

تأثیر پارامترهای برشی و دامنه ارتعاش بر نیروی برشی در کنارتراشی ارتعاشی آلیاژ آلومنیم AI7022

محمد مهدی ابوترابی زارچی^{1*}, محمد رضا رازفر², امیر عبدالله²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* یزد، صندوق پستی 89195-741

abootorabi@yazd.ac.ir

چکیده

کاهش نیروی برشی در یک فرآیند ماشین کاری دارای مزایای فراوانی از جمله افزایش عمر ابزار و بهبود کیفیت سطح ماشین کاری شده است. یکی از تکنیک های نوین برای کاهش نیروی برشی، براده برداری به کمک ارتعاش آلتراسونیک است. در این مقاله، فرآیند فرز کاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک یک بُعدی روی آلیاژ آلومنیم AI7022 مطالعه شده است. با طراحی یک مکانیزم مؤثر برای اعمال ارتعاش آلتراسونیک به قطعه کار، تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشوایی، عمق برش شعاعی و دامنه ارتعاش بر مؤلفه های سه گانه نیروی برشی و برآیند آنها در هر دو فرآیند فرز کاری معمولی و فرز کاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک مورد بررسی تجزیی قرار گرفته است. اعمال ارتعاش آلتراسونیک به فرز کاری، بیشترین تأثیر را بر مؤلفه پیشوایی نیروی برشی که در راستای ارتعاش قطعه کار است، گذاشته و به طور متوسط آن را 33% کاهش داده است. هرچه سرعت برشی کوچکتر و دامنه ارتعاش بزرگتر باشد، میزان جدایش ابزار و قطعه کار در قسمت هایی از هر سیکل ارتعاشی افزایش یافته و مؤلفه پیشوایی نیروی برشی کاهش بیشتری می یابد. برآیند نیروی برشی نیز به طور متوسط ۱۰/۸% در فرز کاری ارتعاشی نسبت به فرز کاری معمولی کاهش یافته است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 بهمن 1393

پذیرش: 16 فروردین 1394

ارائه در سایت: 25 فروردین 1394

کلید واژگان:

فرز کاری به کمک آلتراسونیک

فرز کاری معمولی

نیروی برشی

دامنه ارتعاش

سرعت برشی

The Effect of Cutting Parameters and Vibration Amplitude on Cutting Forces in Vibration-Assisted Side Milling Process of Al7022 Aluminum Alloy

Mohammad Mahdi Abootorabi Zarchi^{1*}, Mohammad Reza Razfar², Amir Abdullah²

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 89195-741 Yazd, Iran. abootorabi@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 08 February 2015

Accepted 05 April 2015

Available Online 14 April 2015

Keywords:

Ultrasonic Assisted Milling

Conventional Milling

Cutting Force

Vibration Amplitude

Cutting Speed

ABSTRACT

Reduction of cutting force in a machining process offers several advantages including, increase in tool life and improvement in the quality of the machined surface. One of the new techniques for reducing cutting force relates to ultrasonic vibration assisted machining. In the present paper, one-dimensional ultrasonic vibration-assisted side milling process of Al7022 aluminum alloy has been studied. In order to investigate the effect of cutting speed, feed rate, radial depth of cut, and vibration amplitude on three cutting force components and their resultant, a special experimental setup has been designed and established which applies one dimensional ultrasonic vibration to work piece. Applying the ultrasonic vibrations on milling process, mostly affects the feed component of cutting force, which is unidirectional with the work piece vibration, and decreases it by 33.5% on average. Decrease in cutting speed and increase in vibration amplitude results in increasing the separation of tool and work piece from each other in a portion of each vibration cycle, and a larger decrease of the feed force. The average decrease of the resultant cutting force in ultrasonic-assisted milling process is 10.8%.

- مقدمه

گذشته، محققان مختلف مزایای زیادی نظیر کاهش نیروی برشی [5,4]. افزایش عمر ابزار [6]، بهبود کیفیت سطح [7] و شکل گیری بهتر براده [8] را برای ماشین کاری به کمک ارتعاش گزارش کرده اند. از بین فرآیندهای اصلی براده برداری، در زمینه فرآیند فرز کاری به کمک آلتراسونیک¹ مطالعات کمتری انجام شده است. چرن و چانگ [9] اثرات فرآیندهای ماشین کاری ارتعاشی رو به فزونی گذاشته است [3]. در سال های

1- Ultrasonic assisted milling

Please cite this article using:

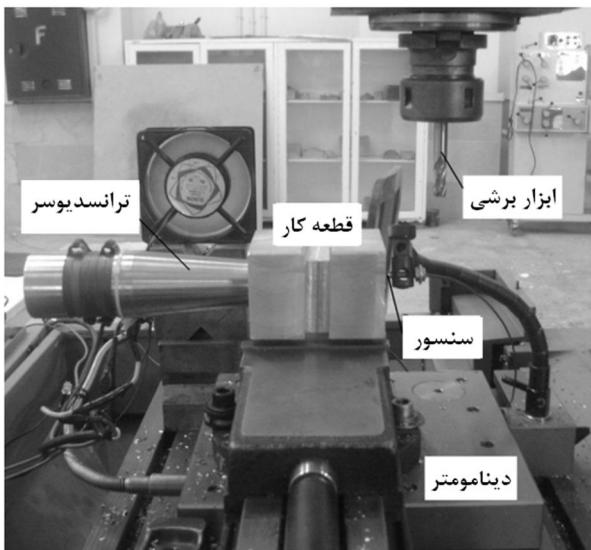
M. M. Abootorabi Zarchi, M. R. Razfar, A. Abdullah, The Effect of Cutting Parameters and Vibration Amplitude on Cutting Forces in Vibration-Assisted Side Milling Process of Al7022 Aluminum Alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 392-396, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

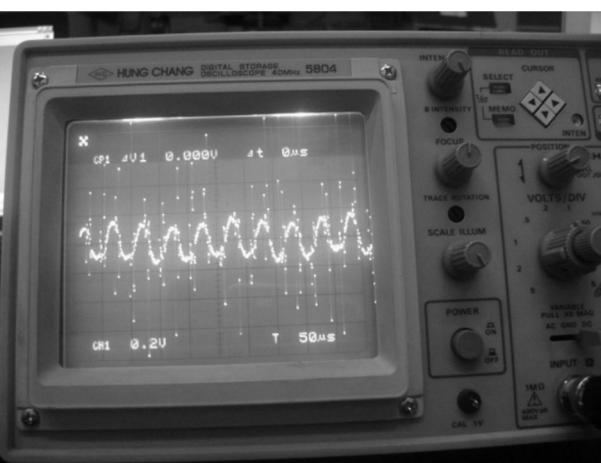
ارتعاش انتهای قطعه کار توسط یک سنسور القابی اندازه گیری فاصله مدل PU-09، یک مبدل مدل AEC-5509 و یک اسیلوسکوپ، اندازه گیری شده است. این سنسور بر روی یک پایه در فاصله $0/4\text{mm}$ عمود بر سطح انتهای قطعه کار و در مرکز آن قرار گرفته است (شکل 1) و خروجی ولتاژ آن روی اسیلوسکوپ قابل مشاهده است (شکل 2).

فرآیند کنار تراشی بر روی قطعه کار از جنس آلیاژ آلمینیم AI7022 با یک ابزار فرز انگشتی 4 دندانه از جنس فولاد تندری به قطر 10mm انجام شده است. آلیاژ AI7022 برای ساخت قالب‌های تزریق پلاستیک کاربرد فراوانی دارد.

روی دو سطح جانبی قطعه کار شیاری با عرض 20mm و عمق 10mm ایجاد شده است (شکل 1). ابتدا کنار تراشی به صورت فرز کاری معمولی انجام می‌شود و سپس در وسط شیار با روش شدن ژراتور آلتراسونیک و بدون قطع حرکت دورانی اسپیندل و حرکت پیشروی میز ماشین فرز، برش با حالت آلتراسونیکی ادامه می‌یابد تا همه شرایط آزمایشی برای دو فرآیند معمولی و آلتراسونیکی یکسان باشد. به کمک طراحی آزمایش تاگوچی، تأثیر سرعت اسپیندل (N)، پیشروی به ازای هر دندانه (f_z)، عمق برش ساعی (a_f)



شکل 1 تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش‌های فرز کاری آلتراسونیکی و معمولی



شکل 2 نمونه‌ای از ولتاژ خروجی از سنسور اندازه گیری دامنه ارتعاش

و دامنه ارتعاش (a) بر نیروهای برشی بررسی شده است. سطوح و مقادیر

اعمال ارتعاش آلتراسونیک دو بعدی بر کیفیت میکرو فرز کاری آلیاژ آلمینیم AI6061-T6 را به صورت تجربی بررسی و مشاهده کردند که دقت عرض و صافی سطح شیارها بهبود یافت و به دلیل شرایط بهتر ماشین کاری و همچنین کاهش نیروهای برشی، عمر ابزار افزایش پیدا کرد. سو و دیگران [10] ویژگی‌های فرز کاری سوپر آلیاژ پایه نیکل MAR-M247 با ترکیب ارتعاش آلتراسونیک و برش داغ را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که فرکانس ارتعاش تأثیر اندکی بر نیروی برشی دارد. دینگ و دیگران [11] مدلی برای پیش‌بینی نیروی برشی در فرآیند میکرو فرز کاری به کمک ارتعاش دو بعدی ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که افزایش دامنه ارتعاش موجب افزایش ماکریم نیروی برشی می‌گردد. شن و دیگران [12] اثرات ارتعاش آلتراسونیک در عملیات میکرو فرز کاری آلیاژ آلمینیم را بررسی کردند. آن‌ها با اعمال ارتعاش آلتراسونیک به قطعه کار هم‌زمان با عملیات شیار تراشی نتیجه گرفتند که میکرو فرز کاری همراه با ارتعاش آلتراسونیک در جهت پیشروی، نیروی برشی پالسی شکل و برآدهای کوچکتر بوجود می‌آورد. در این مقاله، با طراحی یک مکانیزم مؤثر برای اعمال ارتعاش آلتراسونیک به قطعه کار، فرآیند کنار تراشی¹ آلیاژ آلمینیم AI7022 به کمک آلتراسونیک به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش ساعی و دامنه ارتعاش آلتراسونیک بر مؤلفه‌های سه گانه نیروی برشی و برآیند نیروی برش در فرآیندهای فرز کاری معمولی² و ارتعاشی نشان می‌دهد که تأثیر اعمال ارتعاش آلتراسونیک بر کاهش مؤلفه پیشروی نیروی برشی که در راستای ارتعاش قطعه کار است، بسیار قابل توجه بوده است.

2- تجهیزات آزمایش

آزمایش‌های فرز کاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک روی یک ماشین فرز با کنترل عددی ساخت شرکت دیکل انجام شده است. برای اعمال ارتعاش یک بعده به قطعه کار از یک ترانسدیوسر پیزوکلتیریکی با توان 3kW منبع الکتریکی 50Hz را به یک فرکانس بالا 20500 Hz ^(f) تبدیل می‌کند. این پاس‌های الکتریکی فرکانس بالا وارد ترانسدیوسر شده و به عنوان اثر پیزوکلتیریک، به ارتعاش مکانیکی با فرکانس آلتراسونیک تبدیل می‌شوند. قطعه کار با یک پیچ دو سر رزو، در انتهای قسمت تطبیق ترانسدیوسر به آن متصل شده و به این دلیل، فرکانس رزو نانس سیستم ارتعاشی را تغییر داده است. با وجود آن که کلیه اجزای درگیر در آزمایش‌ها مانند قطعه کار، ماشین فرز، دینامومتر و غیره و همچنین براده برداری از قطعه کار بر روی حالت رزو نانس ترانسدیوسر تأثیرگذار است، سیستم ارتعاشی در حین تغییرات دینامیکی بار، حالت رزو نانس ارتعاش را حفظ می‌کند. شکل 1 تجهیزات آزمایشی استفاده شده را نشان می‌دهد که آزمایش‌های هر دو حالت فرز کاری معمولی و آلتراسونیکی به کمک آن انجام شده است.

ابعاد قطعه کار به کمک آنالیز المان محدود به گونه‌ای طراحی شده است که در حین آزمایش، یک ارتعاش با مود طولی در قطعه کار بوجود آید و همچنین در دو انتهای قطعه کار، شکم ارتعاشی و در وسط آن گره ارتعاشی تشکیل گردد. برای جلوگیری از اتلاف ارتعاش، قطعه کار در محل گره ارتعاشی (وسط قطعه کار) با دو پیچ M8 و دو پین M8 به یک قطعه فولادی متصل و این قطعه فولادی داخل گیره ماشین فرز محکم شده است. دامنه

2-Side milling

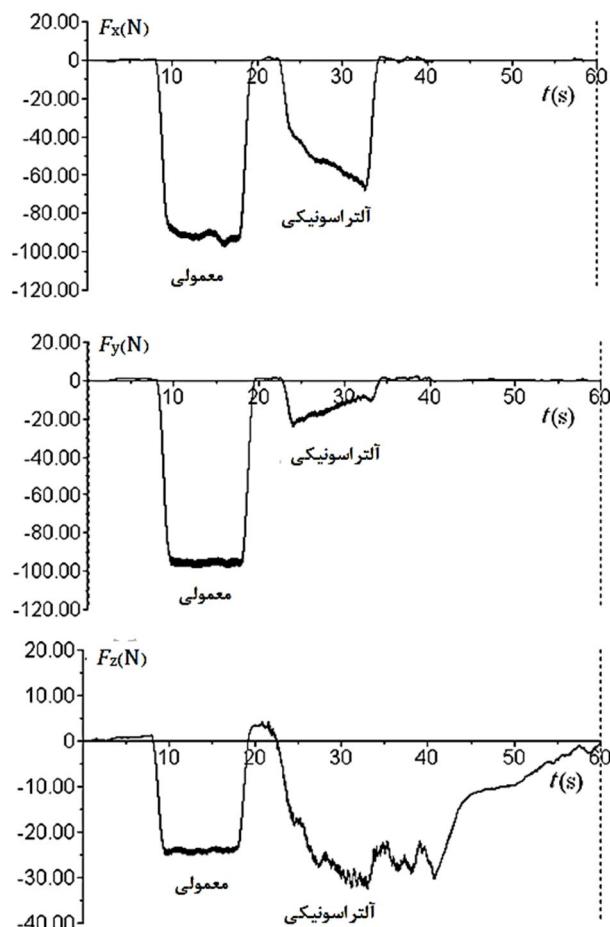
3-Conventional milling

$$V_p = 2\pi af \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

هرگاه سرعت ارتعاشی قطعه کار بزرگتر از سرعت برشی ابزار گردد، جدایش ابزار و قطعه کار از یکدیگر انفاق می‌افتد. بنابراین، هر عاملی که سرعت ارتعاشی را افزایش و سرعت برشی را کاهش دهد موجب جدایش بیشتر ابزار و قطعه کار می‌گردد. سرعت برشی از رابطه (3) به دست می‌آید:

$$v = \pi DN \quad (3)$$

قطر ابزار فرز انگشتی و N میزان دوران اسپیندل دستگاه فرز است. به دلیل نسبت مستقیم سرعت برشی و سرعت اسپیندل، گاهی این دو مفهوم بجای یکدیگر بکار می‌رود. به طور کلی، میزان جدایش ابزار و قطعه کار با افزایش دامنه و فرکانس ارتعاش، افزایش و با افزایش سرعت اسپیندل، کاهش می‌یابد. نتیجه تجربی به دست آمده در مورد تأثیر دامنه ارتعاش بر برآیند نیروی برشی در فرزکاری به کمک آلتراسونیک نشان می‌دهد که افزایش دامنه ارتعاش تا یک مقدار خاص، برآیند نیروی برشی را کاهش می‌دهد. افزایش بیشتر دامنه به دلیل افزایش ضربه‌های متولی جانبی قطعه کار به ابزار برشی و به عبارت دیگر، اثر ارتعاشی-ضربه‌ای¹ در فرآیندهای ماشینکاری ارتعاشی، موجب افزایش مؤلفه‌های شعاعی و محوری و در نتیجه، برآیند نیروی برشی می‌گردد [17].



شکل 3 نمونه‌ای از نیروهای اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر با شرایط $a=24 \mu\text{m}$ و $a_r=1/5 \text{ mm}$, $f_r=0/15 \text{ mm/tooth}$, $N=400 \text{ rpm}$

اختلاف پارامترهای ورودی در جدول 1 آمده است. همه آزمایش‌ها در غیاب روانکار و در حالت موافق انجام شده‌اند. در همه آزمایش‌ها، عمق برش محوری $a_r=5 \text{ mm}$ و فرکانس ارتعاش آلتراسونیک $f_r=20500 \pm 200 \text{ Hz}$ است.

3- نتایج تجربی و بحث

در هر یک از آزمایش‌های انجام شده، مؤلفه‌های شعاعی (F_y), پیشروی و محوری (F_z) نیروی برشی به وسیله یک دینامومتر کیستلر مدل 9255B اندازه‌گیری شده است. شکل 3 یک نمونه از نیروهای اندازه‌گیری شده با شرایط برشی $N=400 \text{ rpm}$, $a_r=1/5 \text{ mm}$, $f_r=0/15 \text{ mm/tooth}$, $a=24 \mu\text{m}$ و $a=1/5 \text{ mm}$. در جدول 2 میانگین مؤلفه‌های نیروی برشی و برآیند آن‌ها در نشان می‌دهد. در جدول 2 میانگین مؤلفه‌های نیروی برشی و برآیند آن‌ها در هر آزمایش ذکر شده است. F_{CM} برآیند نیروی برشی در فرزکاری به کمک آلتراسونیک است. در جدول 2 سطوح پارامترهای ورودی در هر آزمایش ذکر شده است. برای دانستن مقادیر این پارامترها باید به جدول 1 مراجعه شود.

در فرزکاری معمولی، برآیند نیروی برشی با افزایش عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت برشی، روندی کاهشی دارد که با یافته‌های سایر محققان مطابقت دارد [14,13]. افزایش عمق برش شعاعی باعث افزایش طول قوس تماس ابزار با قطعه کار و افزایش پیشروی باعث افزایش ضخامت و سطح مقطع براده می‌گردد و در نتیجه، نیروی برشی افزایش می‌یابد. کاهش نیروی برشی با افزایش سرعت برشی به دلیل افزایش دمای ناحیه برش و کاهش اصطکاک اتفاق می‌افتد [14]. تأثیر عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی بر نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیکی مشابه فرزکاری معمولی است ولی افزایش سرعت برشی تأثیر معنا داری بر مقادیر برآیند نیروی برشی در فرزکاری به کمک آلتراسونیک ندارد. در فرزکاری آلتراسونیکی، با افزایش دامنه ارتعاش از $a=8 \mu\text{m}$ به $a=12 \mu\text{m}$ برآیند نیروی برشی کاهش می‌یابد ولی افزایش بیشتر دامنه تا $a=24 \mu\text{m}$ ، برآیند نیروی برشی را اندکی افزایش می‌دهد. دلیل این رفتار را می‌توان به کمک بررسی میزان جدایش ابزار و قطعه کار از یکدیگر در هر سیکل ارتعاشی توضیح داد. اساس فرآیندهای ماشینکاری به کمک ارتعاش آن است که به دلیل ارتعاش متناسب ابزار یا قطعه کار، در پارامترهای مناسب برشی و ارتعاشی، ابزار به صورت متناسب از براده جدا می‌شود و در نتیجه، میانگین نیروی برشی کاهش می‌یابد [16,15].

در فرزکاری آلتراسونیکی، اگر حرکت ارتعاشی قطعه کار به صورت رابطه (1) باشد:

$$y(t) = a \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

که a و f به ترتیب دامنه و فرکانس ارتعاش است، آنگاه سرعت ارتعاشی قطعه کار را می‌توان با مشتق گیری از جابجایی به صورت رابطه (2) به دست

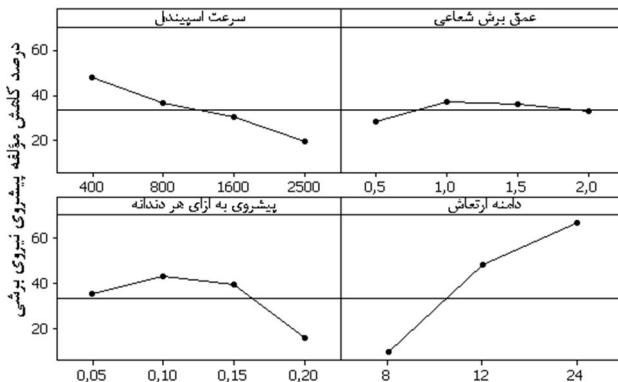
جدول 1 سطوح و مقادیر پارامترهای ورودی در آزمایش‌ها

سطح	سرعت اسپیندل (rpm)	پیشروی به ازای هر دندانه (mm/tooth)	عمق برش شعاعی (mm)	دامنه ارتعاش (mm)
1	400	0/05	0/5	8
2	800	0/1	1	12
3	1600	0/15	1/5	24
4	2500	0/2	2	-

آورده:

جدول 2 میانگین مؤلفه‌های نیروی برشی و برآیند آنها بر حسب فرآیندهای فرزکاری معمولی و آلتراسونیکی

برآیند نیروها		فرزکاری معمولی			فرزکاری آلتراسونیکی			پارامترهای ورودی				شماره آزمایش
F_{CM}	F_{UAM}	F_z	F_y	F_x	F_z	F_y	F_x	a	f_z	a_r	N	
21/6	21/4	7/1	15/9	12/8	11/1	12/1	13/7	1	1	1	1	1
66/9	34/0	11/5	49/3	43/7	18/8	10/4	26/4	2	2	2	1	2
135/8	61/3	24/9	96/8	92/0	24/9	16/1	53/7	3	3	3	1	3
225/3	218/5	44/5	163/8	148/1	47/1	156/0	145/6	1	4	4	1	4
36/8	29/1	4/3	28/7	22/6	20/5	7/3	19/3	3	2	1	2	5
35/5	35/3	8/0	25/7	23/2	7/5	23/1	25/6	1	1	2	2	6
164/2	164/0	35/8	127/4	97/2	38/6	124/5	99/5	1	4	3	2	7
172/6	99/7	29/9	118/0	122/4	16/8	49/2	85/1	2	3	4	2	8
41/2	42/5	9/3	34/0	21/4	8/6	31/0	27/7	1	3	1	3	9
116/3	87/0	18/6	87/8	74/0	10/2	42/9	75/0	3	4	2	3	10
56/4	57/1	9/9	35/2	43/0	8/1	17/4	53/8	2	1	3	3	11
118/2	117/7	22/0	76/7	87/2	23/8	68/3	92/8	1	2	4	3	12
52/6	55/6	8/6	43/1	28/9	6/5	40/9	37/1	2	4	1	4	13
77/8	78/9	17/3	59/8	46/7	16/1	55/6	53/6	1	3	2	4	14
86/6	87/6	20/6	59/8	59/1	18/8	54/8	65/7	1	2	3	4	15
70/3	79/2	11/3	39/0	57/4	10/1	16/3	76/8	3	1	4	4	16



شکل 4 تأثیر سرعت اسپیندل، پیشروی به ازای هر دندانه، عمق برش شعاعی و دامنه ارتعاش بر درصد کاهش مؤلفه پیشروی نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیکی نسبت به فرزکاری معمولی

بیشتر نیروی F_y در فرزکاری آلتراسونیکی نسبت به فرزکاری معمولی شده است. به عبارت دیگر، هر چه سرعت برشی کوچکتر و دامنه ارتعاش بزرگتر باشد، مؤلفه پیشروی نیروی برشی کاهش بیشتری می‌یابد. در آزمایش شماره 3 که سرعت اسپیندل $N=400\text{ rpm}$ و دامنه ارتعاش $a=24\mu\text{m}$ است، میزان F_y در فرزکاری معمولی $96/8$ نیوتون و در فرزکاری آلتراسونیکی $16/1$ نیوتون گزارش شده که نشان دهنده قابل توجه 83 درصدی است.

مقایسه برآیندهای نیروی برشی در جدول 2 نشان می‌دهد که در بیشتر آزمایش‌ها، برآیند نیروی برشی در فرزکاری به کمک آلتراسونیک کمتر از فرزکاری معمولی است. هر چند در اکثر آزمایش‌ها، مؤلفه‌های محوری و شعاعی نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیکی بیشتر از فرزکاری معمولی است ولی کاهش مقادیر مؤلفه پیشروی (F_y) در آزمایش‌های مختلف آنقدر قابل توجه بوده که در مجموع، برآیند نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیکی نسبت به فرزکاری معمولی به طور متوسط $10/8$ ٪ کاهش یافته است.

مقایسه مؤلفه‌های نیروی برشی در فرآیندهای فرزکاری معمولی و آلتراسونیکی نشان می‌دهد که در اکثر آزمایش‌ها، به دلیل وجود ضربه‌های ارتعاشی و عدم جایش ابزار و قطعه‌کار، مؤلفه شعاعی و محوری نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیکی بزرگتر از فرزکاری معمولی است ولی در همه آزمایش‌های تجربی، مؤلفه پیشروی نیروی برشی (F_y) در فرزکاری آلتراسونیکی کوچکتر از فرزکاری معمولی است. میزان متوسط کاهش نیروی F_y در فرزکاری به کمک آلتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی $\%33.5$ است. دلیل این کاهش، جایش ابزار و قطعه‌کار ناشی از همراستایی ارتعاش آلتراسونیک و پیشروی میز ماشین فرز است. همان‌گونه که در شکل 3 دیده می‌شود، در قسمت مریبوط به فرزکاری آلتراسونیکی، با حرکت ابزار از میانه قطعه‌کار به سمت انتهای آن، میزان F_y به دلیل افزایش دامنه ارتعاش کاهش می‌یابد ولی مقدار F_x با زیاد شدن دامنه ارتعاش و افزایش ضربه‌های ارتعاشی، روندی افزایشی دارد.

شکل 4 تأثیر پارامترهای سرعت اسپیندل، پیشروی به ازای هر دندانه، عمق برش شعاعی و دامنه ارتعاش بر درصد کاهش F_y در فرزکاری به کمک آلتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی را نشان می‌دهد. عمق برش شعاعی اثر قابل توجهی بر میزان کاهش F_y در فرزکاری آلتراسونیکی ندارد. در مقادیر کوچکتر پیشروی، تأثیر تغییر پیشروی بر درصد کاهش F_y ناچیز است ولی در $0/2\text{mm/tooth}$ ، از میزان کاهش F_y در فرزکاری آلتراسونیکی نسبت به فرزکاری معمولی کاسته شده است. روند تجربی مشاهده شده در شکل 4 در مورد تأثیر سرعت اسپیندل و دامنه ارتعاش تأیید کننده گفته‌های قبلی در مورد تأثیر میزان جایش ابزار و قطعه‌کار بر مقدار کاهش نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیکی نسبت به فرزکاری معمولی است. با افزایش سرعت برشی (سرعت اسپیندل)، به دلیل کاهش جایش ابزار و قطعه‌کار، فرآیند فرزکاری به کمک آلتراسونیک به آغاز فرزکاری معمولی نزدیک می‌شود و از درصد کاهش F_y در فرزکاری آلتراسونیکی نسبت به فرزکاری معمولی کاسته می‌گردد.علاوه بر این، افزایش دامنه ارتعاش با افزایش میزان جایش ابزار و قطعه‌کار باعث کاهش هر چه

- [3] S. Amini, M. J. Nategh, One directional and elliptical ultrasonic vibration assisted cutting of IN738, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 117-123, 2012. (In Persian)
- [4] M. J. Nategh, S. Amini, H. Soleimanimehr, A. Abdullah, M. H. Sadeghi, A Machining Force Model Developed for Ultrasonic Vibration-Assisted Turning, through Statistical Analysis of Influential Parameters, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 83-91, 2009. (In Persian)
- [5] E. Shakouri, M.H. Sadeghi, M. Maerefat, M.R. Karafi, M. Memarpour, Experimental and analytical investigation of thrust force in ultrasonic assisted drilling of bone, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 194-200, 2014. (In Persian)
- [6] M. Xiao, K. Sato, S. Karube, T. Soutome, The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 1375-1382, 2003.
- [7] V. I. Babitsky, A. N. Kalashnikov, A. Meadows, A. A. H. P. Wijesundara, Ultrasonically assisted turning of aviation materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, No. 1, pp. 157-167, 2003.
- [8] M. M. Abootorabi Zarchi, M. R. Razfar, A. Abdullah, Experimental Investigation of Chip Formation and Surface Topology in Ultrasonic-Assisted Milling of X20Cr13 Stainless Steel, in *ASME 2013 Manufacturing Science and Engineering Conference*, Madison, Wisconsin, USA, 2013.
- [9] G. L. Chern, Y. C. Chang, Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, pp. 659-666, 2006.
- [10] C. Y. Hsu, C. K. Huang, C. Y. Wu, Milling of MAR-M247 nickel-based superalloy with high temperature and ultrasonic aiding, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, pp. 857-866, 2007.
- [11] H. Ding, S. J. Chen, K. Cheng, Two-dimensional vibration-assisted micro end milling: cutting force modeling and machining process dynamics, *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. 12, pp. 1775-1783, 2010.
- [12] X. H. Shen, J. H. Zhang, H. Li, J. J. Wang, X. C. Wang, Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 63, No. 1-4, pp. 41-49, 2012.
- [13] N. Suresh, P. Rao, Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, pp. 189-198, 2006.
- [14] P. K. Baro, S. S. Joshi, S. G. Kapoor, Modeling of cutting forces in a face-milling operation with self-propelled round insert milling cutter, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 831-839, 2005.
- [15] V. I. Babitsky, A. V. Mitrofanov, V. V. Silberschmidt, Ultrasonically assisted turning of aviation materials, *Ultrasonics*, Vol. 42, pp. 81-86, 2004.
- [16] T. Tawakoli, B. Azarhoushang, Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 1585-1591, 2008.
- [17] J. Pujana, A. Rivero, A. Celaya, L. N. Lopez de Lacalle, Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, pp. 500-508, 2009.

4- نتیجه گیری

در این مقاله، عملیات کنارتراشی در فرزکاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک یک بُعدی به صورت تجربی بررسی شده و نیروهای برشی در فرزکاری عمومی و فرزکاری به کمک آلتراسونیک با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای اعمال مؤثر ارتعاش آلتراسونیک به قطعه‌کار و اندازه‌گیری دامنه ارتعاش و همچنین نیروهای برشی، از یک تنظیم تجربی خاص استفاده شده است. به کمک طراحی آزمایش تاگوچی، تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش شعاعی و دامنه ارتعاشی بر مؤلفه‌های شعاعی (F_x)، پیشروی (F_y) و محوری (F_z) نیروی برشی بررسی شده است. در فرزکاری آلتراسونیکی، مؤلفه‌های F_x و F_z نیروی برشی در اکثر آزمایش‌ها بیشتر از فرزکاری عمومی است. در همه آزمایش‌های انجام شده، به دلیل جدایش ابزار و قطعه‌کار، مؤلفه F_y نیروی برشی که در راستای ارتعاش قطعه‌کار است، در فرزکاری به کمک آلتراسونیک نسبت به فرزکاری عمومی کاهش قابل توجهی یافته است. میزان متوسط کاهش F_y در فرزکاری آلتراسونیکی نسبت به فرزکاری عمومی، $33/5\%$ است. کاهش مؤلفه F_y در فرزکاری آلتراسونیکی آنقدر قابل توجه بوده است که با وجود افزایش مؤلفه‌های F_x و F_z ، برآیند نیروی برشی در بیشتر آزمایش‌ها در فرزکاری آلتراسونیکی کمتر از فرزکاری عمومی است. برآیند نیروی برشی به طور متوسط $10/8\%$ در فرزکاری آلتراسونیکی نسبت به فرزکاری عمومی کاهش یافته است. هر چه سرعت برشی کوچکتر و دامنه ارتعاشی بزرگتر باشد، به دلیل کاهش میزان درگیری ابزار و قطعه‌کار در راستای پیشروی (محور y ، F_y) کاهش بیشتری می‌یابد. میزان F_y در سرعت اسپیندل $N=400 \text{ rpm}$ و دامنه ارتعاش $a=24\mu\text{m}$ در فرزکاری عمومی، $96/8$ نیوتون و در فرزکاری آلتراسونیکی، $16/1$ نیوتون است که نشان دهنده کاهش قابل توجه 83 درصدی است.

5- مراجع

- [1] D. E. Brehl, T. A. Dow, Review of vibration-assisted machining, *Precision Engineering*, Vol. 32, pp. 153-172, 2007.
- [2] M. Zhou, Y. Eow, B. Ngoi, E. Lim, Vibration-assisted precision machining of steel with PCD tools, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 18, No. 5, pp. 825-834, 2003.