ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):113-118.

# Investigating the Effect of Ultrasonic Vibrations on the Maximum Force of Tools in Drilling of Aluminum

**ARTICLE INFO**

***Authors***
Zandi pour M.[1*],
Soleimanimehr H.[1] ,
Amini S.[1]

[1] Department of Mechanics, Electrical Power and Computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*** Correspondence**
Address: Department of Mechanics, Electrical Power and Computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
shafagh.zandi@gmail.com

**How to cite this article**
Zandi pour M, Soleimanimehr H, Amini S. Investigating the Effect of Ultrasonic Vibrations on the Maximum Force of Tools in Drilling of Aluminum. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):113-118.

**ABSTRACT**

Ultrasonic machining is a new technique, and one of the new and promising processes for machining metals, especially metal alloys with low machinability. In this paper, a set of laboratory studies is used to investigate the effect of using ultrasonic vibrations on the force required for drilling of the thin aluminum workpieces. For this perpuse, three aluminum workpieces with different thicknesses are drilled under three different rotation speeds, and four different advance rates. The results showed that in two aluminum workpieces, 1 and 1.5 mm, the use of ultrasonic vibrations generally reduced the axial force, but in the 2 mm workpiece, it is not possible to understand a meaningfull effect of adding ultrasonic vibrations. In other words, it can be said that adding ultrasonic vibrations with constant amplitude and frequency does not have the same effect on drilling in different conditions, and to reach the most efficient drilling, the characteristics of optimal vibration should be studied.

**Keywords** Drilling, Ultrasonic Vibration, Thin Aluminum Workpieces, Axial force

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته.
مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۱۱۳-۱۱۸.

# بررسی تاثیر ارتعاشات اولتراسونیک بر حداکثر نیروی ابزار سوراخ کاری در آلومینیوم

**مشخصات مقاله**

**نویسنده‌ها**
مرتضی زندی پور[1*]
حمید سلمانی مهر[1]
سعید امینی[1]
[1] دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات ، تهران

*** نویسنده مسئول**
آدرس:
shafagh.zandi@gmail.com

**چکیده**

ماشینکاری به کمک اولتراسونیک یک تکنیک جدید و یکی از فرآیندهای نوین و نوید بخش، برای ماشینکاری فلزات به‌خصوص آلیاژهای فلزی با قابلیت ماشینکاری پایین می‌باشد. در این تحقیق، با استفاده از یک مجموعه مطالعات آزمایشگاهی، تاثیر استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک روی نیروی لازم برای سوراخکاری قطعه‌کارهای نازک آلومینیوم با سه ضخامت متفاوت در سه سرعت دوران مختلف و چهار نرخ پیشروی متفاوت بررسی شده است. نتایج نشان داد که در دو قطعه‌کار آلومینیوم ۱ و ۱/۵ میلیمتر، استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک عموما باعث کاهش نیروی محوری شده است اما در قطعه‌کار ۲ میلیمتری در مورد اثر اضافه کردن ارتعاشات اولتراسونیک نمی توان اظهار نظر قطعی نمود. به بیان دیگر می توان گفت که اضافه کردن ارتعاشات اولتراسونیک با دامنه و فرکانس ثابت اثر یکسانی بر سوراخکاری در شرایط متفاوت ندارد و برای رسیدن به مطلوب ترین حالت سوراخکاری باید مشخصات ارتعاش بهینه مورد مطالعه قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها** سوراخ کاری، ارتعاشات اولتراسونیک، قطعه کار نازک آلومینیوم، نیروی محوری

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.18.1 ]

## ۱- مقدمه

ماشینکاری به کمک اولتراسونیک یک تکنیک جدید و یکی از فرآیندهای نوین و نوید بخش، برای ماشینکاری فلزات به‌خصوص آلیاژهای فلزی با قابلیت ماشینکاری پایین می‌باشد[1]. بنای فرآیند سوراخکاری ارتعاشی مانند سوراخکاری معمولی است با این تفاوت که برای بهبود شرایط ماشینکاری، ارتعاشات اولتراسونیک نیز به حرکت ابزار اضافه می‌شود. ارتعاشات اولتراسونیک برای تحریک ابزار یا قطعه‌کار ، اغلب با فرکانس بالا و بیشتر از ۱۶کیلوهرتز به صورت طولی یا بیضوی به کار میرود؛ به طوری که درگیری ابزار با قطعه‌کار حین پیشروی محوری، قطع و وصل می‌گردد. با ترکیب مناسب سرعت برش و بسامد ارتعاش، ابزار بصورت تناوبی تماس با براده را از دست میدهد در نتیجه نیروهای ماشینکاری میتوانند کمتر و براده‌هایی با ضخامت کوچکتری تولید شود که در مقایسه با ماشینکاری مرسوم، پرداخت سطح و دقت فرم بهتری حاصل می شود[2].

استفاده از ارتعاشات اولتراسونیکی در فرآیندهای مختلف ماشینکاری مورد توجه محققین قرار گرفته است. از این روش در فرآیندهای ماشینکاری نظیر تراشکاری، سوراخکاری، فرزکاری استفاده شده است. پژوهش‌های متنوعی روی فرآیند سوراخکاری ارتعاشی انجام شده است. فرآیند ترکیب امواج اولتراسونیک با ماشین ابزارهای معمولی توسط کومابه و همکاران در حدود سال ۱۹۵۸ شروع شد. او نشان داد که نیروی برشی پالسی مزیتهای زیادی را از جمله جابجایی گرمای برش و افزایش عمر ابزار به دنبال دارد[3]. تاکیاما و کاتو فرآیند اعمال ارتعاش اولتراسونیک به قطعه‌کار را در سوراخکاری ارتعاشی بررسی نمودند. آنها بهبود در سوراخکاری ارتعاشی با فرکانس بالا روی آلومینیوم را نشان دادند و گزارش کردند که ارتفاع براده تا ۷۵درصد کاهش یافت [4]. جانگ و وانگ با آنالیز مسیر براده در سوراخکاری به کمک اولتراسونیک با ارتعاش محوری روی مواد چقرمه و نرم یک روش جدید را برای شکستن براده با کمک اولتراسونیک پیشنهاد کردند[5]. لی و همکاران یک کنترل شرایط ارتعاشی چندمرحله‌ای برای سوراخکاری ارتعاشی مواد کامپوزیتی لایه‌ای به‌وجود آوردند[6]. بابیستکی و همکاران سوراخکاری موادی چون صفحات نازک فلزی و شیشه را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که سوراخکاری صفحات نازک آلومینیومی بدون استفاده از پشتبند در سوراخکاری ارتعاشی امکانپذیر است در حالی که صفحات نازک آلومینیومی در سوراخکاری معمولی خم شدند. همچنین کیفیت سطح شیشه در سوراخکاری ارتعاشی بهبود چشمگیری نسبت به سوراخکاری معمولی داشت[7]. چنگ و بون نشان دادند که کاهش اندازه براده در سوراخکاری آلومینیوم از طریق روش VD امکانپذیر است[8]. وانگ و همکارانش به طور عملی سوراخکاری ارتعاشی با فرکانس کم را روی فیبر تقویت شده بررسی کردند. نتایج نشان داد که سوراخکاری ارتعاشی با فرکانس کم میتواند نیروهای محوری را کاهش دهد، اما شرایط ارتعاشی مطلوب برای شرایط برشی خاصی وجود دارد[9]. آذرهوشنگ و اکبری سوراخکاری ارتعاشی اینکونل LC۷۳۸ را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که کیفیت سطح در استفاده از این روش بهبود می‌یابد[10]. پوجانا و همکارانش نشان دادند که در سوراخکاری ارتعاشی با قطعه‌کار Ti6Al4V براده‌ها تمایل به خرد شدن دارند در صورتی که سوراخکاری معمولی براده‌های پیوسته ایجاد می‌کند. آنها دلیل این امر را اثرات اولتراسونیک و برخوردهای مداوم سر مته با براده ها بیان کردند [11]. ژانگ و همکاران ثابت کرد که کاربرد ارتعاش با فرکانس ۱۶ KHz روی قطعه اثرات افزایش صلبیت سوراخکاری، کاهش لغزش مته و کاهش خطاهای اندازه سوراخ و افزایش عمر مته را دارد[12]. لین و همکاران سوراخکاری به کمک اولتراسونیک اینکونل ۷۱۸ را مورد مطالعه قرار دادند که نتیجه آن کاهش اندازه براده و تغییرات کمتر گشتاور بود. همچنین با تغییر فرکانسها توانایی سوراخکاری بهبود کمی و در مقابل عمر مته بهطور چشمگیری در کاربرد ارتعاشات با دامنه کم افزایش یافت. آنها همچنین تحت شرایط خاصی عمر ابزار ۲/۷ برابر بیشتر از فرآیند سوراخکاری معمولی را گزارش کردند[13]. ما و همکاران سوراخکاری به کمک ارتعاشات دوبعدی یا بیضوی را بر روی قطعه‌کار آلومینیوم s۵۲ مورد بررسی قرار دادند. بر طبق گزارشهای آنها نیروی محوری تا یک سوم، نیروی شعاعی تا یک دوم و ضخامت براده از یک دوم تا یک سوم کاهش یافتند[14]. گوو و همکارش سوراخکاری ارتعاشی قطعاتی از جنس Al6061-T6 و فولاد SS41 را مورد بررسی قرار دادند. بر طبق نتایج آنها لغزش سر مته و کیفیت سطح سوراخ در سوراخکاری ارتعاشی نسبت به سوراخکاری معمولی بهبود یافت اما عمر مته در سوراخکاری ارتعاشی بدتر شد[15]. چنگ و بون مدلی برای ارتفاع براده در سوراخکاری Al6061-T6 ارائه کردند که بر اساس آن استفاده درست از ارتعاشات اولتراسونیک باعث کاهش ارتفاع براده می شود[16]. یوهایی و همکاران نشان دادند که میتوان در فرآیند میکروسوراخکاری ارتعاشی با افزایش نرخ پیشروی به زمان ماشینکاری کمتری رسید در حالی که عمر ابزار حفظ می‌گردد [17]. نوجبایر و استول از طریق آزمایش نشان دادند که در سوراخکاری ارتعاشی آلیاژهای آلومینیوم عمر ابزار نسبت به روش معمولی بیشتر می گردد. سیمون و همکاران به این نتیجه رسیدند که با اضافه کردن ارتعاشات اولتراسونیک به سوراخکاری نیروی محوری کاهش می یابد اما اضافه شدن ارتعاشات اولتراسونیک سبب افزایش مقدار درجه حرارت فرآیند سوراخکاری می‌گردد[8]. این افزایش دما سبب تبلور مجدد دوباره ساختار دانه و سبب افزایش میکرو سختی نیز می‌گردد[18]. همچنین این تلفیق، سبب انتقال تنگستن و کبالت از ابزار به سطح قطعه می‌شود[19]. پاک



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.18.1 ]

نیت و همکاران با بررسی اثر اضافه شدن ارتعاشات اولتراسونیک به فرآیند سوراخکاری Al2024-T6 نتیجه گرفتند که نیروی محوری در فرآیند سوراخکاری ارتعاشی نسبت به فرآیند سوراخکاری معمولی کاهش می‌یابد و براده‌ها در سوراخکاری ارتعاشی به صورت منقطع و ناپیوسته هستند[20]. امینی و همکارانش به مطالعاتی بر روی سوراخکاری ارتعاشی چرخشی با مته مارپیچ، با استفاده از موج طولی پرداختند. نتایج آنها نشان میدهد که سوراخکاری ارتعاشی باعث کاهش قابل ملاحظه نیروی محوری در حدود ۷۰ درصد نسبت به سوراخکاری معمولی شده است[21]. در این تحقیق، با استفاده از یک مجموعه مطالعات آزمایشگاهی، تاثیر استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک روی نیروی لازم برای سوراخکاری قطعه‌کارهای نازک آلومینیوم با سه ضخامت متفاوت در سه سرعت دوران مختلف و چهار نرخ پیشروی متفاوت بررسی شده است.

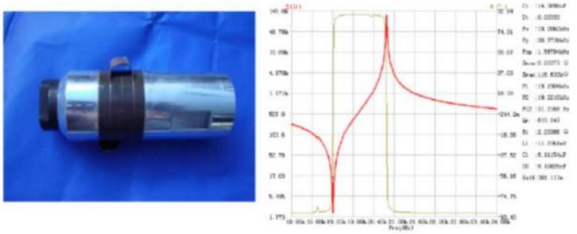
## ۲- روش، تجهیزات و نمونه

در این مطالعه برای بررسی تاثیر استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک بر نیروی محوری لازم برای سوراخ کاری قطعه‌کار های آلومینیوم نتایج سوراخ کاری بر روی قطعه‌کار آلومینیوم با سه ضخامت ۱، ۱/۵ و ۲ میلیمتر با استفاده از سوراخکاری اولتراسونیک و سوراخکاری معمولی با هم مقایسه شده است. در این مجموعه آزمایش، سوراخ کاری در هر قطعه‌کار با ضخامت معین، در سه سرعت دوران متفاوت شامل ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و در چهار نرخ پیشروی مختلف شامل ۰/۰۸، ۰/۱۶، ۰/۲۴ و ۰/۳۲ میلیمتر در دور انجام شده است. دستگاه مورد استفاده در این تحقیق، دستگاه تراش اونیورسال با سرمته فولاد H13 با قطر ۱۰ میلیمتر بوده است. دامنه و فرکانس ارتعاش اولتراسونیک در تمامی آزمایش ها به ترتیب ۲۰ میکرومتر و ۲۰ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده است.

برای تولید و انتقال ارتعاشات اولتراسونیک به ناحیه هدف، از یک سیستم اولتراسونیک شامل ژنراتور، ترانسدیوسر و متمرکزکننده استفاده می شود. قرصهای پیزوالکتریک برای تحریک شدن و ایجاد ارتعاش نیاز به انرژی الکتریکی دارند که این انرژی توسط مولد تولید می‌گردد. ژنراتور یا مولد، برق شهری با بسامد ۵۰ هرتز و ولتاژ ۲۲۰ ولت را به بسامدهایی در حد اولتراسونیک و ولتاژی در حد کیلو ولت تبدیل می کند. عموما مولدها قابلیت تنظیم بسامد و توان مورد استفاده در هر شرایط مورد استفاده را دارا می‌باشد. ژنراتور سیستم اولتراسونیک استفاده شده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.

**شکل ۱)** ژنراتور استفاده شده در این تحقیق

ترانسدیوسر یکی از مهمترین اجزای سیستم اولتراسونیک میباشد که برای تولید و حفظ ارتعاشات اولتراسونیک در یک ماده، بطور معمول از آن استفاده می‌شود تا سیگنالهای الکتریکی را به حرکات مکانیکی و ارتعاشات مکانیکی را به سیگنالهای الکتریکی تبدیل کند. در این تحقیق برای تولید ارتعاشات اولتراسونیک از ترانسدیوسر پیزوالکتریک ساخت شرکت mpi با توان ۱/۲ کیلووات استفاده شده است (شکل ۲). ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک معمولا حاوی دو تا چهار پیزوسرامیک به شکل حلقه‌ای یا دیسکی هستند که با اعمال ولتاژ متناوب، دیسکهای پیزوسرامیک شروع به انقباض و انبساط کرده و ارتعاشات را به بلوکهای فلزی دو سمت خود منتقل میکنند. ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک به دلیل خاصیت پیزو الکتریسیته، از خود رفتاری نسبتا خطی نشان میدهند. بخاطر تبدیل مستقیم سیگنالهای الکتریکی به ارتعاشات مکانیکی در پیزوسرامیکها، بازدهی این ترانسدیوسرها بسیار بالاتر از ترانسدیوسرهای مگنتواستریکتیو است.



**شکل ۲)** ترنسدیوسر استفاده شده در این تحقیق

بخش نهایی سیستم تمرکزدهنده یا هورن است که نقش انتقال انرژی و تمرکز ارتعاشات بر یک حجم کوچک را دارد. در این تحقیق از هورن نمایی استفاده شده که با استفاده از پیچ به مته متصل شده است. این نوع اتصال که رایج ترین روش اتصال هورت به مته است ضمن ارزانی، از مزایایی از جمله سرعت و سهولت تعویض مته، کارایی بالا در انتقال ارتعاش، عدم لنگی مته، اتصال محکم و سفت را نیز دارا می باشد. نحوه اتصال مته و هورن در این تحقیق در شکل ۳ ارائه شده است.

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.18.1 ]

**شکل ۳)** اتصال هورن و مته بوسیله پیچ

همچنین داده های آزمایش بوسیله دینامومتر پیزوالکتریک که در پشت قطعه بسته شده استفاده شده است. سیگنالهای دریافتی از دینامومتر تقویت و در رایانه جمع آوری و ذخیره شده است. مجموعه ابزار سوراخکاری ارتعاشی استفاده شده در این تحقیق شامل ترانسدیوسر، هورن، مته، قطعه‌کار و پشت بند و دینامومتر به صورت شکل ٤ مونتاژ شده است.

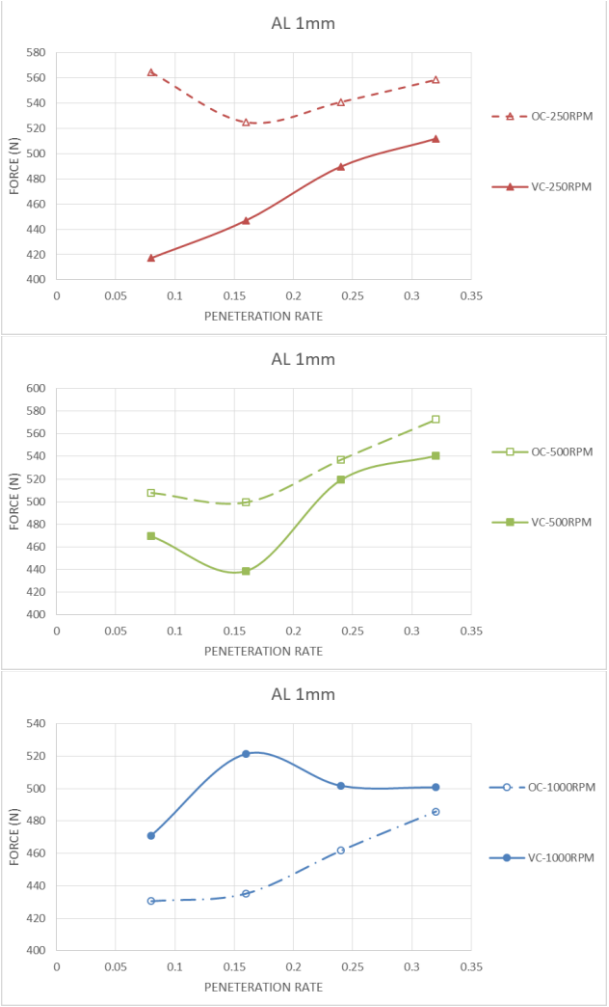
**شکل ۴)** مجموعه ابزار سوراخکاری ارتعاشی

## ۳- نتایج مطالعات آزمایشگاهی

آزمایش سوراخکاری روی سه قطعه‌کار آلومینیومی با ضخامت ۱، ۱/۵ و ۲ میلیمتر در سرعت دوران و پیشروی مختلف، در دو حالت سوراخکاری معمولی (OC) و سوراخکاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک (VC) انجام شد. نمونه‌ای از نتیجه سوراخکاری در شکل ۵ نشان داده شده است.

**شکل ۵)** نمونه ای از نتیجه سوراخکاری قطعه‌کار آلومینیوم

پس از انجام سوراخکاری در شرایط مختلف، حداکثر نیروی محوری سوراخکاری ثبت شده توسط دینامومتر در هر آزمایش به عنوان خروجی استخراج شد. در نمودارهای زیر مقدار حداکثر نیروی محوری در برابر نرخ پیشروی برای سوراخکاری در حالات مختلف ارائه شده است.

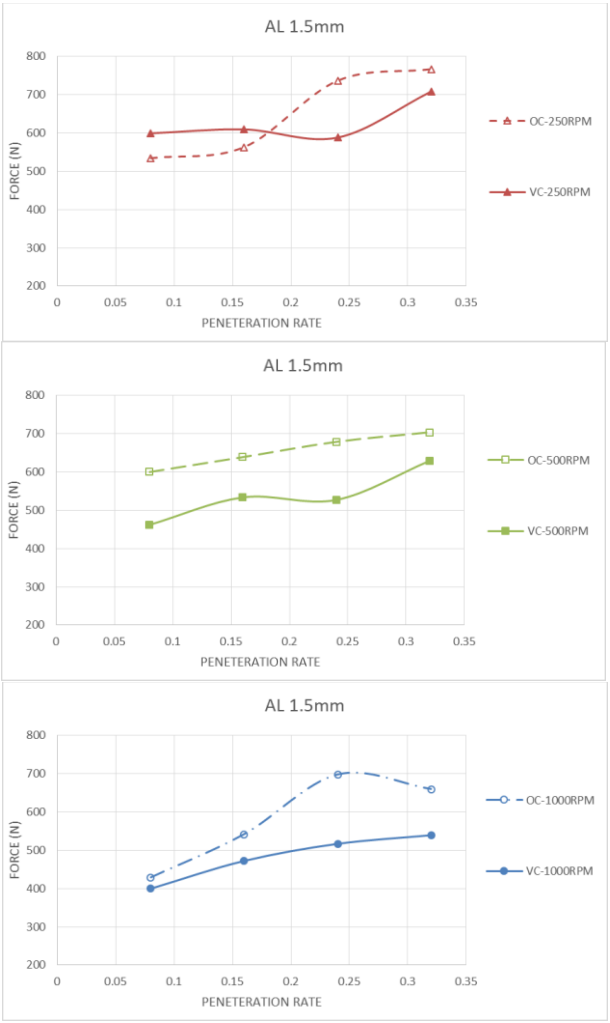



**شکل ۶)** حداکثر نیروی محوری سوراخکاری آلومینیوم ۱ میلیمتر

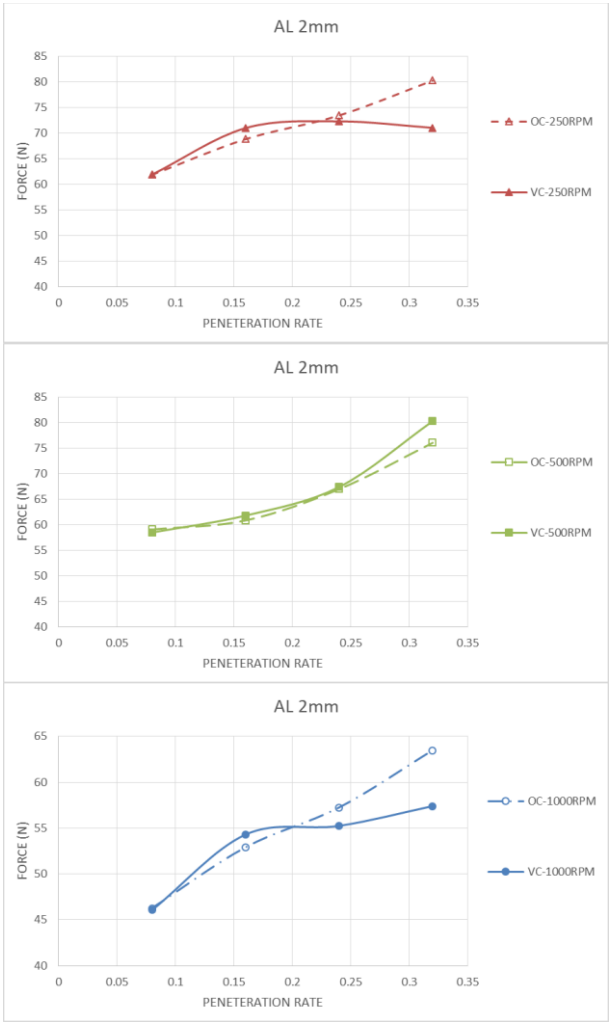
نتایج نشان می دهد که در همه حالات سوراخکاری چه معمولی و چه به کمک ارتعاشات اولتراسونیک بیشترین نیروی محوری متناظر با بیشترین نرخ پیشروی است اما افزایش نیروی محوری در سوراخکاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک نسبت به سوراخکاری معمولی کمتر است. در هر قطعه‌کار با افزایش سرعت دوران، حداکثر نیروی ثبت شده نیز افزایش می یابد. در دو قطعه‌کار آلومینیوم ۱ و ۱/۵ میلیمتر، استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک عموما باعث کاهش نیروی محوری شده است اما در قطعه‌کار ۲ میلیمتری در مورد اثر اضافه کردن ارتعاشات اولتراسونیک نمی‌توان اظهار نظر قطعی نمود. به بیان دیگر می توان گفت که اضافه کردن ارتعاشات اولتراسونیک با دامنه و

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.18.1 ]




**شکل ۷)** نیروی محوری سوراخکاری آلومینیوم ۱/۵ میلیمتر




**شکل ۸)** نیروی محوری سوراخکاری آلومینیوم ۲ میلیمتر

فرکانس ثابت اثر یکسانی بر سوراخکاری در شرایط متفاوت ندارد و برای رسیدن به مطلوب ترین حالت سوراخکاری باید مشخصات ارتعاش بهینه مورد مطالعه قرار گیرد. اگر حالت بهینه سوراخکاری حالتی در نظر گرفته شود که کمترین نیرو به دستگاه وارد شود آنگاه بر اساس نتایج می توان گفت که حالت بهینه برای حفاری قطعه کار ۱ میلیمتر در سرعت دوران ۲۵۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۰۸ میلیمتر بر دور و برای قطعه کار ۱/۵ و ۲ میلیمتری برای شرایط سرعت دوران ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۰۸ میلیمتر بر دور اتفاق می افتد.

## ۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک بر نیروی محوری لازم برای سوراخ کاری قطعه‌کارهای آلومینیوم بوسیله مقایسه نتایج حاصل از سوراخ کاری اولتراسونیک و سوراخکاری معمولی بر روی قطعه‌کار آلومینیوم با سه ضخامت ۱، ۱/۵ و ۲ میلیمتر بررسی شده است. در این مجموعه آزمایش، سوراخ کاری در هر قطعه‌کار، در سه سرعت دوران متفاوت شامل ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و در چهار نرخ پیشروی مختلف شامل ۰/۰۸، ۰/۱۶، ۰/۲۴ و ۰/۳۲ میلیمتر در دور انجام شده است. نتایج به صورت زیر خلاصه شده است:

- که در همه حالات سوراخکاری چه معمولی و چه به کمک ارتعاشات اولتراسونیک بیشترین نیروی محوری متناظر با بیشترین نرخ پیشروی است.
- در هر قطعه‌کار با افزایش سرعت دوران، حداکثر نیروی ثبت شده نیز افزایش می یابد.
- استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک در دو قطعه‌کار آلومینیوم ۱ و ۱/۵ میلیمتر، عموما باعث کاهش نیروی محوری شده است اما در قطعه‌کار ۲ میلیمتری در مورد اثر اضافه کردن ارتعاشات اولتراسونیک نمی‌توان اظهار نظر قطعی نمود.
- اضافه کردن ارتعاشات اولتراسونیک با دامنه و فرکانس ثابت اثر یکسانی بر سوراخکاری در شرایط متفاوت ندارد و برای رسیدن به مطلوب ترین حالت سوراخکاری باید مشخصات ارتعاش بهینه مورد مطالعه قرار گیرد.



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.18.1 ]

## فهرست علائم

| | |
|---|---|
| OD | حفاری معمولی |
| VD | حفاری ارتعاشی |
| OC | سوراخکاری معمولی |
| VC | سوراخکاری اولتراسونیک |

**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان تایید می‌نمایند در ایده، طراحی، اجرا، تجزیه- تحلیل و تالیف مقاله با یکدیگر همکاری داشته‌اند و اعلام می‌دارند دست‌نوشته حاضر برداشت مستقیم از نوشته‌های چاپ شده یا در حال چاپ دیگر تحقیقات نمی‌باشد و این مقاله به زبان انگلیسی یا فارسی در مجله داخلی یا خارجی به چاپ نرسیده است و یا تحت بررسی نمی باشد

**تعارض منافع:** هیچگونه تعارض منافعی بین نویسندگان مقاله وجود ندارد.

**منابع مالی:** کلیه منابع مالی این مقاله توسط نویسندگان تامین شده است.

## مراجع

1- Razavi H, Nategh M. J, Abdullah A, Soleimanimehr H. An Investigation on the Kinematics of Tool-Workepiece's Relative Movement in One-Directional Ultrasonic-Vibration Assisted Turning. Modares Mechanical Engineering. 2011. 11(1): p. 103-115.
2- Brehl D.a, Dow T. Review of vibration-assisted machining. Precision Engineering. 2008. 32(3): p. 153-172.
3- Kumabe J, Fuchizawa K, Soutome T, Nishimoto Y. Ultrasonic superposition vibration cutting of ceramics. Precision Engineering. 1989. 11(2): p. 71-77.
4- Takemaya H, Kato S. Burrless drilling by means of ultrasonic assistance. Annals of CIRP. 1991. 40(1): p. 83-86.
5- Deyuan Z, Lijiang W. Investigation of chip in vibration drilling. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1998. 38(3): p. 165-176.
6- Li Z, Hong M, Su H, Wei Y. Machining accuracy analysis for step multi-element varying-parameter vibration drilling of laminated composite materials. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2003. 21(10): p. 760-768.
7- Babitsky V, Astashev V, Meadows A. Vibration excitation and energy transfer during ultrasonically assisted drilling. Journal of sound and vibration. 2007. 308(3-5): p. 805-814.
8- Chang S.S, Bone G. M. Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance. Robotics and computer-integrated manufacturing, 2005. 21(4-5): p. 442-450.
9- Wang X, Wang L, Tao J. Investigation on thrust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics. Journal of Materials Processing Technology. 2004. 148(2): p. 239-244.
10- Azarhoushang B, Akbari J. Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. 47(7-8): p. 1027-1033.
11- Pujana J, Rivero A, Celaya A, De Lacalle L.L. Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2009. 49(6): p. 500-508.
12- Zhang D.-y, Feng X.-j, Wang L.-j, Chen D.-c. Study on the drill skidding motion in ultrasonic vibration microdrilling. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1994. 34(6): p. 847-857.
13- Liao Y., Chen Y, Lin H. Feasibility study of the ultrasonic vibration assisted drilling of Inconel superalloy. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007. 47(12-13): p. 1988-1996.
14- Ma C. X, Shamoto E, Moriwaki T. Drilling assisted by ultrasonic elliptical vibration. Paper presented at the Key engineering materials. 2005.
15- Chern G.-L, Lee H.-J. Using workpiece vibration cutting for micro-drilling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006. 27(7): p. 688-692.
16- Chang S.S, Bone G. M. Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6. Precision Engineering. 2010. 34(3): p. 369-375.
17- Nambu Y, Ochiai K, Horio K, Kaneko J, Watanabe T, Matsuda S. Attempt to increase step feed by adding ultrasonic vibrations in micro deep drilling. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing. 2011. 5(2): p. 129-138.
18- Eliseev A, Fortuna S, Kolubaev E, Kalashnikova T. Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling. Materials Science and Engineering: A, 2017. 691: p. 121-125.
19- Lee S. M, Chow H. M, Huang F. Y, Yan B.H. Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN-and TiAlN-coated tungsten carbide tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2009. 49(1): p. 81-88.
20- Paktinat H, Amini S, Barani A, Fadaei Tehrani A. Vibration drilling tool and thrust force investigation in vibratory drilling process of Al 2024-T6. Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics. 2015. 26(1): p. 129-142. doi: 10.22067/fum-mech.v26i1.44707 (In Persian)
21- Amini S, Paktinat H, Barani A, Tehran A.F. Vibration drilling of Al2024-T6. Materials and Manufacturing Processes. 2013. 28(4): p. 476-480.

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-10 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1401.22.10.18.1 ]