



بررسی نرخ براده برداری و کیفیت سطح قطعه کار از جنس شیشه‌ی کریستالی فوق شفاف در فرآیند ماشین کاری آلتراسونیک

امین‌اله محمدی^{۱*}، حمیدرضا عباسی مobarakeh^۲، محمد خداکرمی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: amin1@iut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۲ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۲ آبان ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

ماشین کاری آلتراسونیک

طراحی تقویت کننده‌های پله‌ای

پارامترهای بهینه‌ی ماشین کاری

در سال‌های اخیر کاربرد نوسانات حاصل از امواج آلتراسونیک در صنایع مختلف به شدت رو به افزایش می‌باشد. از این رو با توجه به نوع کاربرد این امواج در حوزه‌های مختلف صنعتی، تحقیقات گسترده‌ای آغاز گشته تا بتواند در راستای بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر روش‌های مبتنی بر استفاده از این امواج، کمک‌کننده و راه‌گشا باشد. از جمله کاربردهای خاص امواج آلتراسونیک، استفاده از آن در ماشین کاری می‌باشد. ماشین کاری آلتراسونیک یک فرآیند براده برداری مکانیکی می‌باشد که برای ایجاد سوراخ و حفره‌های مختلف بر روی مواد ترد و شکننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش با طراحی آزمایش، عملیات سوراخ کاری بر روی قطعه کار شیشه‌ای از نوع کریستالی فوق شفاف انجام شده است تا ضمن اطمینان از کارکرد عملی دستگاه، بتوان نتایج حاصل را بررسی نمود و پارامترهای بهینه‌ی ماشین کاری را بدست آورد. نتایج آزمایش در شرایط مختلف نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس، بار استاتیکی و توان ماشین کاری، نرخ براده برداری افزایش یافته و با انتخاب فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به همراه بار استاتیکی ۱۰۸۰ گرم و توان ۱۳۰ وات می‌توان به بیشترین نرخ براده برداری دست یافت در حالی که سوراخ‌های ایجاد شده از کیفیت مناسبی از لحاظ تلرانس گردی برخوردار می‌باشند.

Investigation of material removal rate and surface quality of super clear crystal glass workpiece in the ultrasonic machining process

Aminollah Mohammadi^{1*}, Hamidreza Abbasi Mobarakeh², Mohammad Khodakarami²

1- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- BSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* Corresponding Author's Email: amin1@cc.iut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 14 October 2023

Accepted: 3 November 2023

Keywords:

Ultrasonic Machining
Design of Step Amplifiers
Optimal Machining Parameters

Abstract

In recent years, the oscillations use of ultrasonic waves has been strongly increased in various industries. Therefore, respecting to the application type of these waves in different industrial fields, extensive and wide researches have been started which can be helpful and competent in optimizing the effective parameters in methods based on the ultrasonic waves application. One of the special uses of them is in machining. The ultrasonic machining is a mechanical material removal which is applied for creating various holes and cavities on the brittle and fragile materials. In this study, in order to ensure the practical behavior of the machine, be able to investigate the resulted findings and also obtain the optimized machining parameters, the drilling operation was performed on the glass workpiece of super clear crystal type by designing the experiment. The results in different conditions show that the material removal has been increased by increasing the frequency, the static load and the machining power. The highest material removal has been achieved by choosing a frequency of 40 kilohertz, static load of 1080 grams and power of 130 watts. Also, the created holes have a desirable quality of roundness tolerance.

Please cite this article using:

Mohammadi A, Abbasi Mobarakeh H, Khodakarami M. Investigation of material removal rate and surface quality of super clear crystal glass workpiece in the ultrasonic machining process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 March 21;10(1):1-10. doi: 10.22034/IJME.2023.420276.1857 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

استفاده از آلتراسونیک برای فرایندهای ماشین‌کاری مواد سخت و شکننده از اوایل دهه ۱۹۵۰ شناخته شده است. ماشین‌کاری آلتراسونیک^۱، حذف مواد با عمل سایش، به کمک ذره‌های ساینده در دوغاب در حال گردش بین قطعه‌ی کار و ابزار می‌باشد که ابزار عمود بر سطح قطعه‌ی کار در فرکانسی بالاتر از محدوده‌ی شنیداری، ارتعاش می‌کند. این فرایند با اکثر عملیات‌های ماشین‌کاری متفاوت است زیرا گرمای بسیار کمی تولید می‌کند و ابزار با قطعه‌ی کار تماس ندارد. این امر باعث می‌شود این عملیات برای ماشین‌کاری مواد بسیار سخت و شکننده مانند شیشه، یاقوت کبود، یاقوت سرخ، الماس و سرامیک مناسب باشد. ماشین‌کاری آلتراسونیک یک عملیات اقتصادی مقرون به صرفه است که در آن سوراخ و حفره‌های مختلف بر روی مواد سخت و شکننده ماشین‌کاری می‌شود. در این فرایند قطعه‌ی کار می‌تواند رسانا یا نارسانا باشد. ابزار با دامنه‌ی کم بین ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر در فرکانس‌های بالا (۱۰ تا ۴۰ کیلوهرتز) نوسان می‌کند. در حین نوسان ابزار، دوغاب ساینده به طور مداوم به فضای بین ابزار نوسانی و قطعه‌کار ثابت، وارد می‌شود. ذره‌های ساینده توسط ابزار به سطح قطعه‌ی کار برخورد می‌کنند و در نهایت باعث براده‌برداری از آن می‌شوند. علاوه بر این، به ابزار نیروی استاتیکی از یک نیوتن تا چند کیلوگرم وارد می‌شود و این نیروی استاتیکی، برای حفظ پیشروی ابزار در حین ماشین‌کاری ضروری می‌باشد. نوک ابزار معمولاً از یک ماده‌ی نسبتاً نرم ساخته می‌شود. ذره‌های ساینده باعث سایش ابزار و کاهش دقت ابعادی سوراخ‌ها و حفره‌های ماشین‌کاری شده می‌شود. باتوجه به اینکه نوسان‌های ابزار به صورت محوری می‌باشد، فرایند ماشین‌کاری آلتراسونیک محدود به تولید حفره‌های دایره‌ای نمی‌شود. ابزار می‌تواند به اشکال مورد نیاز ساخته شود و اشکال پیچیده‌ای را در مواد سخت، ماشین‌کاری کند [۱].

گواسانی و همکاران [۲] به بررسی الگوریتم‌های بهینه‌سازی و اثربخشی آن‌ها بر عملکرد فرایند ماشین‌کاری آلتراسونیک پرداختند. در این پژوهش نتایج بهینه‌سازی برای شرایط مختلف مقایسه شده و تغییرات نرخ براده‌برداری و زبری سطح در اثر پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری آلتراسونیک تحلیل شده است. آن‌ها الگوی مناسب بهینه‌سازی را یافته و دریافتند که نرخ براده‌برداری بیشینه با مقادیر دامنه‌ی کمتر ارتعاشات و نیروی استاتیکی کمتر بدست می‌آید، در حالی که با افزایش فرکانس ارتعاشات، قطر میانگین دانه‌های ساینده و غلظت حجمی ذرات ساینده در محلول، می‌تواند افزایش یابد. بوساله و همکاران [۳] با طراحی آزمایش، قطعات کامپوزیتی سرامیکی آلومینا-زیرکونیا را با روش ماشین‌کاری آلتراسونیک ماشین‌کاری نموده و سپس نرخ براده‌برداری و زبری سطح را اندازه‌گیری نمودند. آن‌ها دریافتند که دامنه‌ی ارتعاشات، تاثیر قابل توجهی بر نرخ براده‌برداری و زبری سطح دارد. همچنین آن‌ها دریافتند که نوع محلول مصرفی نیز بر روی نرخ براده‌برداری تأثیر داشته و استفاده از ذرات ساینده‌ی خالص کاربید سیلیسیم^۲ نسبت به ذرات ساینده‌ی مخلوط نتایج بهتری در صافی سطح ایجاد می‌کند. کاتاریا و همکاران [۴] به بررسی نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار در ماشین‌کاری آلتراسونیک مواد کامپوزیتی پرداختند. آن‌ها دریافتند میزان کبالت موجود در قطعه‌ی کار، اندازه‌ی دانه‌های ساینده و توان استفاده شده، تاثیر چشم‌گیری بر نرخ براده‌برداری و سایش ابزار دارند که با افزایش میزان کبالت، به دلیل افزایش چقرمگی شکست، نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد. همچنین ابزارها با سختی بالاتر، عملکرد بهتری در ماشین‌کاری دارد. لیا و همکاران [۵] به بررسی امکان استفاده از ماشین‌کاری آلتراسونیک چرخان برای سوراخ‌کاری در کامپوزیت‌های سرامیکی پرداختند. در این پژوهش، طراحی آزمایش با سه متغیر سرعت اسپیندل، نرخ تغذیه و توان آلتراسونیک صورت‌گرفت و تأثیر این پارامترها بر نیروی برش، نرخ براده‌برداری و کیفیت سوراخ ایجاد شده مورد تحلیل قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که ماشین‌کاری آلتراسونیک چرخان مزایای قابل توجهی نسبت به سوراخ‌کاری بدون ارتعاش الماسی داشته و با کاهش چشم‌گیری در نیروی برش (حدود ۵۰٪) و افزایش نرخ حذف مواد (حدود ۱۰٪) همراه می‌باشد. همچنین نرخ پیشروی تأثیر مهمی بر نیروی برش داشته و نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و تعامل بین آن‌ها، تأثیرات مهمی بر کیفیت سوراخ دارند.

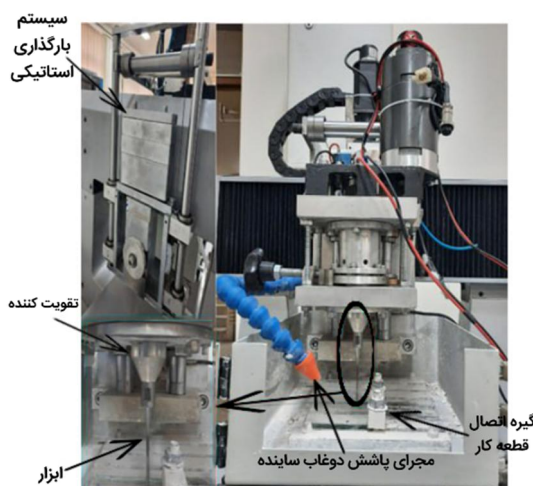
¹ Ultrasonic Machining

² SiC

۲- بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

ماشین‌کاری آلتراسونیک با توجه به کاربردهای خاص در صنایع مختلف، در حال گسترش است. تحقیقات در این زمینه در دو بخش عمده انجام می‌شود: بخش اول ارتقا و بهبود مکانیزم‌های مربوط به دستگاه و دیگری در حوزه بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری بر روی مواد مختلف می‌باشد. شیشه به علت شفافیت، ایزوتروپی، همگنی و کاربردهای گسترده به عنوان قطعه‌ی کار مرجع در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. شیشه‌ی انتخابی از نوع کریستالی فوق شفاف می‌باشد که یکی از جدیدترین‌ها در صنعت شیشه است. این شیشه نسبت به شیشه‌های دیگر به مراتب شفاف‌تر و مستحکم‌تر است و تا بیش از ۹۰ درصد نور طبیعی از آن منتقل می‌شود. به دلیل یکپارچگی و ظاهر تزیینی زیبا، این شیشه انتخاب مهندسان برای طراحی نماهای داخلی بوده و همچنین به دلیل خواص منحصر به فرد، موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های تهویه مطبوع در تابستان و گرمایش در زمستان و در نتیجه بهره‌وری بالای انرژی می‌شود. به منظور آزمایش‌های هدف‌دار، قطعه‌کارهایی از جنس شیشه کریستالی فوق شفاف به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ میلی‌متر به تعداد دو عدد تهیه گردید. در این پژوهش به بررسی امکان ماشین‌کاری شیشه‌های کریستالی فوق شفاف و همچنین دستیابی به پارامترهای مناسب ماشین‌کاری برای این قطعه‌ی کار، پرداخته شده است.

در این تحقیق از دستگاه ماشین‌کاری آلتراسونیک (شکل ۱) استفاده شده است. به منظور دستیابی به فرکانس مد نظر برای ماشین‌کاری، پس از تعیین فرکانس رزونانس ترانس‌دوسر، ابزاری جدید با انجام محاسبات تحلیلی و شبیه‌سازی عددی مرتبط با آن، طراحی، ساخته و بر روی دستگاه نصب گردید. سپس پارامترهای مختلف آزمایش تعیین و مراحل آزمایش طراحی گردید. پس از اتمام عملیات ماشین‌کاری و انجام تمام مراحل آزمایش و اندازه‌گیری، نتایج تجزیه و تحلیل شده و ارائه گردید.



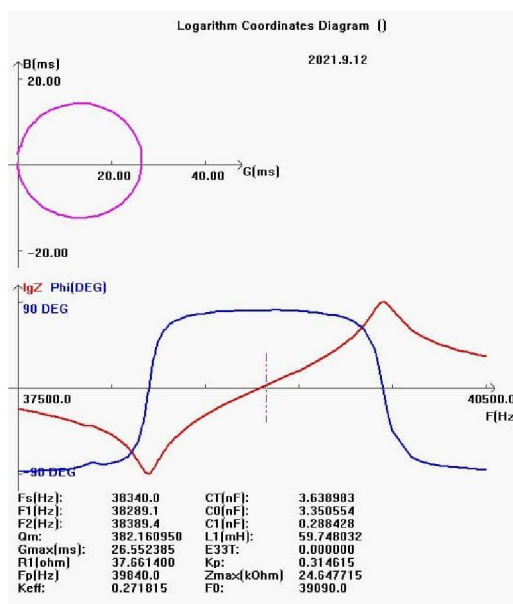
شکل ۱ دستگاه ماشین‌کاری آلتراسونیک

۳- روش تحقیق

در این تحقیق، با تغییر پارامترهایی نظیر توان ماشین‌کاری آلتراسونیک، بار استاتیکی اعمالی و فرکانس ارتعاشی ابزار، شرایط متفاوتی برای عملیات ماشین‌کاری در نظر گرفته شده و سایر پارامترهای فرایند ثابت می‌باشند. یکی از پارامترهای مهم که در فرایند ماشین‌کاری آلتراسونیک بر روی مواد مختلف مورد بحث و بررسی بوده، میزان بار استاتیکی موجود پشت ابزار در حال ارتعاش می‌باشد. در این دستگاه از مکانیزم اهرم مانند، همراه وزنه‌هایی با مقدار مشخص استفاده شده، بدین صورت که در زمان تماس ابزار با قطعه‌ی کار امکان حرکت و جابجایی ابزار به سمت بالا ممکن بوده ولی همچنان کل مجموعه متصل به صفحه‌ی اصلی (کله‌گی) رو به پایین حرکت می‌کند. به منظور انتخاب بارهای استاتیکی مختلف، پس از بررسی نمونه‌های مشابه ماشین‌کاری در مقالات و آزمایش‌های مختلف و در نظر داشتن مقادیر پیشنهادی برای ماشین‌کاری، مقدار دقیق وزنه‌های موجود بر روی دستگاه تعیین گردید [۱]. سپس بارهای استاتیکی ۵۴۰، ۱۰۸۰ و ۲۷۰۰ گرم انتخاب شد. در گام بعدی، به منظور انتخاب بازه‌ی مناسب برای توان‌های متفاوت ماشین‌کاری، نمونه‌های مختلف مطالعه گردید [۶]. همچنین برخی از توان‌های ماشین‌کاری تحت آزمون قرار گرفتند و

مشاهده شد که در برخی از توان‌های پایین ماشین کاری، مانند توان ۵۰ وات عملیات ماشین کاری انجام نمی‌شود. در نهایت با در نظر داشتن توان پیشنهادی توسط سازنده‌ی دستگاه، توان‌های ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۳۰ وات برای انجام ماشین کاری انتخاب گردید. در ماشین کاری برخی از مواد شکننده مانند شیشه، سرامیک و ژرمانیوم از تقویت کننده‌های پله‌ای استفاده می‌شود و چون نیاز به دامنه‌ی ارتعاشی بالایی نمی‌باشد، از خستگی در نقاط گره ناشی از تمرکز تنش، جلوگیری می‌شود [۱]. در این آزمایش از دو فرکانس ارتعاشی مختلف استفاده شده است. بدین منظور علاوه بر مجموعه‌ی ارتعاشی ساخته شده بر روی دستگاه، نیازمند به طراحی مجموعه‌ی ارتعاشی جدید، با فرکانس رزونانس متفاوت می‌باشد. از این رو نیاز به طراحی و ساخت ابزار جدید با طول متفاوت می‌باشد. ترانسدیوسر موجود توسط دستگاه امپدانس آنالایزر تحت آزمون قرار گرفت و با توجه به شکل ۲ فرکانس رزونانس آن مقدار ۳۸۳۴۰ هرتز می‌باشد.

پس از بررسی ترانسدیوسر موجود، در گام بعدی طراحی ابزار با مجموعه طولی برابر با نصف طول موج $(\frac{\lambda}{2})$ انجام گرفت به گونه‌ای که فرکانس طبیعی این مجموعه در شرایط رزونانس، برابر و در محدوده بسیار نزدیک به ترانسدیوسر باشد. انتظار می‌رود پس از اتصال این دو زیرمجموعه به همدیگر، صرف نظر از افت‌های مکانیکی ناشی از محل اتصالات، کل مجموعه نیز تحت همان فرکانس، در شرایط رزونانس قرار گرفته و در راستای طولی نوسان داشته باشد.



شکل ۲ فرکانس رزونانس ترانسدیوسر موجود

در فرآیند ماشین کاری آلتراسونیک، از جمله ویژگی‌های ابزار، مقاومت به سایش بالا و استحکام خستگی مناسب می‌باشد که برای قطعه کار شیشه‌ای، ابزار از جنس تنگستن-کاربید، مس و یا فولاد نقره پیشنهاد می‌شود [۷]. در این آزمایش، ابزار از جنس فولاد نقره انتخاب گردید. به منظور طراحی ابزار، در ابتدا با استفاده از روابط مبتنی بر معادلات موج، طول اولیه‌ی محاسبه شده و سپس مدل سه بعدی آن، تهیه گردید. در گام بعدی، در نرم افزار آباکوس^۱ مدل سه بعدی ابزار تحت آنالیز مودال قرار گرفته و نتایج بررسی گردید. جهت بدست آوردن طول اولیه، با توجه به اینکه جنس ابزار از فولاد نقره انتخاب شده است، با محاسبه‌ی سرعت موج از رابطه‌ی ۱، و پس از جایگذاری در رابطه‌ی ۲، طول اولیه قابل محاسبه می‌باشد [۸].

$$C_i = \sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}} \quad (1)$$

¹ Abaqus

$$\lambda_i = \frac{c_i}{f}$$

$$= \sqrt{\frac{2.1 \times 10^{11}}{7800}} = 5189 \frac{m}{s}$$

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} = \frac{5189}{2 \times 38280} = 8.67 \text{ mm} \quad (2)$$

باید توجه داشت که به منظور حفظ شرایط یکسان برای دو مجموعه‌ی ارتعاشی مد نظر، سعی در یکسان نگه داشتن میزان افزایش دامنه در ابزار می‌باشد. لذا با توجه به ابعاد ترانسدیوسر موجود، قطر سر ابزار ۴ میلی‌متر انتخاب می‌گردد. طبق رابطه‌ی ۳ که مربوط به طراحی تقویت کننده‌ی غیر متقارن پله‌ای می‌باشد [۸]، با تخمین $L_1 = 30 \text{ mm}$ طول قسمت دوم از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\tan \frac{\omega l_2}{c} = -N^2 \tan \frac{\omega l_1}{c} \quad (3)$$

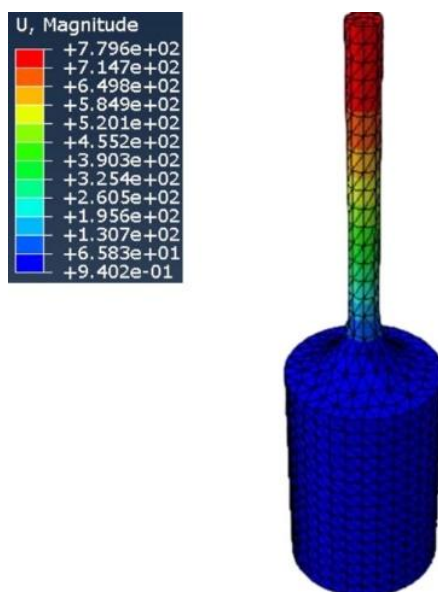
$$N = \frac{D_1}{D_2} = \frac{20}{4} = 5$$

$$\tan \frac{2\pi \times 38280 \times l_2}{5189} = -5^2 \tan \frac{2\pi \times 38280 \times 0.030}{5189}$$

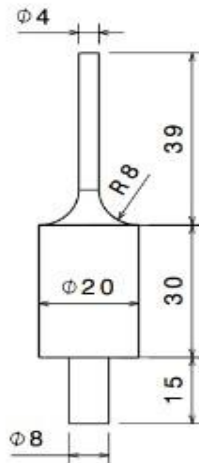
$$\Rightarrow l_2 = 33.7 \text{ mm}$$

سپس در نرم افزار آباکوس مراحل تنظیم پارامترها، شبکه بندی و سایر تنظیمات مربوطه جهت انجام آنالیز مودال انجام گردید و نتایج شبیه سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. پس از آنالیز دقیق در نرم افزار و تعیین ابعاد مناسب ابزار برحسب میلی‌متر، نقشه‌ی آن مطابق با شکل ۴ تهیه گردید.

پس از طراحی و ساخت ابزار، دو مجموعه‌ی ترانسدیوسر و ابزار با همدیگر مونتاژ شدند و به کمک دستگاه امپدانس آنالایزر تحت آزمون قرار گرفتند تا از عملکرد کل مجموعه اطمینان حاصل گردد. پس از مونتاژ مجموعه و بررسی آن، فرکانس رزونانس مجموعه ارتعاشی با توجه به شکل ۵ برابر ۴۰۵۱۶ هرتز می‌باشد.

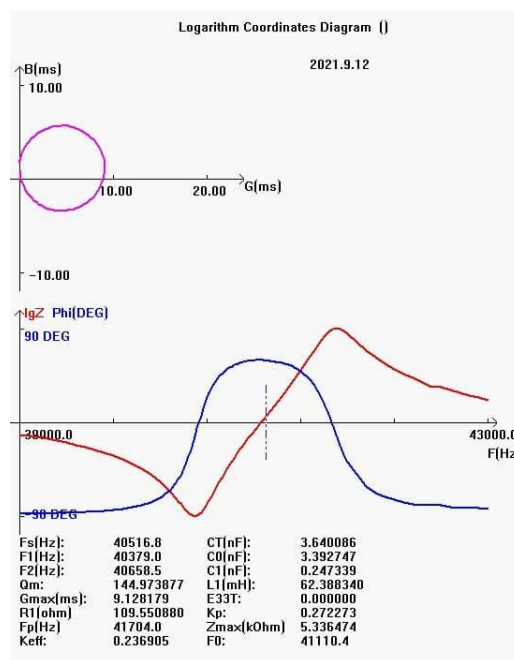


شکل ۳ آنالیز مودال ابزار طراحی شده در نرم افزار آباکوس



شکل ۴ نقشه‌ی ابزار مورد استفاده در ماشین‌کاری با فرکانس ۳۸ کیلوهرتز

اختلاف موجود میان فرکانس حاصله از شبیه‌سازی و فرکانس رزونانس مجموعه‌ی ساخته شده می‌تواند ناشی از عیوب و خطای ساختاری قطعه‌کار و همچنین خطاهای ماشین‌کاری باشد. بنابراین پارامترهای متغیر در این آزمایش مطابق جدول ۱ ارائه می‌گردد.



شکل ۵ فرکانس رزونانس مجموعه‌ی ارتعاشی مونتاژ شده

جدول ۱ پارامترهای متغیر آزمایش

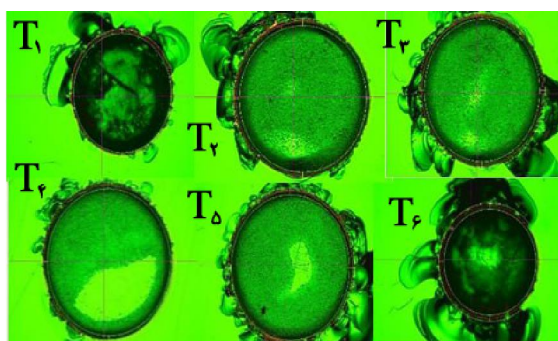
S.L (g)	P (W)	F(KHz)
۵۴۰	۱۰۰	۲۲
۱۰۸۰	۱۱۰	۴۰
۲۷۰۰	۱۳۰	

باید توجه داشت که سایر پارامترهای ماشین‌کاری از جمله جنس ابزار، نوع مواد ساینده، اندازه‌ی دانه‌های ساینده، غلظت دوغاب ساینده و سطح تماس ابزار ثابت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است دوغاب ساینده مورد نیاز از ذرات ساینده اکسید آلومینیوم (آلومینا) با درجه دانه بندی ۴۰۰ و مخلوط با آب به نسبت حجمی ۲۰ درصد تهیه گردید و همچنین دبی مناسب برای دوغاب ساینده، توسط شیر نصب شده در مسیر جریان تنظیم گردید.

۴- نتایج و بحث

پس از اتمام عملیات سوراخ‌کاری و محاسبه نرخ براده برداری در هر آزمایش، به منظور بررسی کیفیت ظاهری سوراخ‌های ایجاد شده، تصاویر خروجی از دستگاه اندازه‌گیری ویدیویی با مدل KIM-3020CU-IM، ساخت شرکت ARCS تایوان تحت بررسی قرار گرفتند. از بررسی این تصاویر نتیجه می‌شود که برخی از سوراخ‌ها دچار لب پدیدگی شده و از کیفیت ظاهری مناسبی برخوردار نیستند. در فرکانس ۲۲ کیلوهرتز و توان ۱۳۰ وات در هر بار استاتیکی، منجر به لب پدیدگی سوراخ‌ها می‌شود. همچنین انتخاب فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به همراه بار استاتیکی ۲۷۰۰ گرم (در هر توان ماشین‌کاری) لب پر شدن سوراخ‌ها را به همراه دارد. به طور کلی می‌توان دریافت که میزان لب پدیدگی در فرکانس ۲۲ کیلوهرتز بیشتر از فرکانس ۴۰ کیلوهرتز می‌باشد. به عنوان نمونه در شکل ۶ برخی از سوراخ‌های لب پر شده نشان داده شده است.

پس از آنالیز نتایج در نرم‌افزار مینی‌تیب^۱، نمودار تاثیر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری بر نرخ براده برداری مطابق شکل ۷ به دست می‌آید. از آنجایی که توان ماشین‌کاری، دامنه‌ی ارتعاش ابزار را کنترل می‌کند، با افزایش توان، دامنه‌ی ارتعاش ابزار در یک فرکانس خاص افزایش می‌یابد و این موضوع منجر به بهبود جریان موثر در انتقال براده‌ها گشته و در نهایت نرخ براده برداری افزایش می‌یابد [۹]. این موضوع در نمودار شکل ۸ قابل مشاهده است و همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش توان ماشین‌کاری، نرخ براده برداری افزایش یافته است. بررسی رابطه‌ی میان فرکانس و نرخ براده برداری اندکی چالش برانگیز است زیرا در اکثر ماشین‌های آلتراسونیک فرکانس رزونانس نمی‌تواند در محدوده‌ی وسیعی تنظیم شود. با افزایش فرکانس در یک دامنه‌ی ثابت، تعداد ضربه‌های ذرات ساینده و مومنتوم ضربات افزایش یافته و این موضوع منجر به افزایش نرخ براده برداری می‌شود [۱۰]. همچنین باتوجه به آزمایش‌های مشابه در دیگر مقالات می‌توان دریافت که با افزایش بار استاتیکی، نرخ براده برداری افزایش می‌یابد. این موضوع در نمودار شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد. باید توجه داشت در حالت عملی، بار استاتیکی دارای مقدار بهینه‌ای بوده و اگر از میزان بهینه‌ی خود بیشتر شود منجر به خرد شدن ذرات ساینده شده و نرخ براده برداری کاهش می‌یابد [۱۱]. اکنون با توجه به توضیحات فوق، همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش فرکانس، بار استاتیکی و توان، افزایش نرخ براده برداری مشاهده می‌شود.

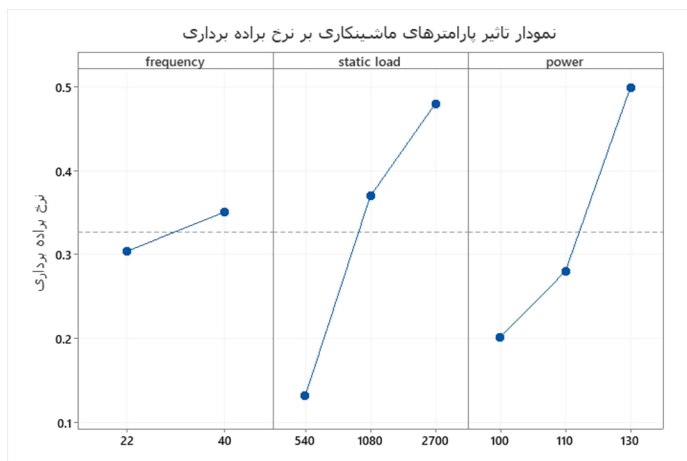


شکل ۶ لب پدیدگی سوراخ‌ها در شرایط مختلف ماشین‌کاری

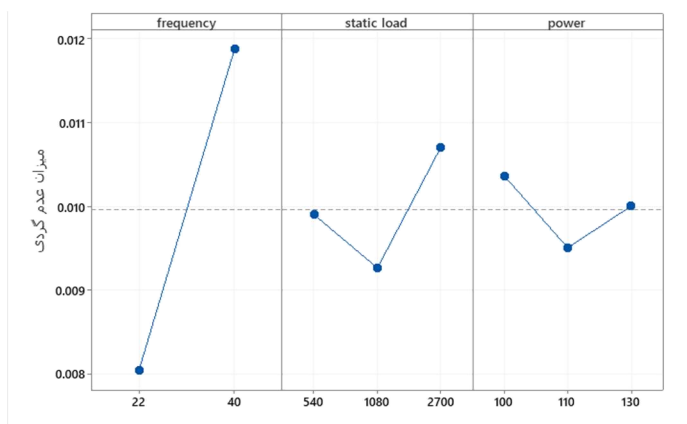
- T₁: فرکانس ۲۲ کیلوهرتز، بار استاتیکی ۵۴۰ گرم، توان ۱۳۰ وات
- T₂: فرکانس ۲۲ کیلوهرتز، بار استاتیکی ۱۰۸۰ گرم، توان ۱۳۰ وات
- T₃: فرکانس ۲۲ کیلوهرتز، بار استاتیکی ۲۷۰۰ گرم، توان ۱۳۰ وات
- T₄: فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، بار استاتیکی ۲۷۰۰ گرم، توان ۱۰۰ وات
- T₅: فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، بار استاتیکی ۲۷۰۰ گرم، توان ۱۱۰ وات
- T₆: فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، بار استاتیکی ۲۷۰۰ گرم، توان ۱۳۰ وات

¹ Minitab

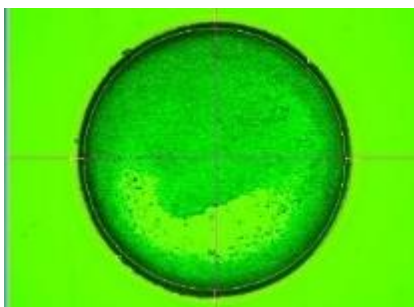
در فرایند ماشین کاری آلتراسونیک جنس قطعه کار بر روی صافی سطح و کیفیت ظاهری سوراخ ایجاد شده تاثیر چشم گیری دارد. همچنین مواردی از قبیل نوع مواد ساینده و اندازه‌ی ذره‌های ساینده نیز بر این موضوع تاثیرگذار است [۱۲]. با استفاده از تصاویر خروجی از دستگاه اندازه گیری ویدیویی، میزان عدم گردی سوراخ‌ها تحت بررسی قرار گرفته و شکل ۸ بیانگر تاثیر پارامترهای مختلف ماشین کاری بر عدم گردی می باشد. با افزایش میزان بار استاتیکی، ارتعاشات جانبی ابزار کاهش می یابد. همچنین افزایش بار استاتیکی منجر به خورد شدن ذرات ساینده شده و اندازه آن‌ها کاهش می یابد. این موضوع باعث بهتر شدن کیفیت ظاهری سوراخ‌های ایجاد شده می گردد [۱۱]. همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می شود با انتخاب بار استاتیکی ۱۰۸۰ گرم، کمترین میزان عدم گردی سوراخ‌ها بدست می آید.



شکل ۷ تاثیر پارامترهای مختلف ماشین کاری بر نرخ براده برداری



شکل ۸ تاثیر پارامترهای مختلف ماشین کاری بر عدم گردی سوراخ‌ها



شکل ۹ سوراخ ماشین کاری شده در شرایط: فرکانس ۴۰ کیلوهرتز بار استاتیکی ۱۰۸۰ گرم توان ۱۳۰ وات

نرخ براده برداری: ۰.۰۲۲۱ میلی متر مکعب بر دقیقه

میزان گردی: ۰.۰۰۳۷۴ میلی متر

در انتها نتیجه می‌شود که انتخاب فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به همراه بار استاتیکی ۱۰۸۰ گرم و توان ۱۳۰ وات، سبب دستیابی به بیشترین نرخ براده برداری شده و با توجه به شکل ۹ کیفیت ظاهری سوراخ‌های ایجاد شده در این شرایط از لحاظ لب پریدگی و عدم گردی کمتر می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

باتوجه به کاربرد روز افزون ارتعاشات آلتراسونیک در صنایع مختلف در بسیاری از کشورهای صنعتی، به خصوص کاربردهای آن در زمینه‌های خاص و منحصر به فرد از جمله ماشین‌کاری با نوسانات آلتراسونیک، رشد و گسترش تحقیقات و پیشرفت در این زمینه در کشور ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، مجموعه‌های ارتعاشی با فرکانس‌های رزنانس ۲۲ کیلوهرتز و ۴۰ کیلوهرتز آماده گشته و عملیات ماشین‌کاری بر روی شیشه به همراه بارهای استاتیکی و توان‌های مختلف آلتراسونیک انجام گردید. آزمون‌های عملی انجام شده، نشان داد که با افزایش فرکانس، بار استاتیکی اعمالی و توان ماشین‌کاری، نرخ براده برداری افزایش می‌یابد. همچنین در برخی آزمون‌ها، سوراخ‌های ماشین‌کاری شده از لحاظ ظاهری کیفیت مناسبی نداشته و دچار لب پریدگی شدند. با تنظیم فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به همراه بار استاتیکی ۱۰۸۰ گرم و توان ۱۳۰ وات می‌توان به بیشترین نرخ براده برداری دست یافت. همچنین سوراخ‌های ماشین‌کاری شده در این شرایط، از لحاظ ظاهری و تلرانس گردی مناسب‌تر بوده و دچار لب پریدگی نمی‌شوند.

۶- فهرست علائم

C	سرعت صوت در جامد (ms^{-1})
E	مدول الاستیسیته ($\text{Kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
f	فرکانس ارتعاشی آلتراسونیک (Hz)

علائم یونانی

ρ	دانسیته جامد (Kgm^{-3})
λ	طول موج صوت در جامد (m)
ω	فرکانس زاویه‌ای (rads^{-1})

References

- [1] Youssef H, El-Hofy H. Non-Traditional and Advanced Machining Technologies. CRC Press; 2020 Aug 10. doi: 10.1201/9781003055310
- [2] Goswami D, Chakraborty S. Parametric optimization of ultrasonic machining process using gravitational search and fireworks algorithms. Ain Shams Engineering Journal. 2015 Mar 1;6(1):315-31. doi: 10.1016/j.asej.2014.10.009
- [3] Bhosale SB, Pawade RS, Brahmankar PK. Effect of process parameters on MRR, TWR and surface topography in ultrasonic machining of alumina-zirconia ceramic composite. Ceramics International. 2014 Sep 1;40(8):12831-6. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.04.137
- [4] Kataria R, Kumar J, Pabla BS. Experimental investigation and optimization of machining characteristics in ultrasonic machining of WC-Co composite using GRA method. Materials and Manufacturing Processes. 2016 Apr 3;31(5):685-93. doi: 10.1080/10426914.2015.1037910
- [5] Li ZC, Jiao Y, Deines TW, Pei ZJ, Treadwell C. Rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: feasibility study and designed experiments. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005 Oct 1;45(12-13):1402-11. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.034
- [6] Rajathesh BC, Vinay G, Shivayogi CA, TS N. Process parameters of ultrasonic machining. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2019 Nov;8(4). doi: 10.35940/ijrte.D9743.118419
- [7] Nee AY. Handbook of manufacturing engineering and technology. Springer Publishing Company, Incorporated; 2014 Nov 14. doi: 10.1007/978-1-4471-4976-7
- [8] Ensminger D, Stulen FB, editors. Ultrasonics: data, equations and their practical uses. CRC press; 2008 Dec 17. doi: 10.1201/9781420020205
- [9] Sindhu D, Thakur L, Chandna P. Parameter optimization of rotary ultrasonic machining on quartz glass using response surface methodology (RSM). Silicon. 2020 Mar;12:629-43. doi: 10.1007/s12633-019-00160-2

- [10] Wang ZY, Rajurkar KP. Dynamic analysis of the ultrasonic machining process. In Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 1995. doi: [10.1115/1.2831039](https://doi.org/10.1115/1.2831039)
- [11] Komaraiah M, Manan MA, Reddy PN, Victor S. Investigation of surface roughness and accuracy in ultrasonic machining. Precision Engineering. 1988 Apr 1;10(2):59-65. doi: [10.1016/0141-6359\(88\)90001-3](https://doi.org/10.1016/0141-6359(88)90001-3)
- [12] Zarepour H. An Experimental Investigation on Surface Roughness and Edge Chipping in Micro Ultrasonic Machining. Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production. 2016 Nov 1;5(4):45-56. doi: [20.1001.1.27170314.2016.5.4.5.5](https://doi.org/20.1001.1.27170314.2016.5.4.5.5)