

مدل سازی اجزاء محدود سه بعدی فرآیند فرزکاری با ارتعاشات اولتراسونیک آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V و تأثیر تغییرات فرکانس و دامنه

ارتعاشات بر روی نیروی برشی

محمد خسروی*

استادیار

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند

بیرجند، ایران

mkhosravi@birjandut.ac.ir

معین غلامی

کارشناس ارشد

مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند

بیرجند، ایران

mgholami_stu@birjandut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۳۰

چکیده

با کاهش نیروی برشی در فرایندهای ماشین کاری می توان به مزایای مانند عمر ابزار و بهبود کیفیت سطح ماشین کاری شده دست یافت. در چند دهه اخیر، یکی از روش های مؤثر برای کاهش نیروی برشی، اعمال ارتعاشات اولتراسونیک به ابزار یا قطعه کار در فرایند ماشین کاری است. در این مقاله، شبیه سازی سه بعدی فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک بر روی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با در نظر گرفتن ۵ فرکانس و ۶ دامنه ارتعاشی با استفاده از نرم افزار آباکوس^۱ انجام شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد با افزایش فرکانس از ۱۸ تا ۲۰ کیلوهرتز ماکزیمم نیروی برشی تغییری نمی کند. در این مقاله حالت های مختلف فرایند فرزکاری جهت دستیابی به کمینه نیروی برشی با توجه به پارامترهای فرکانس و دامنه ارتعاش مورد بررسی قرار گرفته است و با مقایسه نتایج مشاهده گردید کمینه نیروی برشی در بین حالت های مختلف شبیه سازی برای فرکانس ۱۸ کیلوهرتز و دامنه ارتعاش ۲۵ میکرومتر حاصل می گردد.

واژگان کلیدی: شبیه سازی اجزاء محدود، دامنه ارتعاش، فرکانس، فرایند فرزکاری اولتراسونیک، آلیاژ تیتانیوم

۱. مقدمه

استحکام، کامپوزیت ها و سرامیک ها، باعث تولید نیروهای برشی زیادی می شود که باعث سایش سریع لبه های برشی، صافی سطح نامطلوب و تغییرات ابعادی می شود. نیاز

فرزکاری به عنوان یکی از فرایندهای تولید قطعات صنعتی به روش براده برداری محسوب می شود. ماشین کاری آلیاژهای با

کمک ارتعاش اولتراسونیک را در عملیات فرزکاری با اندازه‌گیری نیروهای برشی، زبری سطح، مورفولوژی تراشه و دقت ابعادی مقایسه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که ارتعاش اولتراسونیک به عملیات فرزکاری با انجام عملیات برش پالس مانند کمک می‌کند. شن و همکاران [۱۳] یک مدل تحلیلی را با در نظر گرفتن اثر ارتعاش بر روی ضخامت لحظه‌ای تراشه ایجاد کردند. نتایج آنها با انجام عملیات فرزکاری با کمک ارتعاش اولتراسونیک تأیید شد. الهامی و همکاران [۱۴] تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری را بر نیروهای برشی در حین فرزکاری ناشی از اولتراسونیک AISI4140 سخت‌کاری شده مورد مطالعه قرار دادند. آنها همچنین یک مدل تحلیلی را با در نظر گرفتن اثر ارتعاش بر روی ضخامت لحظه‌ای تراشه پیشنهاد داده‌اند. مدل آنها همچنین شامل یک مدل انتقال گرمای سه بعدی برای پیش‌بینی میدان دما در قطعه‌کار به منظور ترکیب کردن اثر افزایش دما بر نیروهای برشی بود. ویچرام چیچی و همکاران [۱۵] اثر فرکانس ارتعاش (ارتعاش محوری) را در فرزکاری با کمک اولتراسونیک AISI3161 مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجربی آنها نشان داد که با افزایش ارتعاش، زبری سطح افزایش یافته است. شبیه‌سازی اجزاء محدود به صورت سه بعدی تا کنون برای فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک انجام نشده است. در این مقاله شبیه‌سازی اجزاء محدود سه بعدی فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک برای دامنه‌ها و فرکانس‌های مختلف انجام شده و نتایج این شبیه‌سازی‌ها برای یافتن کمترین نیروی برشی با هم مقایسه شده است.

۲. شبیه‌سازی اجزاء محدود

شبیه‌سازی فرایند فرزکاری با کمک ارتعاشات اولتراسونیک بر روی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به صورت سه بعدی توسط نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶ انجام شده است.

روزافزون ماشین‌کاری این مواد موجب توسعه روش‌های جدید در براده‌برداری شده است. با توجه به محدودیت‌های ذکر شده یک روش جدید برای غلبه بر محدودیت‌های به وجود آمده، فرزکاری با کمک ارتعاشات اولتراسونیک نام دارد که در آن، ارتعاشاتی با فرکانس بالا (۱۶ تا ۴۰ کیلوهرتز و دامنه کم (۲ تا ۳۰ میکرومتر) هم‌زمان با حرکت اصلی برش در فرزکاری، به ابزار یا قطعه‌کار اعمال می‌شود [۱]. جدایش به طور متناوب ابزار و قطعه‌کار از یکدیگر در هر سیکل ارتعاشی، ویژگی اصلی ماشین‌کاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک است [۲]. با بکار بردن ارتعاشات اولتراسونیک در فرآیندهای مختلف براده‌برداری، نیروهای برشی، سایش ابزار، صافی سطح و اندازه‌ی پلیسه به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد [۳-۵]. در فرآیند فرزکاری با ارتعاشات اولتراسونیک نیروهای برشی و زبری سطح کاهش یافته است [۶-۸]. در اواخر دهه ۱۹۶۰، ارتعاش اولتراسونیک برای اولین بار در مقیاس ماکرو اعمال شد که منجر به کاهش نیروهای برشی شد [۹]. رحمان و همکاران [۱۰] اثر ماشین‌کاری ارتعاشی را با در نظر گرفتن نسبت تماس ابزار-قطعه‌کار مدل‌سازی کردند. (نسبت تماس، نسبت زمان تماس در یک نوسان به دوره زمانی نوسان) در طول آزمایش‌های تراشکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک است. آنها پیشنهاد کرده‌اند که میانگین نیرو در طول برش به کمک اولتراسونیک برابر با نسبت تماس ضربدر نیروی برشی معمولی است. لی و وانگ [۱۱] تأثیر پارامتر فرایند را بر فرسایش ابزار و زبری سطح در فرزکاری با ارتعاش اولتراسونیک فولاد ابزار SKD61 بررسی کردند. نتایج تجربی آنها نشان داد که کمک ارتعاش اولتراسونیک، فرایند فرزکاری را با کاهش سایش ابزار، زبری سطح و ارتفاع پلیسه، بهبود می‌بخشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که اثر ارتعاش اولتراسونیک با افزایش سرعت دورانی، کاهش می‌یابد. شن و همکاران [۱۲] به طور تجربی تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک بر عملکرد فرزکاری را بررسی کردند. آنها تأثیر

در این شبیه‌سازی ابزار برشی دارای شش لبه برشی و به صورت صلب در نظر گرفته شده است. سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و مقدار پیشروی به ازای هر دندانه ۰/۱ میلی‌متر بر دندانه فرض شده است. تعداد المان‌های قطعه کار ۲۸۸ و از نوع C3D8R-Hex و تعداد المان‌های ابزار ۱۲۰۷ و از نوع Tri-R3D3 و ضریب اصطکاک $M=0$ در نظر گرفته شده است. در این تحقیق سطح زیرین قطعه کار کاملاً در تمام جهات بسته شده و به سطح زیر قطعه کار یک ارتعاش اولتراسونیک مطابق رابطه ۱ اعمال شده است [۱۸]:

$$X(t) = \text{asin}(\omega t) = \text{asin}(2\pi f t) \quad (1)$$

در این رابطه a دامنه ارتعاش، ω سرعت زاویه‌ای و f فرکانس ارتعاش است. در شکل ۱ و ۲ کانتورهای تنش فون میسز و کرنش مؤثر پلاستیک در لحظه شروع درگیری ابزار با قطعه کار در فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک به صورت سه بعدی با دامنه ارتعاش ۲۵ میکرومتر و فرکانس ۱۸ کیلوهرتز نشان داده شده است.

خواص مکانیکی مورد نیاز برای شبیه‌سازی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی ابعاد قطعه کار $5 \times 2 \times 1$ میلی‌متر به ترتیب معرف (طول، عرض و ارتفاع) و تیغه فرز با تعداد ۶ دندانه که زاویه دندانه‌ها نسبت به هم ۶۰ درجه است و با توجه به نوع فرایند، نوع تحلیل Dynamic, Explicit در نظر گرفته شده است.

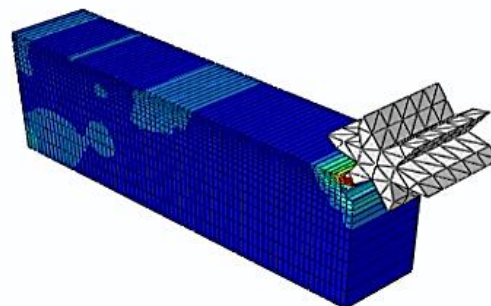
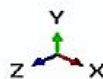
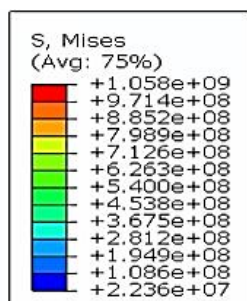
جدول ۱. خواص مکانیکی قطعه کار [۱۶]

چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	استحکام (مگاپاسکال)	ضریب پواسون
۴۴۲۸	۱۰۹	۱۰۹۸	۰,۳۱

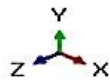
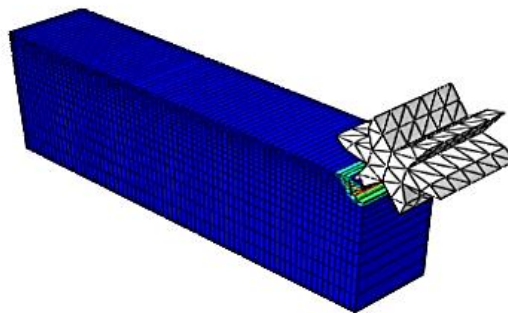
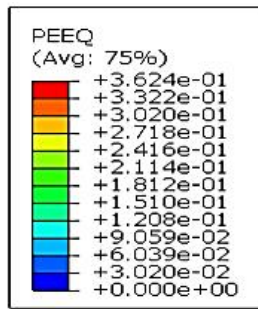
جدول ۲. ضرایب جانسون کوک مورد استفاده در شبیه‌سازی

برای قطعه کار [۱۶]

ناحیه	A (MPa)	B (MPa)	N	C	Tm (K)
پلاستیک	۱۰۹۸	۱۰۹۲	۰/۹۳	۰/۰۱۴	۱۸۷۸
شکست	-۰/۰۹	۰/۲۷	۰/۴۸	۰/۰۱۴	۲/۸۷



شکل ۱. کانتور تنش فون میسز (پاسکال)



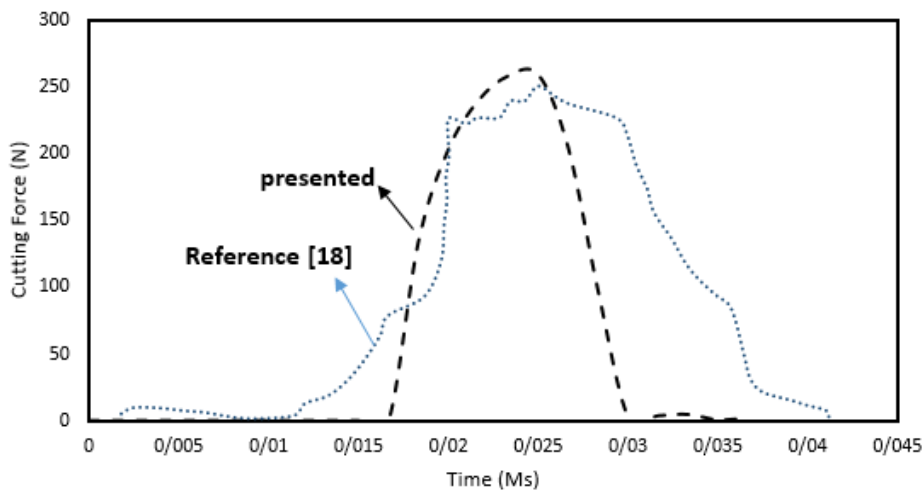
شکل ۲. کانتور کرنش مؤثر پلاستیک

نمودار نیروی برشی در تحقیق حاضر با رفتار نیروی برشی گزارش شده در منبع [۱۸] روند مشابهی دارد. اندکی اختلاف مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن مدل اجزاء محدود سه بعدی ایجاد شده و تغییر جنس ماده قابل توجیه است.

۳. نتایج شبیه‌سازی و بحث

۳-۱. اعتبارسنجی مدل اجزاء محدود

در این بخش به منظور اعتبارسنجی، نتایج شبیه‌سازی با نتایج شبیه‌سازی گزارش شده در منبع [۱۸] با همدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد رفتار

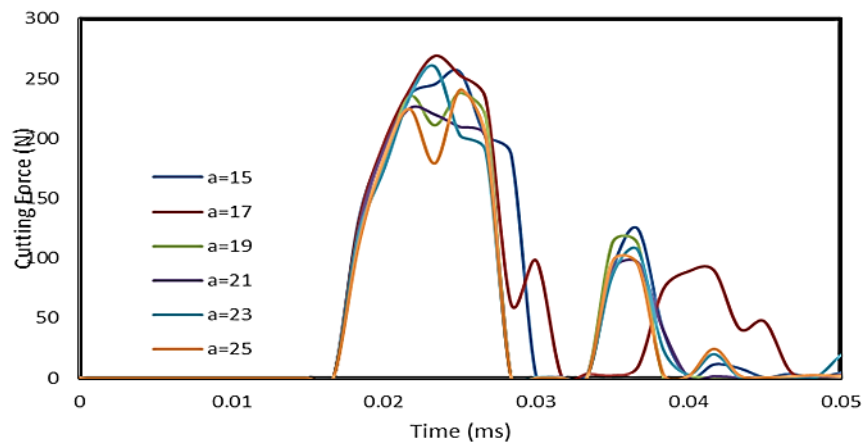


شکل ۳. مقایسه نتایج نیروی برشی مدل اجزاء محدود با نیروی برشی گزارش شده در منبع [۱۸] (فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ارتعاشی ۱۵ میکرومتر)

در شبیه‌سازی به ترتیب ۱۸-۱۹-۲۰-۲۱-۲۲ کیلوهرتز و ۲۵-۲۳-۲۱-۱۹-۱۷-۱۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها در قالب نمودار نیروی برشی بر حسب زمان در شکل‌های ۴-۸ با هم مقایسه و نشان داده شده است.

۳-۲. بررسی اثر فرکانس و دامنه ارتعاش روی نیروی برشی

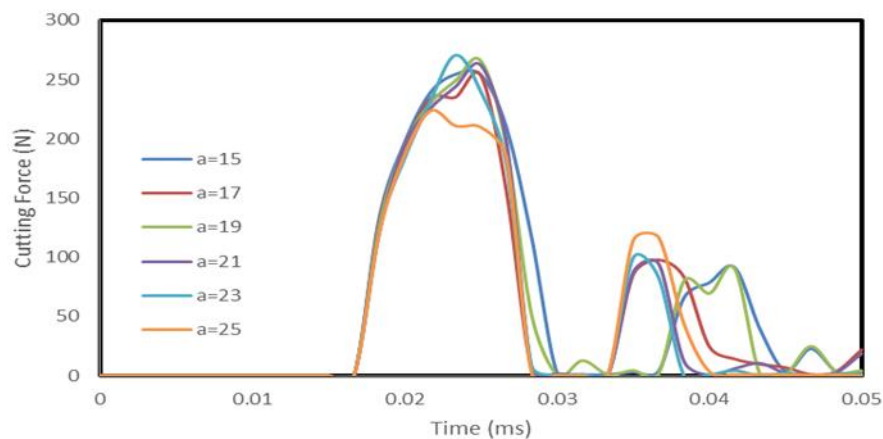
در این مقاله، شبیه‌سازی اجزاء محدود فرایند فرزکاری به همراه ارتعاشات اولتراسونیک به صورت سه بعدی در فرکانس و دامنه‌های مختلف انجام شده است. فرکانس‌ها و دامنه‌ها



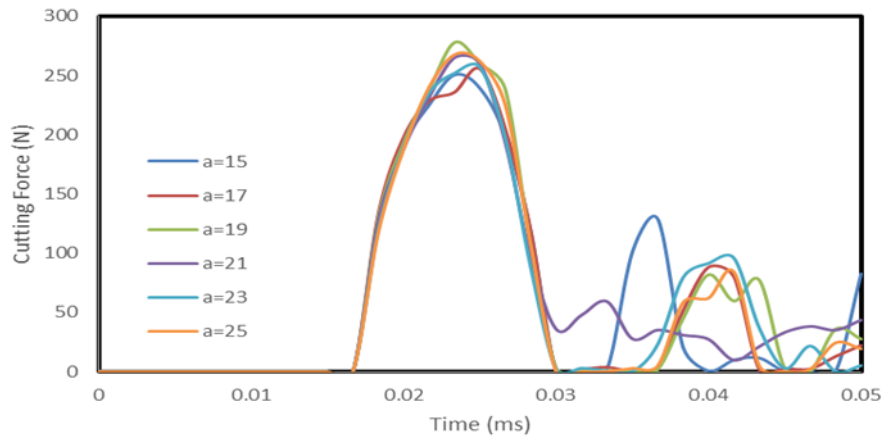
شکل ۴. نمودارهای نیروی برشی برحسب زمان فرایند فرزکاری با ارتعاشات اولتراسونیک با فرکانس ۱۸ کیلوهرتز (a = دامنه ارتعاش)

می‌کنند. برای فرکانس ۱۸ کیلوهرتز و دامنه ارتعاشی ۱۵ میکرومتر ماکزیمم نیروی برشی ۲۵۰ نیوتن و نیروی برشی در دامنه ارتعاشی ۲۱ میکرومتر در پایان زمان سیکل به صفر می‌رسد.

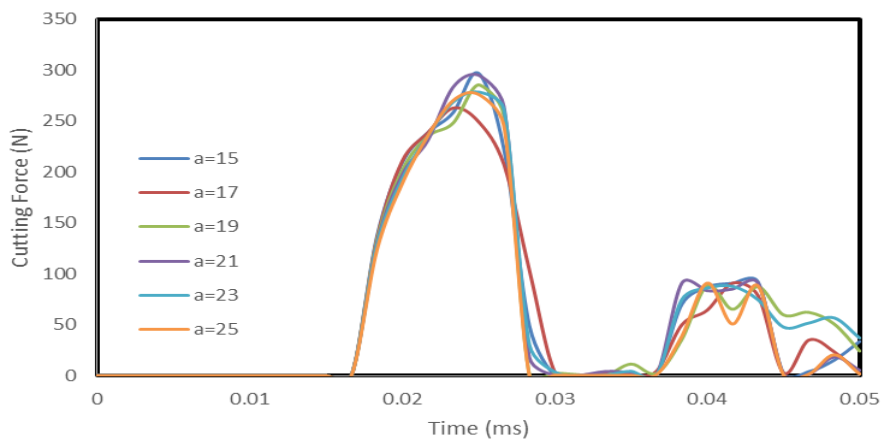
نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک در یک سیکل ارتعاشی در شکل ۴ نشان داده شده است. پارامتر a دامنه ارتعاش را برحسب میکرومتر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌گردد در یک فرکانس ثابت با تغییر دامنه‌ها نیروهای برشی تغییر



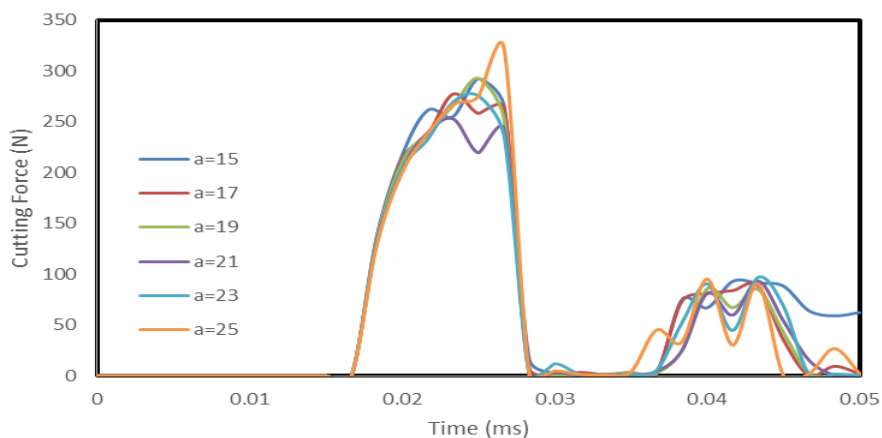
شکل ۵. نمودارهای نیروی برشی برحسب زمان فرایند فرزکاری با ارتعاشات اولتراسونیک با فرکانس ۱۹ کیلوهرتز (a = دامنه ارتعاش)



شکل ۶. نمودارهای نیروی برشی بر حسب زمان فرآیند فرزکاری با ارتعاشات اولتراسونیک با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز ($a =$ دامنه ارتعاش)



شکل ۷. نمودارهای نیروی برشی بر حسب زمان فرآیند فرزکاری با ارتعاشات اولتراسونیک با فرکانس ۲۱ کیلوهرتز ($a =$ دامنه ارتعاش)



شکل ۸. نمودارهای نیروی برشی بر حسب زمان فرآیند فرزکاری با ارتعاشات اولتراسونیک با فرکانس ۲۲ کیلوهرتز ($a =$ دامنه ارتعاش)

بازه زمانی ۲-۳ میکروثانیه نیروهای برشی حاصل شده برای دامنه‌های ارتعاشی ۱۵-۱۷-۱۹-۲۱ میکرومتر نزدیک به هم

با توجه به نتایج شبیه‌سازی که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد ماکزیمم نیروی برشی در دامنه ارتعاشی ۱۵ رخ می‌دهد. در

$$F_{trv} = F_{t/c} + C \sin \theta \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$F_{t/c} = k_t a_p a_{fz} \sin \theta \quad (3)$$

$$C = B k_t a_p \quad (4)$$

در روابط فوق، پارامترهای F_{trv} ، a_p ، a_{fz} ، ω به ترتیب، نیروی اصلی، عمق برش، پیشروی، فرکانس و C یک ثابتی است که به عمق تراش و انقباض براده وابسته است که با داشتن این مقادیر و جای گذاری در رابطه ۲ امکان محاسبه نیروی اصلی فراهم می‌گردد. علاوه بر این پارامترهای $F_{t/c}$ ، k_t و θ به ترتیب معرف نیروی برشی ثابت برشی و زاویه لبه برنده تیغه فرز است. در خصوص انقباض براده می‌توان گفت هر چقدر میزان k_t به سمت ۱ میل کند به معنای آن است که تغییر شکل براده هنگام جدا شدن از کار کمتر شده و در نتیجه نیروی مصرفی کاهش یافته و بازدهی تراش افزایش می‌یابد. در خصوص تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک در فرایندهای ماشین کاری همان‌طور که روابط تحلیلی حاکم بر فرایند در منبع [۱۷] اثبات می‌کند نیروی برشی به فرکانس وابسته است. نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته هم اثبات این ادعاست.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، شبیه‌سازی اجزاء محدود فرایند فرز کاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک بر روی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V برای ۵ فرکانس و ۶ دامنه ارتعاشی مختلف با فرکانس‌های ۱۸-۱۹-۲۰-۲۱-۲۲ کیلوهرتز و دامنه‌های ارتعاشی ۱۵-۱۷-۱۹-۲۱-۲۳-۲۵ میکرومتر در یک سیکل ارتعاشی با زمان ۵ میکروثانیه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر را استخراج نمودیم:

- ۱- با تغییر فرکانس و دامنه ارتعاشی، میزان نیروی برشی تغییر می‌کند.
- ۲- با افزایش فرکانس از ۱۸ تا ۲۰ کیلوهرتز ماکزیمم نیروی برشی تغییر نمی‌کند.

هستند و در پایان زمان سیکل برای دامنه ارتعاشی ۲۵ میکرومتر نیروی برشی به صفر می‌رسد. تقریباً در پایان زمان سیکل برای دامنه ارتعاش ۲۱ میکرومتر شیب نمودار به سمت بالا میل می‌کند. با افزایش فرکانس از ۱۸ تا ۲۰ کیلوهرتز ماکزیمم نیروی برشی تغییر نمی‌کند. در دامنه ارتعاش ۲۵ میکرومتر با افزایش فرکانس از ۲۱ به ۲۲ کیلوهرتز، ماکزیمم نیروی برشی به میزان ۱۲ درصد افزایش می‌یابد و میانگین نیروی برشی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. در این مقاله دنبال حالت کمینه برای نیروی برشی هستیم که از نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود و ملاحظه و مقایسه نمودارهای حاصل از نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مشاهده می‌گردد برای تمام فرکانس‌ها و دامنه‌های ارتعاشی ماکزیمم نیروی برشی در بازه زمانی ۲ تا ۳ میکروثانیه از یک سیکل ارتعاشی رخ می‌دهد به دلیل اینکه با شروع درگیری در این بازه زمانی تنش وارد بر المان به حداکثر مقدار خود رسیده و سبب جدایش براده از سطح قطعه کار می‌گردد. در زمان ۴/۵-۳ میکروثانیه به دلیل تغییر شکل براده نیروهای برشی افزایش می‌یابد که میزان این افزایش نیرو در دامنه‌ها و فرکانس‌های مختلف متفاوت است. می‌توان نتیجه گرفت میزان مینیمم نیروی برشی در این بازه برای فرکانس ۱۸ کیلوهرتز و دامنه ارتعاشی ۲۵ میکرومتر حاصل می‌گردد که در این حالت در انتهای سیکل نیروی برشی به صفر می‌رسد.

۴. بررسی روابط تحلیلی نیروی برشی در

ماشین کاری به کمک ارتعاشات اولتراسونیک با

نتایج شبیه‌سازی

در این بخش از مقاله، به بررسی حل تحلیلی نیروی برشی در ماشین کاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک پرداخته می‌شود. مطابق نتایج شبیه‌سازی حاضر با تغییر فرکانس نیروی برشی تغییر می‌کند. براساس روابط ۲-۴ در منبع [۱۷] نیروی برشی تابعی از فرکانس است که در زیر ارائه می‌گردد:

۵- در فرکانس‌های ۲۱ و ۲۲ کیلوهرتز، ماکزیمم و میانگین نیروی برشی جهت تغییر شکل کاهش می‌یابد.
 ۶- حالت بهینه از نظر کمینه کردن نیروی برشی هنگامی است که فرکانس ۱۸ کیلوهرتز و دامنه ارتعاش ۲۵ میکرومتر باشد و در زمان ۲-۳ میکرو ثانیه رخ می‌دهد که در این زمان تنش وارد بر المان به حداکثر مقدار خود رسیده و براده از روی سطح قطعه‌کار جدا می‌شود.

۳- در دامنه ارتعاش ۲۵ میکرومتر با افزایش فرکانس از ۲۱ به ۲۲ کیلوهرتز ماکزیمم نیروی برشی ۱۲ درصد افزایش می‌یابد.
 ۴- در دامنه ارتعاش ۲۵ میکرومتر با افزایش فرکانس از ۲۱ به ۲۲ کیلوهرتز، میانگین نیروی برشی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

۶. مآخذ

- [1] Azarhoushang, Bahman, and Javad Akbari, "Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, Vol.47, no.7-8, pp.1027-1033.
- [2] Chern, Gwo-Lianq, and Yuan-Chin Chang, "Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, Vol.46, no.6, pp.659-666.
- [3] Tawakoli, Taghi, and Bahman Azarhoushang, "Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, Vol.48, no.14, pp.1585-1591.
- [4] Razfar, M. R., P. Sarvi, and MM Abootorabi Zarchi, "Experimental investigation of the surface roughness in ultrasonic-assisted milling", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, Vol.225, no.9, pp.1615-1620.
- [5] Brehl, DE and, and T. A. Dow, "Review of vibration-assisted machining", *Precision engineering*, 2008, Vol.32, no.3, pp.153-172.
- [6] Zarchi, MM Abootorabi, M. R. Razfar, and A. Abdullah, "Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, Vol.66, no.1-4, pp.83-89.
- [7] Abootorabi Zarchi, Mohammad M., Mohammad R. Razfar, and Amir 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*, 2012, Vol.226, no.7, pp.1185-1191.
- [8] Ko, Jeong Hoon, and Shao Wei Tan, "Chatter marks reduction in meso-scale milling through ultrasonic vibration assistance parallel to tooling's axis", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, Vol.14, no.1, pp.17-22.
- [9] Ding, H., S. J. Chen, and K. Cheng, "Two-dimensional vibration-assisted micro end milling: cutting force modelling and machining process dynamics", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2010, Vol.224, no.12, pp.1775-1783.
- [10] Nath, Chandra, and M. Rahman, "Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, Vol.48, no.9, pp.965-974.
- [11] Li, Kuan-Ming, and Shang-Lan Wang, "Effect of tool wear in ultrasonic vibration-assisted micro-milling", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014, Vol.228, no.6, pp.847-855.
- [12] Shen, Xue-Hui, Jian-Hua Zhang, Hua Li, Jin-Jun Wang, and Xiao-Chen Wang, "Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, Vol.63, no.1-4, pp.41-49.

- [13] Shen, Xue Hui, Jian Hua Zhang, Tian Jin Yin, and Chun Jie Dong, "A study on cutting force in micro end milling with ultrasonic vibration", In *Advanced Materials Research*, 2010, Vol.97, pp.1910-1914. Trans Tech Publications Ltd.
- [14] Elhami, S., M. R. Razfar, and M. Farahnakian, "Analytical, numerical and experimental study of cutting force during thermally enhanced ultrasonic assisted milling of hardened AISI 4140", *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, Vol.103, pp.158-171.
- [15] Maurotto, A., and C. T. Wickramarachchi, "Experimental investigations on effects of frequency in ultrasonically-assisted end-milling of AISI 316L: a feasibility study", *Ultrasonics*, 2016, Vol.65, pp.113-120.
- [16] Wang, Xuemei, and Jun Shi, "Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment", *International Journal of Impact Engineering*, 2013, Vol.60, pp.67-75.
- [17] Zarchi, MM Abootorabi, M. R. Razfar, and A. Abdullah, "Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, Vol.66, no.1-4, pp.83-89.

[۱۸] محمد مهدی ابوترابی زارچی؛ عباس قاسمی مبارکه، " شبیه سازی المان محدود فرایند فرزکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک"، مهندسی مکانیک، دوره ۲۲، شماره ۶، بهمن و اسفند ۱۳۹۲، صفحه ۳۲-۳۷.

پی نوشت:

1. ABAQUS
2. Li & Wang
3. Shen & et al.
4. Wickramarachchi & et al.
5. Johnson-Cook