



The Effect of Ultrasonic Vibrations on the Geometric Accuracy of the Work Piece in Aluminum 6061-T6 Milling



ARTICLE INFO

Authors

Amini S.^{1*},
Rahmanifar M A.²

¹ Department of mechanical engineering, Kashan University, Kashan, Iran.

² Master's degree Student of mechanical engineering, Kashan University, Kashan, Iran.

* Correspondence

Address: Kashan University, Kashan, Iran.

amini.s@kashanu.ac.ir

How to cite this article

AminiS, Rahmanifar M A. The effect of ultrasonic vibrations on the geometric accuracy of the work piece in Aluminum 6061-T6 milling. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):119-124.

ABSTRACT

Achieving the required dimensional and geometrical accuracy as well as the appearance and performance quality in the production of industrial parts and the availability of interchangeability in the assembly and supply of spare parts for products has been one of the important challenges of the industry. In this research, the effect of adding axial ultrasonic vibration to the tool on the geometric accuracy of the Al6061-T6 work piece in the milling process was investigated. By analyzing the results, it was found that the presence of axial ultrasonic vibration improves the parallelism and flatness of the wall and the smoothness of the bottom surface as well as the perpendicularity of the wall with the bottom. It was also observed that a higher feed speed increases geometric deviations and surface roughness, while a higher cutting speed reduces them. By comparing the graphs, it was found that the positive effect of ultrasonic vibrations on the quality of the surface and the geometric accuracy of the work piece is more noticeable in the conditions of lower cutting speed and higher feed; That is, the condition in which we face the worst surface quality and the lowest geometric accuracy in conventional milling.

Keywords Ultrasonic Vibration, Geometric Accuracy, Milling

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۱۹-۱۲۴



اثر ارتعاشات اولتراسونیک بر دقت هندسی قطعه کار در فرزکاری آلومینیوم 6061-T6



چکیده

دستیابی به دقت مورد نیاز ابعادی و هندسی و همچنین کیفیت ظاهری و عملکردی در ماشین‌کاری قطعات صنعتی و میسر شدن تعویض پذیری در مونتاژ و تامین لوازم یدکی محصولات، یکی از چالش‌های مهم صنعت بوده است. در این پژوهش تاثیر افزودن ارتعاش اولتراسونیک محوری به ابزار، روی دقت هندسی قطعه کاری از جنس Al 6061-T6 در فرآیند فرزکاری مورد بررسی قرار گرفت. با تحلیل نتایج مشخص شد که حضور ارتعاش اولتراسونیک محوری توأزی و تختی دیواره و صافی سطح کف و همچنین تعامد دیواره با کف را بهبود میدهد. سرعت پیشروی بیشتر، انحرافات هندسی و زبری سطح را افزایش می‌دهد در حالی که سرعت برشی بیشتر، باعث کاهش آنها می‌شود. با مقایسه نمودارها مشخص شد که اثر مثبت ارتعاشات اولتراسونیک بر کیفیت سطح و دقت هندسی قطعه کار، در شرایط سرعت برشی کمتر و پیشروی بیشتر، محسوس‌تر است؛ یعنی شرایطی که با وجود آن در فرزکاری متداول، با بدترین کیفیت سطح و کمترین دقت هندسی روبرو می‌شویم.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

سعید امینی^{۱*}

محمد علی رحمانی^۲

^۱ عضو هیات علمی گروه ساخت و تولید، دانشگاه کاشان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید، دانشگاه کاشان

* نویسنده مسئول

آدرس: گروه ساخت و تولید، دانشگاه کاشان، کاشان

amini.s@kashanu.ac.ir

کلیدواژه‌ها ارتعاش التراسونیک، دقت هندسی، فرزکاری

۱- مقدمه

رسیدن به ابعاد و هندسه‌ی دقیق در ماشینکاری قطعات صنعتی و میسر شدن کامل تعویض پذیری در مونتاژ و در تامین لوازم یدکی، همواره یکی از نگرانی‌های مهم این حوزه بوده است. در تحقیقات سال‌های گذشته مشخص شده است که با افزودن ارتعاش اولتراسونیک به قطعه کار یا ابزار هنگام براده برداری، به واسطه‌ی جدایش مکرر ابزار و پدید آمدن برش تناوبی و یا تناوبی بیضیگون، نیروهای ماشینکاری کاهش می‌یابند و به تبع آن، عمر ابزار افزایش می‌یابد. همچنین به وضوح مشخص شده است که کیفیت سطح حاصل به جز در موارد خاص افزایش چشمگیری داشته است. از این تکنولوژی ابتدا در فرآیندهای سوراخکاری قطعات سخت و شکننده مثل شیشه و سرامیک‌ها و همچنین برش دادن مواد ترد استفاده می‌شد. اما در سال‌های اخیر با تحقیقات بیشتر تأثیر آن روی فرآیندهای زیاد دیگری مثل سنگ-زنی، تراشکاری، فرزکاری و ساچمه‌زنی بررسی و اثرات آن روی دقت ابعادی، تنش‌های پسماند سطحی و عمر متاثر از خستگی قطعه کار نیز دیده شد. در سال ۲۰۰۵ برای اولین بار اثرات فرزکاری ارتعاشی روی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 مورد بررسی قرار گرفت. ارتعاش مورد نظر از سمت قطعه کار توسط یک میز کار دارای ارتعاش دو بعدی تامین می‌شد. در آن آزمایش شیار تولید شده توسط فرزکاری با ابزار انگشتی سر تخت قطر ۱ میلی‌متر، از نظر دقت ماشینکاری مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد که خطای ابعادی شیار، جایجایی مرکز شیار و زبری سطح شیار را می‌توان با فرزکاری ارتعاشی هنگامی که دامنه نوسان بالا و فرکانس بهینه اعمال شده باشد، باعث افزایش تعداد شیار تولید شده در تلورانس داده شده می‌شود. دقت ابعادی عرض شیار نیز بررسی و مشخص شد که در فرزکاری، استفاده از ارتعاش دو جهته برای به حداقل رساندن خطای ابعادی عرض شیار مفید است [۱].

در سال ۲۰۱۰ اثر پارامترهای فرزکاری اولتراسونیک قطعه کاری از جنس Inconel 718 تجزیه و تحلیل شد. نتایج تجربی نشان داد که ابزار برش، عمق برش، سرعت برشی، نرخ پیشروی، فرکانس و مایع خنک‌کننده به ترتیب از نظر آماری و فیزیکی روی سایش ابزار، زبری سطح و نیروی برش به‌دست‌آمده تأثیر دارند [۲]. همچنین در تحقیقات دیگری که در این سال انجام شد میکرو ماشینکاری با کمک ارتعاش دو بعدی برای ماشینکاری فولاد ابزار سخت شده (HRC 55 و HRC 58) به منظور بهبود ماشینکاری آن به کار گرفته شد. آزمایش‌هایی برای بررسی تأثیر پارامترهای ارتعاش بر روی زبری سطح و سایش ابزار انجام گردید و مشخص شد که میکرو ماشینکاری با کمک ارتعاش دو بعدی می‌تواند زبری سطح را بهبود بخشد و سایش ابزار را در مقایسه با فرزکاری سنتی کاهش دهد و دامنه ارتعاش بزرگتر و فرکانس بالاتر برای بهبود زبری سطح و

کاهش سایش ابزار مفید است. در این بررسی، میکرو ماشینکاری با کمک ارتعاش دو بعدی، به‌عنوان یک روش موثر برای فرزکاری فولادهای ابزار سخت شده معرفی گردید و پیشنهاد شد تا در ساخت قالب‌ها جهت افزایش راندمان ماشینکاری، کیفیت سطح و عمر ابزار از آن استفاده شود [۳]. در سال ۲۰۱۱ اثرات ارتعاش اولتراسونیک در عملیات میکرو فرزکاری با ابزار سر تخت بررسی و با تجزیه و تحلیل عددی روی مسیر نوک ابزار برای تیغ فرز انگشتی سر تخت دو پُر، مشخص شد که با فرزکاری با کمک ارتعاش اولتراسونیک که جهت ارتعاش آن در جهت پیشروی باشد، می‌توان به نوع جدیدی از فرزکاری دست یافت که با فرزکاری متداول، متفاوت است. جهت بررسی تأثیر ارتعاش اولتراسونیک بر فرآیند فرزکاری، یک آزمایش فرزکاری شیاری بر روی یک قطعه کار از جنس آلیاژ آلومینیوم انجام شد. ارتعاش اولتراسونیک مورد نظر در جهت پیشروی و توسط یک وایبراتور اولتراسونیک اعمال شد. از طریق بررسی و مقایسه برخی از نتایج تجربی شامل نیروی برش، شکل براده، توپوگرافی سطح، زبری سطح، و دقت ابعادی ماشینکاری، محققان دریافتند که میکرو فرزکاری با ابزار سر تخت به کمک ارتعاش اولتراسونیک اعمال شده در جهت پیشروی، منجر به نیروی برشی پالسی خواهد شد و براده‌های کوچک‌یکناختی تولید می‌کند. همچنین آنها مشاهده کردند که ارتعاش اولتراسونیک در جهت پیشروی، روی کیفیت سطح کف شیار اثر منفی دارد اما بر دقت ابعادی عرض شیار تأثیر مثبت دارد [۴]. در سال ۲۰۱۲ با بررسی تجربی اثرات ارتعاش اولتراسونیک بر روی زبری سطح تولید شده توسط لبه برش کناری یک تیغ فرز انگشتی سر تخت مشخص شد که زبری سطح عمودی جانبی شکاف پس از استفاده از ارتعاش اولتراسونیک به وضوح بهبود می‌یابد. نتایج ANOVA نشان داد که زبری سطح هدف، به عملکرد ترکیبی چندین پارامتر کلیدی ماشینکاری در UVAM بستگی دارد، بنابراین انتخاب و بهینه‌سازی آنها برای دستیابی به زبری سطح کمتر، بسیار مهم است [۵]. همچنین در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۲ در زمینه فرزکاری جانبی با کمک اولتراسونیک یک بعدی روی فولاد ضد زنگ AISI 420 صورت گرفت، به منظور بررسی تجربی نیروهای برش و زبری سطح قطعه کار، فرآیندهای فرزکاری متداول و فرزکاری اولتراسونیک انجام و در شرایط برش مشخصی مقایسه شدند. نتایج نشان داد که میانگین نیروهای برشی در فرزکاری اولتراسونیک کمتر از فرزکاری متداول است و بسته به پارامترهای برش، زبری سطح قطعه کار در فرزکاری اولتراسونیک می‌تواند بهبود یابد. در حالت مقدار پیشروی کم، تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک بر کاهش نیروهای برش در فرزکاری مخالف بیشتر محسوس است، در حالی که در پیشروی‌های بزرگتر، به کارگیری فرزکاری اولتراسونیک در فرزکاری موثرتر است. در نرخ پیشروی کم، سرعت برشی زیاد و فرزکاری مخالف، تأثیر ارتعاشات

توجه به: انواع مختلف فرزکاری، کاهش نیروی برشی متوسط، مقدار نیرو و حداکثر نیروی برشی در جهت پیشروی، می‌تواند با اتخاذ دامنه ارتعاش بهینه، تا حد زیادی کاهش یابد. نتایج همچنین نشان داد که ترکیبی بهینه از پارامترهای ماشینکاری برای دستیابی به نیروی برشی کمتر مفید است. در این تحقیق با توجه یافته‌های تجربی عنوان شد که فرزکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک یک فناوری آینده نگر برای دستیابی به فرزکاری دقیق قطعات کوچک است [۱۰]. در مطالعه ای در سال ۲۰۱۹، اثر پارامترهای فرآیند فرزکاری اولتراسونیک شامل: قدرت ارتعاش اولتراسونیک، سرعت دورانی، عمق برش و نرخ پیشروی ارزیابی شد. یک سیستم آزمایشی برای انجام فرآیند فرزکاری اولتراسونیک با ارتعاشات محوری طراحی و توسعه داده شد. نتایج حاکی از آن بود که موثرترین پارامتر برای نیروهای برشی، سرعت پیشروی است، اما انحراف معیار آن تحت تأثیر سرعت دورانی قرار دارد. همچنین وجود ارتعاش محوری باعث کاهش میانگین نیروی برش شد و انحراف معیار آن را افزایش داد. به منظور ارزیابی اثر ارتعاشات اولتراسونیک محوری، شبیه سازی برای مطالعه سینماتیک برش در فرآیند UAM انجام شد. شبیه سازی‌ها نشان داد که حضور ارتعاش پیچشی در نوک برش، باعث برش متناوب می‌شود [۱۱]. پژوهش دیگری در همین سال بر روی فرزکاری قطعات هوافضایی در حالت‌های متداول و اولتراسونیک انجام گرفت و نتایج آن نشان داد که تکنیک‌های ماشینکاری اولتراسونیک برای آلیاژهایی که قابلیت ماشینکاری پایینی دارند (سخت تراش) مزایای بالقوه ای دارد [۱۲]. با توجه به تأثیر قابل توجه دمای ماشینکاری روی نرخ سایش ابزار و تنش‌های پسماند حرارتی، در یک تحقیق در سال ۲۰۲۰، یک مدل پیش بینی دمای ماشینکاری در فرزکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک، پیشنهاد شد [۱۳]. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۲، اثرات دامنه اولتراسونیک، نرخ تغذیه و سرعت برش بر روی سطح ماشین‌کاری شده در فرآیند فرزکاری تیتانیوم TC18 به کمک ارتعاش اولتراسونیک طولی-پیچشی بررسی شد و مورفولوژی، زبری سطح، تنش پسماند سطحی و ریزساختار زیرسطحی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، اولتراسونیک طولی-پیچشی در دامنه زیاد، نرخ تغذیه کم و سرعت برش بالا، می‌تواند به شکل‌گیری ریز ساختار سطحی واضح تر و بافت سطح منظم‌تر و متمایزتر کمک کند. در مقایسه با فرزکاری معمولی، فرزکاری اولتراسونیک با ارتعاش طولی-پیچشی، زبری سطح و تنش پسماند سطحی بیشتر و یک لایه تغییر شکل پلاستیک عمیق تر و بسیار آشفته ایجاد می‌کند. بطوریکه با دامنه ارتعاش بزرگتر تنش پسماند سطحی بیشتر و لایه تغییر شکل پلاستیک عمیق تر می‌شود. با دامنه ۵ میکرومتر، تنش پسماند سطحی ۴۰/۶-۵۰/۶-مگاپاسکال و عمق لایه تغییر شکل پلاستیک ۵/۴ میکرومتر بود. تنش و عمق به ترتیب ۲۱/۵۵ درصد

اولتراسونیک بر زبری سطح، بیشتر محسوس است [۱۴]. در پژوهشی که در سال ۲۰۱۳ روی میکرو فرزکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک (UVAM) با ارتعاش طولی قطعه کار صورت گرفت، با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌ها برای بررسی زبری سطح Al6061 ماشینکاری شده توسط میکرو فرزکاری با و بدون ارتعاش اولتراسونیک مشخص شد که سطح Al6061 ماشینکاری شده توسط UVAM به شرط انتخاب دامنه ارتعاش مناسب، در مقایسه با ماشینکاری توسط میکرو فرزکاری معمولی دارای مقدار زبری کمتری است. همچنین تاثیر دامنه ارتعاش‌های مختلف بر روی زبری سطح Al6061 ماشینکاری شده توسط UVAM تجزیه و تحلیل شد و مشخص گردید که دامنه ارتعاش اولتراسونیک با توجه به زبری سطح Al6061 ماشینکاری شده توسط UVAM دارای مقداری بهینه است؛ و اینگونه نیست که هرچه دامنه ارتعاش بزرگتر باشد بهتر است [۱۵]. در یک بررسی در سال ۲۰۱۶ اثرات فرکانس در فرزکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک (UVAM) با ارتعاش محوری ابزار مورد مطالعه قرار گرفت و یک سری آزمایش فرزکاری روتراشی در شرایط خشک بر روی AISI 316L انجام شد. زبری سطوح تمام شده به همراه سایش ابزار برای فرزکاری معمولی و UVAM با مجموعه‌ای از فرکانس‌ها (۲۰-۴۰-۶۰ کیلوهرتز) در طیف گسترده ای از شرایط برش، بررسی شد. برای بررسی اثرات پنهان UVAM نیز از تنش‌های پسماند سطحی و نمونه‌های متالوگرافی استفاده شد. نتایج تجربی در حالت UVAM مقادیر مطلوب تری را برای هر دو مورد زبری سطح و تنش پسماند در مقایسه با فرزکاری معمولی نشان داد، به ویژه در حالت فرکانس پایین، و روندی مشابه در مورد سایش ابزار [۱۶]. در مقاله ای در سال ۲۰۱۸ فناوری فرزکاری با کمک ارتعاش اولتراسونیک (UVA) با ارتعاش قطعه کار در جهت پیشروی به منظور افزایش دقت ماشینکاری ارائه شد و ویژگی‌های تغییر شکل فرزکاری UVA آلیاژ تیتانیوم TC4 قطعات جدار نازک مورد بررسی قرار گرفت. از طریق تحلیل تئوری، نیروی برش و ویژگی‌های تغییر شکل در فرزکاری UVA مشخص شد. بر اساس تحلیل دامنه متعامد آزمایش، اثرات پارامترهای فرزکاری و دامنه ارتعاش بر انحراف جابجایی و تغییر شکل در فرزکاری قطعات به دست آمد. نتایج تحقیقات نشان داد که انحراف جابجایی در فرآیند فرز UVA بر خطای ضخامت جداره تأثیر می‌گذارد [۱۷]. پژوهش دیگری در همین سال از طریق یک سری آزمایشات فرزکاری شیاری به بررسی تغییرات نیروی ماشینکاری در فرآیند فرزکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک پرداخت. محتویات اصلی این تحقیق شامل دو بخش بود، یکی تأثیر حضور ارتعاش بر نیروی فرزکاری، و دیگری تأثیر تطبیق پارامترهای ماشینکاری و ارتعاش بر مقدار نیروی فرزکاری. نتایج تجربی نشان داد که ارتعاش اولتراسونیک می‌تواند شرایط فرزکاری سنتی را تغییر دهد. دستیابی به پروفیل نیروهای برشی مشابه و پالسی با

۸۵/۲٪ و ۵۴/۵٪ کمتر از CM و LVAM است. همچنین مشخص شد که ابزار پیشنهادی LBHVAM نه تنها دارای مزایای منحصره فردی در کاهش نیروی برش و تشکیل پلیسه است، بلکه دارای پتانسیل زیادی در بهبود دقت ماشین‌کاری است، که در ماشین‌کاری فوق دقیق مواد سخت تراش بسیار مطلوب است [۱۶]. در مقاله دیگری که در سال ۲۰۲۳ به چا® رسید برای حل مشکل عیوب جدی سطح ماشین‌کاری شده‌ی کف شیار، از تکنیک فرزکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک طولی برای ماشین‌کاری شیار در قطعه کاری از جنس آلیاژ Al-Si استفاده شد. در این پژوهش تغییرات نیروی برش و دمای ماشین‌کاری، نسبت به تغییر دامنه ارتعاش، مورد مطالعه قرار گرفت و تمرکز آن روی تأثیر دامنه ارتعاش بر مکانیسم برش و وضعیت سطح کف شیار در فرزکاری دقیق و غیر دقیق بود. نتایج نشان داد که احتمال شکستگی و پوسته شدن ذرات Si در فرزکاری اولتراسونیک با افزایش دامنه ارتعاش، کاهش می‌یابد. آزمایش محققین نشان داد که کیفیت شیار ماشین‌کاری شده آلیاژ Al-Si را می‌توان با انتخاب دامنه ارتعاش بهینه‌شده در فرزکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک طولی بهبود بخشید [۱۷].

۲- روش انجام

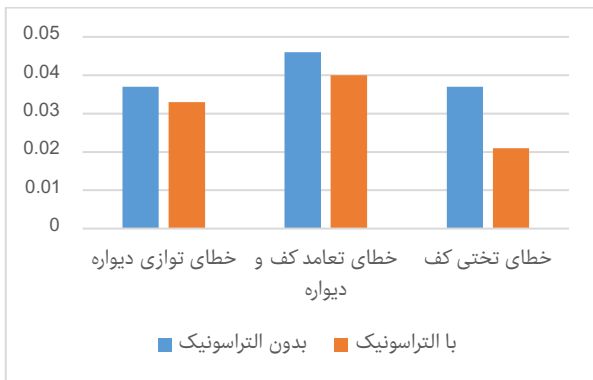
هشت آزمایش مطابق جدول ۱ طراحی شد. قطعه کاری از جنس آلومینیوم 6061-T6 با ابعاد ۲۵*۱۲۰*۱۸۰ میلی‌متر دارای هشت شیار با عرض ۱۵ و عمق ۶ میلی‌متر تهیه گردید. در هر شیار یک آزمایش انجام شد؛ به این صورت که کف و دیواره‌های هر شیار با عمق ۰/۳ میلی‌متر توسط ابزار انگشتی ۶ میلی‌متر دو پر، فرزکاری شد. چهار شیار با کمک ارتعاش اولتراسونیک و چهار شیار بدون ارتعاش اولتراسونیک فرزکاری گردید. فرکانس ارتعاش اولتراسونیک ۲۶۳۵۰ هرتز و بیشینه دامنه‌ی آن برابر با ۱۰ میکرومتر بود. برای هر آزمایش انحرافات هندسی از قبیل تعامد دیواره با کف، توازی دیواره‌ها نسبت به یکدیگر و تختی و زبری سطح کف شیار اندازه‌گیری و ثبت شد.

و ۱۳۴/۷۸ درصد در مقایسه با فرزکاری معمولی افزایش یافت. افزایش در نرخ تغذیه زبری سطح را افزایش و تنش پسماند سطحی را کاهش داد و تأثیر قابل توجهی در عمق لایه تغییر شکل پلاستیک نداشت. هنگامی که نرخ تغذیه ۰/۰۱ میلی‌متر بر z بود، زبری سطح ۰/۳۸۳ میکرومتر بود و تنش پسماند سطحی ۴۷۹/۱- مگاپاسکال بود. نرخ تغذیه و زبری سطح ۴۲/۶۳ و ۲۰/۶۲ درصد به ترتیب در مقایسه با فرزکاری معمولی افزایش یافت. با افزایش سرعت برش، زبری سطح افزایش و تنش پسماند سطحی و عمق لایه تغییر شکل پلاستیک کاهش یافت. هنگامی که سرعت برش ۱۵ متر در دقیقه بود، زبری ۰/۳۱ میکرومتر و مقدار تنش پسماند سطحی ۴۵۴/۷- مگاپاسکال بود. و عمق لایه تغییر شکل پلاستیک ۵/۷ میکرومتر بود. این سه پارامتر در مقایسه با فرزکاری معمولی به ترتیب ۱۷/۸٪، ۱۸/۷۹٪ و ۹۲/۵٪ افزایش یافت [۱۴]. در پژوهش دیگری که در همین سال انجام شد، طراحی و ساخت ابزار ماشین‌کاری با کمک اولتراسونیک دوار مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور ارزیابی این ابزار، فرآیند فرزکاری بر روی کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با فیبر کربن و تیتانیوم انجام شد. نیروهای برش، زبری سطح و بیرون زدگی الیاف به عنوان عوامل کلیدی برای تجزیه و تحلیل انتخاب شدند. در نتیجه مشاهده شد که ابزار ساخته شده عملکرد خوبی در فرزکاری مواد پیشرفته دارد. همچنین بیرون زدگی الیاف نیز زمانی که از ابزار اولتراسونیک در فرزکاری کامپوزیت یاد شده استفاده می‌شد، حذف شد. علاوه بر این، زبری سطح حدود ۱۵٪ کاهش یافت [۱۵]. در پژوهشی دیگر که در سال ۲۰۲۲ در زمینه فرزکاری اولتراسونیک انجام شد، یک روش جدید مبتنی بر مبدل ترکیبی طولی-خمشی (LBHT) آزمایش شد. نتایج این آزمایش نشان داد که نیروی برش آلیاژ تیتانیوم در حالت فرزکاری اولتراسونیک با ارتعاش ترکیبی طولی-خمشی (LBHVAM)، ۳۹/۳٪ و ۲۷/۲٪ کمتر از فرزکاری معمولی (CM) و فرزکاری به کمک ارتعاش طولی (LVAM) است و تمایل به تشکیل پلیسه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، زبری سطح میانگین تحت LBHVAM به ۰/۱۰۲ میکرومتر می‌رسد، که

جدول ۱- طراحی آزمایش‌ها و خروجی‌های ثبت شده

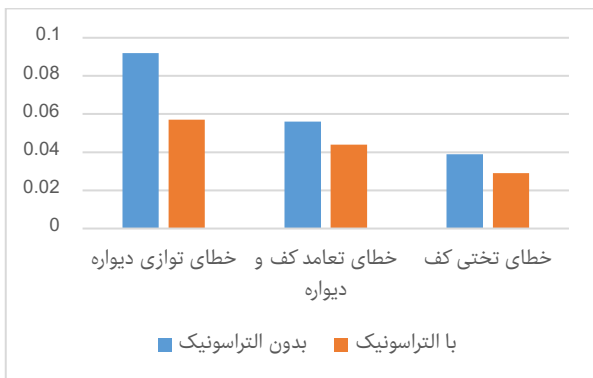
شماره آزمایش	عمق بار (میلی‌متر)	سرعت برشی (دور بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	دامنه ارتعاش (میکرومتر)	توازی دیواره‌ها (میلی‌متر)	تعامد دیواره با کف (میلی‌متر)	تختی کف (میلی‌متر)	زبری سطح (میکرومتر)
۱	۰/۳	۵۶۵	۶۳	۰	۰/۰۸۴	۰/۰۵۵	۰/۰۴۲	۶/۴
۲	۰/۳	۵۶۵	۶۳	۱۰	۰/۰۵۹	۰/۰۴۴	۰/۰۲۰	۴/۲
۳	۰/۳	۵۶۵	۱۳۲	۰	۰/۱۳۷	۰/۰۷۶	۰/۰۵۹	۹/۸
۴	۰/۳	۵۶۵	۱۳۲	۱۰	۰/۰۴۳	۰/۰۳۷	۰/۰۲۳	۳/۹
۵	۰/۳	۱۵۰۰	۶۳	۰	۰/۰۳۷	۰/۰۴۵	۰/۰۳۷	۳
۶	۰/۳	۱۵۰۰	۶۳	۱۰	۰/۰۳۳	۰/۰۴۰	۰/۰۲۱	۲/۱
۷	۰/۳	۱۵۰۰	۱۳۲	۰	۰/۰۵۷	۰/۰۴۴	۰/۰۳۹	۵
۸	۰/۳	۱۵۰۰	۱۳۲	۱۰	۰/۰۹۲	۰/۰۵۶	۰/۰۲۹	۴/۳

نمودار ۳ - تاثیر ارتعاش اولتراسونیک بر انحرافات هندسی - سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه - سرعت پیشروی ۶۳ میلی‌متر بر دقیقه



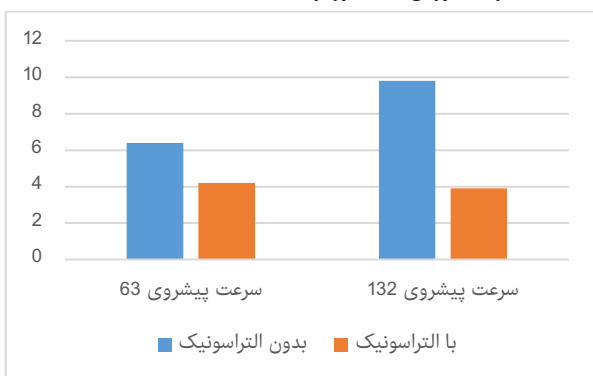
خطاهای هندسی در هر دو حالت فرزکاری و با سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۳۲ میلی‌متر بر دقیقه، در نمودار ۴ نشان داده شده است. با این شرایط ماشینکاری، ارتعاش اولتراسونیک تأثیری کمتر و حدوداً مشابهی را در اصلاح انحرافات هندسی مختلف نشان می‌دهد.

نمودار ۴ - تاثیر ارتعاش اولتراسونیک بر انحرافات هندسی - سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه - سرعت پیشروی ۱۳۲ میلی‌متر بر دقیقه



در نمودار ۵ زبری سطح حاصله با سرعت دورانی ۵۶۵ دور بر دقیقه در پیشروی‌های مختلف نشان داده شده است.

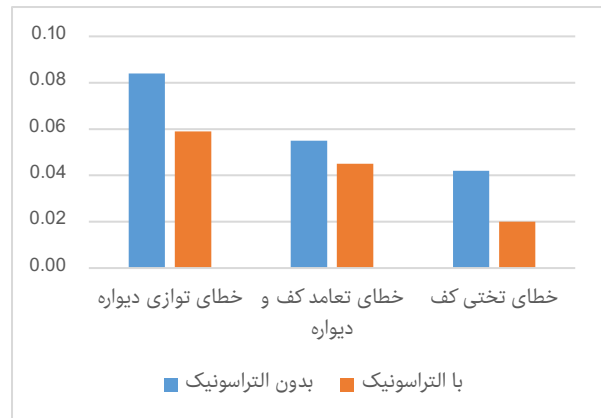
نمودار ۵ - تاثیر ارتعاش اولتراسونیک بر زبری سطح در پیشروی‌های مختلف - سرعت دورانی ۵۶۵ دور بر دقیقه



۳- نتایج و بحث

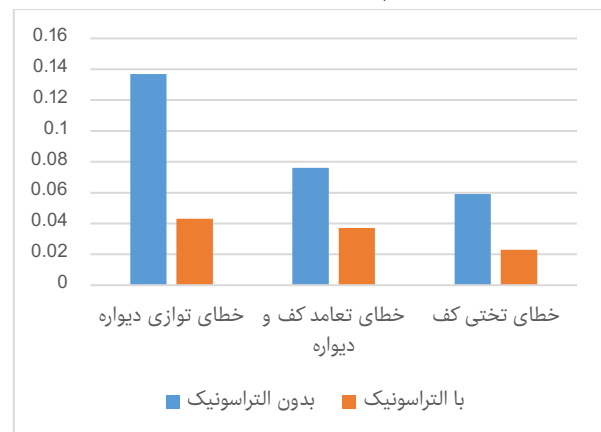
خطاهای هندسی سطوح کف و دیواره در هر دو حالت فرزکاری با کمک ارتعاش اولتراسونیک و بدون ارتعاش اولتراسونیک با سرعت دورانی ۵۶۵ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۶۳ میلی‌متر بر دقیقه، در نمودار ۱ نشان داده شده است. با این پارامترها، بیشترین تاثیر ارتعاش اولتراسونیک به ترتیب در اصلاح خطای تختی کف و توازی دیواره‌ها بوده است.

نمودار ۱ - تاثیر ارتعاش اولتراسونیک بر انحرافات هندسی - سرعت دورانی ۵۶۵ دور بر دقیقه - سرعت پیشروی ۶۳ میلی‌متر بر دقیقه



خطاهای هندسی در هر دو حالت فرزکاری و با سرعت دورانی ۵۶۵ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۳۲ میلی‌متر بر دقیقه، در نمودار ۲ نشان داده شده است. با این پارامترها، بیشترین تاثیر ارتعاش اولتراسونیک به ترتیب در اصلاح خطای توازی دیواره‌ها و تختی کف بوده است.

نمودار ۲ - تاثیر ارتعاش اولتراسونیک بر انحرافات هندسی - سرعت دورانی ۵۶۵ دور بر دقیقه - سرعت پیشروی ۱۳۲ میلی‌متر بر دقیقه

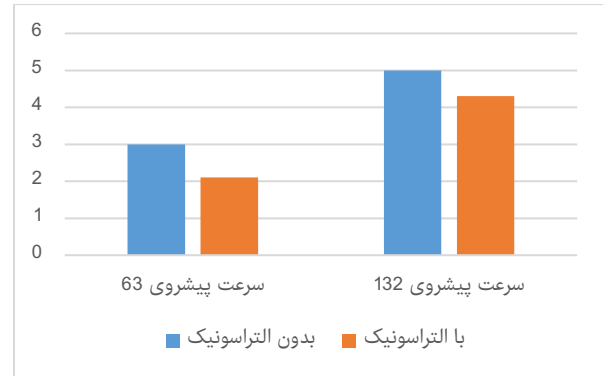


انحرافات هندسی در هر دو حالت فرزکاری و با سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۶۳ میلی‌متر بر دقیقه، در نمودار ۳ نشان داده شده است. در این شرایط، بیشترین تاثیر ارتعاش اولتراسونیک در اصلاح انحراف تختی کف بوده است.

- using two dimensional vibration-assisted micro-end-milling. *Journal of Engineering Manufacture*, 2010; 224(12): 1775-1783.
- 4- Shen, X. H., Zhang, J. H., Li, H., Wang, J. J., Wang, X. C. Ultrasonic vibration assisted milling of aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012; 63: 41-49.
 - 5- Shen, X. H., Zhang, J. H., Li, H., Wang, J. J. Study on Surface Roughness of Ultrasonic Vibration Assisted Milling. *Advanced Materials Research*. 2012; 426: 309-312.
 - 6- Abootorabi Zarchi, M. M., Razfar, M. R., & Abdullah, A. Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013; 66: 83-89.
 - 7- Lian, H., Guo, Z., Huang, Z., Tang, Y., Song, J. Experimental research of Al6061 on ultrasonic vibration assisted micro-milling. *Procedia Cirp*. 2013; 6: 561-564.
 - 8- A. Maurotto, C.T. Wickramarachchi. Experimental investigations on effects of frequency in ultrasonically-assisted end-milling of AISI 316L. *Ultrasonics*. 2016; 65: 113-120.
 - 9- Jiao, F., Zhao, L., Yao, C. L., & Qi, F. Research on milling deformation in ultrasonic vibration assisted end milling of titanium alloy thin-walled parts. *Key Engineering Materials*. 2018; 764: 174-183.
 - 10- Shen, X. H., Xu, G. F. Study of milling force variation in ultrasonic vibration-assisted end milling. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018; 33(6): 644-650.
 - 11- Verma, G. C., Pandey, P. M. Machining forces in ultrasonic vibration assisted end milling. *Ultrasonics*. 2019; 94: 350-363.
 - 12- Tapoglou, N., Taylor, C. Ultrasonic Vibration Assisted Milling of Aerospace Materials. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2019. p. V02AT02A023
 - 13- Feng, Y., Hsu, F. C., Lu, Y. T., Lin, Y. F., Lin, C. T., Lin, C. F., Liang, S. Y. Temperature prediction of ultrasonic vibration-assisted milling. *Ultrasonics*. 2020; 108: 106-212.
 - 14- Xie, W., Wang, X., Zhao, B., Li, G., Xie, Z. Surface and subsurface analysis of TC18 titanium alloy subject to longitudinal-torsional ultrasonic vibration-assisted end milling. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022; 929: 167-259.
 - 15- Lotfi, M., Charkhian, A., Akbari, J. Surface analysis in rotary ultrasonic-assisted milling of CFRP and titanium. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022; 84: 174-182.
 - 16- Du, P., Han, L., Qiu, X., Chen, W., Deng, J., Liu, Y., Zhang, J. Development of a high-precision piezoelectric ultrasonic milling tool using longitudinal-bending hybrid transducer. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022; 222: 107239
 - 17- Jing, L., Niu, Q., Yue, W., Rong, J., Gao, H., & Tang, S. Groove bottom material removal mechanism and machinability evaluation for longitudinal ultrasonic vibration-assisted milling of Al-50wt%Si alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023; 127.1: 365-380.

در نمودار ۶ زبری سطح به دست آمده با سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در پیشروی‌های مختلف به نمایش درآمده است.

نمودار ۶ - تاثیر ارتعاش اولتراسونیک بر زبری سطح در پیشروی‌های مختلف - سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه



۴- نتیجه‌گیری

با بررسی نمودارهای حاصل از نتایج آزمایشات، مشخص می‌شود که وجود ارتعاش اولتراسونیک محوری در ابزار، توازی دیواره‌ها، تختی و صافی سطح کف و همچنین تعامد دیواره با کف را بهبود می‌دهد. همچنین مشاهده شد که سرعت پیشروی بیشتر، انحرافات هندسی و زبری سطح را افزایش می‌دهد، در حالی که سرعت برشی بیشتر، باعث کاهش آنها می‌شود. با مقایسه نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که اثر مثبت ارتعاشات اولتراسونیک بر کیفیت سطح و دقت هندسی قطعه کار، در شرایط سرعت برشی کمتر و پیشروی بیشتر، محسوس‌تر است؛ یعنی شرایطی که با وجود آن در فرزکاری متداول، با بدترین کیفیت سطح و کمترین دقت هندسی روبرو می‌شویم.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان متعهد می‌شوند کلیه نتایج به دست آمده حاصل تحقیقات ایشان است.

تعارض منافع: نویسندگان متعهد می‌شوند نتایج به دست آمده هیچگونه تعارضی با منافع اشخاص حقیقی و حقوقی ندارد.

منابع مالی: هزینه‌های تحقیق انجام شده توسط محققین تامین گردیده است.

مراجع

- 1- Chern, G. L., Chang, Y. C. Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006; 46(6): 659-666.
- 2- Hsu, C. Y., Tsao, C. C., Huang, C. H., Lin, Y. C. A Study on ultrasonic vibration milling of inconel 718. *Key Engineering Materials*. 2010; 419: 373-377.
- 3- Ding, H., Chen, S. J., Cheng, K. Experimental study on machinability improvement of hardened tool steel