http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۱ شماره ۱ بهار۱۳۹۰ ص ص ۱۰۳-۱۱۵

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۱/۲۲
پذیرش ۹۰/۳/۲۱
ارائه در سایت ۹۰/۳/۲۸

بررسی تحلیلی و تجربی سینماتیک حرکت نسبی ابزار و قطعه‌کار در فرآیند تراشکاری به‌همراه ارتعاشات آلتراسونیک

حامد رضوی[۱]، محمد جواد ناطق[۲*]، امیر عبدالله[۳]، حمید سلیمانی‌مهر[۴]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۴- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
*تهران، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۴۳، nategh@modares.ac.ir

چکیده- هدف این مقاله بررسی تحلیلی و تجربی سینماتیک حرکت نسبی ابزار و قطعه‌کار در تراشکاری معمولی (CT) و تراشکاری به‌همراه ارتعاشات آلتراسونیک (UAT) می‌باشد. تحلیل سینماتیک UAT نشان می‌دهد که حرکت لبه برنده ابزار نسبت به قطعه‌کار (ناشی از سرعت برشی، سرعت پیشروی و ارتعاشات ابزار برشی در راستای مماسی)، سطح ماشینکاری‌شده جانبی[۱] را متاثر ساخته و الگوی تکرار شونده‌ای از نواحی له‌شده یا دندانه‌دار روی آن ایجاد می‌کند که در نتیجه کارسختی ناشی از این پدیده می‌تواند میکرو سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی را در مقایسه با CT افزایش دهد. همچنین مدل سینماتیک نشان می‌دهد که در فرآیند UAT با تحریک یک‌بعدی در جهت سرعت برشی، به‌خاطر نرخ پیشروی ثابت ابزار نسبت به قطعه‌کار، ابزار تراشکاری هیچگاه از قطعه‌کار جدا نمی‌شود، اگرچه سطح براده ابزار ممکن است به‌طور تناوبی در هر سیکل ارتعاشی از براده جدا گردد. برای بررسی تجربی پیش‌بینی‌های حاصل از شبیه‌سازی سینماتیک، از آزمون میکرو سختی سطحی و تصویر برداری میکروسکوپ نوری سطح ماشینکاری‌شده جانبی استفاده گردید. نتایج و مشاهدات تجربی، به‌خوبی تاثیرات ارائه شده توسط مدل سینماتیک از حرکت لبه برنده ابزار روی سطح جانبی را برای UAT در مقایسه با CT تصدیق می‌نماید.

کلید واژگان: تراشکاری به‌همراه ارتعاشات آلتراسونیک، سینماتیک، سطح ماشینکاری‌شده جانبی

An Investigation on the Kinematics of Tool-Workpiece's Relative Movement in One-Directional Ultrasonic-Vibration Assisted Turning

H. Razavi[1], M. J. Nategh[2*], A. Abdullah[3], H. Soleimanimehr[4]

1- Ph.D. Student, Mechanical Eng, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares Univ.
2- Assoc. Prof., Mechanical Eng, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares Univ.
3- Assoc. Prof., Faculty of Mechanical Eng, Amirkabir University of Tech.
4- Ph.D. Student, Mechanical Eng, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares Univ.
* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran. nategh@modares.ac.ir

Abstract- The aim of present study is to investigate the kinematics of tool-workpiece's relative movement in conventional and ultrasonic-vibration assisted turning (UAT). The kinematic analysis of UAT shows that the movement of cutting tool edge relative to the workpiece resulted from the cutting speed, feed speed and tool's vibration affects the lateral machined surface of workpiece and leaves a repeating pattern of crushed and toothed regions on it. This results in an increase in the surface hardness of the lateral machined surface in comparison with conventional turning (CT). A model of the tool-workpiece's relative movement has first been developed in the present study. This model predicts a surface hardening effect for the lateral surface in UAT in comparison with CT. Several experiments were subsequently carried out employing a surface micro-hardness testing machine and an optical microscope to verify the predicted results.

1. Lateral Machined Surface

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

Keywords: Ultrasonic-Vibration Assisted Turning, kinematics, Lateral Machined Surface

۱-مقدمه

تراشکاری به‌همراه ارتعاشات آلتراسونیک (UAT)، عبارت است از: اضافه نمودن ارتعاشات آلتراسونیک به ابزار برشی در فرآیند تراشکاری معمولی که جهت اعمال ارتعاشات می‌تواند در جهت سرعت برشی، پیشروی، شعاعی و یا ترکیبی از جهات فوق باشد. اعمال ارتعاشات در جهت سرعت برشی (یک‌بعدی) و یا ترکیب آن با ارتعاشات در جهت پیشروی[1]، بدلیل موثرتر بودن ارتعاشات، از اقبال بیشتری نسبت به سایر روشها برخوردار بوده‌است. تاکنون محققان مزایای مختلفی را برای UAT ذکر کرده‌اند که از جمله آنها می‌توان به کاهش میانگین نیروهای برشی، افزایش کیفیت سطح قطعه‌کار تراشکاری شده، افزایش طول عمر ابزار و غیره اشاره کرد. در منابع، کاهش نیروی برشی میانگین (به‌عنوان مزیت اصلی فرآیند UAT) را به وجود شرایط اتصال و جدایش متناوب ابزار- قطعه‌کار نسبت داده‌اند. Chunxiang و همکاران [۱]، از جدایش سطح براده ابزار[2] از براده و جدایش سطح زیرین ابزار[3] از قطعه‌کار نام برده‌اند. همچنین در سایر مقالات مربوط به تراشکاری با ارتعاشات بیضوی[4] نیز جدایش ابزار از براده به‌علاوه‌ی قطعه‌کار به‌طور صحیح ذکر گردیده‌است [۴-۲]. در فرآیند UAT با تحریک یک‌بعدی در جهت سرعت برشی، برخی از محققان بیان کرده‌اند که در حین عملیات، ابزار برشی به‌طور متناوب از قطعه‌کار جدا می‌شود [۹-۵]. برخی دیگر در همین فرآیند جدایش متناوب ابزار از براده را در حین عملیات مورد توجه قرار داده‌اند[۱۴-۱۰]. همچنین در برخی مقالات، می‌توان هر دو عبارت جدایش ابزار از قطعه‌کار و جدایش ابزار از براده را مشاهده نمود [۱۲، ۱۳]. در شبیه‌سازی المان‌محدود فرآیند تراشکاری، محققان مقدار نرخ پیشروی را برای CT و UAT به‌صورت ضخامت براده تغییرشکل نیافته در نظر گرفته‌اند [۱۱، ۱۳، ۱۵-۲۱] که این فرض، روش پذیرفته‌شده‌ای برای انجام شبیه‌سازی المان‌محدود عملیات براده‌برداری در فرآیندهای ماشینکاری و حتی فرآیند تراشکاری محسوب می‌گردد، اما در UAT واقعی، به‌علت وجود نرخ پیشروی، سینماتیک حرکت نسبی ابزار و قطعه‌کار تاحدودی متفاوت از تراشکاری معمولی است که نادیده گرفته شده و یا از شبیه‌سازی آن صرف‌نظر شده است. در فرآیند UAT، به‌نظر می‌رسد بدلیل وجود نرخ پیشروی ثابت، جدایش ابزار از قطعه‌کار (حتی برای یک لحظه هم) اتفاق نمی‌افتد که اهمیت موضوع و تاثیرات ناشی از آن در مقالات محققان قبلی نادیده انگاشته شده است. در اینجا بایستی ذکر نمود که در عملیات تراشکاری دو سطح ماشینکاری‌شده را می‌توان از هم متمایز نمود: سطح به‌جا مانده از قطعه‌کار پس از تراشکاری (سطح اصلی) و سطحی که در حین عملیات ماشینکاری ایجاد شده و سپس در دوران بعدی قطعه‌کار برداشته می‌شود (سطح ماشینکاری‌شده جانبی). پیش‌بینی‌های حاصل از تحلیل سینماتیک فرآیند UAT با تحریک در جهت سرعت برشی، حاکی از جدایش ابزار از براده در زمانهایی از سیکل ارتعاشی و عدم جدایش ابزار از قطعه‌کار (حتی برای یک لحظه) می‌باشد، که پدیده فوق به‌طور غیرمستقیم از بررسی تجربی سطح ماشینکاری‌شده جانبی مورد تحقیق و جستجو قرار می‌گیرد. بنابراین تصویر برداری با میکروسکوپ نوری و اندازه‌گیری میکرو سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی انجام گردیده‌است.

پیش از این سختی سطح اصلی بعد انجام عملیات ماشینکاری مورد مطالعه قرار گرفته‌است [۱۱، ۱۵-۱۷]. در این مطالعات، مشاهده گردید که سختی سطح ماشینکاری‌شده اصلی در فرآیند UAT یک‌بعدی با ارتعاشات در جهت سرعت برشی، به اندازه ۶۰ درصد کمتر از مقدار آن در CT بوده و به‌طور قابل ملاحظه‌ای نزدیک به

1. Elliptical
2. Tool Rake Face
3. Tool Flank
4. Elliptical Vibration Turning

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

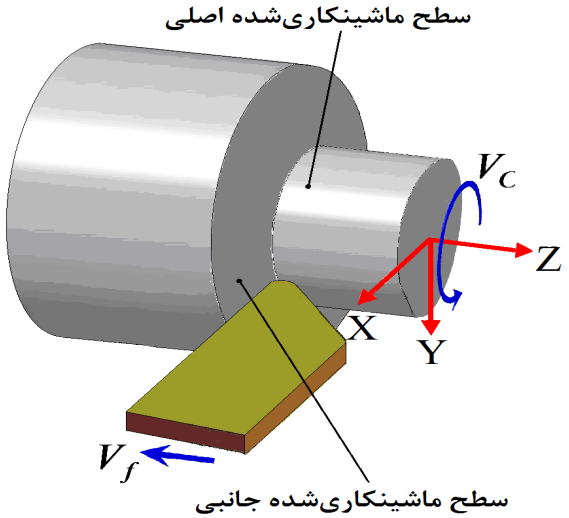
[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

سختی ماده اولیه می‌باشد. این نتایج خاطر نشان می‌کند که دما و تنش پسماند بالاتر مشاهده شده در UAT، منجر به سختی سطحی بالاتر ماده نمی‌شود. از طرف دیگر نیروهای ماشینکاری در UAT در حدود ۳۰ درصد CT می‌باشد و لذا نیروهای ماشینکاری کوچکتر باعث می‌شود که فرآیند UAT نسبت به CT کمتر فرو رونده[1] باشد و منجر به لایه سخت شده کم عمق‌تری گردد. Sasahara [۲۲]، تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل شعاع نوک ابزار، شکل لبه برنده ابزار (تیز یا گرد[2]) و نرخ پیشروی را روی سختی سطح ماشینکاری‌شده در تراشکاری معمولی مورد مطالعه قرار داده‌است. در تراشکاری، لایه‌های ماشینکاری‌شده در دوران قبلی، در مرحله حاضر به‌صورت براده شکل می‌گیرد. او نشان داد نیروهای ماشینکاری، نحوه شکل‌گیری براده و زاویه برش با توجه به کار سختی سطحی ایجاد شده در مرحله قبلی، تحت تاثیر قرار گرفته و ممکن است متفاوت از مقادیر مورد انتظار باشد.

سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی در فرآیند UAT تاکنون مطالعه نشده است. در این مقاله تاثیرات سرعت برشی، نرخ پیشروی و دامنه ارتعاشات روی سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی در فرآیند تراشکاری UAT مورد مطالعه قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود حرکت ابزار منجر به دندانه‌دار شدن (له‌شدگی با الگوی تکرار مشخص روی) سطح ماشینکاری‌شده جانبی گردیده و سختی سطح مذکور را در مقایسه با CT دستخوش تغییر قرار دهد. نتایج حاصل در مقایسه با تراشکاری معمولی ارائه گردیده‌است.

۲- تحلیل سینماتیک

در شکل ۱، عملیات روتراشی در فرآیند تراشکاری نشان داده شده است. در فرآیند تراشکاری، دو سطح ماشینکاری شده وجود دارد: سطح ماشینکاری‌شده اصلی[3] که سطح باقیمانده و قابل مشاهده پس از انجام عملیات ماشینکاری است و دیگری سطح ماشینکاری‌شده جانبی که در هر پاس از دوران قطعه‌کار این سطح مجدداً ماشینکاری شده و در نهایت چیزی از آن باقی نمی‌ماند.

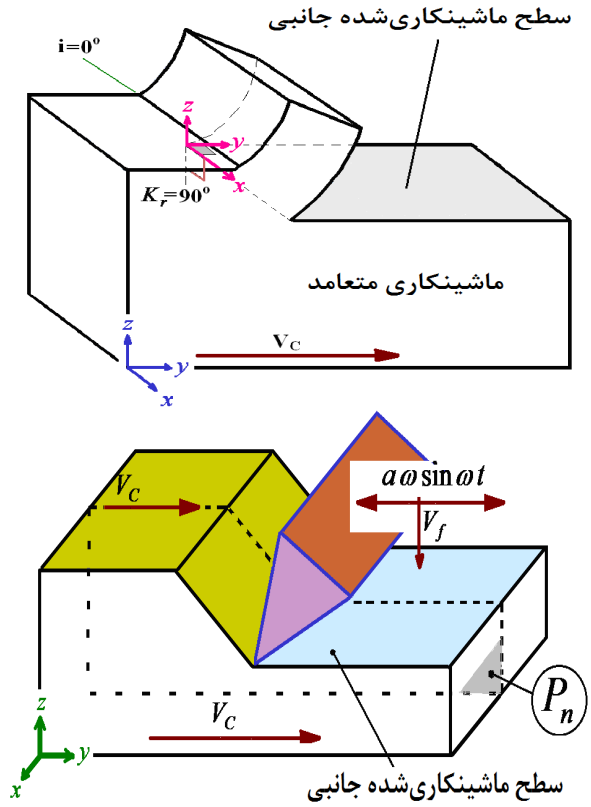


شکل ۱ سطح ماشینکاری‌شده اصلی و سطح ماشینکاری‌شده جانبی در تراشکاری.

در تراشکاری معمولی، سرعت برآیند قطعه‌کار ترکیبی از سرعت برشی V_C و سرعت پیشروی V_f می‌باشد. به هر حال در فرآیند UAT، علاوه بر سرعت برآیند قطعه‌کار، ابزار برشی نیز دارای حرکت نوسانی بوده و لذا بواسطه تغییر در سرعت نسبی ابزار و قطعه‌کار، مکانیزم ماشینکاری دستخوش تغییر می‌گردد. در شکل ۲، نمای سه‌بعدی از صفحه برش و صفحه عمود بر لبه برنده ابزار P_n، در فرآیند UAT متعامد (زاویه تمایل $i=0^\circ$ و زاویه تنظیم $K_r=90^\circ$) با ابزار نوسان‌کننده در جهت سرعت برشی و همچنین دستگاه مختصات ماشین ابزار xyz (x جهت شعاعی یا عمق برش، y جهت مماسی یا سرعت برشی و z جهت محوری یا منفی جهت پیشروی)، نشان داده شده است.

1. Intrusive
2. Chamfered
3. Main Machined Surface

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]



شکل ۲ نمای سه‌بعدی از نحوه شکل‌گیری براده، صفحه برش و صفحه نرمال بر لبه برنده ابزار P_n، در تراشکاری UAT متعامد با تحریک در جهت سرعت برشی.

در تراشکاری متعامد UAT، معادلات سرعت و حرکت قطعه‌کار نسبت به ابزار در دستگاه مختصات ماشین ابزار xyz، به‌صورت زیر قابل تعریف است:

$$V_{X_{W/T}}(t)=0 \quad (۱)$$

$$V_{Y_{W/T}}(t)=-a\,\omega\sin\omega t+V_C \quad (۲)$$

$$V_{Z_{W/T}}(t)=V_f \quad (۳)$$

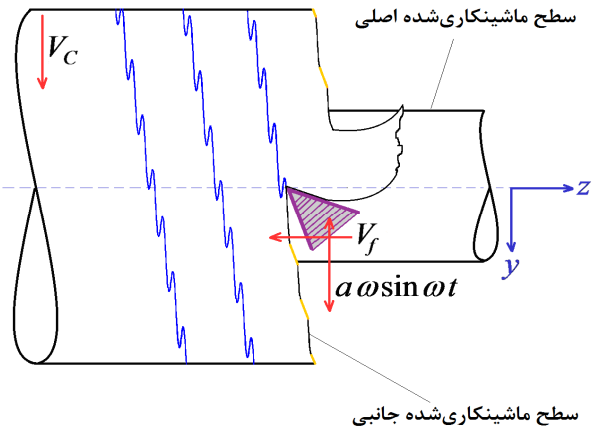
$$X_{W/T}(t)=0 \quad (۴)$$

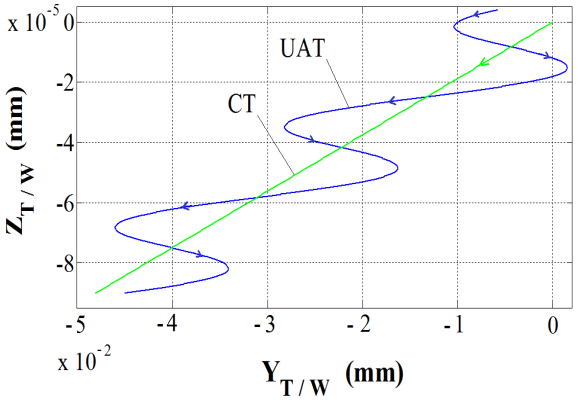
$$Y_{W/T}(t)=a\cos\omega t+V_C\,t \quad (۵)$$

$$Z_{W/T}(t)=V_f\,t \quad (۶)$$

که $X_{W/T}(t)$، $Y_{W/T}(t)$ و $Z_{W/T}(t)$ به‌طور جداگانه مولفه‌های xyz موقعیت قطعه‌کار نسبت به ابزار برنده و $V_{X_{W/T}}(t)$، $V_{Y_{W/T}}(t)$ و $V_{Z_{W/T}}(t)$ مولفه‌های سرعت متناظر هستند؛ a دامنه ارتعاشات در جهت مماسی و ω سرعت زاویه‌ای می‌باشد. در فرآیند تراشکاری، سرعت پیشروی از رابطه $V_f\,(m/s)=feed\,(mm/rev).n\,(rev/\min)/60000$ بدست می‌آید که $feed$ نرخ پیشروی و n سرعت دورانی قطعه‌کار می‌باشد. به‌همین صورت سرعت برشی بر حسب متر بر ثانیه از رابطه $V_C=\pi dn/60000$ بدست می‌آید که d قطر قطعه‌کار تراشکاری بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

سیستم قطعه‌کار ثابت (حرکت نسبی ابزار نسبت به قطعه‌کار) از نظر ادراک ملموس‌تر از سیستم ابزار ثابت (حرکت نسبی قطعه‌کار نسبت به ابزار) می‌باشد. در شکل ۳، مسیر حرکت نسبی ابزار نسبت به قطعه‌کار ($Y_{T/W}(t)=-Y_{W/T}(t)$، $Z_{T/W}(t)=-Z_{W/T}(t)$) در تراشکاری UAT ترسیم شده است.





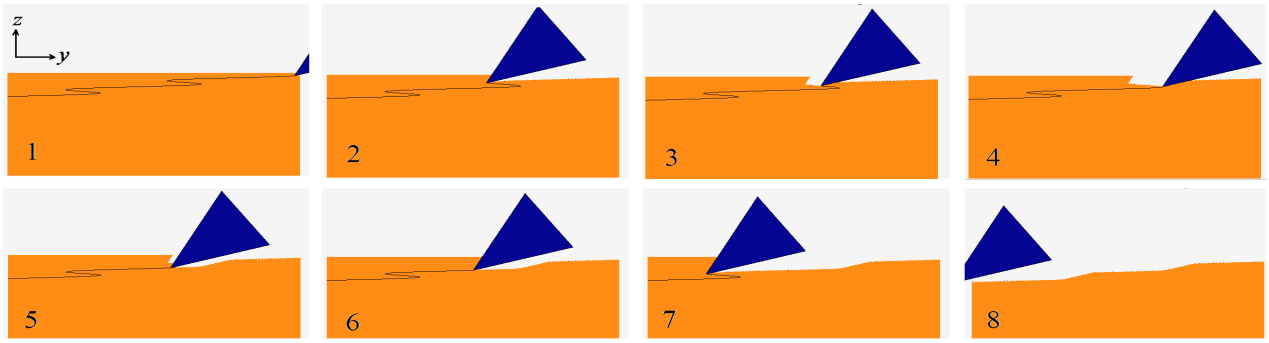
شکل ۳ موقعیت نسبی لبه برنده ابزار نسبت به قطعه‌کار در تراشکاری UAT ($V_C=0.36\,m/s$ ، $feed=0.4\,mm/rev$).

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

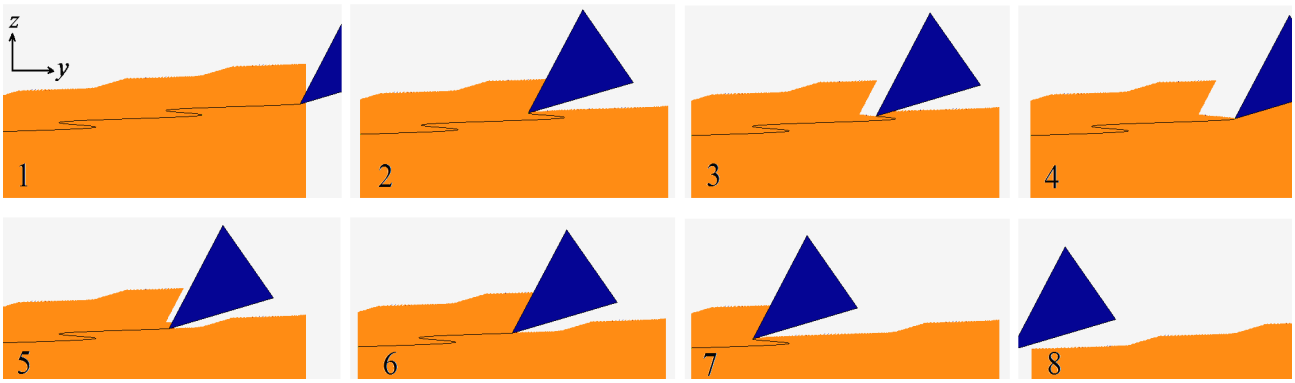
در شکل ۴، به‌کمک روابط (۱) و (۲)، سطح ماشینکاری-شده جانبی حاصل از حرکت نسبی ابزار و قطعه‌کار در صفحه P_n، در اولین پاس تراشکاری UAT با استفاده از نرم افزار Matlab شبیه‌سازی و ترسیم شده است. در شکل ۵ نیز سطح ماشینکاری‌شده جانبی از پاس دوم به بعد نشان داده شده است.

نکته مهم اینکه در شکل ۴ و شکل ۵، برای وضوح بیشتر نحوه‌ی حرکت نسبی ابزار و قطعه‌کار در حرکت رفت و برگشتی، مقدار نرخ پیشروی حدوداً ۵۰ برابر بیشتر از مقدار واقعی ($7.5mm/rev$ به‌جای $0.25mm/rev$) در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن تاثیر سرعت پیشروی در فرآیند تراشکاری معمولی، مسیر حرکت نسبی ابزار قطعه‌کار از حالت افقی به حالت شیب‌دار تغییر می‌یابد. همانطور که در شبیه‌سازی مشاهده می‌گردد، در فرآیند تراشکاری UAT، ناهمواری‌های (پله‌های) کوچکی نیز در سطح ماشینکاری‌شده جانبی وجود دارد که روی مسیر حرکت شیبدار ابزار، قابل مشاهده می‌باشد.

مطابق با شکل ۴ و شکل ۵، در فرآیند UAT طی مرحله ۲-۱ عملیات ماشینکاری (براده‌برداری) صورت می‌گیرد. در مرحله ۴-۲، ابزار از منطقه برش دور شده و به عقب بر می‌گردد، لذا عملیات براده‌برداری قطع می‌شود ولی بدلیل وجود سرعت پیشروی ثابت، ابزار از قطعه‌کار جدا نشده و به‌ناچار سطح ماشینکاری‌شده جانبی قبلی را له (فشرده) می‌کند.



شکل ۴ شبیه‌سازی دوبعدی سطح ماشینکاری‌شده جانبی در تراشکاری UAT در پاس اول؛ $V_C = 0.36m/s$، $feed = 7.5mm/rev$ ، $d = 68mm$، $f = 20KHz, a = 10\mu m$.



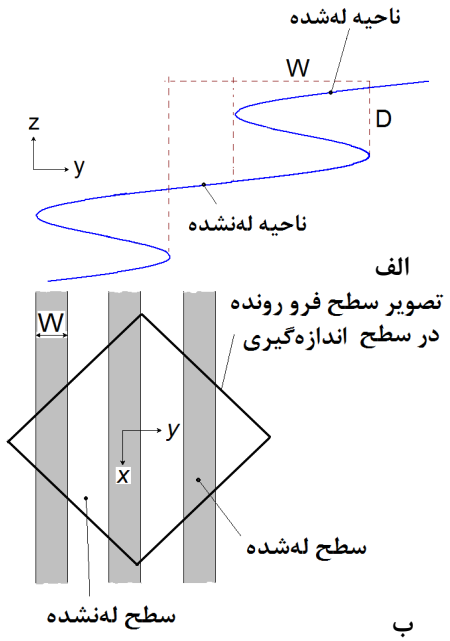
شکل ۵ شبیه‌سازی دوبعدی سطح ماشینکاری‌شده جانبی در در پاسهای بعدی؛ $V_C = 0.36m/s$، $feed = 7.5mm/rev$ ، $d = 68mm$، $f = 20KHz, a = 10\mu m$.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

در مرحله ۶-۴ ابزار مجدداً به سمت ناحیه برش حرکت کرده و بدلیل وجود سرعت پیشروی، ابزار یک لایه‌ی خیلی نازک از سطح ماشینکاری‌شده جانبی را ماشینکاری می‌کند (البته با فرض تیز بودن لبه برنده ابزار)؛ سپس در مرحله ۸-۶ ابزار مجدداً به براده برداری از سطح ماشینکاری‌نشده می‌پردازد.

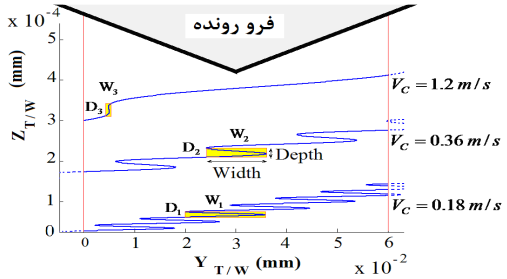
در عمل انتظار می‌رود لهشدن سطح ماشینکاری‌شده جانبی طی مرحله ۴-۲ توسط سطح آزاد ابزار منجر به کارسختی سطح مذکور گردد. همچنین حرکت ابزار طی مرحله ۶-۴ نیز به‌علت کوچکتر بودن مولفه سرعت پیشروی در راستای محور z از شعاع لبه برنده ابزار (در اثر تیز نبودن آن)، احتمال لایه‌برداری نازک از سطح ماشینکاری‌شده جانبی ناچیز بوده و سطح مذکور مجدداً فشرده (له) می‌شود. انتظار می‌رود در نواحی لهشده روی سطح ماشینکاری‌شده جانبی، کارسختی یا سختی سطحی افزایش یابد.

لهشدگی با دو مشخصه قابل بررسی است: ۱) عمق لهشدگی و ۲) پهنای لهشدگی. در شکل ۶-a، عمق D و پهنای W یک ناحیه لهشده در یک سیکل ارتعاش روی سطح ماشینکاری‌شده جانبی، نشان داده شده است.

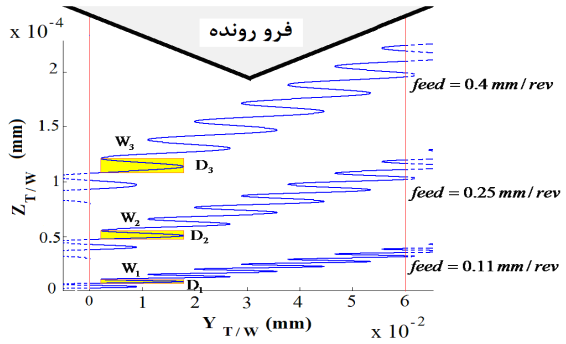


شکل ۶ الف) پهنا و عمق یک ناحیه لهشده در یک سیکل ارتعاشی، ب) تاثیر مناطق سخت شده و سخت نشده بواسطه پهنای لهشدگی روی سختی سطحی میانگین

در شکل شماتیک ۶-b، هنگامی‌که فرورونده‌ی[1] دستگاه میکرو سختی‌سنج روی سطح ماشینکاری‌شده جانبی قرار می‌گیرد، یک سطح اثر لوزی شکل روی آن ایجاد می‌کند که چندین ناحیه لهشده را در بر می‌گیرد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، هنگامی‌که پهنای لهشدگی کوچک باشد، برخی نواحی از سطح اثر فرو رونده سخت نشده باقی می‌مانند، بنابراین انتظار می‌رود که مقدار سختی ناشی از پهنای لهشدگی‌ها برابر با میانگین سختی نواحی لهشده (سخت شده) و نواحی لهنشده (سخت نشده) روی سطح ماشینکاری‌شده جانبی باشد. در شکل ۷، شبیه‌سازی عمق و پهنای نواحی لهشده روی سطح ماشینکاری‌شده جانبی داخل محدوده‌ای اثر فرورونده‌ی دستگاه میکرو سختی‌سنج نشان داده شده است.



الف) نرخ پیشروی ثابت $feed = 0.4mm/rev$ ، $(D_1 < D_2 < D_3 \ , \ W_1 > W_2 > W_3)$.



ب) سرعت برشی ثابت $V_C = 0.18m/s$، $(W_1 = W_2 = W_3)$ ، $(D_1 < D_2 < D_3)$.

شکل ۷ تاثیر پارامترهای مختلف ماشینکاری در تراشکاری UAT ($f = 20KHz, a = 10\mu m$) روی عمق و پهنای نواحی لهشده در سطح ماشینکاری‌شده جانبی.

1. Indenter

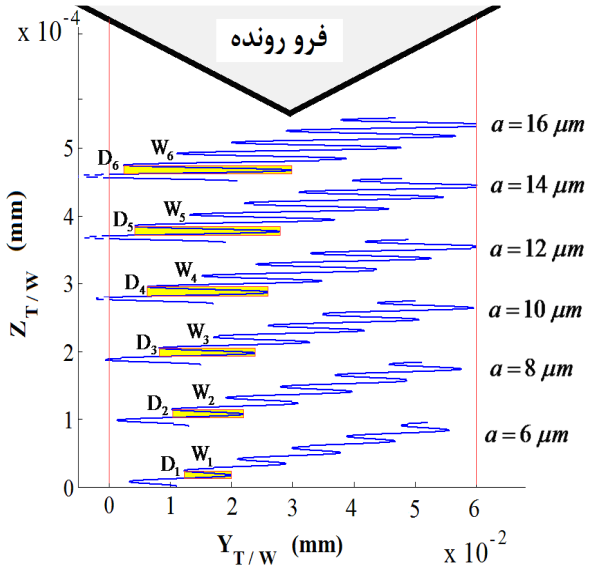
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

از شکل ۷، نتایج زیر استخراج می‌گردد:

- هنگامی که نرخ پیشروی *feed* ثابت است و اثر سرعت برشی V_C جستجو می‌شود، پهنا و عمق لهشدگی عامل تغییر سختی سطحی خواهد بود؛ لذا با افزایش سرعت برشی، پهنای لهشدگی‌ها کاهش یافته ($W_1 > W_2 > W_3$)، اما عمق لهشدگی‌ها افزایش می‌یابد ($D_1 < D_2 < D_3$) (شکل ۷- a).
- هنگامی‌که سرعت برشی V_C ثابت باشد و اثر نرخ پیشروی *feed* جستجو گردد، عمق لهشدگی عامل تغییر سختی سطحی خواهد بود و لذا با افزایش نرخ پیشروی، پهنای لهشدگی‌ها ثابت مانده ($W_1 = W_2 = W_3$)، اما عمق لهشدگی‌ها افزایش می‌یابد ($D_1 < D_2 < D_3$) (شکل ۷- b).

در شکل ۸، تاثیر دامنه ارتعاشات آلترسونیک روی عمق و پهنای نواحی لهشده از سطح ماشینکاری‌شده جانبی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش دامنه ارتعاشات، عمق لهشدگی‌ها ثابت مانده اما پهنای نواحی لهشده افزایش می‌یابد.



شکل ۸ تاثیر دامنه ارتعاشات آلتراسونیک در تراشکاری UAT، روی عمق و پهنای نواحی لهشده سطح ماشینکاری شده جانبی ($V_C = 0.18 m/s$, $feed = 0.4 mm/rev$, $f = 20 KHz$، $W_1 < W_2 < W_3 < W_4 < W_5 < W_6$، $D_1 = D_2 = D_3 = D_4 = D_5 = D_6$)

به‌طور طبیعی انتظار می‌رود افزایش عمق و پهنای لهشدگی‌ها منجر به افزایش سختی سطحی در سطح ماشینکاری‌شده جانبی گردد.

۳- آزمون تجربی

برای اینکه از طریق تجربه پیش‌بینی‌های تحلیل سینماتیک تحقیق گردد، اثرات حرکت ابزار روی قطعه‌کار مطالعه می‌گردد. در تراشکاری معمولی، لهشدگی ناشی از حرکت ارتعاشی ابزار اتفاق نمی‌افتد، به هر حال سختی سطحی قطعه‌کار در تراشکاری معمولی می‌تواند با تغییر شرایط ماشینکاری تغییر نماید. بنابراین در آزمونهای تجربی، سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی قطعه‌کار در هر دو فرآیند تراشکاری UAT و معمولی اندازه‌گیری می‌شود تا بدینوسیله امکان بررسی اثر حرکت ارتعاشی ابزار در شرایط مختلف ماشینکاری روی سختی سطحی در مقایسه با تراشکاری معمولی بدست آید.

برای مقایسه سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی در فرآیند تراشکاری UAT نسبت به تراشکاری CT، تلاش برای ایجاد شرایط آزمایش یکسان صورت پذیرفت. بدین منظور، یک میله آلومینیوم ۶۰۶۱ به قطر ۷۰mm با شرایط ماشینکاری ($n = 160 rev/\min$ ، $feed = 0.2 mm/rev$ ، $a_p = 0.7 mm$)، به میله‌ای به قطر ۶۸/۶mm خشن‌تراشی گردید تا به قطر مورد نظر نزدیک شده و تاثیرات احتمالی فرآیندهای شکل‌دهی قبلی حذف گردد. سپس میله آلومینیومی با شرایط ماشینکاری ($n = 80 rev/\min$ ، $feed = 0.05 mm/rev$ ، $a_p = 0.3 mm$)، به میله‌ای به قطر ۶۸mm ظریف‌تراشی شد تا اثرات احتمالی نیروها، دمای بالا و تنش‌های پسماند ناشی از عملیات خشن‌تراشی حداقل گردد. برای انجام آزمایشات، عمق برش ثابت $a_p = 2 mm$ در تمام آزمونها استفاده گردید. بدین منظور توسط ابزار شیارتراشی شیارهایی با پهنای ۵mm و عمق ۲mm (با شرایط شیار تراشی $feed = 0.05 mm/rev$، $n = 80 rev/\min$) و با فواصل ۱۰mm روی میله ماشینکاری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

شـــد. ســـپس بـــرای دو حالـــت تراشـــکاری CT و UAT ($f = 20\,KHz, a = 10\,\mu m$) شرایط ماشینکاری زیر اعمال گردید: سه سرعت دورانی ($n = 50, 100\ and\ 337\ rev/\min$) متنـاظر بـا سه سرعت برشی ($V_C = 0.18, 0.36\ and\ 1.2\ m/s$) و چهـار نـرخ پیشروی ($feed = 0.05, 0.11, 0.25$ ،$0.4\ mm/rev$).

در آزمـــون‌هـــای تراشـــکاری CT و UAT ایـــن مقالـــه، میلـــه آلومینیومی در فرآیند تراشکاری متعامـد ($i = 0^\circ$ و $K_r = 90^\circ$)، از قطر ۶۸mm به قطر ۶۴mm روتراشی گردید که در شکل ۹، نشان داده شده است.

بـا اسـتفاده از نتـایج مطالعـات قبلـی در طراحـی هـورن و آزمایش‌های تجربـی [۲۱، ۲۳-۲۵]، ارتعاشـات آلتراسـونیک در جهت سرعت برشی بـه اینسـرت کاربیـدی بـا پوشـش نیتریـد تیتانیوم (VBMT-160404) اعمال گردید.

عمق برش $a_P = 2mm$ انتخاب شده برای آزمونها در مقایسه با شعاع نوک ابزار $r = 0.4\,mm$ ، به انـدازه کـافی بـزرگ بـوده و اندازه‌گیری سختی سطحی در نواحی ماشینکاری شـده توسـط بخش مستقیم لبه برنده ابزار انجام گردید.

شکل ۹ عملیات براده‌برداری از سطح جـانبی قطعـه‌کـار در فرآینـد تراشکاری UAT.

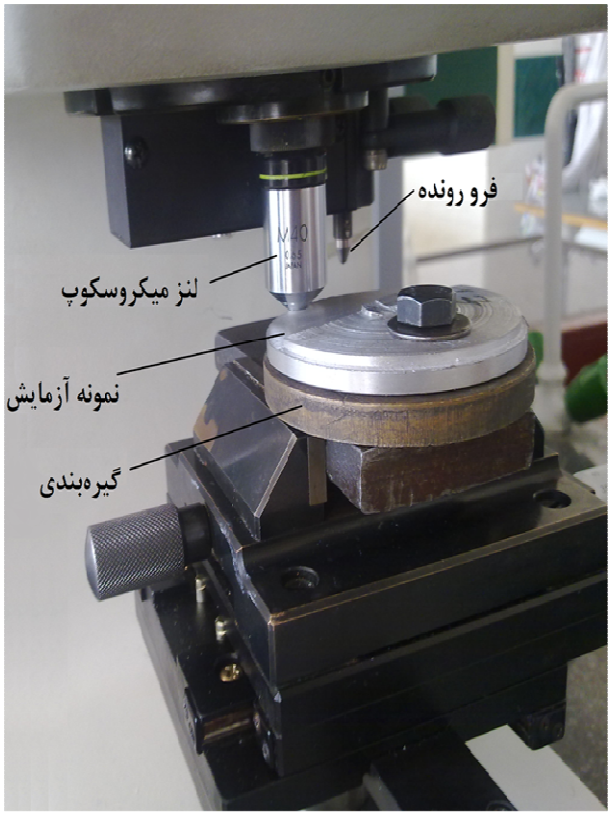
برای بررسی تاثیرات همزمان سرعت برشی و نـرخ پیشـروی روی سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی در تراشکاری UAT، بایستی در حین انجام عملیات براده‌برداری، سرعت برشی و نرخ پیشروی همزمان متوقف گردد. در انجـام آزمایشـها از دسـتگاه تـراش CNC TM40 اسـتفاده گردیـد. بـرخلاف دسـتگاههای تراش معمولی که انجـام حرکـت پیشـروی توسـط گیـربکس و مرتبط با تعداد دوران اسپیندل انجـام مـی‌شـود، در ماشـینهای ابزار CNC، حرکت اسپیندل و پیشروی توسط سیستم محـرک جداگانه کنترل مـی‌شـوند، لـذا پـس از خـاموش شـدن موتـور سه‌نظام، پیشروی به‌صورت لحظه‌ای قطع می‌شـود امـا بـه‌علـت وجود اینرسی دورانـی، اسـپیندل بـه‌صـورت لحظـه‌ای متوقـف نمی‌شود، بنابراین انجام حتی یـک دور دوران ناخواسـته (۳۶۰ درجه) پس از قطع حرکت پیشروی، منجر به حذف اثرات مورد جستجو در ایـن تحقیـق روی سـطح ماشـینکاری‌شـده جـانبی می‌گردد. آزمونهای تجربی نشان داد در آن دسـته از آزمونهـای تراشکاری که سرعت دورانی اسپیندل کمتـر بـود یـا نیروهـای ماشـینکاری زیـادتر بـود، حرکـت پیشـروی و دوران اسـپیندل (براده‌برداری ناخواسته) تقریبا همزمان متوقف می‌گردید امـا در آزمونهایی که نیروهای ماشینکاری کمتـر و یـا سـرعت دورانـی اسپیندل بیشتر بـود، مشـاهده گردیـد کـه بـا توقـف لحظـه‌ای حرکت پیشروی و خاموش شدن دستگاه تـراش، دوران اضـافی اسپیندل در حدود $\frac{1}{4}$ تـا $\frac{1}{3}$ دور ادامـه مـی‌یابـد کـه بخـش مـــذکور روی ســـطح ماشـــین‌کـــاری‌شـــده جـــانبی از انجـــام آزمون‌سختی‌سنجی حذف شد. در شرایط یکسـان آزمایشـات ۳ بار تکرار گردید و سپس نمونه‌های ماشینکاری‌شده شامل سطح ماشینکاری‌شـده جـانبی جداگانـه بریـده شـده و بـرای آزمـون میکروسختی‌سنجی آماده گردیدند.

بـــرای انـــدازه‌گیـــری میکـــرو ســـختی ســـطحی، از دســـتگاه میکـــروســـختی‌ســـنجی ویکـــرز Bohler بـــا وزنـــه‌هـــای $50, 100\ and\ 200\ gr$ و زمان اعمال بار ۱۵ ثانیه استفاده گردیـد. سپس فیکسچری برای بستن قطعات زیر میکروسکوپ سـاخته شد و مطابق شکل ۱۰، نمونه‌هـا بـه دفعـات متعـدد در نـواحی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

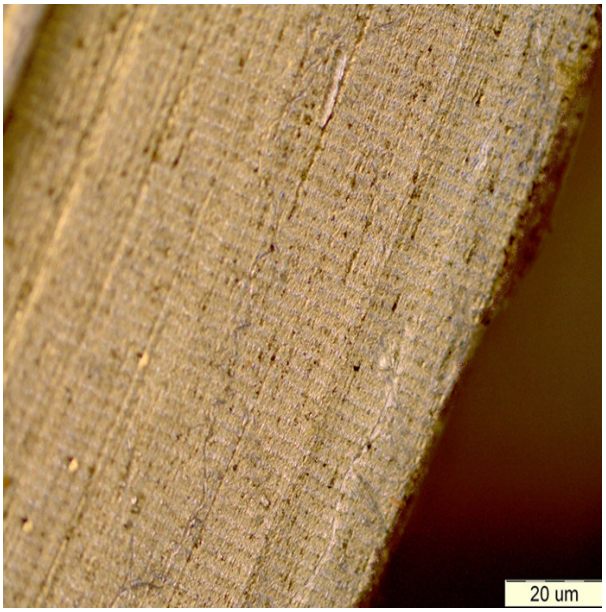
مختلف از سطح ماشینکاری‌شده جانبی مورد میکرو سختی-سنجی قرار گرفته و میانگین میکروسختی سطحی ویکرز برای هر نمونه آزمایش بدست آمد. از میکرسکوپ نوری مدل Olympus نیز برای مطالعه سطح مذکور استفاده شده است.



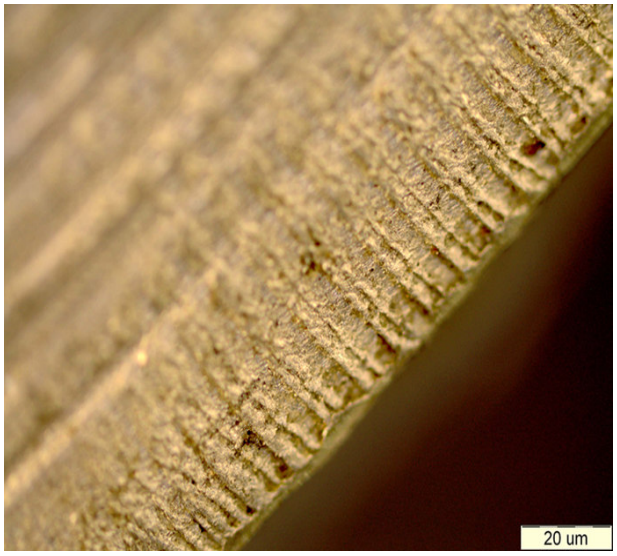
شکل ۱۰ اندازه‌گیری میکرو سختی روی سطح ماشینکاری‌شده جانبی در فرآیند تراشکاری UAT.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در شکل ۱۱، تاثیر ارتعاشات آلتراسونیک روی سطح ماشینکاری‌شده جانبی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ارتعاشات آلتراسونیک، منجر به ایجاد لهیدگی‌های متناوب در سطح ماشینکاری‌شده جانبی می‌شود که با پیش‌بینی‌های تحلیل سینماتیک مطابقت دارد.



CT

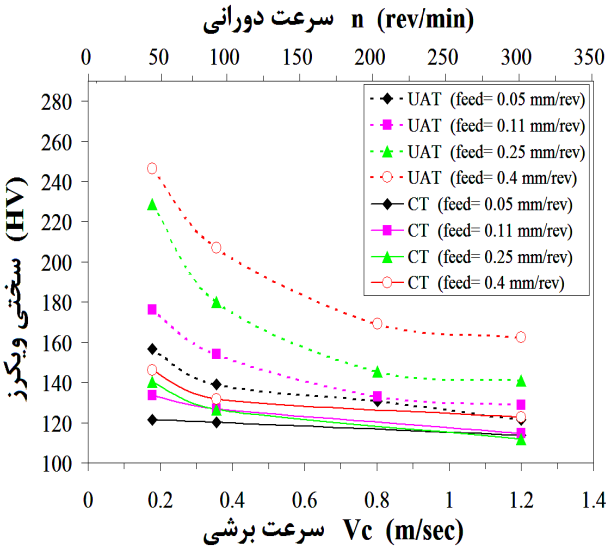


UAT

شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپ نوری از سطح ماشینکاری‌شده جانبی برای CT و UAT در سرعت برشی $V_C = 0.18 m/s$ و نرخ پیشروی $feed = 0.4\ mm/rev$.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

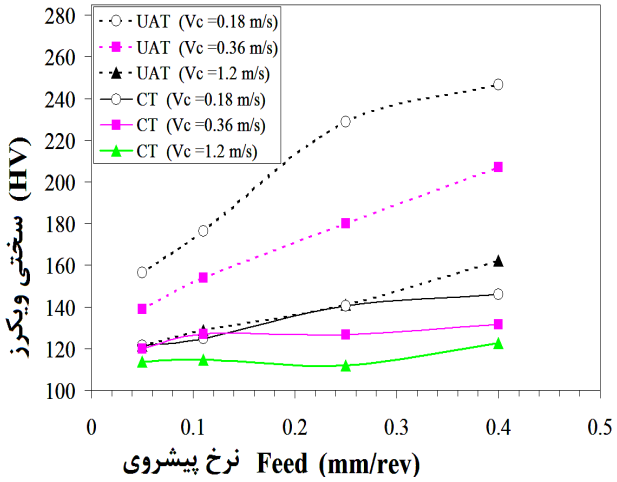
در شکل ۱۲، منحنی میکروسختی سطحی ویکرز سطح ماشینکاری‌شده جانبی برای تراشکاری UAT و CT نشان داده شده است.



شکل ۱۲ منحنی سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی به‌ازای سرعت برشی V_C (یا سرعت دورانی n) برای فرآیندهای UAT و CT در مقادیر مختلف نرخ پیشروی *feed*.

همانطور که مشاهده می‌گردد در سرعت‌های برشی پایین، اعمال ارتعاشات آلتراسونیک موجب افزایش سختی سطحی ماده روی سطح ماشینکاری شده‌جانبی می‌شود که با نتایج پیش‌بینی شده توسط تحلیل سینماتیک در شکل a-۷ مطابق است. در حقیقت با افزایش سرعت برشی، پهنای لهشدگی‌ها کاهش و همچنین عمق آن افزایش یافته و سختی کاهش می‌یابد. مطابق با شکل b-۷، با کاهش پهنای لهشدگی، سختی سطحی تخمین زده شده کاهش یافته و به مقادیر کمتر سختی مربوط به ماده کار نشده نزدیک می‌شود. چنانچه سرعت برشی افزایش یابد، مقدار سختی سطحی به سختی سطحی ایجاد شده توسط فرآیند CT میل می‌کند که نشان‌دهنده کاهش سریع اثرات آلتراسونیک می‌باشد. لازم به‌ذکر است که تحلیل سینماتیک برای تراشکاری معمولی هیچگونه ایجاد لهشدگی را در پیش‌بینی نمی‌کند.

در شکل ۱۳، منحنی تغییرات سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی به‌ازای نرخ پیشروی نشان داده شده است.



شکل ۱۳ منحنی سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی به‌ازای نرخ پیشروی *feed* برای فرآیندهای UAT و CT در مقادیر مختلف سرعت برشی V_C.

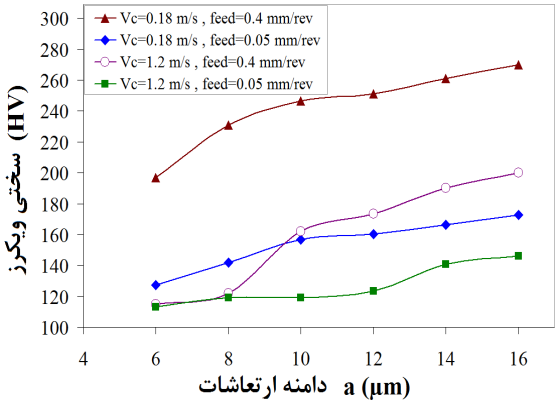
با افزایش نرخ پیشروی، سختی سطحی ماده روی سطح ماشینکاری‌شده جانبی افزایش می‌یابد، که این روند در تراشکاری UAT قابل ملاحظه‌تر بوده و با نتایج تحلیل سینماتیک مبنی بر افزایش عمق لهشدگی با افزایش نرخ پیشروی در شکل b-۷ مطابقت دارد. به‌نظر می‌رسد تاثیر کاهش پهنای لهشدگی روی کاهش سختی به‌طور همزمان بیشتر از تاثیرات افزایش عمق لهشدگی روی افزایش سختی نشان داده‌شده در شکل ۱۲ می‌باشد.

در شکل ۱۴، منحنی سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی به‌ازای دامنه ارتعاشات آلتراسونیک نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه ارتعاشی، سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی افزایش یافته است که دلیل آنرا می‌توان تشدید اثرات ارتعاشات آلتراسونیک (افزایش دامنه حرکت رفت و برگشتی ابزار) و مطابق با نتایج تحلیل سینماتیک، ایجاد نواحی لهشدگی با پهنای بیشتر معرفی نمود (شکل ۸).

نتیجه دیگری که از سخت شدن سطح جانبی می‌توان گرفت این است که سختی سطحی قاعدتاً باعث افزایش نیروی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

ماشینکاری می‌شود. این نکته اگر با یافته‌های قبلی که ثابت شده نیروی ماشینکاری وقتی ارتعاشات آلتراسونیک وجود داشته باشد کمتر از ماشینکاری عادی است گویای آن است که هرچند نیروی متوسط اندازه‌گیری‌شده در ماشینکاری به‌همراه ارتعاشات آلتراسونیک کمتر از ماشینکاری عادی است [۲۱، ۲۳، ۲۴] ولی حداکثر نیروی آن بیشتر است. این نکته اخیر با تحلیل اجزای محدود نیز نشان داده شده است [۲۱].



شکل ۱۴ منحنی سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی به‌ازای دامنه ارتعاشات آلتراسونیک در فرآیند UAT.

۵- جمع‌بندی

اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به حرکت معمولی ابزار و قطعه‌کار در فرآیند روتراشی، موجب لهیدگی سطح ماشینکاری‌شده جانبی قطعه‌کار می‌گردد که این موضوع از دو روش تجربی و تحلیل سینماتیک مورد مطالعه قرار گرفت. تحلیل سینماتیک نشان داد ترکیب سه فاکتور سرعت برشی، نرخ پیشروی و اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به ابزار برشی در جهت مماسی (جهت سرعت برشی)، منجر به الگوی خاصی از حرکت نسبی لبه برنده ابزار نسبت به قطعه‌کار و در نتیجه دندانه‌دار شدن سطح ماشینکاری‌شده جانبی در فرآیند UAT می‌شود.

به‌منظور تحقیق نتایج پیش‌بینی‌شده از تحلیل سینماتیک برای فرآیند UAT، سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی در شرایط مختلف ماشینکاری در مقایسه با فرآیند CT مورد بررسی تجربی قرار گرفت. تصاویر میکروسکوپ نوری نیز دندانه‌دار شدن و لهشدگی ناشی از حرکت رفت و برگشتی ابزار روی سطح ماشینکاری‌شده جانبی را نشان داد که با پیش‌بینی شبیه‌سازی سینماتیک به‌خوبی مطابقت دارد. آزمون میکروسختی ویکرز نشان داد که سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی متاثر از حرکت نسبی ابزار و قطعه‌کار می‌باشد که تائیدی دیگر بر نتایج تحلیل سینماتیک ارائه‌شده می‌باشد. مشاهده گردید که با کاهش سرعت برشی و افزایش دامنه ارتعاشات که متناظر با تشدید اثرات ارتعاشات آلتراسونیک در فرآیند تراشکاری است، همچنین با افزایش نرخ پیشروی، سختی سطح ماشینکاری‌شده جانبی افزایش می‌یابد.

۶- علائم و نشانه‌ها

a	دامنه ارتعاشات در جهت مماسی (μm)
a_p	عمق برش (mm)
d	قطر قطعه‌کار (mm)
D_i	عمق ناحیه لهشده در یک سیکل ارتعاشی
f	فرکانس ارتعاشات (Hz)
$feed$	نرخ پیشروی (mm/rev)
i	زاویه تمایل (deg)
K_r	زاویه تنظیم (زاویه بین لبه برنده اصلی و جهت پیشروی اصلی) (deg)
n	سرعت دورانی ($rev/\min$)
P_n	صفحه عمود بر لبه برنده ابزار
r	شعاع نوک ابزار (mm)
V_C	سرعت برشی ($m/\sec$)
V_{cr}	سرعت حدی (ماکزیمم سرعت نوسانات آلتراسونیک) ($m/\sec$)
V_f	سرعت پیشروی ($m/\sec$)
$V_{X_{W/T}}(t)$	سرعت نسبی ابزار نسبت به قطعه‌کار در جهت شعاعی (دستگاه xyz ماشین) ($m/\sec$)
$V_{Y_{W/T}}(t)$	سرعت نسبی ابزار نسبت به قطعه‌کار در جهت مماسی (دستگاه xyz ماشین) ($m/\sec$)
$V_{Z_{W/T}}(t)$	سرعت نسبی ابزار نسبت به قطعه‌کار در جهت محوری (دستگاه xyz ماشین) ($m/\sec$)
W_i	پهنای ناحیه لهشده در یک سیکل ارتعاشی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

$x\,y\,z$	دستگاه مختصات ماشین ابزار: x جهت شعاعی یا عمق برش، y جهت مماسی یا سرعت برشی و z جهت محوری یا منفی جهت پیشروی
$X_{W/T}(t)$	موقعیت نسبی ابزار و قطعه‌کار در جهت عمق برش (شعاعی) (دستگاه xyz ماشین) ($m/\sec$)
$Y_{W/T}(t)$	موقعیت نسبی ابزار و قطعه‌کار در جهت سرعت برشی (مماسی) (دستگاه xyz ماشین) ($m/\sec$)
$Z_{W/T}(t)$	موقعیت نسبی ابزار و قطعه‌کار در جهت منفی سرعت پیشروی (محوری) (دستگاه xyz ماشین) ($m/\sec$)

۷- منابع

[1] Chunxiang Ma, E. Shamoto, T. Moriwaki, Lijiang Wang, Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 1305–1310.

[2] Chunxiang Ma, E. Shamoto, T. Moriwaki, Yonghong Zhang, Lijiang Wang, Suppression of burrs in turning with ultrasonic elliptical vibration cutting, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1295–1300.

[3] C. Nath, M. Rahman, K.S. Neo, A study on ultrasonic elliptical vibration cutting of tungsten carbide, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 4459–4464.

[4] Chandra Nath, Mustafizur Rahman, Ken Soon Neo, Machinability study of tungsten carbide using PCD tools under ultrasonic elliptical vibration cutting, International Journal of Machine Tools & Manufacture, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 1089–1095.

[5] M. Xiao, S. Karube, T. Soutome, K. Sato, Analysis of chatter suppression in vibration cutting, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 1677–1685.

[6] M. Xiao, Q.M. Wang, K. Sato, S. Karube, T. Soutome, H. Xu, The effect of tool geometry on regenerative instability in ultrasonic vibration cutting, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 492–499.

[7] Chandra Nath, M. Rahman, S.S.K. Andrew, A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel, Journal of Materials Processing Technology 192–193 (2007) 159–165.

[8] Chandra Nath, M. Rahman, Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 965–974.

[9] J. Rimkevičienė, V. Ostaševičius, V. Jūrėnas, R. Gaidys, Experiments and simulations of ultrasonically assisted turning tool, ISSN 1392 - 1207. MECHANIKA. 2009. Nr.1 (75).

[10] Jeong-Du Kim, In-Hyu Choi, Characteristics of chip generation by ultrasonic vibration cutting with extremely low cutting velocity, International Journal of Advance Manufacturing Technology (1998) 14:2-6.

[11] N. Ahmed, A. V. Mitrofanov, V. I. Babitsky, V V. Silberschmidt, Analysis of material response to ultrasonic vibration loading in turning Inconel 718, Materials Science and Engineering A 424 (2006) 318–325.

[12] N. Ahmed, A.V. Mitrofanov, V I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, Analysis of forces in ultrasonically assisted turning, Journal of Sound and Vibration 308 (2007) 845–854.

[13] Jerald L. Overcash, James F. Cuttino, In-process modeling of dynamic tool-tip temperatures of a tunable vibration turning device operating at ultrasonic frequencies, Precision Engineering 33 (2009) 505–515.

[14] Kei Harada, Hiroyuki Sasahara, Effect of dynamic response and displacement/stress amplitude on ultrasonic vibration cutting, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 4490–4495.

[15] A.V. Mitrofanov, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, Finite element simulations of ultrasonically assisted turning, Computational Materials Science 28 (2003) 645–653.

[16] A.V. Mitrofanov, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, Finite element analysis of ultrasonically assisted turning of Inconel 718, Journal of Materials Processing Technology 153–154 (2004) 233–239.

[17] V.I. Babitsky, A.V. Mitrofanov, V.V. Silberschmidt, Ultrasonically assisted turning

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]

of aviation materials: simulations and experimental study, Ultrasonics 42 (2004) 81–86.

[18] A.V. Mitrofanov, N. Ahmed, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, Effect of lubrication and cutting parameters on ultrasonically assisted turning of Inconel 718, Journal of Materials Processing Technology 162–163 (2005) 649–654.

[19] A.V. Mitrofanov, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, Thermomechanical finite element simulations of ultrasonically assisted turning, Computational Materials Science 32 (2005) 463–471.

[20] N. Ahmed, A.V. Mitrofanov, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, 3D finite element analysis of ultrasonically assisted turning, Computational Materials Science 39 (2007) 149–154.

[21] S. Amini, H. Soleimanimehr, M.J. Nategh, A. Abudollah, M.H. Sadeghi, FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool, Journal of Materials Processing Technology 201 (2008) 43–47.

[22] Hiroyuki Sasahara, The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45%C steel, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 131–136.

[23] M.J. Nategh, S. Amini, H. Soleimanimehr, Modeling the Force, surface roughness and cutting temperature in ultrasonic vibration-assisted turning of Al 7075, Advanced Materials Research Vol. 83-86 (2010) pp 315-325.

[24] H. Soleimanimehr, M.J. Nategh and S. Amini, Prediction of machining force and surface roughness in ultrasonic vibration-assisted turning using neural networks, Advanced Materials Research Vol. 83-86 (2010) pp 326-334.

[25] H. Soleimanimehr, M.J. Nategh , S. Amini, Modeling of Surface Roughness in Vibration Cutting by Artificial Neural Network, International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering 4:3 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1390.11.1.6.4]