



تأثیر پارامترهای برشی و دامنه ارتعاش بر نیروی برشی در کنار تراشی ارتعاشی آلیاژ آلومینیم 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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 بهمن 1393
پذیرش: 16 فروردین 1394
ارائه در سایت: 25 فروردین 1394
کلیدواژه‌ها:
فرزکاری به کمک آلتراسونیک
فرزکاری معمولی
نیروی برشی
دامنه ارتعاش
سرعت برشی

چکیده

کاهش نیروی برشی در یک فرآیند ماشین‌کاری دارای مزایای فراوانی از جمله افزایش عمر ابزار و بهبود کیفیت سطح ماشین‌کاری شده است. یکی از تکنیک‌های نوین برای کاهش نیروی برشی، براده برداری به کمک ارتعاش آلتراسونیک است. در این مقاله، فرآیند فرزکاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک یک بُعدی روی آلیاژ آلومینیم AI7022 مطالعه شده است. با طراحی یک مکانیزم مؤثر برای اعمال ارتعاش آلتراسونیک به قطعه‌کار، تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش شعاعی و دامنه ارتعاش بر مؤلفه‌های سه‌گانه نیروی برشی و برآیند آن‌ها در هر دو فرآیند فرزکاری معمولی و فرزکاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. اعمال ارتعاش آلتراسونیک به فرزکاری، بیشترین تأثیر را بر مؤلفه پیشروی نیروی برشی که در راستای ارتعاش قطعه‌کار است، گذاشته و به طور متوسط آن را 33/5٪ کاهش داده است. هرچه سرعت برشی کوچکتر و دامنه ارتعاش بزرگتر باشد، میزان جدایش ابزار و قطعه‌کار در قسمت‌هایی از هر سیکل ارتعاشی افزایش یافته و مؤلفه پیشروی نیروی برشی کاهش بیشتری می‌یابد. برآیند نیروی برشی نیز به طور متوسط 10/8٪ در فرزکاری ارتعاشی نسبت به فرزکاری معمولی کاهش یافته است.

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%.

1- مقدمه

گذشته، محققان مختلف مزایای زیادی نظیر کاهش نیروی برشی [5,4]، افزایش عمر ابزار [6]، بهبود کیفیت سطح [7] و شکل‌گیری بهتر براده [8] را برای ماشین‌کاری به کمک ارتعاش گزارش کرده‌اند. از بین فرآیندهای اصلی براده برداری، در زمینه فرآیند فرزکاری به کمک آلتراسونیک¹ مطالعات کمتری انجام شده است. چرن و چانگ [9] اثرات

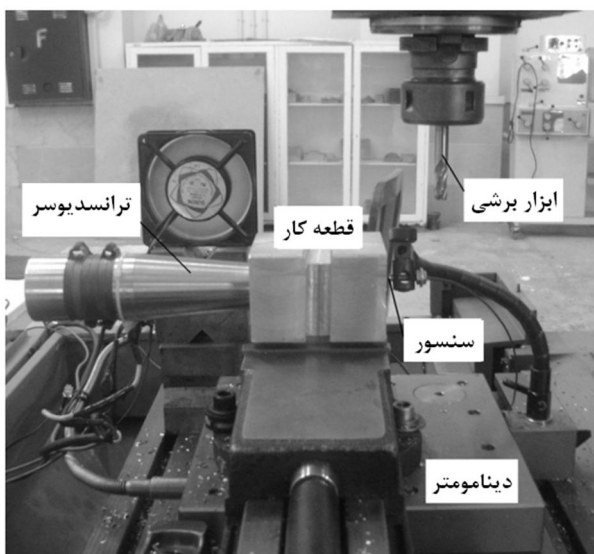
ماشین‌کاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک یکی از روش‌های نوین براده برداری است که در آن، ارتعاش آلتراسونیک به ابزار یا قطعه‌کار در حین براده برداری اعمال می‌گردد [1] و موجب جدایش متناوب ابزار و قطعه‌کار از یکدیگر می‌شود [2]. با افزایش کاربرد مواد سخت و آلیاژی، استفاده از فرآیندهای ماشین‌کاری ارتعاشی رو به فزونی گذاشته است [3]. در سال‌های

1- Ultrasonic assisted milling

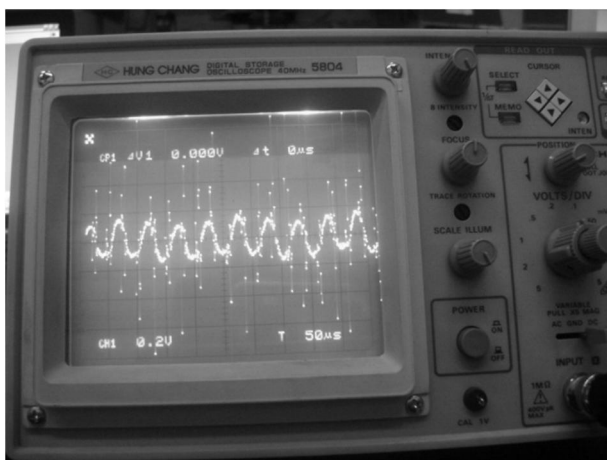
ارتعاش انتهایی قطعه کار توسط یک سنسور القایی اندازه‌گیری فاصله مدل PU-09، یک مبدل مدل AEC-5509 و یک اسیلوسکوپ، اندازه‌گیری شده است. این سنسور بر روی یک پایه در فاصله 0/4mm عمود بر سطح انتهایی قطعه کار و در مرکز آن قرار گرفته است (شکل 1) و خروجی ولتاژ آن روی اسیلوسکوپ قابل مشاهده است (شکل 2).

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

روی دو سطح جانبی قطعه کار شیار با عرض 20mm و عمق 10mm ایجاد شده است (شکل 1). ابتدا کنارتراشی به صورت فرزکاری معمولی انجام می‌شود و سپس در وسط شیار با روشن شدن ژنراتور آلتراسونیک و بدون قطع حرکت دورانی اسپیندل و حرکت پیشروی میز ماشین فرز، برش با حالت آلتراسونیک ادامه می‌یابد تا همه شرایط آزمایشی برای دو فرآیند معمولی و آلتراسونیک یکسان باشد. به کمک طراحی آزمایش تاگوچی، تأثیر سرعت اسپیندل (N)، پیشروی به ازای هر دندانه (f)، عمق برش شعاعی (a_r)



شکل 1 تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش‌های فرزکاری آلتراسونیک و معمولی



شکل 2 نمونه‌ای از ولتاژ خروجی از سنسور اندازه‌گیری دامنه ارتعاش

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

اعمال ارتعاش آلتراسونیک دو بُعدی بر کیفیت میکرو فرزکاری آلیاژ آلومینیم AI6061-T6 را به صورت تجربی بررسی و مشاهده کردند که دقت عرض و صافی سطح شیارها بهبود یافت و به دلیل شرایط بهتر ماشین‌کاری و همچنین کاهش نیروهای برشی، عمر ابزار افزایش پیدا کرد. سو و دیگران [10] ویژگی‌های فرزکاری 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 پیش بینی نیروی برشی در فرآیند میکرو فرزکاری به کمک ارتعاش دو بُعدی ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که افزایش دامنه ارتعاش موجب افزایش ماکزیمم نیروی برشی می‌گردد. شن و دیگران [12] اثرات ارتعاش آلتراسونیک در عملیات میکرو فرزکاری آلیاژ آلومینیم را بررسی کردند. آن‌ها با اعمال ارتعاش آلتراسونیک به قطعه کار همزمان با عملیات شیار تراشی نتیجه گرفتند که میکرو فرزکاری همراه با ارتعاش آلتراسونیک در جهت پیشروی، نیروی برشی پالسی شکل و براده‌های کوچکتر بوجود می‌آورد.

در این مقاله، با طراحی یک مکانیزم مؤثر برای اعمال ارتعاش آلتراسونیک به قطعه کار، فرآیند کنارتراشی¹ آلیاژ آلومینیم AI7022 به کمک آلتراسونیک به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش شعاعی و دامنه ارتعاش آلتراسونیک بر مؤلفه‌های سه گانه نیروی برشی و برآیند نیروی برش در فرآیندهای فرزکاری 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 فرزکاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک روی یک ماشین فرز با کنترل عددی ساخت شرکت دیکل انجام شده است. برای اعمال ارتعاش یک بُعدی به قطعه کار از یک ترانسدیوسر پیزوالکتریکی با توان 3kW استفاده شده است. منبع تغذیه آلتراسونیک با توان 2kW ساخت شرکت MPI، منبع الکتریکی 50Hz را به یک فرکانس بالا ($f=20500$ Hz) تبدیل می‌کند. این پالس‌های الکتریکی فرکانس بالا وارد ترانسدیوسر شده و به علت اثر پیزوالکتریک، به ارتعاش مکانیکی با فرکانس آلتراسونیک تبدیل می‌شوند. قطعه کار با یک پیچ دو سر رزوه، در انتهای قسمت تطبیق ترانسدیوسر به آن متصل شده و به این دلیل، فرکانس رزونانس 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 رزونانس ترانسدیوسر تأثیرگذار است، سیستم ارتعاشی در حین تغییرات دینامیکی بار، حالت رزونانس ارتعاش را حفظ می‌کند. شکل 1 تجهیزات آزمایشی استفاده شده را نشان می‌دهد که آزمایش‌های هر دو حالت فرزکاری معمولی و آلتراسونیک به کمک آن انجام شده است.

ابعاد قطعه کار به کمک آنالیز امان 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 $\varnothing 8$ به یک قطعه فولادی متصل و این قطعه فولادی داخل گیره ماشین فرز محکم شده است. دامنه

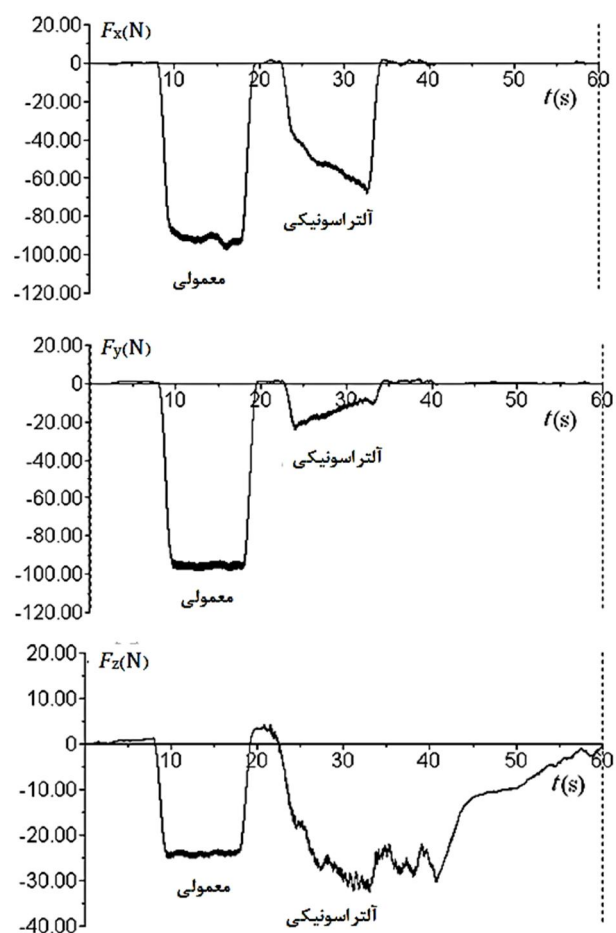
2- Side milling
3- Conventional milling

$$V_p = 2\pi a f \cos(2\pi f t) \quad (2)$$

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

$$v = \pi D N \quad (3)$$

که D 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 می رود. به طور کلی، میزان جدایش ابزار و قطعه کار با افزایش دامنه و فرکانس ارتعاش، افزایش و با افزایش سرعت اسپیندل، کاهش می یابد. نتیجه تجربی به دست آمده در مورد تأثیر دامنه ارتعاش بر برآیند نیروی برشی در فرزکاری به کمک آلتراسونیک نشان می دهد که افزایش دامنه ارتعاش تا یک مقدار خاص، برآیند نیروی برشی را کاهش می دهد. افزایش بیشتر دامنه به دلیل افزایش ضربه های متوالی جانبی قطعه کار به ابزار برشی و به عبارت دیگر، اثر ارتعاشی-ضربه ای¹ در فرآیندهای ماشین کاری ارتعاشی، موجب افزایش مؤلفه های شعاعی و محوری و در نتیجه، برآیند نیروی برشی می گردد [17].



شکل 3 نمونه ای از نیروهای اندازه گیری شده توسط دینامومتر با شرایط rpm $a=24 \mu\text{m}$ و $a_t=1/5 \text{ mm}$ ، $f_z=0/15 \text{ mm/tooth}$ ، $N=400$

مختلف پارامترهای ورودی در جدول 1 آمده است. همه آزمایش ها در غیاب روانکار و در حالت موافق انجام شده اند. در همه آزمایش ها، عمق برش محوری $a=5 \text{ mm}$ و فرکانس ارتعاش آلتراسونیک $f=20500 \pm 200 \text{ Hz}$ است.

3- نتایج تجربی و بحث

در هر یک از آزمایش های انجام شده، مؤلفه های شعاعی (F_x)، پیشروی (F_y) و محوری (F_z) نیروی برشی به وسیله یک دینامومتر کیستلر مدل 9255B اندازه گیری شده است. شکل 3 یک نمونه از نیروهای اندازه گیری شده با شرایط برشی $N=400 \text{ rpm}$ ، $f_z=0/15 \text{ mm/tooth}$ ، $a_t=1/5 \text{ mm}$ و $a=24 \mu\text{m}$ را نشان می دهد. در جدول 2 میانگین مؤلفه های نیروی برشی و برآیند آن ها در هر آزمایش ذکر شده است. F_{CM} برآیند نیروی برشی در فرزکاری معمولی و F_{UAM} 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 می یابد و با افزایش سرعت برشی، روندی کاهشی دارد که با یافته های سایر محققان مطابقت دارد [13,14]. افزایش عمق برش شعاعی باعث افزایش طول قوس تماس ابزار با قطعه کار و افزایش پیشروی باعث افزایش ضخامت و سطح مقطع براده می گردد و در نتیجه، نیروی برشی افزایش می یابد. کاهش نیروی برشی با افزایش سرعت برشی به دلیل افزایش دمای ناحیه برش و کاهش اصطکاک اتفاق می افتد [14]. تأثیر عمق برش شعاعی و نرخ پیشروی بر نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک مشابه فرزکاری معمولی است ولی افزایش سرعت برشی تأثیر معناداری بر مقادیر برآیند نیروی برشی در فرزکاری به کمک آلتراسونیک ندارد. در فرزکاری آلتراسونیک، با افزایش دامنه ارتعاش از $8 \mu\text{m}$ به $12 \mu\text{m}$ برآیند نیروی برشی کاهش می یابد ولی افزایش بیشتر دامنه تا $24 \mu\text{m}$ ، برآیند نیروی برشی را اندکی افزایش می دهد. دلیل این رفتار را می توان به کمک بررسی میزان جدایش ابزار و قطعه کار از یکدیگر در هر سیکل ارتعاشی توضیح داد. اساس فرآیندهای ماشین کاری به کمک ارتعاش آن است که به دلیل ارتعاش متناوب ابزار یا قطعه کار، در پارامترهای مناسب برشی و ارتعاشی، ابزار به صورت متناوب از براده جدا می شود و در نتیجه، میانگین نیروی برشی کاهش می یابد [15,16].

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

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

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

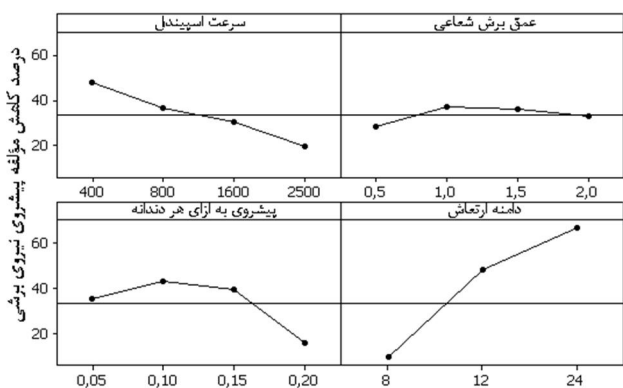
جدول 1 سطوح و مقادیر پارامترهای ورودی در آزمایش ها

سطح	سرعت اسپیندل (rpm)	پیشروی به ازای هر دندان (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	-

آورد:

جدول 2 میانگین مؤلفه‌های نیروی برشی و برآیند آنها برحسب نیوتن در فرآیندهای فرزکاری معمولی و آلتراسونیک

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



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 آلتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی

بیشتر نیروی F_y در فرزکاری آلتراسونیک 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 $96/8$ نیوتن و در فرزکاری آلتراسونیک، $16/1$ نیوتن گزارش شده که نشان دهنده کاهش 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 آلتراسونیک 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 آلتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی به طور متوسط 10/8٪ کاهش یافته است.

مقایسه مؤلفه‌های نیروی برشی در فرآیندهای فرزکاری معمولی و آلتراسونیک نشان می‌دهد که در اکثر آزمایش‌ها، به دلیل وجود ضربه‌های ارتعاشی و عدم جدایش ابزار و قطعه‌کار، مؤلفه شعاعی و محوری نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک بزرگتر از فرزکاری معمولی است ولی در همه آزمایش‌های تجربی، مؤلفه پیشروی نیروی برشی (F_y) در فرزکاری آلتراسونیک 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، جدایش ابزار و قطعه‌کار ناشی از همراستایی ارتعاش آلتراسونیک و پیشروی میز ماشین فرز است. همان‌گونه که در شکل 3 دیده می‌شود، در قسمت مربوط به فرزکاری آلتراسونیک، 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 نیروی 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 آلتراسونیک ندارد. در مقادیر کوچکتر پیشروی، تأثیر تغییر پیشروی بر درصد کاهش F_y ناچیز است ولی در $f_z=0/2\text{mm/tooth}$ ، از میزان کاهش F_y در فرزکاری آلتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی مقدار زیادی 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 جدایش ابزار و قطعه‌کار بر مقدار کاهش نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی است. با افزایش سرعت برشی (سرعت اسپیندل)، به دلیل کاهش جدایش ابزار و قطعه‌کار، فرآیند فرزکاری به کمک آلتراسونیک به فرآیند فرزکاری معمولی نزدیک می‌شود و از درصد کاهش F_y در فرزکاری آلتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی کاسته می‌گردد. علاوه بر این، افزایش دامنه ارتعاش با افزایش میزان جدایش ابزار و قطعه‌کار باعث کاهش هر چه

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 معمولی 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 آلتراسونیک، مؤلفه‌های F_x و F_z نیروی برشی در اکثر آزمایش‌ها بیشتر از فرزکاری معمولی 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 معمولی کاهش قابل توجهی یافته است. میزان متوسط کاهش F_y در فرزکاری آلتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی، 33/5٪ است. کاهش مؤلفه F_y در فرزکاری آلتراسونیک آنقدر قابل توجه بوده است که با وجود افزایش مؤلفه‌های F_x و F_z ، برآیند نیروی برشی در بیشتر آزمایش‌ها در فرزکاری آلتراسونیک کمتر از فرزکاری معمولی است. برآیند نیروی برشی به طور متوسط 10/8٪ در فرزکاری آلتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی 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 $N=400$ rpm و دامنه ارتعاش $a=24\mu\text{m}$ در فرزکاری معمولی، 96/8 نیوتن و در فرزکاری آلتراسونیک، 16/1 نیوتن 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.
- [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.