



Invention of a New Ultrasonic Horn in 3D Ultrasonic Vibration Assisted Turning

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sajjady S.A.¹ MSc,
Amini S.^{*1} PhD

How to cite this article

Sajjady S.A, Amini S. Invention of a New Ultrasonic Horn in 3D Ultrasonic Vibration Assisted Turning. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):1845-1854.

ABSTRACT

Since the invention of ultrasonic vibration assisted turning, this process has been widely considered and investigated. The reason for this consideration is the unique features of this process, which include reducing machining forces, reducing wear, and friction, increasing the tool life, creating periodic cutting conditions, increasing the machinability of difficult-to-cut material, increasing the surface quality, creating a hierarchical structure (micro-nano textures) on the surface and so on. Different methods have hitherto been used to apply ultrasonic vibration to the tip of the tool during the turning process. In this research, a unique horn has been designed and constructed to convert linear vibrations of piezoelectrics to three-dimensional vibrations (longitudinal vibrations along the z axis, bending vibrations around the x axis, and bending vibrations around the y axis). The advantage of this ultrasonic machining tool compared with other similar tools is that in most other tools, it is only possible to apply one-dimensional (linear) and two-dimensional (elliptical) vibrations, while this tool can create three-dimensional vibrations. Additionally, since the nature of the designed horn can lead to the creation of three-dimensional vibrations, there is no need for piezoelectric half-rings (which are stimulated by 180 phase difference) to create bending vibrations around the x and y axes. The reduction of costs as well as simplicity of applying three-dimensional vibrations in this new method can play an important role in industrializing the process of three-dimensional ultrasonic vibration assisted turning.

Keywords Ultrasonic Vibration Assisted Turning; Acoustic Horn; 2D Vibration; Modal Analysis; Cutting Forces; 3D Vibration; Surface Topography

CITATION LINKS

[1] Ultrasonically assisted turning of aviation ... [2] Ultrasonically assisted turning of aviation materials ... [3] A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy ... [4] Experimental study on effect of micro textured surfaces ... [5] Experimental studies of wettability control on cylindrical ... [6] An analysis of the surface generation mechanics of the elliptical ... [7] Impact of water drops onto the junction of a hydrophobic ... [8] Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review ... [9] Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under ... [10] Study on friction and wear reducing surface micro ... [11] Friction control by multi-shape textured surface under ... [12] Effects of surface texturing on ring/liner friction under ... [13] Excimer-laser surface treatment of metals for improved ... [14] Fabrication of super-hydrophobic surfaces on aluminum ... [15] Fabrication of durable hydrophobic micropatterns on stainless ... [16] Influence of variable substrate geometry on wettability ... [17] Evaporative heat transfer characteristics of a water spray ... [18] A review of the diversity and evolution of photonic structures in ... [19] Bioinspired holographically featured superhydrophobic and ... [20] Advances in engineered surfaces for functional ... [21] "Structured", "textured" or "engineered ... [22] Ultraprecision diamond turning of stainless steel by applying ... [23] Ultrasonic elliptical vibration ... [24] Ultrasonic elliptical vibration transducer driven by single ... [25] Transducer for high speed and large thrust ultrasonic linear motor ... [26] Development of a new vibrator for elliptical ... [27] An ultrasonic elliptical vibration cutting device for micro V-groove ... [28] A novel single driven ultrasonic elliptical vibration ... [29] Analytical and experimental study of topography of ... [30] Creating micro textured surfaces for the improvement of ... [31] Ultrasonic processes and machines: Dynamics ... [32] Effect of ultrasonic vibration on frictional behavior ... [33] simulation of linear and elliptical ultrasonic vibrations ... [34] Mechanical vibrations ...

¹Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran

*Correspondence

Address: Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran. Postal Code. 8731753153
Phone: +98 (31) 55912497
Fax: -
amini.s@kashanu.ac.ir

Article History

Received: June 27, 2018

Accepted: January 08, 2019

ePublished: August 12, 2019

ابداع یک هورن التراسونیک جدید در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک سه‌بعدی

سیدعلی سجادی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

سعید امینی PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

از زمان ابداع فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، این فرآیند به‌صورت گسترده مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. دلیل این توجه ویژگی‌های منحصر به فرد این فرآیند شامل کاهش نیروهای ماشین‌کاری، کاهش ساییش و اصطکاک، افزایش عمر ابزار، ایجاد شرایط برشی متناوب، افزایش قابلیت ماشین‌کاری مواد سخت‌برش، افزایش کیفیت سطح، ایجاد ساختار سلسله‌مراتبی (میکرونی-نانویی) روی سطوح و غیره است. تاکنون روش‌های مختلفی برای اعمال ارتعاشات التراسونیک به نوک ابزار حین فرآیند تراشکاری به‌کار گرفته شده است. در این پژوهش یک هورن منحصر به فرد به‌منظور تبدیل ارتعاش خطی پیزوالکتریک‌ها به ارتعاش سه‌بعدی (ارتعاش طولی در راستای محور z ، ارتعاش خمشی حول محور x و ارتعاش خمشی حول محور y) طراحی و ساخته شده است. امتیاز این ابزار ماشین‌کاری التراسونیک نسبت به ابزارهای مشابه، آن است که در اکثر ابزارهای دیگر تنها امکان اعمال ارتعاشات یک‌بعدی (خطی) و دوبعدی (بیضوی) وجود دارد؛ در حالی که در این ابزار ارتعاشات سه‌بعدی تولید می‌شود. به علاوه از آنجا که ماهیت منحصر به فرد هورن طراحی‌شده باعث ایجاد ارتعاشات سه‌بعدی می‌شود، دیگر نیازی به نیم‌حلقه‌های پیزوالکتریک (که با اختلاف فاز ۱۸۰° تحریک می‌شوند، برای ایجاد ارتعاشات خمشی حول محورهای x و y نیست. کاهش هزینه‌ها و همچنین سادگی اعمال ارتعاشات سه‌بعدی در این روش جدید می‌تواند نقش مهمی را در جهت صنعتی‌شدن فرآیند تراشکاری به‌کمک ارتعاشات التراسونیک سه‌بعدی ایفا کند.

کلیدواژه‌ها: تراشکاری به‌کمک ارتعاشات التراسونیک، هورن آکوستیک، ارتعاش دوتایی، آنالیز مودال، نیروهای ماشین‌کاری، ارتعاش سه‌بعدی، توپوگرافی سطح

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۸

*نویسنده مسئول: amini.s@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، با پیشرفت صنایعی همچون بیوتکنولوژی، نانو تکنولوژی، سیستم‌های الکترومکانیکی میکرونی (MEMS) و غیره، تولید دقیق و انبوه قطعات مکانیکی سبک، کوچک و با استحکام بالا، به‌صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در ساخت این قطعات، روش‌های ماشین‌کاری سنتی نمی‌توانند پاسخگوی نیازهای صنایع پیشرفته امروز باشند. همچنین روش‌های ماشین‌کاری غیرسنتی (مدرن) مانند EDM، ECM، LBM و غیره، به‌دلیل مصرف بالای انرژی، افزایش هزینه‌ها، ایجاد اعوجاج حرارتی روی سطوح ماشین‌کاری، محدودیت در ماشین‌کاری جنس‌های خاص و غیره، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین دلیل، برای برطرف کردن نیاز تولید چنین قطعاتی، ترکیب روش‌های تولید سنتی و مدرن، مورد توجه قرار گرفت. یکی از این روش‌ها، ترکیب ماشین‌کاری سنتی با ارتعاشات التراسونیک است. فرآیند ماشین‌کاری به کمک ارتعاشات التراسونیک (UVAT)، یک روش ماشین‌کاری برای ایجاد سطوح دقیق است که به‌دلیل مزایایی همچون ایجاد شرایط برشی متناوب، کاهش ضخامت براده موثر، کاهش نیروهای ماشین‌کاری، افزایش عمر ابزار، بهبود کیفیت سطح، افزایش دقت ابعادی، افزایش

قابلیت ماشین‌کاری مواد سخت برش و غیره، کاربردهای فراوانی پیدا کرده است.

بایستی‌سکی و همکاران^[1, 2]، با مقایسه پارامتر زبری سطح، در دو حالت تراشکاری سنتی (CT) و تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک (UVAT)، بهبود ۲۵ تا ۵۰٪ کیفیت سطح را برای فرآیند UVAT، گزارش نمودند.

چاندر^۳ و همکاران^[3]، به بررسی تأثیر فرآیند UVAT، روی نیروهای برشی و شکل براده پرداختند. آنها با استفاده از نتایج تجربی، نشان دادند که نیروهای برشی در فرآیند UVAT، در سه جهت مماسی، محوری و شعاعی، نسبت به فرآیند CT، کمتر است.

فرآیند ماشین‌کاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، به‌دلیل ایجاد حفره‌های میکرونی منظم روی سطوح، موجب بهبود خواص سطوح، از جمله افزایش کیفیت سطح، کاهش اصطکاک و نرخ ساییش، ایجاد خاصیت خودتمییزکنندگی و غیره می‌شود^[4].

لو و همکاران^[5]، از ایجاد حفره‌های میکرونی روی سطوح با استفاده از فرآیند EVC، به‌منظور کنترل آبدوستی سطوح بهره بردند.

در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک بیضوی، پارامترهای ماشین‌کاری، هندسه ابزار و نوع حالت ارتعاشی، از پارامترهای تأثیرگذار روی الگو و شکل حفره‌های میکرونی ایجادشده روی سطوح هستند^[6]. ایجاد بافت‌های میکرونی/نانویی روی سطوح، موجب تغییر خواص مختلف آنها، شامل بهبود رفتار هیدرودینامیکی^[7-9]، رفتار تریبولوژی^[10-12]، رفتار چسبندگی^[13]، رفتار آبدوستی^[14-16]، رفتار انتقال حرارت^[17]، مهندسی نور^[18, 19] و غیره می‌شود. کاربردهای بافت‌های میکرونی سطح در مطالعات دیگری نیز مطالعه شده است^[20, 21].

از زمان ابداع فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، این فرآیند به‌صورت گسترده، مورد توجه و بررسی قرار گرفته و به مرور زمان توسعه پیدا کرده است.

در سال ۱۹۹۱، موریوکی و همکاران^[22]، با اضافه کردن ارتعاشات التراسونیک یک‌بعدی به فرآیند تراشکاری، موفق به دستیابی به مزایایی از قبیل کاهش ساییش در سطح آزاد ابزار، ایجاد سطوح با کیفیت سطح بالا با زبری R_{max} کمتر از ۰/۱ میکرومتر، ایجاد سطح پرداخت آینه‌ای و غیره شدند.

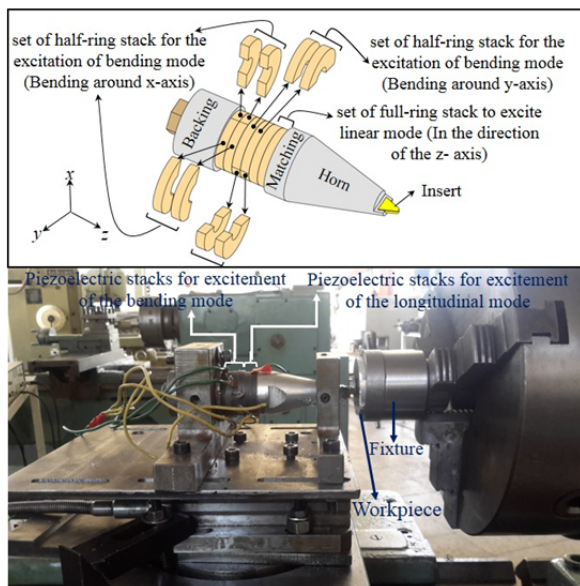
پس از آن موریوکی و شوماتو^[23]، با استفاده از یک ارتعاشگر جدید، به اعمال ارتعاشات بیضوی با دامنه کم و در فرکانس التراسونیک، به ابزار برشی پرداختند و این روش ماشین‌کاری جدید را تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک بیضوی (EVC)، نامیدند. ایده اصلی کار آنها بر مبنای همپوشانی مسیرهای بیضوی بود که منجر به بهبود کارایی فرآیند برش، شامل کاهش نیروهای برش، کاهش ضخامت براده موثر، افزایش عمر ابزار و غیره شد.

لی و همکاران^[24]، با استفاده از یک ترانسیدوسر با ساختار متقارن، ارتعاشات طولی پیزوالکتریک‌ها را به ارتعاشات بیضوی تبدیل و از آن برای انجام فرآیند EVC استفاده نمودند.

کاروسا^{۲۵} و همکاران^[25]، یک ترانسیدوسر ارتعاشات التراسونیک بیضوی جدید را با استفاده از دو ارتعاشگر طولی از نوع ساندویچی، که عمود بر هم هستند، طراحی نمودند و از آن در یک موتور خطی التراسونیک سرعت بالا، استفاده نمودند.

در ادامه، گو و همکاران^[26]، براساس مفهوم کار کاروسا^{۲۵}، یک ارتعاشگر جدید، برای اعمال ارتعاشات التراسونیک بیضوی به ابزار برش ارائه کردند و از آن برای ایجاد حفره‌های بیضوی روی سطوح استفاده نمودند.

حول محور V ، طراحی و ساخته شد. امتیاز این ابزار ماشینکاری التراسونیک نسبت به ابزارهای مشابه، آن است که در اکثر ابزارهای دیگر تنها امکان اعمال ارتعاشات یک بعدی (خطی) و دوبعدی (بیضوی) وجود دارد؛ درحالی که در این ابزار ارتعاشات سه بعدی تولید می شود. به علاوه از آنجایی که ماهیت منحصربه فرد هورن طراحی شده موجب ایجاد ارتعاشات سه بعدی می شود؛ دیگر نیازی به نیم حلقه های پیزوالکتریک (که با اختلاف فاز 180° تحریک می شوند)، برای ایجاد ارتعاشات خمشی حول محورهای X و Y ، نیست. برای درک بیشتر این موضوع، ابتدا ساختمان ابزاری که قبلاً توسط نویسندگان حاضر [29, 30]، طراحی و ساخته شده است؛ توضیح داده می شود (شکل ۲).



شکل ۲) شماتیک فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک سه بعدی [30]

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود؛ در این حالت به منظور اعمال ارتعاشات التراسونیک سه بعدی به ابزار، سه مجموعه از چیدمان پیزوالکتریک ها مورد استفاده قرار می گیرد که شامل دو حلقه کامل پیزوالکتریک برای ایجاد ارتعاش خطی (در راستای محور Z)، چهار نیم حلقه پیزوالکتریک برای ایجاد ارتعاش خمشی (حول محور X) و چهار نیم حلقه پیزوالکتریک برای ایجاد ارتعاش خمشی (حول محور Y)، است. نیم حلقه ها برای ایجاد ارتعاش خمشی با اختلاف فاز 180° درجه تحریک می شوند (تا در هنگام انبساط یک نیم حلقه، نیم حلقه دیگر در حال انقباض باشد و به این ترتیب ارتعاش خمشی ایجاد شود). برای ارتعاش خطی، سیگنال تحریک دارای 90° درجه اختلاف فاز نسبت به حالت خمشی است تا یک مسیر بیضوی در نوک ابزار تولید شود. بنابراین در این حالت نیاز به چند ژنراتور و اعمال ولتاژهای تحریک سینوسی با اختلاف فازهای 90° و 180° درجه است.

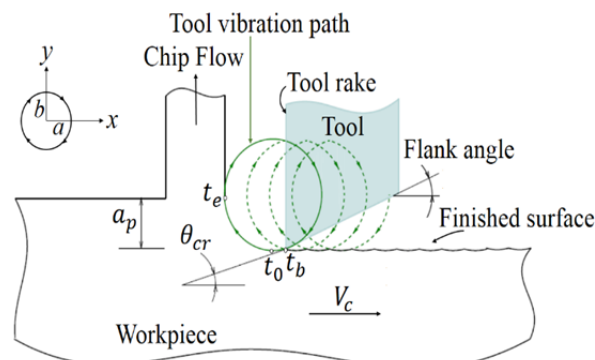
در حالی که در این پژوهش، تنها از حلقه های کامل پیزوالکتریک برای ایجاد ارتعاش خطی، استفاده می شود. سپس این ارتعاش خطی، به وسیله یک هورن با هندسه منحصر به فرد، به ارتعاش سه بعدی (ارتعاش طولی در راستای محور Z ، ارتعاش خمشی حول محور X و ارتعاش خمشی حول محور Y)، تبدیل می شود (شکل ۳). به همین دلیل دیگر نیازی به چندین ژنراتور و اعمال اختلاف فاز در ولتاژ اعمالی نیست. در حقیقت در این حالت، ارتعاش خطی پیزوالکتریک ها، پس از گذر از ناحیه استوانه ای هورن، به زائده های

کیم و همکاران [27]، با استفاده از دو ارتعاشگر طولی موازی از نوع ساندویچی و اعمال اختلاف فاز بین ولتاژهای متناوب (سینوسی) اعمالی به آنها، به ایجاد ارتعاشات التراسونیک بیضوی برای ماشین کاری شیارهای میکرونی V - شکل، پرداختند.

در این پژوهش، یک هورن منحصربه فرد به منظور تبدیل ارتعاش خطی پیزوالکتریک ها به ارتعاش سه بعدی (ارتعاش طولی در راستای محور Z ، ارتعاش خمشی حول محور X و ارتعاش خمشی حول محور Y)، طراحی و ساخته شد. امتیاز این ابزار ماشین کاری التراسونیک نسبت به ابزارهای مشابه، آن است که در اکثر ابزارهای دیگر تنها امکان اعمال ارتعاشات یک بعدی (خطی) [22] و دوبعدی (بیضوی) [23, 28] وجود دارد؛ درحالی که در این ابزار ارتعاشات سه بعدی تولید می شود. به علاوه از آنجایی که ماهیت منحصربه فرد هورن طراحی شده موجب ایجاد ارتعاشات سه بعدی می شود؛ دیگر نیازی به نیم حلقه های پیزوالکتریک (که با اختلاف فاز 180° تحریک می شوند) برای ایجاد ارتعاشات خمشی حول محورهای X و Y نیست.

۲- تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک دوبعدی (بیضوی)

در شکل ۱، ایجاد شرایط برشی متناوب در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک بیضوی (EVC)، نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است؛ فرآیند برش در لحظه t_0 شروع می شود. در ادامه، ابزار در لحظه t_0 به پایین ترین نقطه خود در مسیر بیضوی می رسد و در لحظه t_e تماس پایان می یابد. بنابراین ابزار و قطعه کار در زمان $t_e - t_0$ در هر سیکل برش ارتعاشی با یکدیگر در تماس هستند و در زمان $t_e - t_0$ براده شکل گرفته شده در حین حرکت ابزار در جهت جریان براده، به سمت بالا کشیده می شود. در مدت زمان $T - (t_e - t_0)$ ، ابزار بدون براده برداری به نقطه برشی در هر سیکل ارتعاشی بازگردانده می شود. اعمال حرکت های ارتعاشی با دامنه کم و فرکانس بالا (در محدوده التراسونیک) به ابزار برش، منجر به تغییرات نوسانی ابزار در حین فرآیند ماشین کاری و در نتیجه ایجاد حفره های میکرونی - نانویی روی سطوح می شود. پیاده سازی چنین بافت هایی روی سطوح، موجب ایجاد مزایایی از جمله، افزایش کیفیت سطح، کاهش اصطکاک و سایش، افزایش خاصیت خود تمیزکنندگی، بهبود آبدوستی یا آبگریزی سطح و غیره، می شود [29].

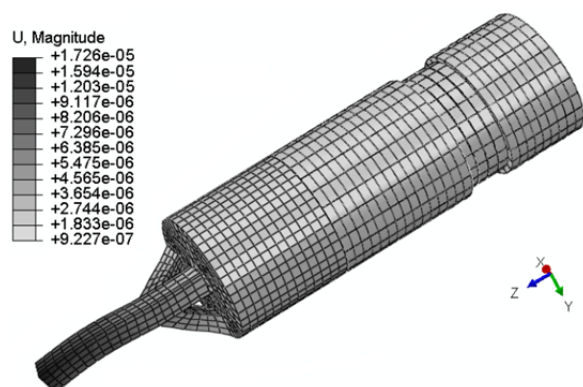


شکل ۱) شماتیک فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک بیضوی [29]

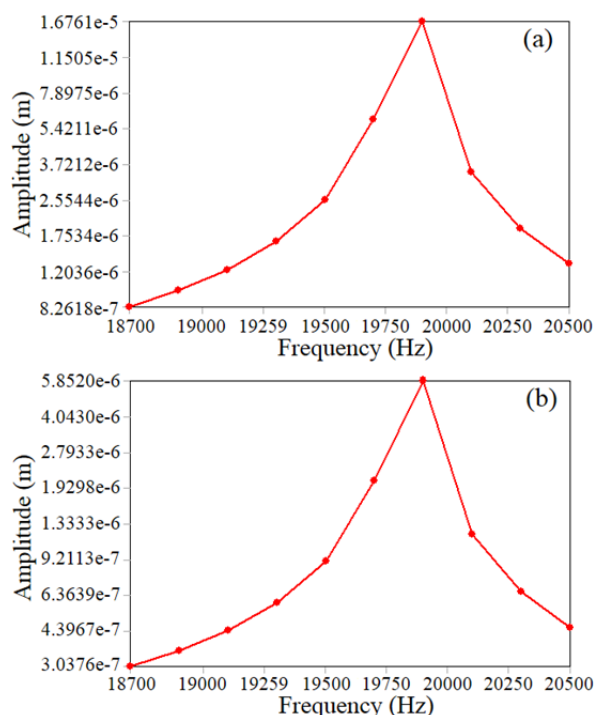
۳- تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک سه بعدی (3D-VT)

در این پژوهش، یک هورن منحصربه فرد به منظور تبدیل ارتعاش خطی پیزوالکتریک ها به ارتعاش سه بعدی (ارتعاش طولی در راستای محور Z ، ارتعاش خمشی حول محور X و ارتعاش خمشی

نقاط گره به منظور گیره‌بندی ابزار، به کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی آباکوس و انسیس، صورت گرفت. در تحلیل المان محدود، از المان‌های مکعبی ۲۰-گره‌ای مرتبه دوم با انتگرال‌گیری کاهشی (C3D20R)، استفاده شد. تحلیل مدل شبیه‌سازی و نتایج تجربی نشان می‌دهند که ابزار در فرکانس ۱۹۸۵۰ هرتز، دارای ارتعاش سه‌بعدی با دامنه طولی ۱۵ میکرومتر و دامنه خمشی ۵ میکرومتر است. در شکل ۴ و نمودار ۱ به ترتیب مدل شبیه‌سازی این ابزار جدید و نمودار دامنه ارتعاشی به‌عنوان تابعی از فرکانس، نشان داده شده است.



شکل ۴) مدل شبیه‌سازی ابزار فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک سه‌بعدی



نمودار ۱) نمودار دامنه ارتعاشی به‌عنوان تابعی از فرکانس (الف) در راستای محور z (ب) در راستای محور x یا y

پس از تحریک هورن در فرکانس ارتعاشی ۱۹۸۵۰ هرتز، با استفاده از سنسور فاصله‌سنج از نوع PU-09 (AEC؛ ژاپن؛ شکل ۵)، اندازه دامنه ارتعاشی در راستای محور z، اندازه‌گیری شد. مقدار دامنه ارتعاشی در راستای محور z، نزدیک به ۱۵ میکرومتر، است که تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد (همان‌طور که در نمودار ۱-الف، نشان داده شده؛ در تحلیل المان محدود، دامنه ارتعاشی در راستای

محور ۱، ۲ و ۳ می‌رسد. زائده ۱، ارتعاش را به‌صورت طولی (در راستای محور Z) به نوک ابزار منتقل می‌کند؛ زائده‌های ۲ و ۳، ارتعاشات خطی پیزوالکتریک‌ها را به‌ترتیب به ارتعاش خمشی حول محور X و Y تبدیل و آنها را به نوک ابزار منتقل می‌کنند. در این حالت، حرکت‌های ارتعاشی در راستای محورهای مختصات، به وسیله روابط (۱ تا ۳)، تعریف می‌شوند:

$$(۱)$$

$$x(t) = a \sin(2\pi ft)$$

$$(۲)$$

$$y(t) = a \sin(2\pi ft)$$

$$(۳)$$

$$z(t) = b \sin(2\pi ft + \Psi)$$

که در آن، a و b، به‌ترتیب دامنه ارتعاشی ابزار در راستای محورهای X (یا Y) و Z و f، فرکانس ارتعاشی ابزار هستند. آزمایش‌ها [31-33]، نشان می‌دهد که اعمال ارتعاشات التراسونیک تنها زمانی منجر به کاهش نیروی ماشین‌کاری می‌شود که سرعت برشی (U)، کوچک‌تر از حداکثر سرعت ارتعاشی در راستای برشی (محور Z) باشد تا سیکل متناوب درگیری و جدایش ابزار اتفاق بیفتد.

$$(۴)$$

$$\dot{z} = b \times 2\pi f \cos(2\pi ft + \Psi)$$

$$(۵)$$

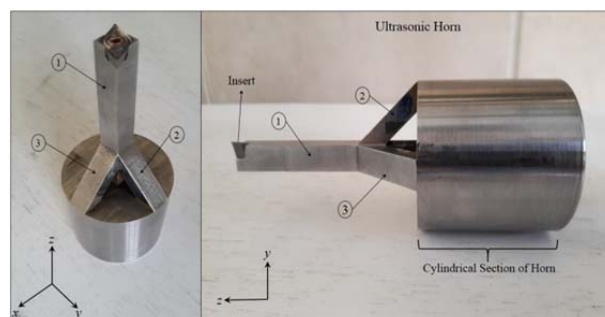
$$\dot{z}_{max} = b \times 2\pi f = b\omega$$

$$(۶)$$

$$v < b \times 2\pi f = b\omega$$

مزیت دیگر ابزار حاضر آن است که از آنجایی که تعبیه دو زائده یکسان در هورن ابداعی، موجب تبدیل ارتعاش خطی پیزوالکتریک‌ها به ارتعاش خمشی حول محورهای X و Y می‌شوند؛ بنابراین این دو ارتعاش خمشی، از لحاظ شدت و دامنه ارتعاشی، یکسان هستند.

هورن مذکور از جنس فولاد ۱/۶۵۸۲ (BOZ)، ساخته شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱، ارائه شده است.



شکل ۳) هورن ابداعی برای تبدیل ارتعاش خطی به ارتعاشات سه‌بعدی

جدول ۱) ترکیب شیمیایی فولاد ۱/۶۵۸۲ (BOZ)

عناصر	درصد ترکیب (%)
نیکل	۱/۵۰
مولیبدن	۰/۲۵
کروم	۱/۵۰
کربن	۰/۳۴

آنالیز ارتعاشی ابزار مذکور (شامل تحلیل مودال و تحلیل هارمونیک)، به‌منظور تعیین فرکانس رزونانس، مدهای ارتعاشی، چگونگی انتشار ارتعاشات التراسونیک در ابزار و همچنین یافتن

درجه آزادی، پاسخ حالت پایدار $x_L(t)$ و $x_N(t)$ برای انتهای R میله مایل قابل محاسبه است.

با انتخاب موج طولی $z_{02}(t)$ (در امتداد جهت میله مستقیم)، به عنوان فاز مرجع و با در نظر گرفتن سرعت انتشار موج عرضی $N(t)$ و موج طولی $L(t)$ در میله مایل، امکان محاسبه اختلاف فاز بین موج طولی $z_{02}(t)$ و موج عرضی $N(t)$ یا موج طولی $L(t)$ وجود دارد. در نهایت پاسخ حالت پایدار مولفه های $x_R(t)$ و $z_R(t)$ در انتهای S ، با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱)، به دست می آیند [34]:

(۱۰)

$$x(t) = G_x \sin(\omega t + \Psi_x)$$

(۱۱)

$$z(t) = G_z \sin(\omega t + \Psi_z)$$

G_x و G_z ، به ترتیب تابع های انتقال دامنه ارتعاشی در دو جهت x و z هستند. به عبارت دیگر، این دو تابع، به ترتیب مقدار دامنه ارتعاشی انتهای S هورن را در دو جهت x و z تعیین می کنند:

(۱۲)

$$G_x = \left\{ \frac{1 + (2\xi_x r_x)^2}{(1 - r_x^2)^2 + (2\xi_x r_x)^2} \times [(G_L \cos \beta \cos(-\theta_L - \varphi_L) - G_N \sin \beta \cos(-\theta_N - \varphi_N))^2 + (G_L \cos \beta \sin(-\theta_L - \varphi_L) - G_N \sin \beta \sin(-\theta_N - \varphi_N))^2] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

(۱۳)

$$G_{z1} = \left\{ \frac{1 + (2\xi_z r_z)^2}{(1 - r_z^2)^2 + (2\xi_z r_z)^2} \times [(G_L \sin \beta \cos(-\theta_L - \varphi_L) + G_O \cos \varphi_O)^2 + (G_L \sin \beta \sin(-\theta_L - \varphi_L) + G_O \cos \varphi_O)^2] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

در اینجا باید ذکر شود که اگر چه در این قسمت به تحلیل هورن در صفحه xz پرداخته می شود (در این صفحه، زائده های ۱ و ۳، قرار دارند (شکل ۳)، اما نباید تاثیر زائده مایل دوم (زائده ۲)، روی تحلیل هورن در این صفحه، نادیده گرفته شود.

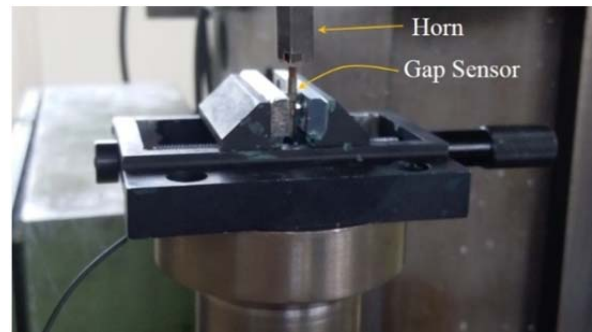
زائده مایل دوم (زائده ۲)، عمود بر صفحه xz است بنابراین تاثیری روی G_x ندارد؛ اما روی G_z تاثیرگذار است (این تاثیر موجب دوبرابر شدن عبارت های $G_L \sin \beta \cos(-\theta_L - \varphi_L)$ و $G_L \sin \beta \sin(-\theta_L - \varphi_L)$ ، در رابطه (۱۳)، می شود). بنابراین با در نظر گرفتن هر سه زائده، به صورت رابطه (۱۴)، نوشته می شود:

(۱۴)

$$G_z = \left\{ \frac{1 + (2\xi_z r_z)^2}{(1 - r_z^2)^2 + (2\xi_z r_z)^2} \times [(2G_L \sin \beta \cos(-\theta_L - \varphi_L) + G_O \cos \varphi_O)^2 + (2G_L \sin \beta \sin(-\theta_L - \varphi_L) + G_O \cos \varphi_O)^2] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

در روابط (۱۲) و (۱۴)، G_L ، G_N و G_O به ترتیب برابر با:

محور z ، ۱۶/۷ میکرومتر است).

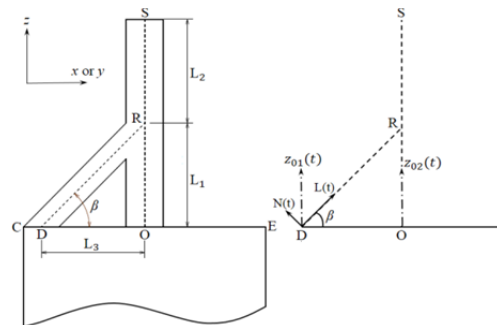


شکل ۵) سنسور فاصله سنج برای اندازه گیری دامنه ارتعاشی

۴- مدل تئوری ارتعاش هورن التراسونیک ابداعی

۴-۱- تحلیل تئوری هورن در صفحه xz

در مدل سازی تئوری هورن، به منظور ساده سازی تحلیل ارتعاشی، دو زائده مایل و زائده مستقیم (که تیرهایی با سطح مقطع مربعی هستند)، به صورت میله هایی با قطر یکسان در نظر گرفته می شود (شکل ۶).



شکل ۶) مدل سازی تئوری هورن ابداعی

ارتعاش اولیه در راستای z ، برای انتهای O (در میله مستقیم) و انتهای D (در میله مایل)، با یکدیگر برابر و به صورت:

(۷)

$$z_0(t) = z_{01}(t) = z_{02}(t) = A \sin(\omega t)$$

است که در آن A ، دامنه ارتعاشی میله ها در انتهای O و D است. ω نیز برابر با:

(۸)

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

که در آن f ، فرکانس زرنانس هورن است.

زاویه بین میله مستقیم و مایل، β است که از رابطه (۹) به دست می آید:

(۹)

$$\beta = \arctan \frac{L_1}{L_3}, \beta \in (0, \frac{\pi}{2})$$

میله مستقیم OS ، شامل دو قسمت OR با موج طولی و قسمت RS با موج ترکیبی (عرضی-طولی)، است. پاسخ حالت پایدار $x_0(t)$ موج طولی $z_{02}(t)$ در انتهای R ، قابل محاسبه است.

ارتعاشات طولی انتهای D میله مایل (در راستای محور z)، به دو مولفه ارتعاش خمشی $N(t)$ و ارتعاش طولی $L(t)$ ، تجزیه می شود. با استفاده از تئوری ارتعاشات برای یک تحریک هارمونیک یک

ارتعاشی بیضوی، در نوک S هورن می‌شود.
روابط (۱۰) و (۱۱)، بیانگر معادله یک بیضی مایل در صفحه xz هستند (نمودار ۳):
(۲۴)

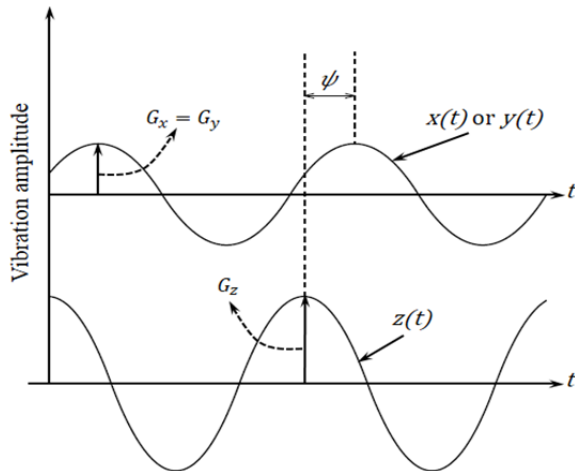
$$F_{x,z}(t) = G_x \sin(\omega t + \Psi_x) \vec{i} + G_z \sin(\omega t + \Psi_z) \vec{k}$$

برای به‌دست‌آوردن شعاع‌های کوچک و بزرگ بیضی، ابتدا رابطه (۲۴)، به‌صورت رابطه (۲۵)، باز نویسی می‌شود:

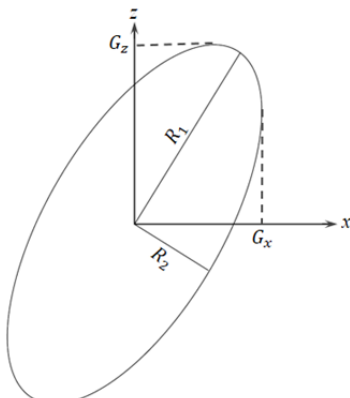
$$F_{x,z}(t) = \left[\underbrace{(G_x \sin \Psi_x)}_{a_1} \cos \omega t + \underbrace{(G_x \cos \Psi_x)}_{a_2} \sin \omega t \right] \vec{i} + \left[\underbrace{(G_z \sin \Psi_z)}_{a_3} \cos \omega t + \underbrace{(G_z \cos \Psi_z)}_{a_4} \sin \omega t \right] \vec{k} \quad (۲۵)$$

در این حالت، رابطه (۲۶) مجذور فاصله نقاط روی بیضی از مرکز آن را نشان می‌دهد:

$$R^2(t) = x^2(t) + z^2(t) = (a_1^2 + a_3^2) \cos^2(\omega t) + (a_2^2 + a_4^2) \sin^2(\omega t) + 2(a_1 a_2 + a_3 a_4) \cos \omega t \sin \omega t \quad (۲۶)$$



نمودار ۲) نمودار دامنه ارتعاشی به‌عنوان تابعی از زمان در سه جهت x ، y و z



نمودار ۳) حرکت ارتعاشی بیضوی نوک S هورن در صفحه xz

$$G_L = \left(\frac{1 + (2\xi_L r_L)^2}{(1 - r_L^2)^2 + (2\xi_L r_L)^2} \right)^2 \times A_L, \quad A_L = A \sin \beta \quad (۱۶)$$

$$G_N = \left(\frac{1 + (2\xi_N r_N)^2}{(1 - r_N^2)^2 + (2\xi_N r_N)^2} \right)^2 \times A_N, \quad A_N = A \cos \beta \quad (۱۷)$$

$$G_O = \left(\frac{1 + (2\xi_O r_O)^2}{(1 - r_O^2)^2 + (2\xi_O r_O)^2} \right)^2 \times A_O, \quad A_O = A$$

هستند. زاویه‌های Ψ_x و Ψ_z نیز با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹)، به دست می‌آیند:

(۱۸)

$$\Psi_x = \text{Arctan} \frac{G_L \cos \beta \sin(-\theta_L - \varphi_L) - G_N \sin \beta \sin(-\theta_N - \varphi_N)}{G_L \cos \beta \cos(-\theta_L - \varphi_L) - G_N \sin \beta \cos(-\theta_N - \varphi_N)} - \theta_x - \varphi_x$$

(۱۹)

$$\Psi_z = \text{Arctan} \frac{2G_L \sin \beta \sin(-\theta_L - \varphi_L) + G_O \sin \varphi_O}{2G_L \sin \beta \cos(-\theta_L - \varphi_L) + G_O \cos \varphi_O} - \varphi_z$$

بنابراین اختلاف فاز در جهت‌های ارتعاشی x و z ، برابر است با:

(۲۰)

$$\Psi = \Psi_z - \Psi_x$$

۲-۴- تحلیل تئوری هورن در صفحه yz

از آنجایی که مدل هندسی هورن در صفحه yz ، با مدل هندسی هورن در صفحه xz ، کاملاً یکسان است (شکل ۶)؛ بنابراین تحلیل تئوری هورن در صفحه yz و صفحه xz ، کاملاً با یکدیگر مشابه هستند. بنابراین در در صفحه yz ، پاسخ حالت پایدار مولفه‌های $y_R(t)$ و $z_R(t)$ در انتهای S ، با استفاده از روابط (۲۱) و (۲۲)، به دست می‌آیند:

(۲۱)

$$y(t) = G_y \sin(\omega t + \Psi_y)$$

(۲۲)

$$z(t) = G_z \sin(\omega t + \Psi_z)$$

که در آن $G_y = G_x$ و $\Psi_y = \Psi_x$ است. در این حالت، اختلاف فاز در جهت‌های ارتعاشی y و z ، برابر است با:

(۲۳)

$$\Psi = \Psi_z - \Psi_y$$

۳-۴- تحلیل تئوری هورن در فضای سه‌بعدی

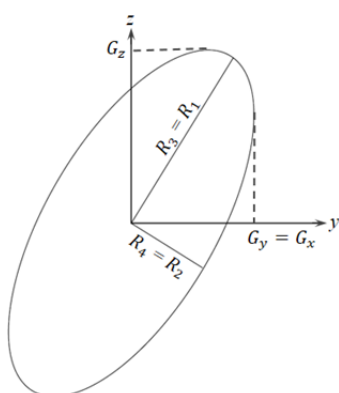
معادله ارتعاشی هورن در فضای سه‌بعدی، از برآیند تحلیل تئوری هورن در صفحات xz و yz ، حاصل می‌شود. در نمودار ۲، براساس روابط (۱۰)، (۲۱) و (۲۲)، نمودار دامنه ارتعاشی در سه جهت x ، y و z ، به‌عنوان تابعی از زمان، ترسیم شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد؛ معادلات ارتعاشی هورن در در جهت‌های x و y ، هم‌فاز و هم‌دامنه هستند و با معادله ارتعاشی در جهت z ، به اندازه Ψ ، اختلاف فاز دارند. این اختلاف فاز موجب ایجاد یک حرکت

یا:

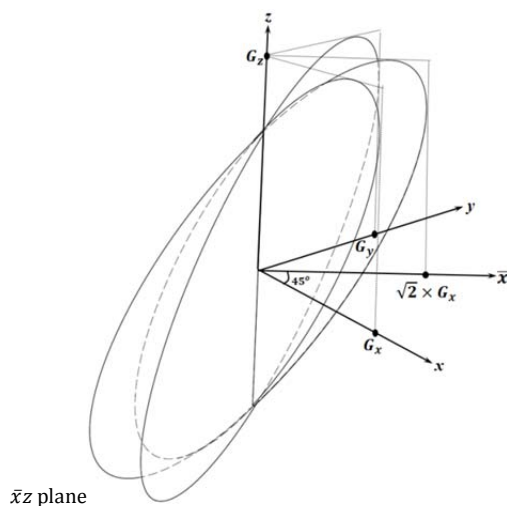
(۳۴)

$$F_{\bar{x},z}(t) = \left[\frac{(\sqrt{2}G_x \sin \Psi_x)}{a_1} \cos \omega t + \frac{(\sqrt{2}G_x \cos \Psi_x)}{a_2} \sin \omega t \right] \vec{i} + \left[\frac{(G_z \sin \Psi_z)}{a_3} \cos \omega t + \frac{(G_z \cos \Psi_z)}{a_4} \sin \omega t \right] \vec{k}$$

به این ترتیب، با استفاده از روابط (۲۷ تا ۲۹)، می توان شعاع های این بیضی مایل در صفحه $\bar{x}z$ را محاسبه نمود.



نمودار ۴) حرکت ارتعاشی بیضوی نوک S هورن در صفحه yz



نمودار ۵) حرکت ارتعاشی بیضوی نوک S هورن در صفحه $\bar{x}z$

۵- نتایج و بحث

پس از ساخت هورن مذکور، آن را به یک هد التراسونیک (شامل حلقه های پیزوالکتریک، قطعه پشتیبان و قطعه تطبیق دهنده)، متصل کرده و از آن به منظور روتراشی یک قطعه آلومینیومی (Al-7075-T6) به قطر ۴۰ میلی متر، تحت شرایط ماشین کاری با عمق برش ۰/۵ میلی متر، سرعت دورانی ۲۵۵۵rpm و نرخ پیشروی ۴mm/rev، استفاده شد. در شکل ۷، تنظیمات دستگاه نشان

با استفاده از روابط $\cos 2\theta = 2\cos^2 \theta - 1 = 1 - 2\sin^2 \theta$ و $\sin 2\theta = 2\sin \theta \cos \theta$ ، رابطه (۲۶)، به صورت رابطه (۲۷)، بازنویسی می شود:

(۲۷)

$$R^2(t) = \frac{1}{2} [a_1^2 + a_3^2 + a_2^2 + a_4^2 + ((a_1^2 + a_3^2) - (a_2^2 + a_4^2)) \cos 2\omega t + 2(a_1 a_2 + a_3 a_4) \sin 2\omega t]$$

با مساوی صفر قراردادن مشتق رابطه (۲۷)، نقاط اکسترمم بیضی، به دست می آید:

(۲۸)

$$\frac{d}{dt} (R^2(t)) = [a_1^2 + a_3^2 - (a_2^2 + a_4^2) \sin 2\omega t + 2(a_1 a_2 + a_3 a_4) \cos 2\omega t]$$

(۲۹)

$$t_i = \frac{1}{2\omega} \left[\frac{-2(a_1 a_2 + a_3 a_4)}{(a_1^2 + a_3^2) - (a_2^2 + a_4^2)} \right] + \frac{N\pi}{2}, N=0,1,2,3$$

به این ترتیب با قراردادن t_1 و t_2 ، در جذر رابطه (۲۷)، شعاع های این بیضی مایل (R_1 و R_2)، قابل محاسبه است. روابط (۲۱) و (۲۲)، نیز بیانگر معادله یک بیضی مایل در صفحه yz، هستند (نمودار ۴):

(۳۰)

$$F_{y,z}(t) = G_y \sin(\omega t + \Psi_y) \vec{j} + G_z \sin(\omega t + \Psi_z) \vec{k}$$

یا:

(۳۱)

$$F_{y,z}(t) = \left[\frac{(G_y \sin \Psi_y)}{a_1} \cos \omega t + \frac{(G_y \cos \Psi_y)}{a_2} \sin \omega t \right] \vec{j} + \left[\frac{(G_z \sin \Psi_z)}{a_3} \cos \omega t + \frac{(G_z \cos \Psi_z)}{a_4} \sin \omega t \right] \vec{k}$$

از آنجایی که $G_y = G_x$ و $\Psi_y = \Psi_x$ ، است بنابراین دو بیضی ایجاد شده در صفحه های xz و yz، با یکدیگر یکسان هستند. حرکت ارتعاشی بیضوی نوک هورن در فضای سه بعدی، از برآیند حرکت های ارتعاشی بیضوی در صفحه های xz و yz، حاصل می شود (نمودار ۵). برآیند دو بیضی مایل یکسان در دو صفحه xz و yz، یک بیضی مایل در صفحه $\bar{x}z$ ، ایجاد می کند (صفحه $\bar{x}z$ با صفحه xz زاویه ۴۵ درجه می سازد).

همان طور که قبلاً اشاره شد، G_x برابر با G_y است. بنابراین برآیند G_y و G_x در راستای محور $\bar{x}$ ، برابر است با:

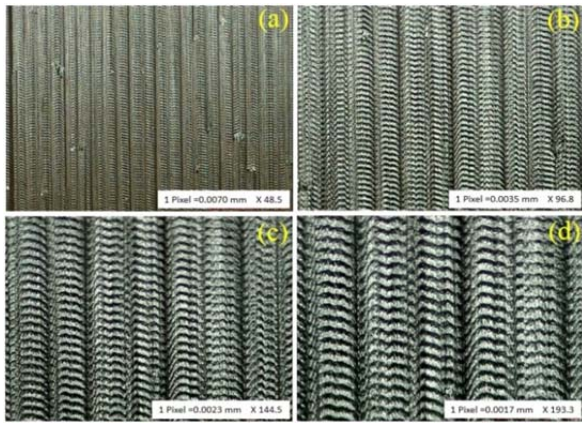
(۳۲)

$$G_{\bar{x}} = G_x \vec{i} + G_y \vec{j} = G_x (\vec{i} + \vec{j}) = \sqrt{2} G_x \vec{i}$$

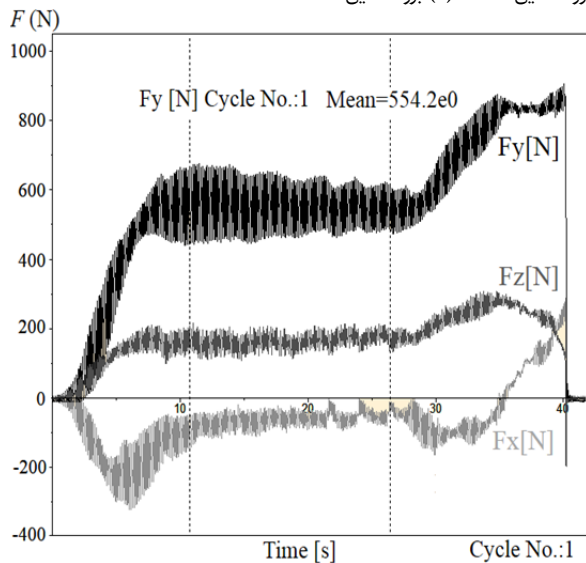
بنابراین حرکت ارتعاشی بیضوی نوک هورن در فضای سه بعدی، طبق رابطه (۳۳)، صورت می پذیرد:

(۳۳)

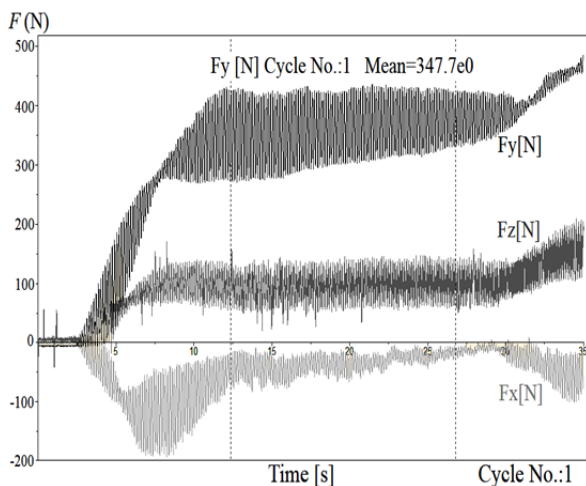
$$F_{\bar{x},z}(t) = \sqrt{2} G_x \sin(\omega t + \Psi_x) \vec{i} + G_z \sin(\omega t + \Psi_z) \vec{k}$$



شکل ۸) بافت میکرونی سطح حاصل از فرآیند ماشینکاری به کمک ابزار التراسونیک ابداعی، (الف) بزرگنمایی ۴۸/۵، (ب) بزرگنمایی ۹۶/۸، (ج) بزرگنمایی ۱۴۴/۵، (د) بزرگنمایی ۱۹۳/۳



نمودار ۱) نیروهای برش در حالت تراشکاری ساده



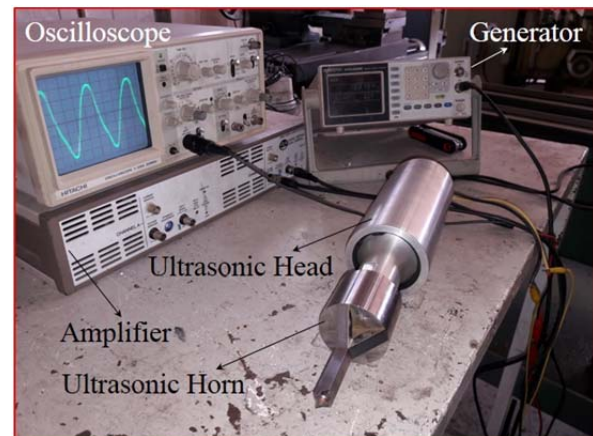
نمودار ۷) نیروهای برش در حالت تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک سه بعدی (به کمک هورن ابداعی)

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش، یک هورن منحصربه فرد به منظور تبدیل ارتعاش خطی پیزوالکتریک ها به ارتعاش سه بعدی (ارتعاش طولی در راستای محور Z ، ارتعاش خمشی حول محور X و ارتعاش خمشی حول محور Y)، طراحی و ساخته شد. این هورن با موفقیت برای

داده شده است. ژنراتور با توان یک کیلووات، ولتاژ سینوسی با فرکانس ۱۹۸۵۰ هرتز و دامنه ۱۰ ولت تولید می کند. این ولتاژ توسط یک تقویت کننده (با قابلیت تقویت دامنه تا ۵۰۰ برابر)، تقویت می شود و از خروجی تقویت کننده، برای تحریک پیزوالکتریک ها استفاده می شود. ارتعاش خطی پیزوالکتریک ها، به وسیله یک هورن با هندسه خاص (هورن ابداعی)، به ارتعاش سه بعدی (ارتعاش طولی در راستای محور Z ، ارتعاش خمشی حول محور X و ارتعاش خمشی حول محور Y)، تبدیل می شود.

در ادامه، پس از انجام فرآیند ماشینکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک سه بعدی، با استفاده از یک دستگاه (VMM)، از سطح ماشینکاری شده قطعه کار، تصویربرداری شد. شکل ۸، ساختار سلسله مراتبی و حفره های میکرونی ناشی از ماشینکاری این قطعه آلومینیومی را با استفاده از ابزار مذکور، نشان می دهد. در نهایت، به منظور مقایسه نیروهای ماشینکاری در حالت تراشکاری ساده و تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک (با هورن ابداعی)، عملیات ماشینکاری روی یک قطعه تیتانیومی (Ti-6Al-4V) به قطر ۲۰ میلی متر (تحت شرایط ماشینکاری با عمق برش ۰/۵ میلی متر، سرعت دورانی ۳۵۵ rpm و نرخ پیشروی ۰/۸ mm/rev، صورت گرفت و نیروهای ماشینکاری توسط دینامومتر ثبت شد. در نمودارهای ۶ و ۷، به ترتیب نیروهای برشی در حالت تراشکاری سنتی و تراشکاری به کمک هورن ابداعی، نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود؛ در حالت تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، نیروی اصلی برش (F_y)، نزدیک به ۴۰٪ کاهش یافته است.



شکل ۷) ابزار UVT و تنظیمات اولیه آزمایش

$$r_L (= \frac{f}{f_L})$$

نسبت بین فرکانس ارتعاشی و فرکانس طبیعی طولی در میله

$$\theta_L$$

زاویه شیفیت فاز سرعت بین موج طولی در میله DR و موج طولی در میله OR

$$\varphi_N$$

زاویه تاخیر فاز موج عرضی در میله DR

$$\xi_x$$

نسبت ضریب دمپینگ میله RS در ارتعاش عرضی

$$r_z (= \frac{f}{f_z})$$

نسبت بین فرکانس ارتعاشی و فرکانس طبیعی طولی در میله

منابع

- 1- Babitsky VI, Kalashnikov AN, Meadows A, Wijesundara AAHP. Ultrasonically assisted turning of aviation materials. Journal of Materials Processing Technology. 2003;132(1-3):157-167.
- 2- Babitsky VI, Mitrofanov AV, Silberschmidt VV. Ultrasonically assisted turning of aviation materials: Simulations and experimental study. Ultrasonics. 2004;42(1-9):81-86.
- 3- Nath C, Rahman M, Andrew SSK. A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel. Journal of Materials Processing Technology. 2007;192-193:159-165.
- 4- Amini S, Nouri Hosseinabadi H, Sajjadi SA. Experimental study on effect of micro textured surfaces generated by ultrasonic vibration assisted face turning on friction and wear performance. Applied Surface Science. 2016;390:633-648.
- 5- Lu Y, Guo P, Pei P, Ehmann KF. Experimental studies of wettability control on cylindrical surfaces by elliptical vibration texturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015;76(9-12):1807-1817.
- 6- Guo P, Ehmann KF. An analysis of the surface generation mechanics of the elliptical vibration texturing process. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013;64:85-95.
- 7- Vaikuntanathan V, Kannan R, Sivakumar D. Impact of water drops onto the junction of a hydrophobic texture and a hydrophilic smooth surface. Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects. 2010;369(1-3):65-74.
- 8- Gropper D, Wang L, Harvey TJ. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings. Tribology International. 2016;94:509-529.
- 9- Costa HL, Hutchings IM. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. Tribology International. 2007;40(8):1227-1238.
- 10- Janssen A, Pinedo B, Igartua A, Liiskmann G, Sexton L. Study on friction and wear reducing surface micro-structures for a positive displacement pump handling highly abrasive shale oil. Tribology International. 2017;107:1-9.
- 11- Segu DZ, Hwang P. Friction control by multi-shape textured surface under pin-on-disc test. Tribology International. 2015;91:111-117.
- 12- Gu C, Meng X, Xie Y, Yang Y. Effects of surface texturing on ring/liner friction under starved lubrication. Tribology International. 2016;94:591-605.
- 13- Henari F, Blau W. Excimer-laser surface treatment of metals for improved adhesion. Applied Optics. 1995;34(3):581-584.
- 14- Fu X, He X. Fabrication of super-hydrophobic surfaces on aluminum alloy substrates. Applied Surface Science. 2008;255(5 Pt 1):1776-1781.

انجام ماشینکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک سه بعدی، به کار گرفته شد.

(۱) امتیاز این ابزار ماشینکاری التراسونیک نسبت به ابزارهای مشابه، آن است که در اکثر ابزارهای دیگر تنها امکان اعمال ارتعاشات یک بعدی (خطی) و دوبعدی (بیضوی) وجود دارد؛ درحالی که در این ابزار ارتعاشات سه بعدی تولید می شود.

(۲) ویژگی دیگر این ابزار التراسونیک نسبت به سایر ابزارهای ماشینکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، سادگی اعمال ارتعاشات سه بعدی به ابزار و کاهش هزینه ها است. در این ابزار، از آنجایی که ارتعاش خطی حلقه های کامل پیزوالکتریک از طریق یک هورن با زائده های منحصر به فرد، به ارتعاشات سه بعدی (ارتعاش طولی در راستای محور Z ، ارتعاش خمشی حول محور X و ارتعاش خمشی حول محور Y) تبدیل می شود؛ به همین دلیل دیگر نیازی به استفاده از نیم حلقه های پیزوالکتریک و در نتیجه استفاده از چندین ژنراتور و اعمال اختلاف فاز در ولتاژ اعمالی نیست.

(۳) مزیت دیگر ابزار حاضر آن است که از آنجایی که تعبیه دو زائده یکسان در هورن ابداعی، موجب تبدیل ارتعاش خطی پیزوالکتریک ها به ارتعاش خمشی حول محورهای X و Y می شوند؛ بنابراین این دو ارتعاش خمشی، از لحاظ شدت و دامنه ارتعاشی، یکسان هستند.

(۴) نتایج تجربی حاصل از ماشینکاری تیتانیوم (Ti-6Al-4V) با این ابزار جدید، کاهش ۴۰٪ نیروی اصلی برش (F_y) را نسبت به ماشینکاری سنتی نشان می دهد.

(۵) کاهش هزینه ها و همچنین سادگی اعمال ارتعاشات سه بعدی در این روش، می تواند نقش مهمی را در جهت صنعتی شدن فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک سه بعدی، ایفا کند.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: سیدعلی سجادی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ سعید امینی (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

۷- پی نوشت

نمادها	توضیح
φ_0	زاویه تاخیر فاز موج طولی در میله OR
φ_L	زاویه تاخیر فاز موج طولی در میله DR
ξ_N	نسبت ضریب دمپینگ میله DR در ارتعاش عرضی
$r_x (= \frac{f}{f_L})$	نسبت بین فرکانس ارتعاشی و فرکانس طبیعی عرضی در میله
θ_x	زاویه شیفیت فاز سرعت موج عرضی به موج طولی در میله RS
φ_z	زاویه تاخیر فاز موج طولی در میله RS
ξ_0	نسبت ضریب دمپینگ میله OR در ارتعاش طولی
ξ_L	نسبت ضریب دمپینگ میله DR در ارتعاش طولی
$r_n (= \frac{f}{f_L})$	نسبت بین فرکانس ارتعاشی و فرکانس طبیعی عرضی در میله
θ_N	زاویه شیفیت فاز سرعت بین موج عرضی در میله DR و موج طولی در میله OR
φ_x	زاویه تاخیر فاز موج عرضی در میله RS
ξ_z	نسبت ضریب دمپینگ میله RS در ارتعاش طولی
$r_o (= \frac{f}{f_0})$	نسبت بین فرکانس ارتعاشی و فرکانس طبیعی طولی در میله
OR	

Ferroelectrics and Frequency Control. 1998;45(5):1188-1195.

26- Guo P, Ehmann KF. Development of a new vibrator for elliptical vibration texturing. ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference, June 13-17, 2011, Corvallis, Oregon, USA. New York: ASME; 2011. p. 373-380.

27- Kim GD, Loh BG. An ultrasonic elliptical vibration cutting device for micro V-groove machining: Kinematical analysis and micro V-groove machining characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;190(1-3):181-188.

28- Yin Z, Fu Y, Xu J, Li H, Cao Z, Chen Y. A novel single driven ultrasonic elliptical vibration cutting device. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;90(9-12):3289-3300.

29- Sajjadi SA, Nouri Hosseinabadi H, Amini S, Nosouhi R. Analytical and experimental study of topography of surface texture in ultrasonic vibration assisted turning. *Materials & Design*. 2016;93:311-323.

30- Nouri Hosseinabadi H, Sajjadi SA, Amini S. Creating micro textured surfaces for the improvement of surface wettability through ultrasonic vibration assisted turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96(5-8):2825-2839.

31- Astashev VK, Babitsky VI. Ultrasonic processes and machines: Dynamics, control and applications. Berlin/Heidelberg: Springer Science & Business Media; 2007.

32- Lotfi M, Amini S. Effect of ultrasonic vibration on frictional behavior of tool-chip interface: Finite element analysis and experimental study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*. 2018;232(7):1212-1220.

33- Lotfi M, Amini S. FE simulation of linear and elliptical ultrasonic vibrations in turning of Inconel 718. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering*. 2018;232(4):438-448.

34- Rao SS. Mechanical vibrations. 4th Edition. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall; 2004.

15- Kim J, Sim SO, Park HW. Fabrication of durable hydrophobic micropatterns on stainless steel using a hybrid irradiation process. *Surface and Coatings Technology*. 2016;302:535-542.

16- Cortese B, Riehle MO, D'Amone S, Gigli G. Influence of variable substrate geometry on wettability and cellular responses. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2013;394:582-589.

17- Hsieh CC, Yao SC. Evaporative heat transfer characteristics of a water spray on micro-structured silicon surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006;49(5-6):962-974.

18- Ingram AL, Parker AR. A review of the diversity and evolution of photonic structures in butterflies, incorporating the work of John Huxley (The Natural History Museum, London from 1961 to 1990). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B Biological Sciences*. 2008;363(1502):2465-2480.

19- Park SG, Moon JH, Lee SK, Shim J, Yang SM. Bioinspired holographically featured superhydrophobic and supersticky nanostructured materials. *Langmuir*. 2010;26(3):1468-1472.

20- Bruzzone AAG, Costa HL, Lonardo PM, Lucca DA. Advances in engineered surfaces for functional performance. *CIRP Annals*. 2008;57(2):750-769.

21- Evans CJ, Bryan JB. "Structured", "textured" or "engineered" surfaces. *CIRP Annals*. 1999;48(2):541-556.

22- Moriwaki T, Shamoto E. Ultraprecision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration. *CIRP Annals*. 1991;40(1):559-562.

23- Moriwaki T, Shamoto E. Ultrasonic elliptical vibration cutting. *CIRP Annals*. 1995;44(1):31-34.

24- Li X, Zhang D. Ultrasonic elliptical vibration transducer driven by single actuator and its application in precision cutting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;180(1-3):91-95.

25- Kuribayashi Kurosawa M, Kodaira O, Tsuchitoi Y, Higuchi T. Transducer for high speed and large thrust ultrasonic linear motor using two sandwich-type vibrators. *IEEE Transactions on Ultrasonics*