

تأثیر جهت ارتعاش بر نیروی برشی در فرزکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک

محمد مهدی ابوترابی زارچی*
استادیار گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه یزد
abootorabi@yazd.ac.ir

امیر عبدالله
دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
amirah@aut.ac.ir

محمدرضا رازفر
دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
razfar@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

چکیده

در فرایند ماشینکاری، کاهش نیروی برشی مزایای بسیاری چون افزایش عمر ابزار و بهبود کیفیت سطح ماشینکاری دارد. از جمله روش‌های جدید برای کاهش نیروی برشی، ماشینکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک است. در این مقاله، تأثیر جهت اعمال ارتعاش اولتراسونیک به قطعه کار در فرایند فرزکاری به کمک اولتراسونیک^۱ بر نیروهای برشی به صورت تجربی با انجام دو مجموعه متفاوت آزمایشی و به کمک یک تنظیم تجربی مخصوص مطالعه شده است. در مجموعه نخست، که جهت پیشروی ابزار همراه با ارتعاش قطعه کار است، نیروهای برشی به دلیل جدایش ابزار و قطعه کار از یکدیگر در قسمت‌هایی از هر سیکل ارتعاشی، به طور متوسط ۱۶/۷ درصد نسبت به فرزکاری معمولی^۲ کاهش یافته‌اند. در مجموعه دوم اما، که پیشروی ابزار عمود بر راستای ارتعاش قطعه کار است، نیروهای برشی در فرزکاری اولتراسونیک به طور متوسط ۵۳/۵ درصد نسبت به فرزکاری معمولی افزایش یافته‌اند. دلیل این افزایش نیرو، وجود ضربه‌های جانبی متوالی بین ابزار و قطعه کار و عدم جدایش آنها از یکدیگر است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که تغییر رفتار اصطکاک در فرزکاری اولتراسونیک تأثیری بر کاهش نیروی برشی ندارد و دلیل اصلی کاهش نیروی برشی در فرایندهای ماشینکاری ارتعاشی، جدایش ابزار و قطعه کار به سبب اعمال ارتعاش است. در حالتی که پیشروی ابزار و ارتعاش قطعه کار همراستاست، برخلاف عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی، سرعت برشی بر میزان کاهش نیروی برشی در فرزکاری به کمک اولتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی مؤثر است، به گونه‌ای که با افزایش سرعت برشی، نیروی برشی در این دو فرایند به یکدیگر نزدیک می‌شود.

واژگان کلیدی: فرزکاری به کمک اولتراسونیک، فرزکاری معمولی، نیروی برشی، راستای ارتعاش

۱. مقدمه

اکثر آنها با روش‌های سنتی بسیار سخت و غیراقتصادی است. با افزایش نیاز به ماشینکاری این مواد، در سال‌های

در سال‌های اخیر، با پیشرفت روزافزون علم مواد، مواد مرکب و آلیاژهای بسیاری ساخته شده‌اند که ماشینکاری

گذشته فناوری‌های ماشینکاری پیشرفته‌ای ارائه شده است. از جمله این فناوری‌ها، افزودن ارتعاش اولتراسونیک با دامنه کم (۲ تا ۳۰ میکرومتر) و فرکانس بالا (۱۶ تا ۴۰ کیلوهرتز) به حرکت معمولی ابزار برشی یا قطعه‌کار است [۱]. مزایای متعددی چون کاهش نیروی برشی، بهبود صافی سطح، افزایش عمر ابزار و افزایش دقت ماشینکاری برای فرایندهای ماشینکاری به کمک ارتعاش گزارش شده است [۲-۵]. این در حالی است که تاکنون مطالعات اندکی در مورد فرایند فرزکاری به کمک اولتراسونیک انجام شده و داده‌های تجربی و روابط تحلیلی در مورد آن بسیار اندک است [۶-۸].

چرن و چانگ (۲۰۰۶) تأثیر ارتعاش اولتراسونیک دوبعدی بر کیفیت میکروفرزکاری آلیاژ آلومینیم Al6061-T6 را بررسی و مشاهده کردند که دقت عرض شیار و صافی سطح شیار بهبود یافت، عمر ابزار افزایش پیدا کرد و نیروهای برشی کم شد [۷]. دینگ و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل سه‌بعدی برای نیروی برشی در فرایند میکرو فرزکاری به کمک ارتعاش دوبعدی را ارائه و نتیجه گرفتند که افزایش دامنه ارتعاش سبب افزایش ماکزیمم نیروی برشی می‌شود [۸]. در این مقاله، برای انتقال پربازده امواج اولتراسونیک به قطعه‌کار در فرایند فرزکاری، یک تنظیم تجربی خاص ارائه و سپس، تأثیر جهت اعمال ارتعاش اولتراسونیک بر نیروهای برشی با انجام دو مجموعه آزمایشی مختلف بررسی شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که همراستابودن یا نبودن جهت پیشروی ابزار با راستای ارتعاش اولتراسونیک، کاملاً بر نیروهای برشی در فرایند فرزکاری به کمک اولتراسونیک مؤثر است.

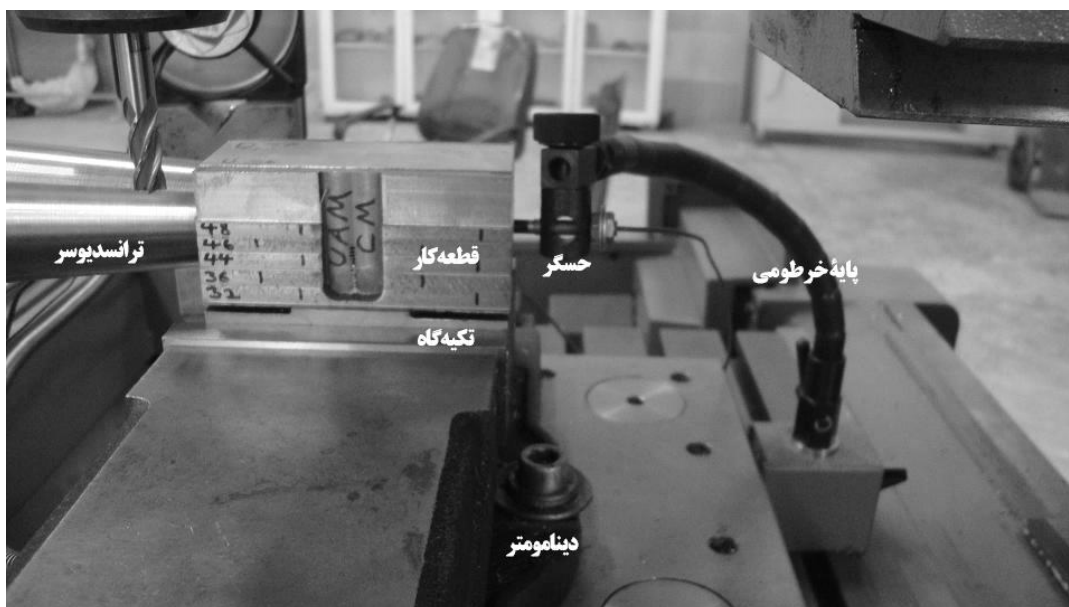
۲. تنظیم تجربی

آزمایش‌های فرزکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک روی یک ماشین فرز ۲/۵ محوره سی. ان. سی. انجام شده است. برای اعمال ارتعاش یک‌بعدی به قطعه‌کار از یک ترانسدیوسر^۴ پیزوالکتریک با توان ۳ کیلووات استفاده شده

است. منبع تغذیه اولتراسونیک با توان ۲ کیلووات ساخت شرکت ام. پی. آی. اولتراسونیک^۵، منبع الکتریکی ۵۰ هرتز را به یک فرکانس بالا تبدیل می‌کند. این پالس‌های الکتریکی فرکانس بالا به ترانسدیوسر وارد و به ارتعاش مکانیکی با فرکانس اولتراسونیک (۲۳ کیلوهرتز) تبدیل می‌شوند. قطعه‌کار با یک پیچ دوسر رزوه، در انتهای قسمت تطبیق ترانسدیوسر به آن متصل شده است. ابعاد قطعه‌کار ($100 \times 57 \times 43$ میلی‌متر) به کمک آنالیز امان محدود به گونه‌ای طراحی شده است که در حین آزمایش، یک ارتعاش با مود طولی در قطعه‌کار به وجود آید و همچنین در دو انتهای قطعه‌کار، شکم ارتعاشی و در وسط آن گره ارتعاشی تشکیل گردد. قطعه‌کار در محل گره ارتعاشی با دو پیچ M8 و دو پین $\varnothing 8$ به یک تکیه‌گاه فولادی متصل و این تکیه‌گاه فولادی داخل گیره ماشین فرز محکم شده است. دامنه ارتعاش انتهای قطعه‌کار توسط یک حسگر فاصله‌سنج القایی مدل PU-09، یک مبدل مدل AEC-5509 و یک نوسان‌نما یا اسیلوسکوپ قابل اندازه‌گیری است. برای بررسی تأثیر جهت ارتعاش اولتراسونیک بر نیروهای برشی، دو مجموعه آزمایشی مجزا انجام شده است. در مجموعه اول و دوم، به ترتیب عملیات کنارتراشی در راستای ارتعاش و عمود بر راستای ارتعاش انجام شده است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب تنظیم تجربی استفاده‌شده در مجموعه‌های آزمایشی اول و دوم را نشان می‌دهد. آزمایش‌های فرزکاری معمولی نیز با همین چیدمان و با خاموش کردن منبع تغذیه اولتراسونیک انجام شده‌اند. در همه آزمایش‌ها از ابزار فرز انگستی چهاردندانه با فولاد تندبر^۶ به قطر ۱۰ میلی‌متر و قطعه‌کار از جنس فولاد ضدزنگ X20Cr13 استفاده شده، عمق برش محوری ۵ میلی‌متر و فرزکاری از نوع موافق است. در حالت فرزکاری اولتراسونیکی، دامنه ارتعاش ۲۰ میکرومتر و میزان فرکانس ارتعاش در مجموعه‌های اول و دوم به ترتیب 300 ± 232 هرتز و 300 ± 253 هرتز است. تغییر فرکانس به دلیل تغییر جرم ناشی از براده‌برداری از قطعه‌کار است. سیستم

اسپیندل^۴، نرخ پیشروی و عمق برش شعاعی بر نیروهای برشی بررسی شده است. مقادیر این پارامترها در جدول ۱ آمده و طراحی آزمایش که در قسمتی از جدول ۲ ذکر خواهد شد، با روش تاگوچی صورت گرفته است.

ارتعاشی به‌گونه‌ای است که با وجود تغییرات جرم و نیرو، حالت رزونانس ارتعاش همواره حفظ می‌شود. تمامی آزمایش‌ها در غیاب روانکار انجام شده‌اند. در هر دو مجموعه آزمایشی، تأثیر پارامترهای سرعت برشی (سرعت



شکل ۱. تنظیم تجربی عملیات کنارتراشی برای آزمایش‌های فرزکاری معمولی و اولتراسونیکی در حالتی که پیشروی ابزار در راستای ارتعاش است



شکل ۲. تنظیم تجربی عملیات کنارتراشی برای آزمایش‌های فرزکاری معمولی و اولتراسونیکی در حالتی که پیشروی ابزار عمود بر جهت ارتعاش است

۳. نتایج تجربی و بحث

در هر آزمایش، سه مؤلفه نیروی برشی به وسیله یک دینامومتر کیستلر^۸ مدل 9255B اندازه گیری شده و برآیند آنها به عنوان نیروی برشی ثبت شده است. در ادامه، نتایج هر یک از مجموعه های آزمایشی به صورت جداگانه ذکر شده است.

۳-۱. مجموعه اول: پیشروی ابزار در راستای ارتعاش اولتراسونیک قطعه کار

در هر آزمایش کنارتراشی در راستای ارتعاش، مؤلفه های پیشروی (F_y)، شعاعی (F_x) و محوری (F_z) نیروی برشی اندازه گیری و برآیند آنها برای فرایندهای فرزکاری معمولی و اولتراسونیک مقایسه شده است. شکل ۳ یک نمونه از خروجی دینامومتر را نمایش می دهد که پارامترهای برشی آن سرعت اسپیندل ۸۰۰ دور در دقیقه، پیشروی به ازای هر

دندانه ۰/۰۵ میلی متر بر دندانه و عمق برش شعاعی ۰/۶ میلی متر است. در این آزمایش، کاهش نیروی برشی در فرزکاری اولتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی به وضوح مشاهده می شود. پس از میانگین گیری از مؤلفه های نیروی برشی و محاسبه برآیند نیرو در هر آزمایش، داده های تجربی جدول ۲ به دست آمده است. مقادیر متناظر با سطوح پارامترهای ذکر شده در جدول ۲ قبلاً در جدول ۱ آمده است.

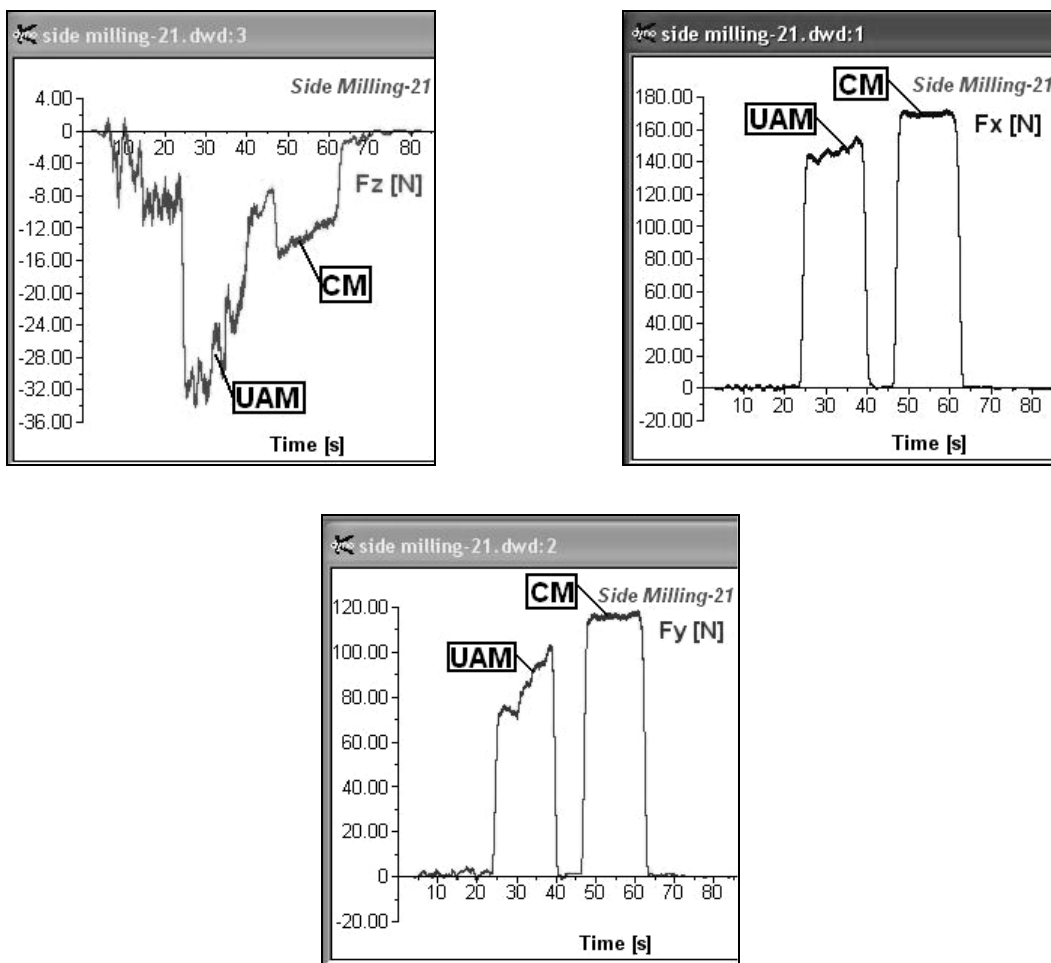
مقادیر F_{CM} و F_{UAM} به ترتیب، برآیند نیروی برشی در فرزکاری اولتراسونیک و فرزکاری معمولی هستند. نتایج تجربی به دست آمده نشان می دهد در حالتی که پیشروی ابزار برشی در راستای ارتعاش قطعه کار باشد، نیروی برشی در فرزکاری اولتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی به طور متوسط ۱۶/۷ درصد کاهش می یابد.

جدول ۱. شرایط برشی در آزمایش های تجربی

سطح	سرعت اسپیندل (دور بر دقیقه)	پیشروی به ازای هر دندانه (میلی متر بر دندانه)	عمق برش شعاعی (میلی متر)
۱	۵۰۰	۰/۰۵	۰/۳
۲	۸۰۰	۰/۱	۰/۶
۳	۱۲۵۰	۰/۲	۰/۹

جدول ۲. برآیند نیروی برشی در کنارتراشی همراستا با ارتعاش اولتراسونیک در فرزکاری معمولی و فرزکاری اولتراسونیک

آزمایش	سرعت اسپیندل (دور بر دقیقه)	پیشروی به ازای هر دندانه (میلی متر بر دندانه)	عمق برش شعاعی	برآیند نیروی برشی در فرزکاری معمولی (نیوتن)	برآیند نیروی برشی در فرزکاری اولتراسونیک (نیوتن)
۱	۱	۱	۱	۸۵/۸	۶۴/۰
۲	۱	۲	۲	۲۲۰/۳	۱۳۲/۴
۳	۱	۳	۳	۴۱۱/۴	۲۸۵/۲
۴	۲	۱	۲	۲۰۵/۷	۱۷۰/۹
۵	۲	۲	۳	۳۵۲/۰	۲۹۷/۹
۶	۲	۳	۱	۱۶۳/۹	۱۴۱/۳
۷	۳	۱	۳	۳۰۹/۵	۳۱۵/۶
۸	۳	۲	۱	۱۷۲/۷	۱۶۲/۹
۹	۳	۳	۲	۳۳۷/۲	۳۲۱/۶



شکل ۳. نمونه‌ای از نیروهای اندازه‌گیری‌شده توسط دینامومتر با سرعت اسپیندل ۸۰۰ دور در دقیقه

پیشروی به ازای هر دندانه ۰/۰۵ میلی‌متر بر دندانه و عمق برش شعاعی ۰/۶ میلی‌متر در حالتی که پیشروی ابزار در راستای ارتعاش قطعه کار است

نیروی برشی در یک سیکل ارتعاشی و در کل فرایند فرزکاری اولتراسونیک کمتر از فرزکاری معمولی است. در حالتی که پیشروی ابزار در راستای ارتعاش قطعه کار است، مناطقی وجود دارد که سرعت برشی ابزار از سرعت بحرانی در فرزکاری اولتراسونیک کمتر می‌شود [۱۰]. سرعت بحرانی در ماشینکاری به کمک ارتعاش، سرعتی است که در سرعت‌های برشی کوچکتر از آن، جدایی ابزار و قطعه کار از یکدیگر در قسمتی از یک سیکل ارتعاشی اتفاق می‌افتد. در مجموع می‌توان دلیل اصلی کاهش نیروی برشی در این فرزکاری اولتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی در این حالت را به کاهش میزان درگیری مؤثر ابزار و قطعه کار

در این مجموعه آزمایشی، به دلیل جدایش ابزار و قطعه کار از یکدیگر در فرزکاری به کمک اولتراسونیک، زمان مؤثر برشی در هر سیکل ارتعاشی کوچکتر از دوره تناوب سیکل ارتعاشی است و ابزار و قطعه کار در قسمتی از هر سیکل ارتعاشی از یکدیگر جدا هستند و می‌توان فرض کرد که در زمان‌های جدایش آنها از هم، نیروی برشی به صورت تئوری صفر است [۹]. هرچند که ماکزیمم نیروی برشی در فرزکاری اولتراسونیک وقتی ابزار و قطعه کار با هم درگیر هستند ممکن است بیشتر از ماکزیمم نیروی برشی در فرزکاری معمولی باشد، اما داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در مقادیر مناسب پارامترهای برشی و ارتعاشی، متوسط

به دلیل جدایش آنها از هم در سیکل‌های ارتعاشی مختلف نسبت داد. در جدول ۲، عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی به ترتیب بیشترین اثر را بر نیروی برشی در فرزکاری معمولی دارند، به طوری که با افزایش آنها، نیروی برشی نیز افزایش می‌یابد، اما سرعت برشی تأثیر خاصی بر نیروهای برشی ندارد. در فرزکاری اولتراسونیک، پارامترهای عمق برش شعاعی، سرعت برشی و نرخ پیشروی به ترتیب بر نیروی برشی اثرگذارند، به گونه‌ای که افزایش آنها سبب افزایش نیروی برشی می‌شود. از بین پارامترهای برشی، میزان سرعت برشی (یا سرعت اسپیندل) بر میزان درصد کاهش نیروی برشی در فرزکاری اولتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی اثرگذار است، اما عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی تأثیر معناداری ندارند. با افزایش سرعت اسپیندل، از میزان درصد کاهش نیرو در فرزکاری اولتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی کاسته می‌شود و نیروهای برشی در فرزکاری اولتراسونیک به حالت معمولی نزدیک می‌شوند. دلیل این موضوع، افزایش میزان درگیری ابزار و قطعه کار با افزایش سرعت دورانی ابزار است.

۲-۳. مجموعه دوم: پیشروی ابزار عمود بر راستای ارتعاش اولتراسونیک قطعه کار

روند انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها در این مجموعه از آزمایش‌ها مشابه مجموعه نخست است. نمونه‌ای از خروجی دینامومتر با پارامترهای برشی و ارتعاشی مشابه شکل ۳، که مؤلفه‌های پیشروی، شعاعی و محوری نیروی برشی را نشان می‌دهد، در شکل ۴ آمده است. در این آزمایش، افزایش نیروی برشی در فرزکاری اولتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی مشاهده می‌شود.

جدول ۳ مقادیر برآیند نیروی برشی فرایندهای فرزکاری معمولی و اولتراسونیک در آزمایش‌های کنارتراشی پیشانی قطعه کار (مجموعه دوم) را نشان می‌دهد. نتایج تجربی موجود در این جدول نشان می‌دهند در حالتی که پیشروی ابزار عمود بر راستای ارتعاش قطعه کار است، اعمال ارتعاش

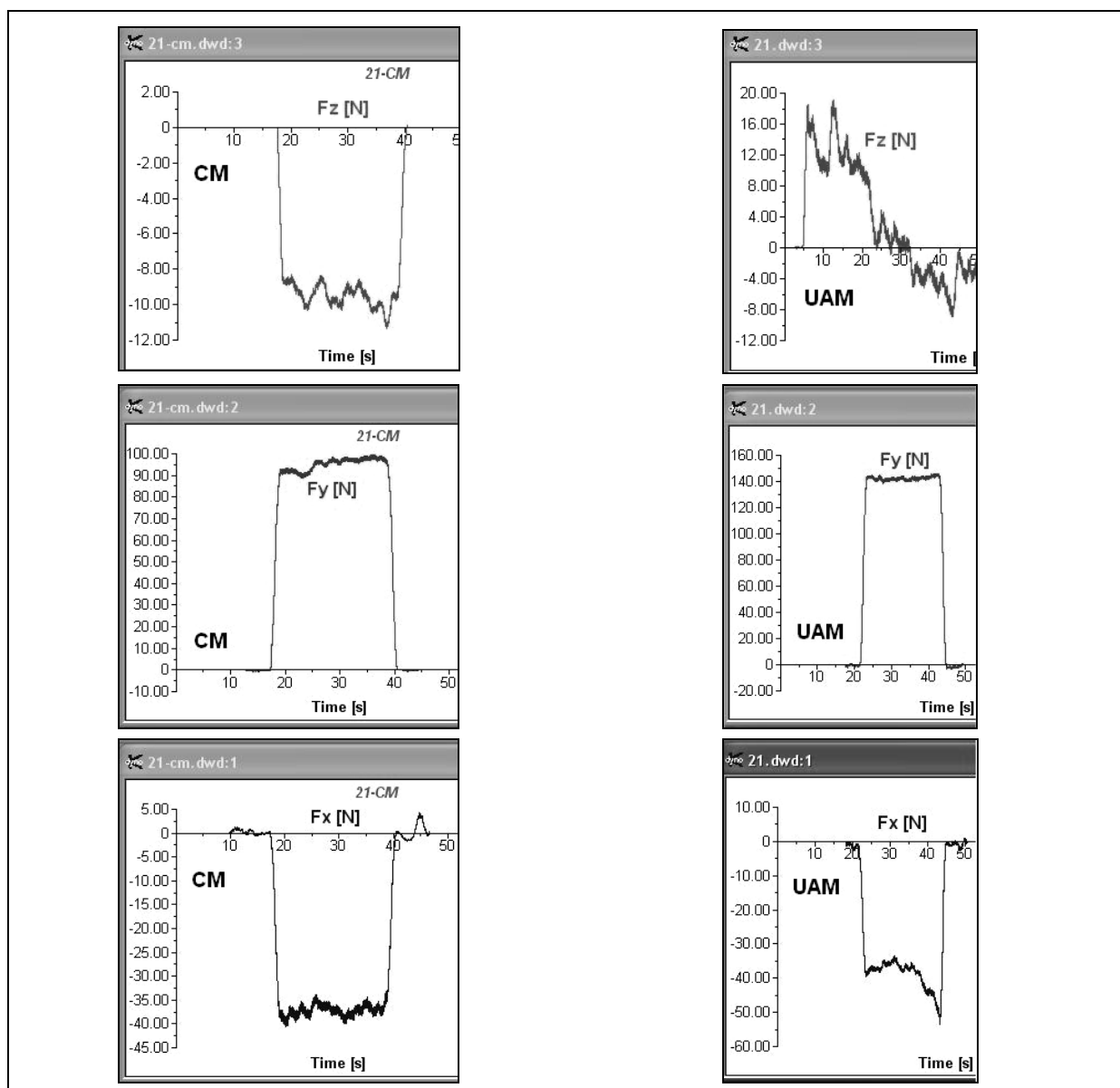
اولتراسونیک به فرایندهای فرزکاری باعث افزایش نیروهای برشی می‌گردد. میزان متوسط افزایش نیرو در فرزکاری اولتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی در این مجموعه از آزمایش‌ها، ۵۳/۵ درصد است. در این مجموعه آزمایشی، ارتعاش قطعه کار در امتداد عمق برش شعاعی است و جدایش ابزار و قطعه کار از یکدیگر اتفاق نمی‌افتد و تنها می‌توان گفت که به صورت نظری، میزان عمق برش شعاعی به اندازه چند میکرون در هر نوسان قطعه کار تغییر می‌کند. به نظر می‌رسد که ضربه‌های متوالی جانبی قطعه کار به ابزار برشی و به عبارت دیگر، اثر ارتعاشی - ضربه‌ای^۹ در فرایند فرزکاری اولتراسونیک در راستای عمق برش شعاعی باعث افزایش نیروی برشی شده باشد.

در جدول ۳ برای هر دو فرایند فرزکاری معمولی و اولتراسونیک، عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نیروهای برشی دارند، به گونه‌ای که با افزایش آنها نیروی برشی نیز افزایش می‌یابد، اما سرعت برشی تأثیر اندکی بر نیروی برشی دارد. در سال‌های اخیر، کاهش نیروی برشی در فرایندهای ماشینکاری ارتعاشی نسبت به ماشینکاری معمولی به دو دلیل اصلی نسبت داده شده است: کاهش ضریب اصطکاک در فرایندهای ارتعاشی [۱۱] و جدایش ابزار و قطعه کار در قسمتی از هر سیکل ارتعاشی [۱۲].

نتایج تجربی به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که تغییر رفتار اصطکاک سبب کاهش نیروی برشی در فرایندهای ماشینکاری ارتعاشی نمی‌شود؛ زیرا در هر دو مجموعه آزمایشی انجام شده، اعمال ارتعاش اولتراسونیک تأثیر مشابهی بر اصطکاک دارد، اما نیروهای برشی فرزکاری اولتراسونیک نسبت به حالت معمولی در مجموعه اول، کاهش و در مجموعه دوم، افزایش یافته است. به تازگی، جمشیدی و ناطق (۲۰۱۳) به صورت تئوری و تجربی نشان دادند که مقدار ضریب اصطکاک در فرایند تراشکاری به کمک اولتراسونیک بزرگتر از تراشکاری معمولی است [۱۳]. به کمک نتایج به دست آمده از

جدایش ابزار و قطعه‌کار از یکدیگر در قسمتی از هر سیکل ارتعاشی است.

آزمایش‌های تجربی می‌توان نتیجه گرفت که دلیل اصلی کاهش نیروی برشی در فرایند فرزکاری اولتراسونیکی،



شکل ۴. نمونه‌ای از نیروهای اندازه‌گیری‌شده توسط دینامومتر با سرعت اسپیندل ۸۰۰ دور در دقیقه

پیشروی به ازای هر دندانه ۰/۰۵ میلی‌متر و عمق برش شعاعی ۰/۶ میلی‌متر در حالتی که پیشروی ابزار عمود بر راستای ارتعاش قطعه‌کار است

۴. نتیجه‌گیری

برای بررسی تأثیر جهت ارتعاش بر نیروهای برشی در فرایند فرزکاری به‌کمک اولتراسونیک، دو مجموعه مختلف آزمایشی انجام شده است. برای انجام آزمایش‌ها از تنظیم تجربی جدیدی استفاده و تأثیر پارامترهای سرعت برشی،

نرخ پیشروی و عمق برش شعاعی بر نیروی برشی در فرایندهای فرزکاری معمولی و فرزکاری اولتراسونیکی بررسی شده است. در مجموعه اول، جهت پیشروی ابزار برشی همراستا با ارتعاش قطعه‌کار و در مجموعه دوم، پیشروی ابزار عمود بر راستای ارتعاش قطعه‌کار است. در

حالتی که پیشروی ابزار همراه با ارتعاش اولتراسونیک است، نیروی برشی در فرزکاری اولتراسونیکی به طور متوسط ۱۶/۷ درصد نسبت به فرزکاری معمولی کاهش یافته است. وقتی جهت پیشروی ابزار عمود بر راستای ارتعاش اولتراسونیک است، نیروی برشی در فرزکاری اولتراسونیکی به طور متوسط ۵۳/۵ درصد بیشتر از فرزکاری معمولی است. در این دو مجموعه آزمایشی، شرایط اصطکاکی و سایر پارامترهای برشی و ارتعاشی یکسان است. در حالتی که راستای پیشروی و ارتعاش یکسان است، جدایش ابزار و قطعه کار در قسمتی از سیکل های ارتعاشی مختلف سبب کاهش نیروی برشی شده است. وقتی

پیشروی ابزار عمود بر ارتعاش است، جدایش ابزار از قطعه کار اتفاق نمی افتد و به دلیل ضربه های متوالی جانبی بین ابزار و قطعه کار، نیروی برشی افزایش می یابد. کاهش نیروی برشی در فرایندهای ارتعاشی ارتباطی با تغییر رفتار اصطکاک ندارد و تابعی از میزان جدایش ابزار و قطعه کار از یکدیگر است. در حالتی که پیشروی ابزار در راستای ارتعاش قطعه کار است، افزایش سرعت برشی سبب نزدیک شدن نیروهای برشی در فرزکاری اولتراسونیکی به فرزکاری معمولی می شود، بنابراین اعمال ارتعاش اولتراسونیک به فرایند فرزکاری در مقادیر کوچکتر سرعت برشی مؤثرتر است.

جدول ۳. برآیند نیروی برشی در کنار تراشی عمود بر راستای ارتعاش اولتراسونیک در فرزکاری معمولی و اولتراسونیکی

آزمایش	برآیند نیروی برشی در فرزکاری معمولی (نیوتن)	برآیند نیروی برشی در فرزکاری اولتراسونیکی (نیوتن)
۱	۲۹/۳	۱۰۰/۸
۲	۱۴۱/۶	۱۵۴/۴
۳	۲۹۸/۷	۲۹۴/۵
۴	۱۰۲/۶	۱۴۷/۴
۵	۱۹۱/۸	۲۸۶/۰
۶	۹۰/۳	۱۴۱/۰
۷	۱۵۷/۶	۱۹۴/۲
۸	۷۱/۲	۷۷/۸
۹	۱۸۶/۴	۱۷۶/۵

۵. مآخذ

- [1] Azarhoushang, B., J. Akbari. "Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47 (2007): 1027-1033.
- [2] Brehl, D.E., T.A. Dow. "Review of vibration-assisted machining." *Precision Engineering* 32 (2007): 153-172.
- [3] Zhou, M., Y. Eow, B. Ngoi, E. Lim. "Vibration-assisted precision machining of steel with PCD tools." *Materials and Manufacturing Processes* 18 (2003): 825-834.
- [4] Neugebauer, R., A. Stoll. "Ultrasonic application in drilling." *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004): 633-639.

- [5] Janghorbanian, J., M.R. Razfar, M.M. Abootorabi Zarchi. "The effect of cutting speed on tool life in ultrasonic-assisted milling process." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 227(8) (2013): 1157-1164.
- [6] Shen, X.H., J. Zhang, D. Xing, Y. Zhao. "A study of surface roughness variation in ultrasonic vibration-assisted milling." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 58 (2012): 553-561.
- [7] Chern, G.L., Y.C. Chang. "Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (2006): 659-666.
- [8] Ding, H., S.J. Chen, K. Cheng. "Two-dimensional vibration-assisted micro end milling: cutting force modeling and machining process dynamics." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 224(12) (2010): 1775-1783.
- [9] Abootorabi Zarchi, M.M., M.R. Razfar, A. Abdullah. "Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 66 (2013): 83-89.
- [10] Abootorabi Zarchi, M.M., M.R. Razfar, A. Abdullah. "Investigation of the effect of cutting speed and vibration amplitude on cutting forces in ultrasonic-assisted milling." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 226(7) (2012): 1185-1191.
- [11] Chou, C.L. "Wave effects of ultrasonic vibration on machining" Ph.D. Thesis, The Pennsylvania University, 1994.
- [12] Nath, C., M. Rahman. "Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48 (2008): 965-974.
- [13] Jamshidi, H., M.J. Nategh. "Theoretical and experimental investigation of the frictional behavior of the tool-chip interface in ultrasonic-vibration assisted turning." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 65 (2013): 1-7.

-
1. ultrasonic assisted milling
 2. conventional milling
 3. computer numerical control (CNC)
 4. transducer
 5. MPI Ultrasonics, <http://www.mpi-ultrasonics.com>
(accessed March 26, 2014)
 6. high-speed steel (HSS)
 7. spindle
 8. KISTLER
 9. vibro-impact effect