمله اینکه ارتعاشات از نوع سینوسی هستند، طول متمرکزکننده ضریب صحیحی از نصف طول موج می‌باشد، ارتعاش ایجاد شده در متمرکزکننده از نوع طولی می‌باشد انجام شده و سپس به حل معادلات مربوطه می‌پردازند. از این روش به طور محدود برای طراحی متمرکزکننده استفاده می‌گردد. حل معادلات بسیار پیچیده و وقت‌گیر از معایب چشم‌گیر این روش می‌باشد. همچنین حل معادلات برای شکل پروفیل‌های ساده امکان‌پذیر بوده و برای شکل پروفیل‌های پیچیده و گوناگون نیاز به برنامه‌نویسی کامپیوتری و حل به کمک کامپیوتر می‌باشد.

روش تجربی بر اساس ساخت و تست متمرکزکننده توسط ژنراتور

2- Stepped Horn
3- Amplification factor
4- Conical Horn
5- Exponential Horn

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.31.7]

می‌باشد. می‌توان طول تقریبی متمرکزکننده را با استفاده از طول موج انتشار یافته در آن به دست آورد. برای این کار کافی است که سرعت انتشار موج در جنس مورد نظر با استفاده از روابط موجود محاسبه گردیده و سپس با در نظر گرفتن بسامد طراحی مورد نظر، طول موج محاسبه شود. از طول موج بدست آمده طول متمرکزکننده به دست می‌آید. بعد از آن متمرکزکننده ساخته و تست می‌شود و در نهایت در صورت نیاز، هورن با استفاده از ماشینکاری مجدد تصحیح شده تا بسامد مورد نظر حاصل گردد. این روش نیز کارایی لازم را نداشته و علاوه بر وقت‌گیر بودن و دقت نامناسب، در صورتی که مجموعه ارتعاشی ما به غیر از متمرکزکننده شامل قطعات دیگری نیز باشد، رسیدن به بسامد طراحی مورد نظر برای کل مجموعه ارتعاشی بسیار مشکل می‌باشد.

روش عددی یکی از مؤثرترین و کارآمدترین روش‌ها برای طراحی متمرکزکننده می‌باشد. با این روش می‌توان متمرکزکننده‌ها با ابعاد و شکل پروفیل‌های متفاوت و ترکیبی از آنها را آنالیز مودال کرد. این روش از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده در حالی که نسبت به سایر روش‌ها راحت‌تر و وقت کمتری را می‌گیرد.

بنابراین با توجه به موارد فوق و با توجه به اینکه متمرکزکننده استفاده شده در این تحقیق دارای شکل پیچیده‌ای است و علاوه بر تحلیل خود متمرکزکننده باید تحلیل جسمی که بر سر آن بسته می‌شود نیز انجام شود نمی‌توان از روش تحلیلی و روش آزمایشگاهی استفاده کرد. بنابراین برای تحلیل متمرکزکننده در این تحقیق، از شبیه سازی اجزاء محدود و از نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

3- انتخاب پارامترهای طراحی برای متمرکزکننده

3-1-جنس متمرکزکننده و دیگر اجزاء

در یک مجموعه ارتعاشی انرژی آلتراسونیک از ترانسدیوسر به متمرکزکننده منتقل می‌شود. از طرفی دیگر انرژی صوتی هنگام عبور از یک سطح به سطحی دیگر کاملاً منتقل نشده، مقداری از آن بازتاب و مقداری هم در بین سطح مشترک دو ماده تلف می‌شود. پس اولین نتیجه‌ای که گرفته می‌شود این است که هر چه جنس متمرکزکننده به جنس ترانسدیوسر نزدیک‌تر باشد انرژی بیشتری به متمرکزکننده منتقل خواهد شد. همچنین یکی از وظایف اصلی متمرکزکننده انتقال ارتعاشات آلتراسونیک می‌باشد. پس باید جنس متمرکزکننده به گونه‌ای انتخاب گردد که دمپینگ ارتعاشی آن بسیار کم بوده و در نهایت منجر به اتلاف انرژی نشود. مثلاً چدن یک انتخاب ضعیفی می‌باشد. دلیل آن این است که در چدن ذرات ریز گرافیت باعث جذب انرژی صوتی می‌گردد[34].

از بحث‌های بالا نتیجه گرفته می‌شود که جنس هورن باید دو خصوصیت مکانیکی و آکوستیکی خوب را با هم دارا باشد. خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت به خستگی بالا، تنش تسلیم بالا، چقرمگی شکست خوب و مقاومت به سایش خوب و خصوصیات آکوستیکی شامل اتلاف انرژی کم، میرایی ارتعاشات پایین[1] و سرعت صوت بالا می‌شود. محققین از جنس‌های گوناگونی مانند آلیاژهای تیتانیم، فولاد و آلومینیوم برای ساخت متمرکزکننده استفاده کرده‌اند.

جنس متمرکزکننده استفاده شده در این تحقیق نیزآلومینیوم سری 7075 تی6 انتخاب گردید تا با ترانسدیوسر استفاد شده در این تحقیق همجنس باشد. همچنین جسم بسته شده بر سر هورن نیز از همین جنس انتخاب گردید که توسط یک پیچ مغزی فولادی به متمرکزکننده بسته می‌شود.که خواص مکانیکی آن‌ها درجدول 1 آمده است.

3-2-بسامد متمرکزکننده

بسامد متمرکزکننده[2] بسامدی است که در آن بسامد، متمرکزکننده به حالت تشدید[3] خواهد رسید. در انتخاب بسامد تشدید متمرکزکننده باید به دو نکته توجه کرد: (1) بسامد انتخابی در رنج بسامد دستگاه آلتراسونیک باشد. به طور مثال اگر به ترتیب حداکثر و حداقل بسامد تولیدی توسط ژنراتور 5kHz و 70kHz باشد نمی‌توان متمرکزکننده‌ای با بسامد بیشتر از 5kHz و کمتر از 70kHz طراحی کرد. (2) بسامد تشدید متمرکزکننده در محدوده بسامد ترانسدیوسر قرار داشته باشد. بازه بسامد ترانسدیوسر مورد استفاده در این مطالعه بین 19/5kHz تا 20/5kHz قرار دارد و باید طراحی به گونه‌ای باشد که بسامد تشدید متمرکزکننده در این بازه قرار گیرد. در صورت قرار نگرفتن در این بازه، بازده هورن به عنوان یک تقویت‌کننده پایین خواهد آمد. حداکثر بازده هورن به عنوان یک تقویت‌کننده انرژی آلتراسونیک وقتی به‌دست می‌آید که بسامد تشدید هورن دقیقاً با بسامد تشدید ترانسدیوسر یکسان باشد.

ذکر این نکته ضروری است که در بسیاری از موارد مجموعه ارتعاشی تنها شامل یک قطعه (متمرکزکننده) نبوده و طراح با یک مجموعه ارتعاشی شامل متمرکزکننده و چند قطعه دیگر مواجه می‌باشد. در این حالت باید بسامد تشدید مجموعه با هم در محدوده بسامد ترانسدیوسر قرار بگیرد. در این تحقیق از بسامد 20kHz مطابق با بسامد تشدید ترانسدیوسر برای طراحی استفاده شد.

3-3- محاسبه طول موج و اندازه ماکزیمم قطر متمرکزکننده و ابعاد متمرکزکننده

طول موج از تقسیم سرعت موج به بسامد طراحی بدست می‌آید. سرعت موج نیز بستگی به جنس ماده دارد و از جذر تقسیم مدول یانگ به چگالی ماده بدست می‌آید. از طول موج بدست آمده می‌توان برای محاسبه طول و قطر متمرکزکننده استفاده کرد. سرعت صوت از رابطه (1) به دست می‌آید:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{71.7 * 10^9}{2813.9}} = 5047 \text{ m/s} \qquad (1)$$

سپس طول موج با استفاده از رابطه(2)محاسبه می‌گردد.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{5047}{20000} = 0.252\text{m} = 252\text{mm} \qquad (2)$$

پیشنهاد شده است که بزرگ‌ترین قطر متمرکزکننده از یک چهارم طول موج کوچک‌تر یا مساوی آن باشد. در صورت بزرگ‌تر بودن از این مقدار

جدول 1 خواص مکانیکی متمرکزکننده و دیگر اجزاء

نام	جنس	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پؤاسن
متمرکزکننده	آلومینیوم	2810	71/7	/33
پیچ مغزی	فولاد	7800	210	/29
قطعه	آلومینیوم	2810	71/7	/33

1- Low Oscillation Damping

2- Horn Frequency
3- Resonanse

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.31.7]

ارتعاشات عرضی در متمرکزکننده قابل توجه بوده که در نهایت باعث کاهش انرژی می‌شود[35]. بنابراین قطر ماکزیمم متمرکزکننده از رابطه (3) به دست می‌آید.

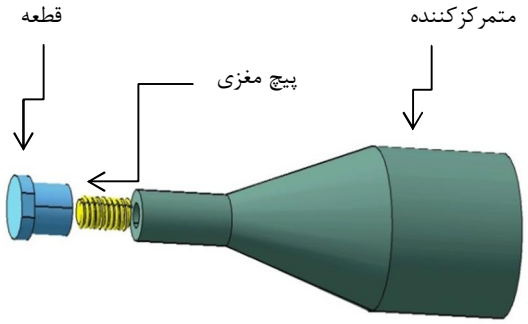
$$D_{max} = \frac{\lambda}{4} = 63\text{mm} \quad (3)$$

طول متمرکزکننده از $L = n\frac{\lambda}{2}$ محاسبه خواهد شد که در آن n عددی صحیح می‌باشد. برای n=1 و n=2 به ترتیب هورن با طول نیم موج و تمام موج به‌دست می‌آید. از هر دو نوع متمرکزکننده می‌توان بر حسب شرایط استفاده کرد از این رابطه در صورتی می‌توان استفاده کرد که ابزار ارتعاشی ما فقط شامل متمرکزکننده باشد. در صورتی که ابزار ارتعاشی شامل چند قطعه باشد (در این تحقیق ابزار ارتعاشی شامل متمرکزکننده، پیچ مغزی و قطعه بسته شده بر سر هورن می‌باشد) باید از نرم‌افزارهای اجزاء محدود برای رسیدن به ابعادی که درآن مجموعه ارتعاش طولی در بسامد مورد نظر داشته باشد، استفاده کرد ولی می‌توان از این ابعاد به عنوان یک مقدار اولیه در نرم افزار اجزاء محدود استفاده کرد.

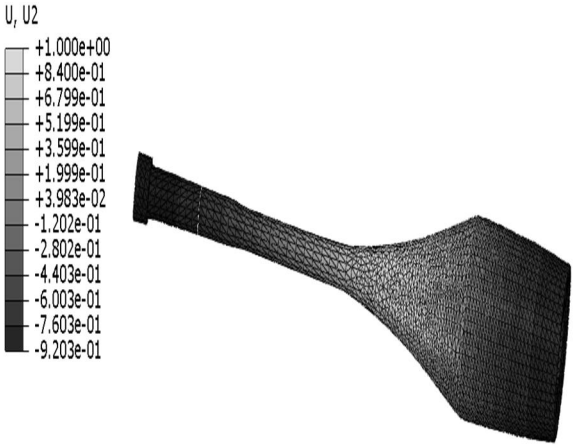
4- شبیه‌سازی اجزاء محدود ابزار ارتعاشی در نرم افزار آباکوس

برای شبیه سازی اجزاء محدود ابزار ارتعاشی، ابتدا طرح اولیه آن مطابق شکل 3 در نرم افزار کتیا طراحی گردید. که در این طراحی طول متمرکزکننده و قطعه بسته شده بر سر آن 252 میلی‌متر، قطر بزرگ متمرکزکننده 51میلی متر و قطر کوچک متمرکزکننده 16 میلی متر در نظر گرفته شد.

برای تحلیل ابزار ارتعاشی از نرم افزار آباکوس استفاده شد. ابتدا شکل طراحی شده در نرم افزار کتیا وارد نرم افزار آباکوس گردید و پس از تعیین مشخصات هر قطعه از لحاظ خواص مکانیکی در نرم افزار، یک مسئله خطی



شکل 3 ابزار ارتعاشی طراحی شده در نرم افزار کتیا



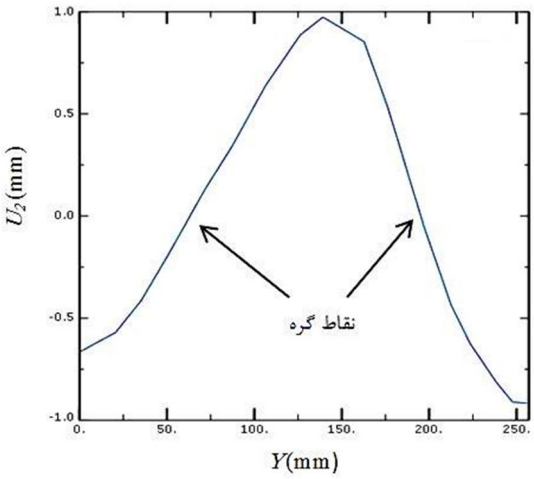
شکل 4 تحلیل ابزار ارتعاشی به منظور یافتن فرکانس تشدید

فرکانسی برای آن تعریف شد. برای تحلیل از مش C3D10 استفاده شد و تعداد المان‌ها 78729 انتخاب گردید، همچنین استقلال از نوع و تعداد مش انجام شد که تغییر قابل توجهی در فرکانس تشدید نداشت. پس از اتمام تحلیل مطابق آنچه در شکل 4 دیده می‌شود مقدار فرکانس تشدید طولی 19966 هرتز به دست آمد.

4-1- گیره‌بندی متمرکزکننده

ارتعاش طولی متمرکزکننده به دلیل اثر پؤاسون باعث تغییر در ابعاد متمرکزکننده در سه جهت می‌شود. از طرفی برای آماده‌سازی یک سیستم ارتعاشی نیاز به گیره‌بندی سیستم یا مجموعه در نقاط خاصی می‌باشد که در این نقاط مجموع حرکت نداشته باشد در اصل این نقاط، نقاط تکیه‌گاه مجموعه می‌باشند. به دلیل اینکه مجموعه، در حال ارتعاش آلتراسونیک می‌باشد، این نقاط بایستی به دقت انتخاب شوند تا اولاً در این نقاط جابجایی وجود نداشته باشد، ثانیاً از ایجاد حرارت جلوگیری شود. چراکه انتخاب نادرست این نقاط علاوه بر اینکه مودهای ارتعاشی را تغییر می‌دهد، باعث گرم شدن بسیار شدید سیستم شده و موجب خرابی ترانسدیوسر نیز می‌شود. برای پیدا کردن این نقاط دو روش وجود دارد، یا می‌توان به کمک نرم‌افزارهای اجزاء محدود این نقاط را تعیین کرد و یا می‌توان به کمک آزمایش‌های بعد از ساخت هورن و با استفاده از آزمایش پاشش پودرنقاط را تعیین نمود.ولی به دلیل دقت بالای نرم‌افزارهای اجزاء محدود و مقرون به صرف نبودن ساخت چندین هورن، در این تحقیق برای پیدا کردن این نقاط از نرم‌افزار آباکوس استفاده گردید که شکل 5 منحنی تغییر طول هورن را در راستای محور هورن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود نقاطی وجود دارد که ارتعاش در آن در تمام جهت صفر می‌باشد.این مکان‌ها به نقاط گره معروف هستند که این گره‌ها در شکل مشخص می‌باشند. گره اولی در فاصله 63 سانتی متری و گره دومی در فاصله 193 سانتی متری از ابتدای متمرکزکننده قرار دارند. در گره اولی برای متمرکزکننده فلنچی ایجاد گردید تا ابزار هم دارای گیره‌بندی باشد و محل گیره‌بندی بر روی هورن به صورت یکپارچه ساخته شد. سعی شد تا حد امکان گره دوم در نزدیکی محل اتصال جسم به متمرکزکننده قرار گیرد.

بنابراین طراحی نهایی ابزار ارتعاشی مطابق شکل 6 می‌باشد. این شکل مجدداً در نرم افزار آباکوس وارد شده و آنالیز مودال انجام گرفت. فرکانس تشدید جدید ابزار ارتعاشی که شامل هورن و جسم بسته شده در سر آن می‌باشد همانگونه که در شکل 7 مشاهده می‌شود برابر19976 هرتز می‌باشد.



شکل 5 نمودار تغییر طول ابزار ارتعاشی در راستای طولی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.31.7]

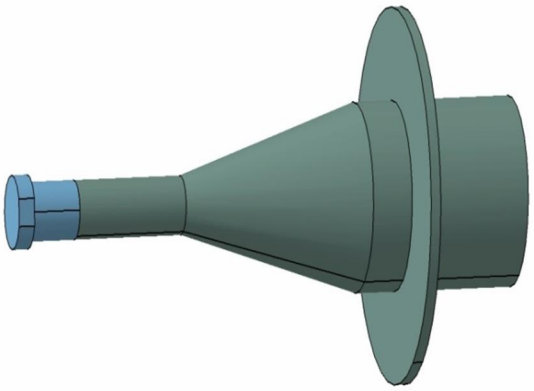
برای هر سیستم ارتعاشی سه مود ارتعاشی اصلی وجود دارد:

1-مود طولی: در این مود هورن در امتداد محور خودش ارتعاش می‌کند.شکل 8

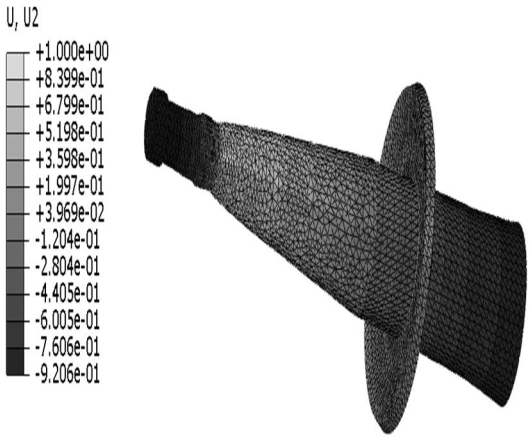
2-مود پیچشی : در این مود هورن حول محور خودش ارتعاش دارد.شکل 9

3-مود خمشی : در این مود هورن به طرف چپ و راست یا بالا و پایین خم و راست می‌شود.شکل10

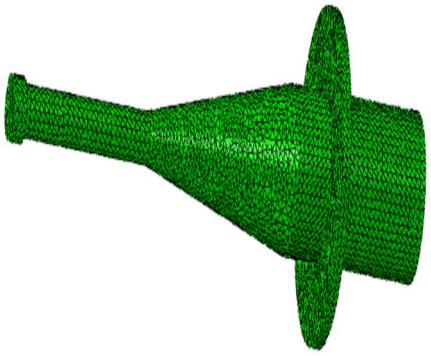
همانگونه که از شکل‌های 8،9 و10 مشخص است فرکانس طولی هورن طراحی شده 19976Hz، فرکانس پیچشی 21013Hz و فرکانس خمشی



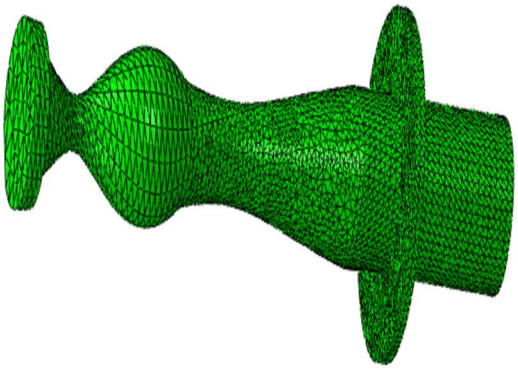
شکل 6 شکل نهایی ابزار ارتعاشی طراحی شده در نرم افزار کتیا



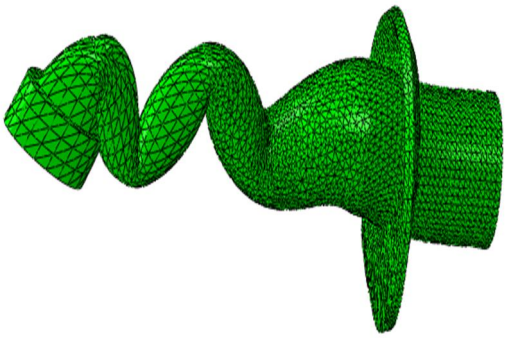
شکل 7 تحلیل نهایی ابزار ارتعاشی به منظور محاسبه فرکانس تشدید



شکل 8 مود طولی هورن طراحی شده



شکل 9 مود پیچشی هورن طراحی شده



شکل 10 مود خمشی هورن طراحی شده

23174Hz می‌باشد. با توجه با این که ترانسدیوسر استفاده شده در این تحقیق یک ترانسدیوسر با ارتعاش طولی می‌باشد و نمی‌تواند ارتعاشات خمشی و پیچشی را تحمل کند و بازه فرکانس تشدید آن نیز بین 19/5 kHz تا20/5 kHz می‌باشد. بنابراین در طراحی ابزار ارتعاشی استفاده شده در این تحقیق به این نکته توجه شد که مودهای خمشی و پیچشی در این بازه قرار نگیرند چراکه در صورتی قرارگیری در این بازه باعث آسیب جدی به ترانسدیوسر و مجموعه ارتعاشی می‌شود. بنابراین کار طراحی ابزار ارتعاشی بسیار حساس و دقیق می‌باشد و نه تنها باید مواردی از جمله جنس، بسامد و طول موج در طراحی ابزار ارتعاشی مورد توجه قرار گیرد بلکه ترانسدیوسری که قرار است ابزار ارتعاشی را نیز مرتعش کند باید مورد توجه باشد. درصورت قرارگیری فرکانس پیچشی و خمشی در بازه‌ی فرکانس ترانسدیوسر باید ابعاد هورن طراحی شده را تغییر داده ، این سعی و خطا تا جایی که این فرکانس‌ها بیرون از بازه فرکانس ترانسدیوسر قرار گیرند ادامه می‌یابد.

5- ساخت و بررسی تجربی ابزار ارتعاشی

سرانجام پس از اینکه ابزار ارتعاشی در نرم افزار کتیا طراحی شد و در نرم افزار آباکوس تحلیل گردید، ساخته شد و برای انجام آزمایشات برروی دستگاه تراش نصب گردید.(شکل 11). به منظور نصب و موقعیت دهی تجهیزات ساخته شده برروی دستگاه تراش، نیاز به ابزاری برای نگه داشتن ابزار ارتعاشی بود که این نگه‌دارنده ها طراحی و ساخته شدند. لذا نگه دارنده نشان داده شده در شکل11 پس از تعیین اندازه‌ها و موقعیت موردنظر ساخته شد، به نحویکه ابزار ارتعاشی به آن پیچ شده و در محل ابزارگیر دستگاه تراش نصب گردید.

پس از آنکه ابزار ارتعاشی ساخته شد و برروی دستگاه تراش نصب گردید فرکانس تشدید آن توسط ژنراتور به دست آمد. ژنراتور مورد استفاده در این

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

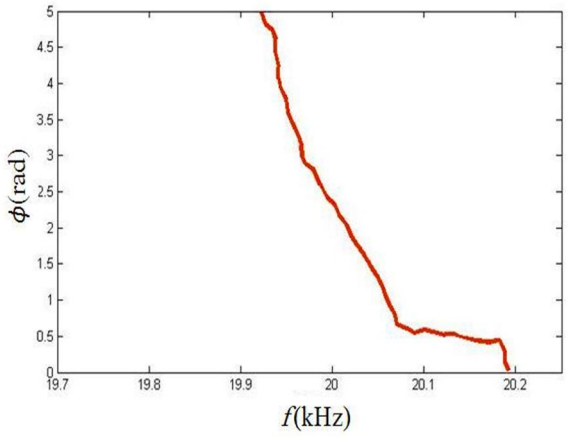
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.31.7]

تحقیق دارای 3000W توان بوده و محدوده بسامد آن بین 5 kHz تا 70 kHz می‌باشد. این ژنراتور در شکل 12 نشان داده شده است. یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های این ژنراتور توانایی اسکن کردن ابزار ارتعاشی در محدوده بسامد مورد نظر می‌باشد. در واقع با اسکن کردن ابزار ارتعاشی، بسامد تشدید مجموعه، قبل از استارت ژنراتور به دست خواهد آمد. این قابلیت باعث می‌شود که از وجود هرگونه مشکل قبل از راه اندازی کامل ژنراتور با خبر شده و از صدمات احتمالی وارده به مجموعه جلوگیری شود. این ژنراتور با نرم افزار لب ویو کنترل می‌گردد.

مقدار فرکانس تشدید به دست آمده از ژنراتور مطابق شکل 13 برابر 19920 هرتز می‌باشد. محور افقی شکل 13 نشان دهنده‌ی فرکانس ابزار ارتعاشی می‌باشد و محور عمودی این شکل معرف زاویه فاز می‌باشد. از آنجایی که در آزمایش انجام‌گرفته زاویه فاز بین ولتاژ و جریان داده شده به ژنراتور 5+ می‌باشد، بنابراین برای یافتن فرکانس تشدید از روی نمودار باید فرکانس مربوط به این زاویه فاز خوانده شود که این مقدار 19920 هرتز می‌باشد.

شکل 11 ابزار ارتعاشی ساخته شده و نحوه گیره بندی ابزار ارتعاشی

شکل 12 ژنراتور استفاده شده در این تحقیق برای به دست آوردن فرکانس تشدید



شکل 13 مقدار فرکانس تشدید به دست آمده از ژنراتور

فرکانس تشدید به دست آمده از نرم افزار برابر 19976 می‌باشد که مقدار تجربی به دست آمده از ژنراتور برابر 19920 می‌باشد. که اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند که این اختلاف بسیار کم نشان دهنده دقت شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد. علت این اختلاف کم را نیز می‌توان، عدم در نظر گرفتن اتلاف انرژی بین سطوح تماس در نرم افزار یا عدم رعایت تلرانس موجود در ساخت متمرکزکننده دانست.

6- نتیجه گیری

بخش مهمی از یک سیستم آلتراسونیک، متمرکزکننده یا هورن می‌باشد. متمرکزکننده ابزاری است که ارتعاشات آلتراسونیک را از ترانسدیوسر گرفته و به ناحیه هدف می‌رساند. مهمترین وظیفه‌ی آن انتقال و تقویت دامنه ارتعاشات به منظور بهبود عملکرد سیستم آلتراسونیک می‌باشد. متمرکزکننده ها بسته به کاربرد آن‌ها دارای شکل‌های مختلفی می‌باشند. در این تحقیق یک متمرکزکننده استوانه‌ای-مخروطی- استوانه‌ای طراحی، تحلیل و ساخته شد. متمرکزکننده از جنس آلومینیوم سری 7075 تی6 می‌باشد. به طور خلاصه نتایج به دست آمده از این پژوهش عبارتند از:

1- طراحی، شبیه سازی اجزاء محدود و ساخت متمرکزکننده استوانه‌ای-مخروطی‌استوانه‌ای با قابلیت تقویت دامنه ارتعاشات و انتقال خوب ارتعاشات در فرآیند اصطکاک.

2- به دست آوردن نقاط گره در متمرکزکننده و طراحی و ساخت فلنج و ابزار گیره‌بندی متمرکزکننده و طراحی و ساخت نگه‌دارنده‌های ابزار ارتعاشی.

3- فرکانس تشدید به دست آمده از شبیه سازی اجزاء محدود توسط نرم‌افزار آباکوس 19976 هرتز می‌باشد.

4- فرکانس تشدید به دست آمده از ژنراتور 19920هرتز می‌باشد.

5- اختلاف بسیار کمی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی به دست آمد(کمتر از 1%). این اختلاف بسیار کم نشان دهنده دقت شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد. علت این اختلاف کم را نیز می‌توان، عدم در نظر گرفتن اتلاف انرژی بین سطوح تماس در نرم افزار یا عدم رعایت تلرانس موجود در ساخت متمرکزکننده دانست.

7- قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از مدیر آزمایشگاه آلتراسونیک دانشگاه صنعتی اصفهان جناب آقای دکتر امین الله محمدی به خاطر همکاری ایشان

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.31.7]

در انجام آزمایش‌های تجربی ابراز می‌دارد.

8- مراجع

[1] M. Murakawa, M. Jin, The utility of radially and ultrasonically vibrated dies in the wire drawing process, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 113, No. 1, pp. 81-86, 2001 .

[2] Z. Huang, M. Lucas, M. J. Adams, Influence of ultrasonics on upsetting of a model paste, *Ultrasonics,* Vol. 40, No. 1, pp. 43-48, 2002 .

[3] S. Mousavi, H. Feizi, R. Madoliat, Investigations on the effects of ultrasonic vibrations in the extrusion process, *Journal of materials processing technology,* Vol. 187, pp. 65 ,2007 ,661-7.

[4] A. Riedll, Stretch Forming Process for Sheet Metal, *German patent ,* 1942 .

[5] Z. Yao, G.-Y. Kim, L. Faidley, Q. Zou, D. Mei, Z. Chen, Effects of superimposed high-frequency vibration on deformation of aluminum in micro/meso-scale upsetting, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 212, No. 3, pp. 640-646, 2012 .

[6] S. Y. A. B. S.E.Eftekhari Shahri , K.khalili ,B.S.Kong, Ultrasonic tube hydroforming, a numerical and analytical study, *Modares Mechanical Engineering,* 2013. In Persian

[7] T. Moriwaki, E. Shamoto, K. Inoue, Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 41, No. 1, pp. 141-144, 1992 .

[8] E. Shamoto, T. Moriwaki, Fundamental Study on Elliptical Vibration Cutting, in *Proceeding of,* 162-165 .

[9] E. Shamoto, T. Moriwaki, Study on elliptical vibration cutting, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 43, No. 1, pp. 35-38, 1994 .

[10]]T. Moriwaki, E. Shamoto, Ultrasonic elliptical vibration cutting, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 44, No. 1, pp. 31-34, 1995 .

[11] V. Astashev, V. Babitsky, Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process, *Ultrasonics,* Vol. 36, No. 1, pp. 89-96, 1998 .

[12] Y. Ichida, R. Sato, Y. Morimoto, K. Kobayashi, Material removal mechanisms in non-contact ultrasonic abrasive machining, *Wear,* Vol. 258, No. 1, pp. 107-114, 2005 .

[13] A. Curodeau, J. Guay, D. Rodrigue, L. Brault, D. Gagné, L.-P. Beaudoin, Ultrasonic abrasive μ-machining with thermoplastic tooling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 48, No. 14, pp. 1553-1561, 2008 .

[14] H. Hocheng, K. Kuo, Fundamental study of ultrasonic polishing of mold steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 42, No. 1 ,pp. 7-13, 2002 .

[15] R. S. Mulik, P. M. Pandey, Mechanism of surface finishing in ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing process, *Materials and Manufacturing Processes,* Vol. 25, No. 12, pp. 1418-1427, 2010 .

[16] W. Littmann, H. Storck, J. Wallaschek, Sliding friction in the presence of ultrasonic oscillations: superposition of longitudinal oscillations, *Archive of Applied Mechanics,* Vol. 71, No. 8, pp. 549-554, 2001 .

[17] H. Storck, W. Littmann, J. Wallaschek, M. Mracek, The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors, *Ultrasonics,* Vol. 40, No. 1, pp. 379-383, 2002 .

[18] V. Kumar, I. Hutchings, Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration, *Tribology International,* Vol. 37, No. 10, pp. 833-840, 2004 .

[19] V. L. Popov, J. Starcevic, A. E. Filippov, Influence of ultrasonic in-plane oscillations on static and sliding friction and intrinsic length scale of dry friction processes, *Tribology letters,* Vol. 39, No. 1, pp. 25-30, 2010 .

[20] S. Dong, M. J. Dapino, Elastic–plastic cube model for ultrasonic friction reduction via Poisson's effect, *Ultrasonics,* Vol. 54, No. 1, pp. 343-350, 2014 .

[21] E. mohsen, m. H. Sadeghi, Analytical Modling and finite element simulation of exponential horns with rectangular cross-section:Application on ultrasonic assisted grinding, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. vol.13,NO 14, pp. 185-189, 2013. In Persian

[22] A. Shoh, Industrial applications of ultrasound-A review I. High-power ultrasound, *Sonics and Ultrasonics, IEEE Transactions on,* Vol. 22, No. 2, pp. 60-70, 1975 .

[23] C. Green, F. Guiu, The ultrasonic stress distribution in a specimen with a circular gauge profile, *Journal of Physics D: Applied Physics,* Vol. 9, No. 6, pp. 1063, 1976 .

[24] S. L. Peshkovsky, A. S. Peshkovsky, Matching a transducer to water at cavitation: Acoustic horn design principles, *Ultrasonics sonochemistry,* Vol. 14, No. 3, pp. 314-322, 2 .٠٠٧

[25] S. Amin, M. Ahmed, H. Youssef, Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 55, No. 3, pp. 254-260, 1995 .

[26] S. Sherrit, M. Badescu, X. Bao ,Y. Bar-Cohen, Z. Chang, Novel horn designs for power ultrasonics, in *Proceeding of,* IEEE, pp. 2263-2266 .

[27] Z. P. F. D. G. Dongming, F. Yaying, Design of horn using four-end network method [J], *Acta Acustica,* Vol. 6, pp. 014, 2002 .

[28] E. Bängtsson ,D. Noreland, M. Berggren, Shape optimization of an acoustic horn, *Computer methods in applied mechanics and engineering,* Vol. 192, No. 11, pp. 1533-1571, 2003 .

[29] S. I. Lee, S. H. Hong, Nonlinear vibration analysis of ultrasonic horn model for flip-chip bonding, in *Proceeding of,* IEEE, pp. 2804-2807 .

[30] V. Yadava, A. Deoghare, Design of horn for rotary ultrasonic machining using the finite element method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 39, No. 1-2, pp. 9-20, 200 .٨

[31] M. Rasoul, M. Saeed, h. mohammad, Design, construction and testing of exponential focused ultrasound to measure the characteristics of agricultural products, *Journal of Agricultural Machinery,* 2012. In Persian

[32] S. Amini, H. Soleimanimehr, M .Nategh, A. Abudollah, M. Sadeghi, FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool, *Journal of materials processing technology,* Vol. 201, No. 1, pp. 43-47, 2008 .

[33] A. Lal, R. M. White, Silicon microfabricated horns for power ultrasonics, *Sensors and Actuators A: Physical,* Vol. 54, No. 1, pp. 542-546, 1996 .

[34] J. R. Frederick, Ultrasonic engineering, 1965 .

[35] D. Ensminger, F. B. Stulen, *Ultrasonics: Data, Equations and Their Practical Uses*: CRC Press, 2008 .

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.31.7]