

تحلیل اجزای محدود و آزمایش در فرایند ماشینکاری با ارتعاش اولتراسونیک یک جهته و بیضوی بر روی قطعه کار اینکونل ۷۳۸

سعید امینی^۱، محمد جواد ناطق^{۲*}

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، nategh@modares.ac.ir

چکیده- در این مقاله، ماشینکاری ارتعاشی یک جهته و بیضوی بر روی قطعه کار سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ تحت فرکانس اولتراسونیک بررسی شد. ابتدا، توسط نرم افزار اجزای محدود ام اس سی- مارک، فرایندها مدل سازی شدند و ارتعاش اولتراسونیک بر ابزار صلب در جهت سرعت برشی برای فرایند ماشینکاری ارتعاشی یک جهته و در جهت سرعت برشی و عمق برش برای فرایند ماشینکاری ارتعاشی بیضوی اعمال گردید. تحلیل نیرو انجام و تاثیر هر کدام از فرایندها بر نیروی ماشینکاری بررسی گردید. سپس آزمایش های لازم بر روی هر کدام از فرایندها توسط دستگاه تراش سی ان سی بسیار دقیق و ابزار الماس تک کریستال انجام شد و نتایج آزمایش با اجزای محدود مقایسه گردید. نتایج نشان می دهد که روند تغییرات روش تحلیل اجزای محدود با آزمایش های انجام شده مشابه می باشد. همچنین، مزیت های فرایند ماشینکاری ارتعاشی بیضوی بر روی قطعه کار سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ مانند دیگر مواد شامل مس، آلومینیوم و تنگستن به تایید رسید.

کلیدواژگان: ماشینکاری ارتعاشی یک جهته، ماشینکاری ارتعاشی بیضوی، ارتعاش اولتراسونیک، اینکونل ۷۳۸

One directional and elliptical ultrasonic vibration assisted cutting of IN738

S. Amini¹, M. J. Nategh^{2*}

1- Assist. Prof., Mech. Eng., Kashan Univ., Kashan, Iran
2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
* P. O. B. 14115-143 Tehran, nategh@modares.ac.ir

Abstract- One directional and elliptical vibration cutting of IN738 at ultrasonic frequency has been investigated both experimentally and by FEM in the present study. The influence of each process on the cutting force was studied. The FEM modeling was carried out by using MSC-MARC. The results were compared with the experimental findings of the conventional cutting. The ultrasonic vibration was applied to a rigid cutting tool along the cutting velocity in one directional vibration cutting. In elliptical vibration cutting the vibration was applied both along the cutting velocity and in the chip flow direction. The experiments were carried out on an ultra precision CNC lathe with single crystal diamond tools. The same effects were confirmed in the machining practice and by FEM. It was quite feasible when machining IN738 to obtain the advantages of elliptical vibration cutting already reported for some other materials such as copper, aluminum, tungsten and super alloys.

Keywords: Vibration Cutting, Elliptical Vibration Cutting, Ultrasonic Vibration, IN738

۱- مقدمه

فرآیند ماشینکاری ارتعاشی با اولتراسونیک یکی از روش‌های ماشینکاری پیشرفته می‌باشد. در این روش، به ابزار برشی حین عملیات ماشینکاری، ارتعاشی تحت فرکانس و دامنه ثابت اعمال می‌گردد. اگر ارتعاش اولتراسونیک در یک جهت (در جهت سرعت برشی) اعمال گردد، ماشینکاری ارتعاشی^۱ و اگر در دو جهت (در جهت‌های سرعت برشی و عمق برش) اعمال گردد، ماشینکاری ارتعاش بیضوی^۲ می‌باشد.

تحقیقات متعددی بر روی فرایندهای فوق انجام شده است. شاموتو و موریواکی فرآیند برش ارتعاشی را در دو جهت تحت عنوان ماشینکاری ارتعاشی بیضوی انجام دادند [۱-۳]. این نوع فرآیند باعث حرکت ارتعاش بیضوی ابزار می‌شود و ضخامت براده و نیروی برشی را کاهش می‌دهد. آنان توسط عمل‌کننده پیزوالکتریک ابزار تراشکاری را در دو جهت (با فرکانس ۱۹ کیلو هرتز) مرتعش کردند و در تحلیل تئوری و عملی نشان دادند که نیروهای ماشینکاری بسیار کمتر از حالتی است که ارتعاش اولتراسونیک در یک جهت اعمال گردد [۴-۵]. باییتسکی و همکارانش تحلیل غیرخطی به صورت ارتعاش ضربه‌ای بر روی فرایند ماشینکاری همراه با اولتراسونیک انجام دادند [۶-۷]. آن‌ها نشان دادند که با اعمال مود ارتعاش ضربه‌ای بر قطعه‌کار، تغییرات زیادی بر ویژگی‌های دینامیکی ماشینکاری در این فرایند حاصل می‌شود و پاسخ دامنه غیرخطی ابزار برشی را به دست آوردند. ترانگ و همکارانش، با نصب یک پیزوالکتریک بر روی ابزار تراشکاری و انجام آزمایش VC، نشان دادند که ابزار ارتعاشی می‌تواند تابع پاسخ فرکانسی را بهینه کند؛ بنابراین پایداری ماشینکاری در عملیات تراشکاری بهینه می‌شود [۸-۹]. ماشینکاری ارتعاشی به عنوان یک روش ماشینکاری دقیق برای مواد سخت‌برش شناخته شده است [۱۰]. تحلیل‌های اجزای محدود بر فرایند ماشینکاری ارتعاشی انجام شده است و اثر فرایند بر نیرو، دما و تنش بحث و بررسی گردیده است [۱۱-۱۴]. بررسی‌های متعددی نیز در فرایند EVC به صورت تئوری و آزمایش انجام شده و نشان داده شده که نیرو و زبری سطح بهتر از فرایند VC است [۱۵-۱۹].

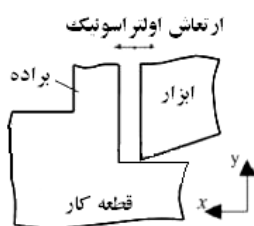
در این تحقیق، تحلیل اجزای محدود فرایندهای VC و EVC با آزمایش مقایسه گردید. در تحقیق قبلی [۲۰] مدل‌سازی

اجزای محدود فرایندها انجام و نحوه درگیری ابزار با براده بررسی گردید و نیروی ماشینکاری و زاویه برش به دست آمد و نتایج حاصل با تراشکاری معمولی مقایسه شد. در ادامه آن، در این تحقیق، آزمایش‌های دقیقی در فرایندهای فوق بر روی قطعه‌کار سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ انجام و نتایج آزمایش‌ها با نتایج اجزای محدود مقایسه گردید.

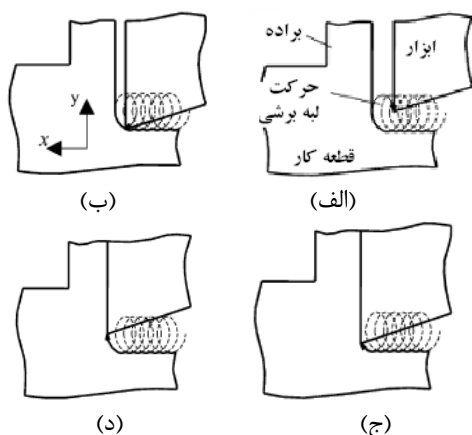
۲- مکانیک فرایندهای ماشینکاری ارتعاشی با

اولتراسونیک

فرایندهای VC و EVC به طور شماتیک در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در این شکل‌ها ابزار برشی برای فرایند VC در جهت سرعت برشی و برای فرایند EVC در جهات سرعت برشی و عمق برش به صورت بیضوی ارتعاش می‌کند.



شکل ۱ درگیری ابزار و قطعه‌کار در فرایند VC



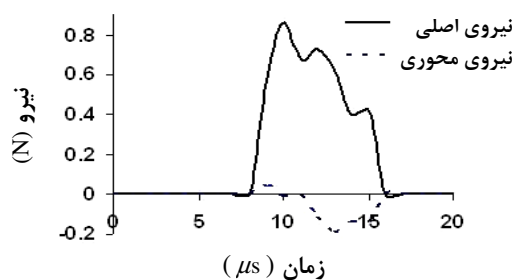
شکل ۲ درگیری ابزار و قطعه‌کار در فرایند EVC. الف) شروع سیکل ارتعاش بیضوی، ب) شروع درگیری بین ابزار و قطعه کار ج) حرکت به سمت بالای ابزار و د) انتهای درگیری

نحوه درگیری ابزار با قطعه‌کار در فرایند EVC مطابق شکل ۲ می‌باشد. به طوری که شکل ۲-الف شروع سیکل ارتعاش بیضوی، شکل ۲-ب درگیری بعد از حرکت ابزار به سمت

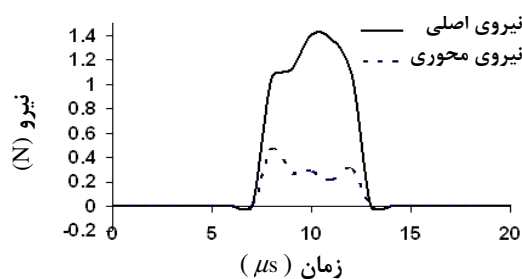
1. Vibration Cutting-VC
2. Elliptical Vibration Cutting

زاویه براده و زاویه آزاد صفر و هفت درجه در نظر گرفته شده است. خواص قطعه کار سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ شامل مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگا پاسکال، ضریب پواسون ۰/۲۸ و دانسیته ۸/۱۱ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. نتایج شبیه سازی انجام شده به قرار زیر است.

نیروی اصلی (در جهت سرعت برشی) و نیروی محوری (در جهت شعاعی)، که به صورت پریودیک در فرایندهای VC و EVC به ابزار اعمال می گردند، در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۳-ب در فرایند EVC نیروی محوری در قسمتی از سیکل ارتعاشی تغییر جهت می دهد که به علت تغییر جهت نیروی اصطکاک می باشد. نیروی محوری منفی باعث کاهش ضخامت براده و در نتیجه کاهش نیروی اصلی می شود.



(الف)



(ب)

شکل ۳ نیروهای ماشینکاری در الف) VC و ب) EVC بر روی قطعه کار اینکونل ۷۳۸

مقایسه نیروهای اصلی و محوری ماشینکاری در فرایندهای VC، EVC و OC در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-الف در VC حداکثر نیروی اصلی ماشینکاری تقریباً معادل نیروی OC است، ولی در EVC حداکثر نیرو کمتر از نیروی OC است و مطابق شکل ۴-ب حداکثر نیروی محوری در فرایند EVC کمتر از فرایندهای دیگر است، طوری که متوسط این نیرو در فرایند EVC بسیار ناچیز و گاهی منفی می شود.

قطعه کار، شکل ۲-ج ادامه درگیری و تغییر جهت حرکت ابزار به سمت بالا و شکل ۲-د انتهای درگیری ابزار با قطعه کار را نشان می دهد. برش بعدی پس از ورود جدید ابزار به سمت قطعه کار ایجاد می شود. براده به سمت بالا می رود و ابزار در قسمتی از مسیر به سمت بالا (در مسیر جریان براده) کشیده می شود. در این فرایند:

$$x = a \sin(2\pi ft), \quad y = b \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1)$$

$$\text{سرعت ارتعاش افقی} = 2\pi fa \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

و a و b دامنه های ارتعاش حرکت بیضوی و φ زاویه فاز می باشد. به جهت مؤثر بودن اثر ارتعاش در ماشینکاری ارتعاشی، حداکثر سرعت ارتعاش افقی نباید کمتر از سرعت برشی در فرایندهای VC و EVC باشد. یعنی:

$$2\pi fa > v_w \quad (3)$$

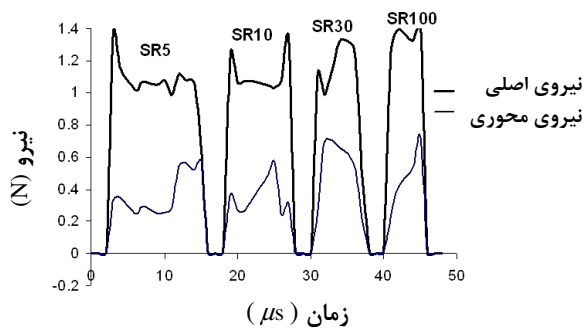
به طوری که v_w سرعت برشی می باشد.

۳- مدلسازی اجزای محدود

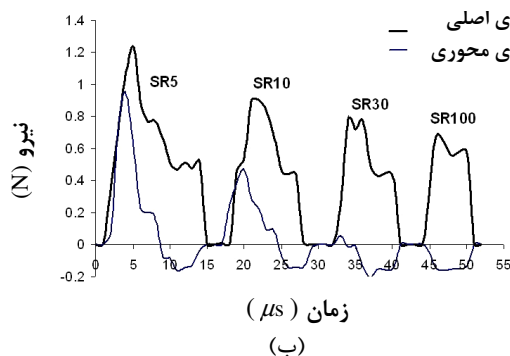
فرایندهای VC، EVC و تراشکاری معمولی^۱ بر روی قطعه کار سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ توسط نویسندگان مدل شده است [۲۰]. به منظور مقایسه نتایج آزمایش با نتایج اجزای محدود، فرایندها تحت شرایط ایزوترمال و توسط نرم افزار ام اس سی-مارک مدل شدند. در این مدل فرایند تراش متعامد با ارتعاش در جهت مماسی (جهت سرعت برشی) در نظر گرفته شده است. مدل فوق تحت شرایط تنش صفحه ای فرض شده است. قطعه کار سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ با طول ۰/۲ میلی متر و ارتفاع ۰/۰۵ میلی متر در مدل سازی می باشد. تعداد المان ۹۶ عدد و نوع المان کوآد ۴ می باشد که تعداد المانها در طول شبیه سازی و عملیات مش ریزی دوباره در منطقه فرایند تغییر می کند.

پارامترهای مورد استفاده در مدلسازی عبارتند از: فرکانس اولتراسونیک ۳۱/۱۶ کیلوهرتز در فرایندهای VC و EVC، سرعت برشی ۴۵۴ میلی متر بر ثانیه در فرایند OC، ضخامت براده تغییر شکل نیافته ۴ میکرون، پهنای برش ۰/۲ میلی متر دامنه ارتعاش در فرایندهای VC و EVC. زاویه فاز در فرایند EVC و سرعت برشی در فرایندهای VC و EVC تغییر داده شده است و تاثیر تغییر پارامترها بر نیرو و زاویه برش بررسی شده است.

1. Ordinary Cutting-OC

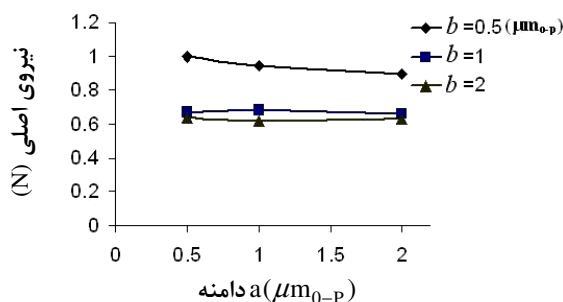


(الف)



(ب)

شکل ۵ اثر SR بر نیروهای اصلی و محوری در الف) VC و ب) EVC



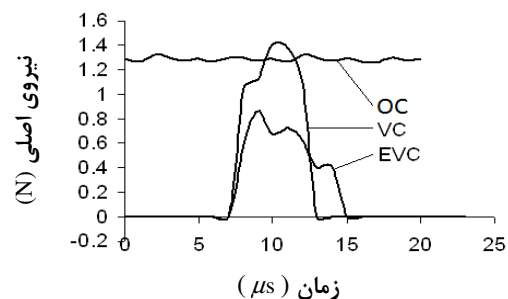
شکل ۶ اثر دامنه‌های افقی و عمودی بر حداکثر نیروی اصلی

۴- آزمایش‌ها

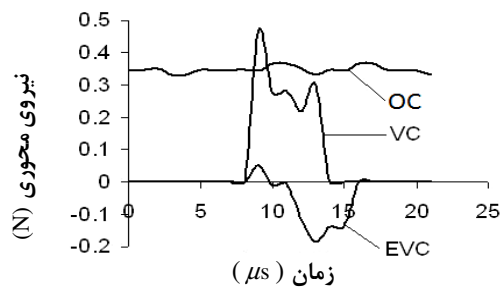
جهت انجام آزمایش‌ها بر روی سوپرایلیاز اینکونل ۷۳۸ از ابزار الماس تک کریستال و شرایط آزمایش، مطابق جدول ۱، استفاده شد. آزمایش‌ها توسط دستگاه تراش بسیار دقیق انجام گردید (ساخت شرکت توپودا با مدل AHN05) که رزولوشن حرکتی این دستگاه در محورهای x ، y و z یک نانومتر می‌باشد. قطعه‌کار بر روی اسپیندلی که روی بالشتک هوا قرار دارد، با گیره‌بندی خاصی، محکم شده است. ژنراتور اولتراسونیک می‌تواند ابزار را در یک جهت یا در دو جهت (بصورت بیضوی) ارتعاش دهد. ژنراتور اولتراسونیک، فرایندهای ارتعاشی VC و EVC را کنترل می‌کند و در صورت خاموش شدن ژنراتور،

به منظور بررسی اثر نسبت سرعت، سرعت برشی تغییر داده شد. نسبت سرعت، عبارت است از نسبت سرعت ارتعاش به سرعت ماشینکاری^۱. اثر SR بر نیروهای ماشینکاری در فرایندهای EVC و VC در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل ۵-الف در EVC با افزایش نسبت سرعت، نیروی اصلی و محوری کاهش می‌یابد. همچنین، قسمت منفی نیروی محوری، با افزایش SR، بیشتر می‌شود. مطابق شکل ۵-ب، افزایش SR تأثیری بر نیروی ماشینکاری در فرایند VC ندارد، ولی با افزایش SR مدت زمان درگیری بین ابزار و قطعه‌کار کاهش می‌یابد و این باعث می‌شود متوسط نیروی ماشینکاری در این فرایند کاهش یابد.

در شکل ۶ تأثیر تغییر پارامترهای دامنه‌های افقی (a) و دامنه عمودی (b) ارتعاشی بر حداکثر نیروی اصلی ماشینکاری در فرایند EVC نشان داده شده است. مطابق این شکل پارامتر دامنه افقی تأثیر زیادی بر نیروی ماشینکاری ندارد ولی با افزایش دامنه عمودی نیروی ماشینکاری کاهش می‌یابد. به طور کلی افزایش دامنه ارتعاش باعث کاهش نیروی ماشینکاری در فرایند EVC می‌شود و این بدان علت است که نیروی اصطکاک معکوس شده کاهش بیشتری می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۴ مقایسه بین الف) نیروی اصلی و ب) نیروی محوری در فرایندهای VC، EVC و OC.

1. Speed Ratio-SR

پارامترهای ماشینکاری مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۲ آورده شده است. انتخاب مقادیر پارامترهای آورده شده در جدول ۲ طوری است که زاویه ورود در EVC کمتر از زاویه آزاد در خلال سیکل ارتعاش باشد. طول قسمت‌های قطعه‌کار در هر آزمایش ۰/۷ mm می‌باشد.

جدول ۲ مقادیر پارامترهای مورد استفاده در آزمایش‌ها

| OC | VC | EVC | |
|----|---------------|-------------|-------------------------|
| ۲۷ | ۶،۳،۱،۰/۵،۰/۳ | ۳،۱،۰/۵،۰/۳ | سرعت برشی (m/min) |
| ۲۰ | ۳۰،۲۰،۱۰ | ۳۰،۲۰،۱۰ | نرخ پیشروی (μm/rev) |
| ۴ | ۴ | ۴ | عمق برش (μm) |
| - | ۰ | ۱۳۵،۹۰،۴۵ | زاویه فاز (degree) |
| - | ۴،۲ | ۴،۲،۱ | a دامنه ارتعاش (μm p-p) |
| - | ۰ | ۴،۲،۱ | b دامنه ارتعاش (μm p-p) |

۴- نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری نیروی اصلی ماشینکاری در شرایط مختلف، مطابق جدول ۲، نمودارهای تاثیر پارامترها حاصل و با نتایج اجزای محدود مقایسه گردید.

نسبت سرعت تاثیر زیادی بر فشار مخصوص ماشینکاری (نسبت نیروی ماشینکاری به سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته را فشار مخصوص ماشینکاری می‌نامند) در فرایند EVC می‌گذارد که در شکل ۸ نشان داده شده است. این نتایج برای عمق برش ۴ میکرون به دست آمده است. نیروی برشی، در آزمایش فرایند OC، ۱/۹ نیوتن و فشار مخصوص ماشینکاری ۲۳۷۵۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع می‌باشد، به طوری که این مقادیر به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مقادیر فرایندهای VC و EVC می‌باشد. همچنین، مطابق شکل ۸، روند تغییرات در نتایج اجزای محدود مشابه نتایج آزمایش‌ها می‌باشد. با افزایش نسبت سرعت SR، فشار مخصوص ماشینکاری کاهش می‌یابد، به طوری که به سمت عدد ثابتی میل می‌کند. فشار مخصوص ماشینکاری در فرایند EVC به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از فرایند VC می‌باشد و بالطبع فشار مخصوص در فرایند VC نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از فرایند OC می‌باشد.

شکل ۹ تاثیر نرخ پیشروی بر نیروی ماشینکاری در آزمایش‌های انجام شده توسط فرایندهای EVC و VC را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها دیگر پارامترهای ماشینکاری شامل دامنه ارتعاش ۴ میکرون، سرعت برشی ۰/۳ متر بر دقیقه و

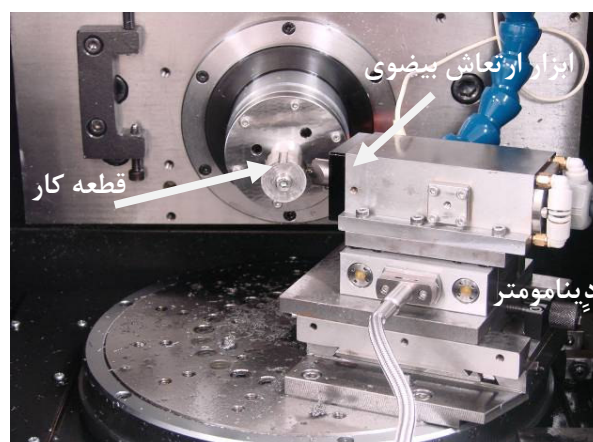
فرایند OC ایجاد می‌شود. حرکت ارتعاشی توسط دستگاه اندازه‌گیر ارتعاش لیزری اندازه‌گیری می‌شود. فرکانس ارتعاش و دامنه ارتعاش به ترتیب ۳۶/۱۶ کیلو هرتز و صفر تا ۴ میکرون می‌باشد. حداکثر سرعت ارتعاشی لبه ابزار عبارت است از:

$$v_{max} = 2\pi a f = 27.25 \text{ m/min}$$

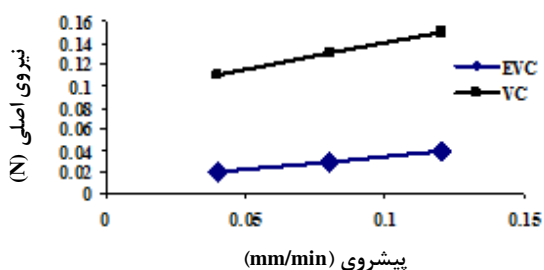
به منظور حفظ اثر ارتعاشی به طوری که قطع و وصل ابزار و قطعه‌کار صورت گیرد، سرعت برشی بایستی کمتر از حداکثر سرعت ارتعاشی باشد. در واقع نسبت سرعت (SR) بایستی بیشتر از یک باشد. سرعت برشی در فرایند OC برابر حداکثر سرعت ارتعاشی در نظر گرفته می‌شود. ابزار الماس تک کریستال برای آزمایش‌ها استفاده شد. دینامومتر سه محوره ساخت شرکت کیستلر با مدل 9256A1 جهت اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری استفاده شد. خروجی دینامومتر توسط یک سیستم دیجیتالی ضبط و توسط نرم‌افزار متلب نشان داده شد. آماده‌سازی فرایند در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات قطعه‌کار و ابزار و شرایط ارتعاشی

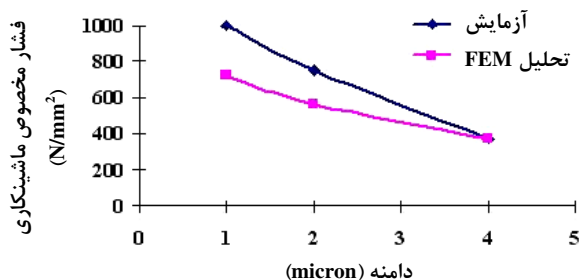
| | |
|--------------|------------------------------------|
| جنس | اینکونل ۷۳۸ |
| قطعه کار | قطر ۲۴/۵ mm |
| | طول ۲۰ mm |
| جنس | الماس تک کریستال |
| ابزار | زاویه براده صفر درجه |
| | زاویه آزاد ۷ درجه |
| | شعاع نوک ابزار ۱ mm |
| شرایط ارتعاش | فرکانس ۳۶/۱۶ kHz |
| | دامنه ارتعاش ۰-۴ μm _{p-p} |



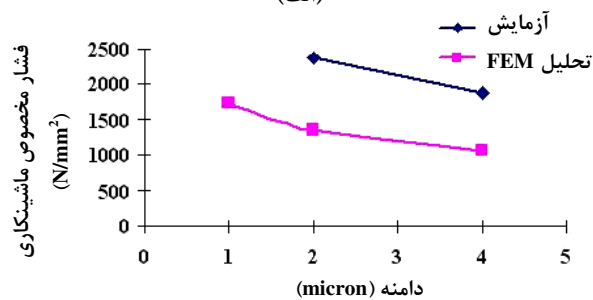
شکل ۷ آماده‌سازی فرایندها جهت آزمایش (آزمایشگاه ماشینکاری دقیق دانشگاه ناگویا زاپن)



شکل ۹ تاثیر نرخ پیشروی بر نیروی برشی در فرایندهای VC و EVC

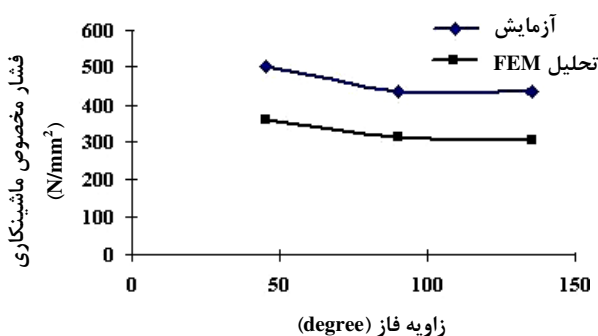


(الف)



(ب)

شکل ۱۰ تاثیر دامنه ارتعاش بر فشار مخصوص ماشینکاری



شکل ۱۱ تاثیر زاویه فاز بر فشار مخصوص ماشینکاری در فرایند EVC

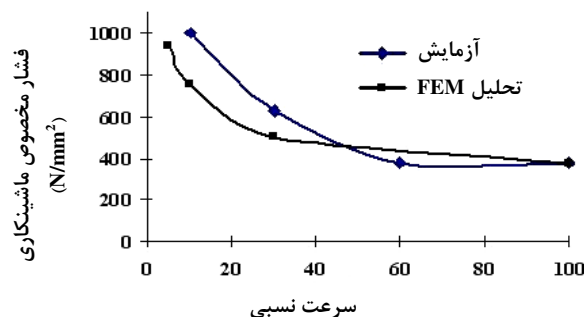
۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، تراشکاری ارتعاشی یک‌جهته VC و بیضوی EVC بر روی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ بررسی شد و نتایج آن‌ها با نتایج فرایند تراشکاری معمولی OC مقایسه گردید.

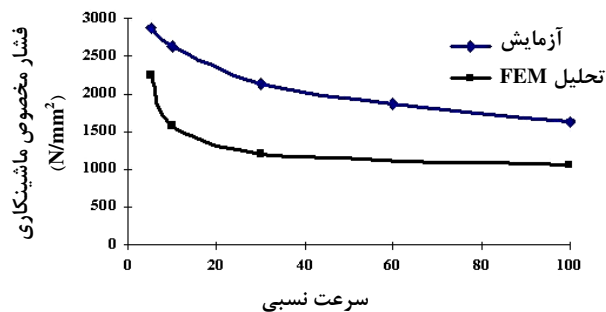
عمق برش ۴ میکرون می‌باشد. همان‌طوری که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش نیروی پیشروی، نیروی برشی نیز افزایش یافته است. براساس اصول مکانیک برش مواد نیز افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش نیروی ماشینکاری می‌شود.

دامنه ارتعاش اثر قابل توجهی بر نیروی برشی در فرایندهای EVC و VC دارد. شکل ۱۰ مقایسه اثر دامنه ارتعاش در نتایج آزمایش و تحلیل اجزای محدود را در فرایندها نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۰، افزایش دامنه ارتعاش باعث کاهش فشار مخصوص ماشینکاری در آزمایش و نتایج تحلیل اجزای محدود شده است. علت این امر قطع و وصل درگیری بین ابزار و قطعه‌کار در فرایندهای ماشینکاری ارتعاشی می‌باشد که باعث کاهش متوسط نیروی ماشینکاری می‌گردد. همچنین، روند تغییر نیرو در تحلیل و آزمایش یکسان است.

شکل ۱۱ مقایسه اثر زاویه فاز در نتایج آزمایش و تحلیل اجزای محدود را در فرایند EVC نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۱، با افزایش زاویه فاز، نیروی اصلی ماشینکاری کاهش می‌یابد و به مقدار ثابتی میل می‌کند. همچنین، اثر تغییر زاویه فاز در آزمایش و تحلیل یکسان است.



(الف)



(ب)

شکل ۸ مقایسه آزمایش و تحلیل اجزای محدود تاثیر سرعت نسبی بر فشار مخصوص ماشینکاری در فرایندهای الف)

EVC و ب) VC

- [8] Lee E. C., Nian C. Y., Tarn Y. S., "Design of a Dynamic Vibration Absorber against Vibrations in Turning Operations", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 108, 2001, pp. 278-285.
- [9] Tarn Y. S., Kao J. Y., Lee E. C., "Chatter Suppression in Turning Operations with a Tuned Vibration Absorber", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 105, 2000, pp. 55-60.
- [10] Kumabe J., Fuchizawa S., Soutome T., Soutome Y., Nishimoto Y., "Ultrasonic Superposition Vibration Cutting of Ceramics", *Precision Eng.*, Vol. 11, 1989, pp. 71-77.
- [11] Mitrofanov A. V., Babitsky V. I., Silberschmidt V. V., "Finite Element Simulations of Ultrasonically Assisted Turning", *Computational Materials Science*, Vol. 28, 2003, pp. 645-653.
- [12] Mitrofanov A. V., Babitsky V. I., Silberschmidt V. V., "Finite Element Analysis of Ultrasonically Assisted Turning of Inconel 718", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 153-154, 2004, pp. 233-239.
- [13] Mitrofanov A. V., Ahmed N., Babitsky V. I., Silberschmidt V. V., "Effect of Lubrication and Cutting Parameters on Ultrasonically Assisted Turning of Inconel 718", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 162-163, 2005, pp. 649-654.
- [14] Amini S., Solaimanimehr H., Nategh M. J., Abodollah A., Sadeghi M. H., "FEM Analysis of Ultrasonic-Vibration-Assisted Turning and the Vibratory Tool", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 20, 2008, pp. 43-47.
- [15] Shamoto E., Ma Ch., Moriwaki T., "Elliptical Vibration Cutting (3st Report, Application to Three-Dimensional Cutting and Investigation of Practical Effects)", *J. JSPE*, Vol. 65, 1999, pp. 586-591 (in Japanese).
- [16] Shamoto E., Morimoto Y., Moriwaki T., "Elliptical Vibration Cutting (2nd Report, Study on Effects of Vibration Conditions)", *J. JSPE*, Vol. 65, 1999, pp. 411-417 (in Japanese).
- [17] Shamoto E., Song Y. C., Sassa K., Yoshida H., Hino R., Moriwaki T., "Proposal of Oblique Type of Elliptical Vibration Cutting and Its Basic Performance", *J. JSPE*, Vol. 69, 2003, pp. 970-975 (in Japanese).
- [18] Shamoto E., Suzuki N., Hino R., "Analysis of 3D Elliptical Vibration Cutting with Thin Shear Plane Model", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 57, 2008, pp. 57-60.
- [19] Suzuki N., Haritani M., Yang J., Hino R., Shamoto E., "Elliptical Vibration Cutting of Tungsten Alloy Molds for Optical Glass Parts", *CIRP*, Vol. 56, 2007, pp. 127-130.
- [20] Amini S., Shamoto E., Suzuki N., M. Nategh J., "FE Analysis of One Directional and Elliptical Ultrasonic Vibration-Assisted Cutting of IN738", *AMPT2008*, 2-5 Nov., Bahrain, 2008.

تحقیق انجام شده توسط آزمایش‌ها و تحلیل اجزای محدود انجام و نتایج آن‌ها با هم مقایسه گردید. آزمایش‌های ماشینکاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ با ابزار تک کریستال انجام پذیرفت. نتایج اجزای محدود توسط آزمایش‌ها تایید گردید و نشان داده شد که روند تغییرات در آزمایش‌ها و اجزای محدود یکسان است. همچنین نتایج زیر حاصل گردید:

- حداکثر نیروی ماشینکاری به صورت $F_{Max,EVC} < F_{Max,VC} \approx F_{OC}$ می‌باشد و متوسط نیروی ماشینکاری به صورت $F_{Ave,EVC} < F_{Ave,VC} < F_{OC}$ است.
- در فرایند EVC در هر سیکل ارتعاش نیروی محوری تغییر جهت داده و قسمت منفی ایجاد می‌کند.
- در فرایند EVC، با افزایش نسبت سرعت، SR، نیروی ماشینکاری کاهش می‌یابد، در حالی که در فرایند VC با افزایش نسبت سرعت، نیروی ماشینکاری تغییر نمی‌کند.
- با افزایش دامنه ارتعاش در فرایندهای ماشینکاری ارتعاشی نیروی ماشینکاری کاهش می‌یابد.
- با افزایش زاویه فاز در فرایند EVC نیروی ماشینکاری کاهش می‌یابد، به طوری که به سمت ثابتی میل می‌کند.

۶- مراجع

- [1] Moriwaki T., Shamoto E., Inoue K., "Ultrprecision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration", *Ann. CIRP*, Vol. 41, 1992, pp. 141-144.
- [2] Shamoto E., Moriwaki T., "Fundamental Study on Elliptical Vibration Cutting", *Proc. of the 8th Annual Meeting*, ASPE, Washington, 1993, pp. 162-165.
- [3] Shamoto E., Moriwaki T., "Study on Elliptical Vibration Cutting", *Ann. CIRP*, Vol. 43, 1994, pp. 35-38.
- [4] Shamoto E., Morimoto Y., Moriwaki T., "Elliptical Vibration Cutting (1st Report, Cutting Principle and Basic Performance)", *J. JSPE*, Vol. 62, 1996, pp. 1127-1131 (in Japanese).
- [5] Shamoto E., Moriwaki T., "Ultrprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting", *CIRP*, 48, 1999, pp. 441-444.
- [6] Astashev V. K., Babitsky V. I., "Ultrasonic Cutting as a Nonlinear (Vibro-Impact) Process", *Ultrasonics*, Vol. 36, 1998, pp. 89-96.
- [7] Babitsky V. I., Kalashnikov A. N., Meadows A., "Ultrasonically Assisted Turning of Aviation Materials", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 132, 2003, pp. 157-167.