



بررسی تحلیلی و تجربی سینماتیک حرکت نسبی ابزار و قطعه کار در فرآیند تراشکاری به همراه ارتعاشات آلتراسونیک

حامد رضوی^۱، محمد جواد ناطق^{۲*}، امیر عبدالله^۳، حمید سلیمانی مهر^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 ۱۴۳-۱۴۱۱۵، nategh@modares.ac.ir

چکیده - هدف این مقاله بررسی تحلیلی و تجربی سینماتیک حرکت نسبی ابزار و قطعه کار در تراشکاری معمولی (CT) و تراشکاری به همراه ارتعاشات آلتراسونیک (UAT) می باشد. تحلیل سینماتیک UAT نشان می دهد که حرکت لبه برنده ابزار نسبت به قطعه کار (ناشی از سرعت برشی، سرعت پیشروی و ارتعاشات ابزار برشی در راستای مماسی)، سطح ماشینکاری شده جانبی^۱ را متاثر ساخته و الگوی تکرار شونده ای از نواحی له شده یا دنداندار روی آن ایجاد می کند که در نتیجه کارسختی ناشی از این پدیده می تواند میکرو سختی سطح ماشینکاری شده جانبی را در مقایسه با CT افزایش دهد. همچنین مدل سینماتیک نشان می دهد که در فرآیند UAT با تحریک یک بعدی در جهت سرعت برشی، به خاطر نرخ پیشروی ثابت ابزار نسبت به قطعه کار، ابزار تراشکاری هیچگاه از قطعه کار جدا نمی شود، اگرچه سطح براده ابزار ممکن است به طور تناوبی در هر سیکل ارتعاشی از براده جدا گردد. برای بررسی تجربی پیش بینی های حاصل از شبیه سازی سینماتیک، از آزمون میکرو سختی سطحی و تصویر برداری میکروسکوپ نوری سطح ماشینکاری شده جانبی استفاده گردید. نتایج و مشاهدات تجربی، به خوبی تأثیرات ارائه شده توسط مدل سینماتیک از حرکت لبه برنده ابزار روی سطح جانبی را برای UAT در مقایسه با CT تصدیق می نماید. **کلید واژگان:** تراشکاری به همراه ارتعاشات آلتراسونیک، سینماتیک، سطح ماشینکاری شده جانبی

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

H. Razavi¹, M. J. Nategh^{2*}, A. Abdullah³, H. Soleimanimehr⁴

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.

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

۱-مقدمه

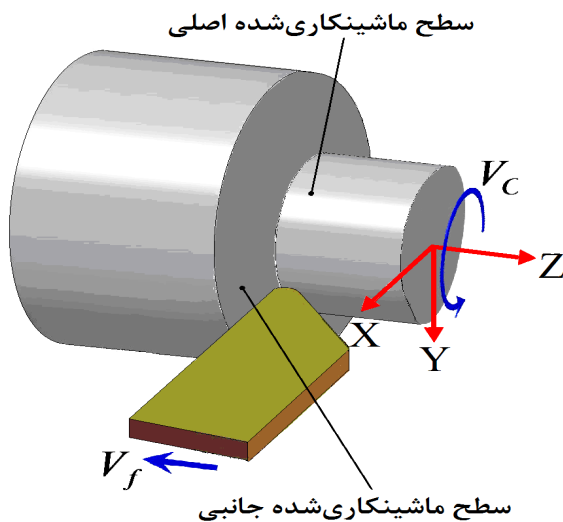
تراشکاری به همراه ارتعاشات آلتراسونیک (UAT)، عبارت است از: اضافه نمودن ارتعاشات آلتراسونیک به ابزار برشی در فرآیند تراشکاری معمولی که جهت اعمال ارتعاشات می‌تواند در جهت سرعت برشی، پیشروی، شعاعی و یا ترکیبی از جهات فوق باشد. اعمال ارتعاشات در جهت سرعت برشی (یک‌بعدی) و یا ترکیب آن با ارتعاشات در جهت پیشروی^۱، دلیل 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^۲ از براده و جدایش سطح زیرین ابزار^۳ از قطعه‌کار نام برده‌اند. همچنین در سایر مقالات مربوط به تراشکاری با ارتعاشات بیضوی^۴ 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 المان محدود 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 المان محدود 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 دلیل 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 فوق‌به‌طور 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

شده وجود دارد: سطح ماشینکاری شده اصلی^۳ که سطح باقیمانده و قابل مشاهده پس از انجام عملیات ماشینکاری است و دیگری سطح ماشینکاری شده جانبی که در هر پاس از دوران قطعه کار این سطح مجدداً ماشینکاری شده و در نهایت چیزی از آن باقی نمی ماند.



شکل ۱ سطح ماشینکاری شده اصلی و سطح ماشینکاری شده جانبی در تراشکاری.

در تراشکاری معمولی، سرعت برآیند قطعه کار ترکیبی از سرعت برشی V_c و سرعت پیشروی V_f می باشد. به هر حال در فرآیند UAT، علاوه بر سرعت برآیند قطعه کار، ابزار برشی نیز دارای حرکت نوسانی بوده و لذا بواسطه تغییر در سرعت نسبی ابزار و قطعه کار، مکانیزم ماشینکاری دستخوش تغییر می گردد. در شکل ۲، نمای سه بعدی 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 نوسان کننده 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.

سختی ماده اولیه می باشد. این نتایج خاطر نشان می کند که دما و تنش پسماند بالاتر مشاهده شده در UAT، منجر به سختی سطحی بالاتر ماده نمی شود. از طرف دیگر نیروهای ماشینکاری در UAT در حدود ۳۰ درصد CT می باشد و لذا نیروهای ماشینکاری کوچکتر باعث می شود که فرآیند UAT نسبت به CT کمتر فرو رونده^۱ باشد و منجر به لایه سخت شده کم عمق تری گردد. Sasahara [۲۲]، تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل شعاع نوک ابزار، شکل لبه برنده ابزار (تیز یا گرد) و نرخ پیشروی را روی سختی سطح ماشینکاری شده در تراشکاری معمولی مورد مطالعه قرار داده است. در تراشکاری، لایه های ماشینکاری شده در دوران قبلی، در مرحله حاضر به صورت براده شکل می گیرد. او نشان داد نیروهای ماشینکاری، نحوه شکل گیری 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 ماشینکاری شده جانبی در فرآیند UAT تاکنون مطالعه نشده است. در این مقاله تاثیرات سرعت برشی، نرخ پیشروی و دامنه ارتعاشات روی سختی سطح ماشینکاری شده جانبی در فرآیند تراشکاری UAT مورد مطالعه قرار می گیرد. انتظار می رود حرکت ابزار منجر به دنداندار شدن (له شدگی با الگوی تکرار مشخص روی) سطح ماشینکاری شده جانبی گردیده و سختی سطح مذکور را در مقایسه با CT دستخوش تغییر قرار دهد. نتایج حاصل در مقایسه با تراشکاری معمولی ارائه گردیده است.

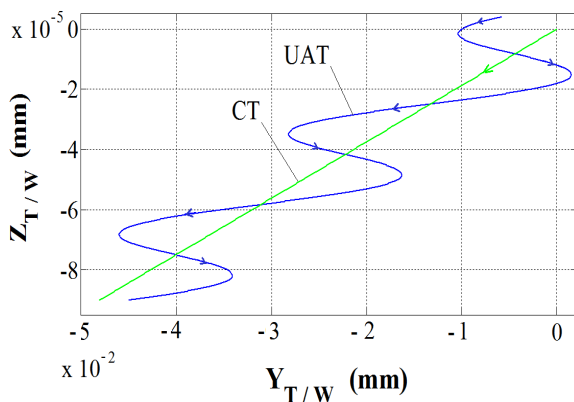
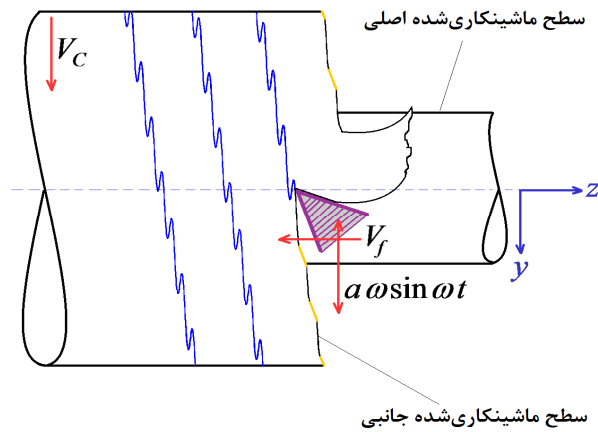
۲- تحلیل سینماتیک

در شکل ۱، عملیات روتراشی در فرآیند تراشکاری نشان داده شده است. در فرآیند تراشکاری، دو سطح ماشینکاری

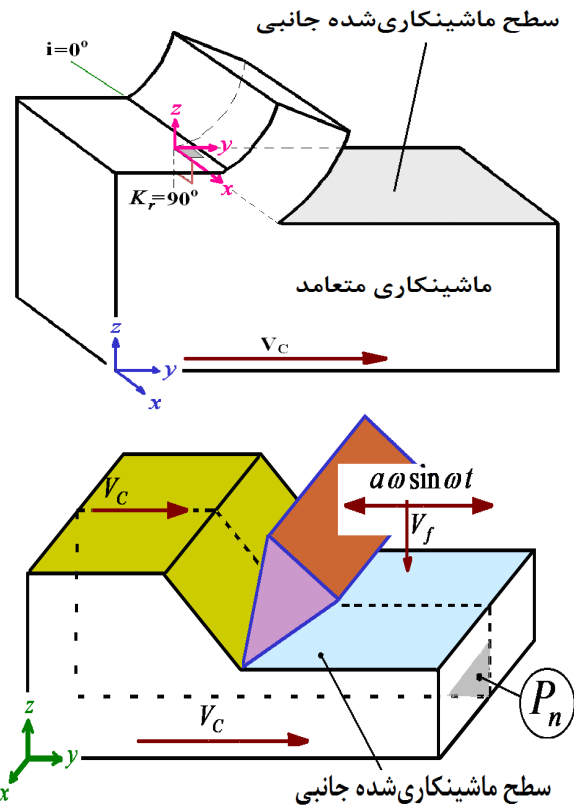
1. Intrusive
2. Chamfered

هستند؛ a دامنه ارتعاشات در جهت مماسی و ω سرعت زاویه‌ای می‌باشد. در فرآیند تراشکاری، سرعت پیشروی از رابطه $V_f (m/s) = feed (mm/rev) \cdot n (rev/min) / 60000$ بدست می‌آید که $feed$ نرخ پیشروی و n سرعت دورانی قطعه‌کار می‌باشد. به همین صورت سرعت برشی بر حسب متر بر ثانیه از رابطه $V_c = \pi d n / 60000$ 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 ($V_c = 0.36 m/s$, $feed = 0.4 mm/rev$)



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 ، به صورت زیر قابل تعریف است:

$$V_{X_{W/T}}(t) = 0 \quad (1)$$

$$V_{Y_{W/T}}(t) = -a \omega \sin \omega t + V_c \quad (2)$$

$$V_{Z_{W/T}}(t) = V_f \quad (3)$$

$$X_{W/T}(t) = 0 \quad (4)$$

$$Y_{W/T}(t) = a \cos \omega t + V_c t \quad (5)$$

$$Z_{W/T}(t) = V_f t \quad (6)$$

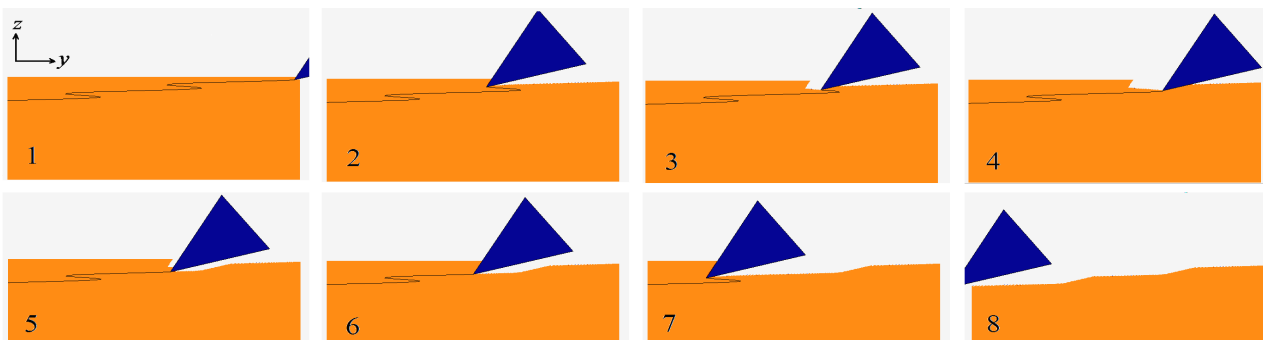
که $X_{W/T}(t)$ ، $Y_{W/T}(t)$ و $Z_{W/T}(t)$ به‌طور جداگانه مولفه‌های xyz موقعیت قطعه‌کار نسبت به ابزار برنده و $V_{X_{W/T}}(t)$ ، $V_{Y_{W/T}}(t)$ و $V_{Z_{W/T}}(t)$ مولفه‌های سرعت متناظر

قطعه کار 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.

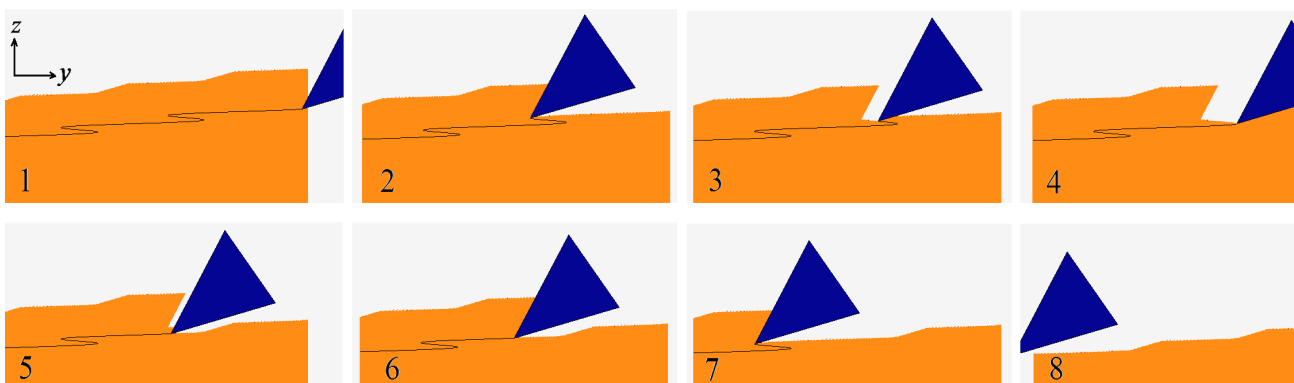
مطابق با شکل ۴ و شکل ۵، در فرآیند UAT طی مرحله ۱-۲ عملیات ماشینکاری (براده‌برداری) صورت می‌گیرد. در مرحله ۲-۴، ابزار از منطقه برش دور شده و به عقب بر می‌گردد، لذا عملیات براده‌برداری قطع می‌شود ولی بدلیل وجود سرعت پیشروی ثابت، ابزار از قطعه کار جدا نشده و به‌ناچار سطح ماشینکاری‌شده جانبی قبلی را له (فشرده)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

در شکل ۴، به کمک روابط (۱) و (۲)، سطح ماشینکاری-شده جانبی حاصل از حرکت نسبی ابزار و قطعه کار 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 قطعه کار در حرکت رفت و برگشتی، مقدار نرخ پیشروی حدوداً ۵۰ برابر بیشتر از مقدار واقعی (7.5mm/rev به جای 0.25mm/rev) در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن تاثیر سرعت پیشروی در فرآیند تراشکاری معمولی، مسیر حرکت نسبی ابزار

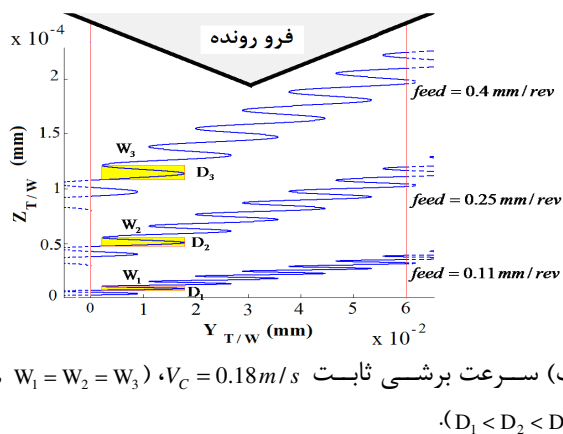
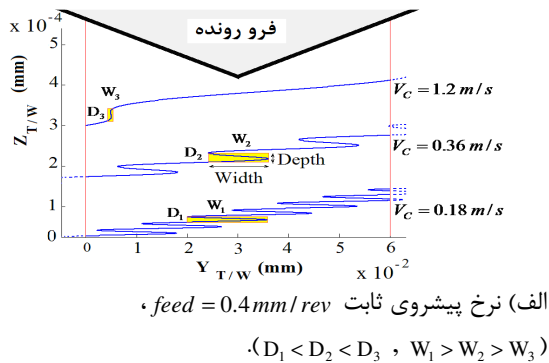


شکل ۴ شبیه‌سازی دوبعدی سطح ماشینکاری‌شده جانبی در تراشکاری UAT در پاس اول؛ $d = 68\text{mm}$ ، $feed = 7.5\text{mm/rev}$ ، $V_c = 0.36\text{m/s}$ ؛ $f = 20\text{KHz}$ ، $a = 10\mu\text{m}$



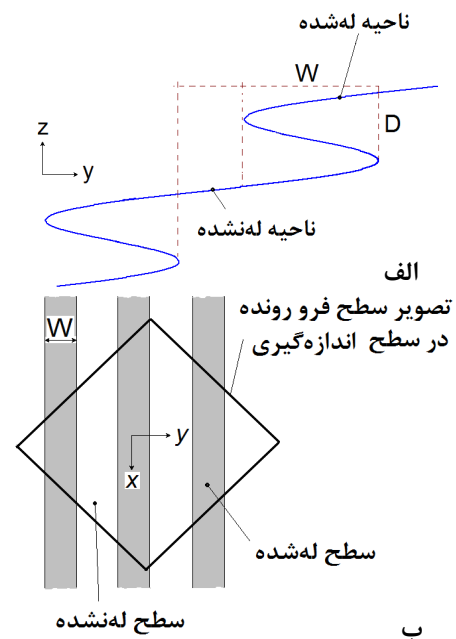
شکل ۵ شبیه‌سازی دوبعدی سطح ماشینکاری‌شده جانبی در در پاس‌های بعدی؛ $d = 68\text{mm}$ ، $feed = 7.5\text{mm/rev}$ ، $V_c = 0.36\text{m/s}$ ؛ $f = 20\text{KHz}$ ، $a = 10\mu\text{m}$

در شکل شماتیک ۶-ب، هنگامی که فرورونده^۱ دستگاه میکرو سختی سنج روی سطح ماشینکاری شده جانبی قرار می گیرد، یک سطح اثر لوزی شکل روی آن ایجاد می کند که چندین ناحیه له شده را در بر می گیرد. همانطور که در شکل دیده می شود، هنگامی که پهنای له شدگی کوچک باشد، برخی نواحی از سطح اثر فرو رونده سخت نشده باقی می ماندند، بنابراین انتظار می رود که مقدار سختی ناشی از پهنای له شدگی ها برابر با میانگین سختی نواحی له شده (سخت شده) و نواحی له نشده (سخت نشده) روی سطح ماشینکاری شده جانبی باشد. در شکل ۷، شبیه سازی عمق و پهنای نواحی له شده روی سطح ماشینکاری شده جانبی داخل محدوده ای اثر فرورونده ی دستگاه میکرو سختی سنج نشان داده شده است.



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

در مرحله ۶-۴ ابزار مجدداً به سمت ناحیه برش حرکت کرده و بدلیل وجود سرعت پیشروی، ابزار یک لایه ی خیلی نازک از سطح ماشینکاری شده جانبی را ماشینکاری می کند (البته با فرض تیز بودن لبه برنده ابزار)؛ سپس در مرحله ۸-۶ ابزار مجدداً به براده برداری از سطح ماشینکاری نشده می پردازد. در عمل انتظار می رود له شدن سطح ماشینکاری شده جانبی طی مرحله ۴-۲ توسط سطح آزاد ابزار منجر به کارسختی سطح مذکور گردد. همچنین حرکت ابزار طی مرحله ۶-۴ نیز به علت کوچکتر بودن مولفه سرعت پیشروی در راستای محور Z از شعاع لبه برنده ابزار (در اثر تیز نبودن آن)، احتمال لایه برداری نازک از سطح ماشینکاری شده جانبی ناچیز بوده و سطح مذکور مجدداً فشرده (له) می شود. انتظار می رود در نواحی له شده روی سطح ماشینکاری شده جانبی، کارسختی یا سختی سطحی افزایش یابد. له شدگی با دو مشخصه قابل بررسی است: (۱) عمق له شدگی و (۲) پهنای له شدگی. در شکل ۶-ا، عمق D و پهنای W یک ناحیه له شده در یک سیکل ارتعاش روی سطح ماشینکاری شده جانبی، نشان داده شده است.



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

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

۳- آزمون تجربی

برای اینکه از طریق تجربه پیش‌بینی‌های تحلیل سینماتیک تحقیق گردد، اثرات حرکت ابزار روی قطعه کار مطالعه می‌گردد. در تراشکاری معمولی، له‌شدگی ناشی از حرکت ارتعاشی ابزار اتفاق نمی‌افتد، به هر حال سختی سطحی قطعه کار در تراشکاری معمولی می‌تواند با تغییر شرایط ماشینکاری تغییر نماید. بنابراین در آزمونهای تجربی، سختی سطح ماشینکاری شده جانبی قطعه کار 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 به‌دست آید.

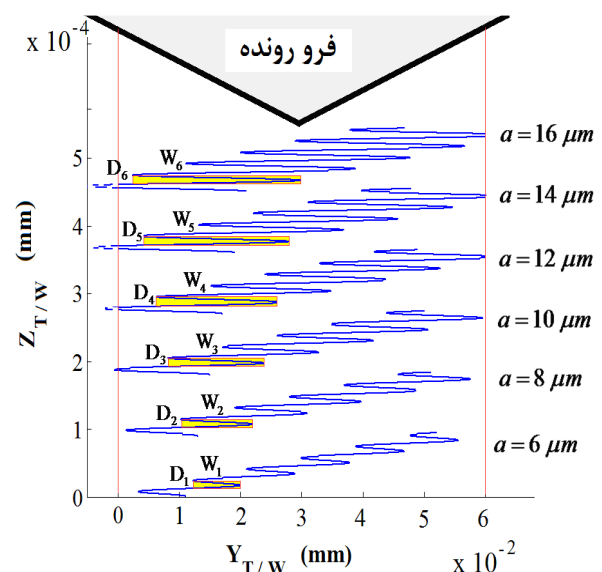
برای مقایسه سختی سطح ماشینکاری شده جانبی در فرآیند تراشکاری UAT نسبت به تراشکاری CT، تلاش برای ایجاد شرایط آزمایش یکسان صورت پذیرفت. به‌همین منظور، یک میله آلومینیوم ۶۰۶۱ به قطر ۷۰ mm با شرایط ماشینکاری $(a_p = 0.7 \text{ mm}, \text{feed} = 0.2 \text{ mm/rev}, n = 160 \text{ rev/min})$ به میله‌ای به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

از شکل ۷، نتایج زیر استخراج می‌گردد:

• هنگامی که نرخ پیشروی feed ثابت است و اثر سرعت برشی V_C جستجو می‌شود، پهنای 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).

• هنگامی که 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 ماشینکاری شده 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 آلترسونیک در تراشکاری UAT، روی عمق و پهنای نواحی له‌شده سطح ماشینکاری شده جانبی

$$(V_C = 0.18 \text{ m/s}, \text{feed} = 0.4 \text{ mm/rev}, f = 20 \text{ KHz})$$

$$W_1 < W_2 < W_3 < W_4 < W_5 < W_6$$

$$D_1 = D_2 = D_3 = D_4 = D_5 = D_6$$

برای بررسی تاثیرات همزمان سرعت برشی و نرخ پیشروی روی سختی سطح ماشینکاری شده جانبی در تراشکاری UAT، بایستی در حین انجام عملیات براده برداری، سرعت برشی و نرخ پیشروی همزمان متوقف گردد. در انجام آزمایشها از دستگاه تراش CNC TM40 استفاده گردید. برخلاف دستگاههای تراش معمولی که انجام حرکت پیشروی توسط گیربکس و مرتبط با تعداد دوران اسپیندل انجام می شود، در ماشینهای ابزار CNC، حرکت اسپیندل و پیشروی توسط سیستم محرک جداگانه کنترل می شوند، لذا پس از خاموش شدن موتور سه نظام، پیشروی به صورت لحظه ای قطع می شود اما به علت وجود اینرسی دورانی، اسپیندل به صورت لحظه ای متوقف نمی شود، بنابراین انجام حتی یک دور دوران ناخواسته (۳۶۰ درجه) پس از قطع حرکت پیشروی، منجر به حذف اثرات مورد جستجو در این تحقیق روی سطح ماشینکاری شده جانبی می گردد. آزمونهای تجربی نشان داد در آن دسته از آزمونهای تراشکاری که سرعت دورانی اسپیندل کمتر بود یا نیروهای ماشینکاری زیادتر بود، حرکت پیشروی و دوران اسپیندل (براده برداری ناخواسته) تقریباً همزمان متوقف می گردید اما در آزمونهایی که نیروهای ماشینکاری کمتر و یا سرعت دورانی اسپیندل بیشتر بود، مشاهده گردید که با توقف لحظه ای حرکت پیشروی و خاموش شدن دستگاه تراش، دوران اضافی اسپیندل در حدود $\frac{1}{4}$ تا $\frac{3}{4}$ دور ادامه می یابد که بخش مذکور روی سطح ماشینکاری شده جانبی از انجام آزمون سختی سنجی حذف شد. در شرایط یکسان آزمایشات ۳ بار تکرار گردید و سپس نمونه های ماشینکاری شده شامل سطح ماشینکاری شده جانبی جداگانه بریده شده و برای آزمون میکروسختی سنجی آماده گردیدند.

برای اندازه گیری میکروسختی سطحی، از دستگاه میکروسختی سنجی ویکرز Bohler با وزنه های 50, 100 and 200 gr و زمان اعمال بار ۱۵ ثانیه استفاده گردید. سپس فیکسچری برای بستن قطعات زیر میکروسکوپ ساخته شد و مطابق شکل ۱۰، نمونه ها به دفعات متعدد در نواحی

شد. سپس برای دو حالت تراشکاری CT و UAT شرایط ماشینکاری زیر اعمال گردید: سه سرعت دورانی ($n = 50, 100 \text{ and } 337 \text{ rev/min}$) متناظر با سه سرعت برشی ($V_C = 0.18, 0.36 \text{ and } 1.2 \text{ m/s}$) و چهار نرخ پیشروی ($feed = 0.05, 0.11, 0.25, 0.4 \text{ mm/rev}$).

در آزمون های تراشکاری CT و UAT این مقاله، میله آلومینیومی در فرآیند تراشکاری متعامد ($i = 0^\circ$ و $K_r = 90^\circ$)، از قطر ۶۸mm به قطر ۶۴mm روتراشی گردید که در شکل ۹، نشان داده شده است.

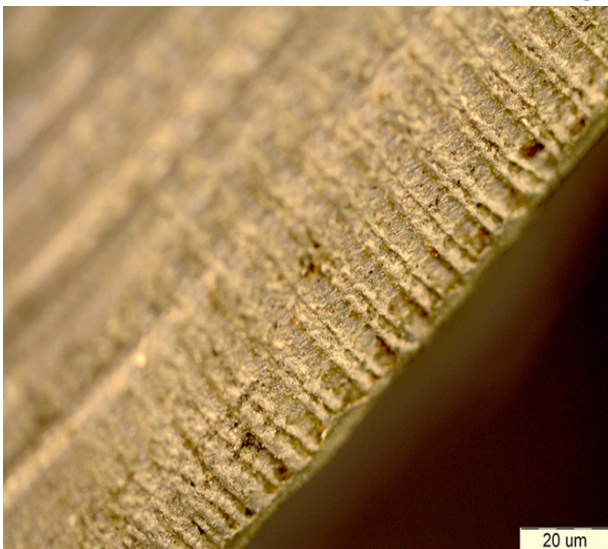
با استفاده از نتایج مطالعات قبلی در طراحی هورن و آزمایش های تجربی [۲۱، ۲۳-۲۵]، ارتعاشات آلتراسونیک در جهت سرعت برشی به اینسرت کاربیدی با پوشش نیتريد تیتانیوم (VBMT-160404) اعمال گردید.

عمق برش $a_p = 2 \text{ mm}$ انتخاب شده برای آزمونها در مقایسه با شعاع نوک ابزار $r = 0.4 \text{ mm}$ ، به اندازه کافی بزرگ بوده و اندازه گیری سختی سطحی در نواحی ماشینکاری شده توسط بخش مستقیم لبه برنده ابزار انجام گردید.



شکل ۹ عملیات براده برداری از سطح جانبی قطعه کار در فرآیند تراشکاری UAT.

می شود که با پیش بینی های تحلیل سینماتیک مطابقت دارد.



UAT

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

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

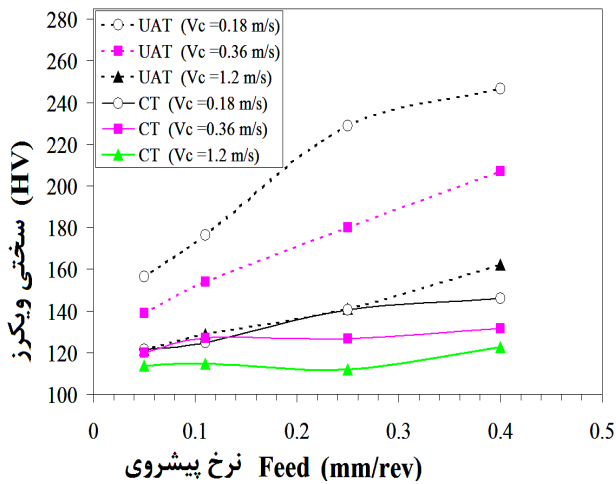


شکل ۱۰ اندازه گیری میکرو سختی روی سطح ماشینکاری شده جانبی در فرآیند تراشکاری UAT.

۴- بحث و نتیجه گیری

در شکل ۱۱، تاثیر ارتعاشات آلتراسونیک روی سطح ماشینکاری شده جانبی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود ارتعاشات آلتراسونیک، منجر به ایجاد لهدگی های متناوب در سطح ماشینکاری شده جانبی

در شکل ۱۳، منحنی تغییرات سختی سطح ماشینکاری شده جانبی به ازای نرخ پیشروی نشان داده شده است.



شکل ۱۳ منحنی سختی سطح ماشینکاری شده جانبی به ازای نرخ پیشروی $feed$ برای فرآیندهای UAT و CT در مقادیر مختلف سرعت برشی V_c .

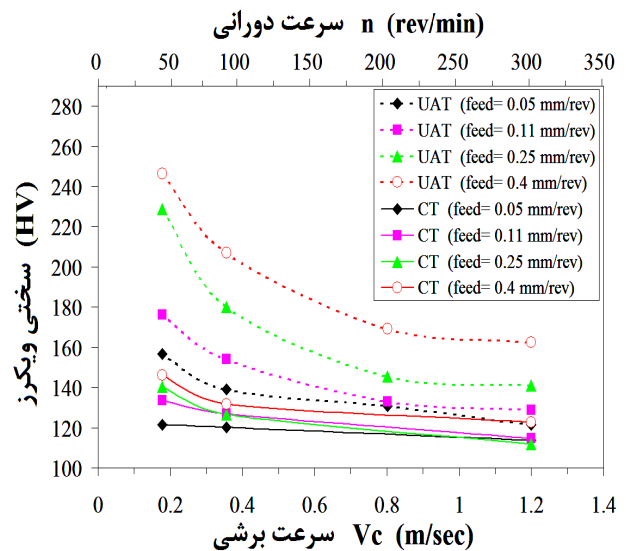
با افزایش نرخ پیشروی، سختی سطحی ماده روی سطح ماشینکاری شده جانبی افزایش می‌یابد، که این روند در تراشکاری UAT قابل ملاحظه‌تر بوده و با نتایج تحلیل سینماتیک مبنی بر افزایش عمق له‌شدگی با افزایش نرخ پیشروی در شکل ۷-b مطابقت دارد. به نظر می‌رسد تاثیر کاهش پهنای له‌شدگی روی کاهش سختی به‌طور همزمان بیشتر از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

در شکل ۱۴، منحنی سختی سطح ماشینکاری شده جانبی به ازای دامنه ارتعاشات آلتراسونیک نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه ارتعاشی، سختی سطح ماشینکاری شده 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 قاعداً باعث افزایش نیروی

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



شکل ۱۲ منحنی سختی سطح ماشینکاری شده جانبی به ازای سرعت برشی V_c (یا سرعت دورانی n) برای فرآیندهای UAT و CT در مقادیر مختلف نرخ پیشروی $feed$.

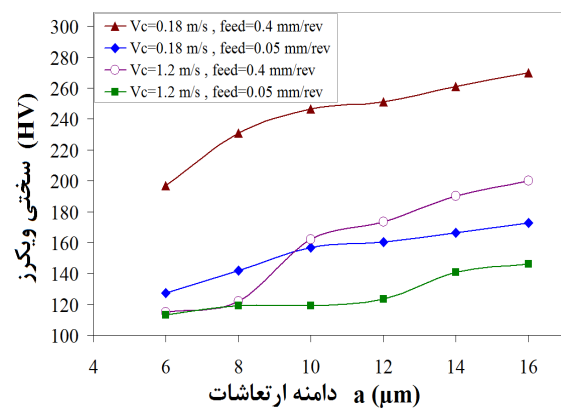
همانطور که مشاهده می‌گردد در سرعت‌های برشی پایین، اعمال ارتعاشات آلتراسونیک موجب افزایش سختی سطحی ماده روی سطح ماشینکاری شده جانبی می‌شود که با نتایج پیش‌بینی شده توسط تحلیل سینماتیک در شکل ۷-a مطابق است. در حقیقت با افزایش سرعت برشی، پهنای له‌شدگی‌ها کاهش و همچنین عمق آن افزایش یافته و سختی کاهش می‌یابد. مطابق با شکل ۷-b، 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 به ذکر است که تحلیل سینماتیک برای تراشکاری معمولی هیچگونه ایجاد له‌شدگی را در پیش‌بینی نمی‌کند.

بررسی تجربی قرار گرفت. تصاویر میکروسکوپ نوری نیز دندانه‌دار شدن و له‌شدگی ناشی از حرکت رفت و برگشتی ابزار روی سطح ماشینکاری شده جانبی را نشان داد که با پیش‌بینی شبیه‌سازی سینماتیک به‌خوبی مطابقت دارد. آزمون میکروسختی ویکرز نشان داد که سختی سطح ماشینکاری شده جانبی متأثر از حرکت نسبی ابزار و قطعه‌کار می‌باشد که تأییدی دیگر بر نتایج تحلیل سینماتیک ارائه شده 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 ماشینکاری شده جانبی افزایش می‌یابد.

۶- علائم و نشانه‌ها

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

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 اندازه‌گیری شده 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 ماشینکاری شده 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 ماشینکاری شده 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 ماشینکاری شده جانبی در فرآیند UAT می‌شود.

به‌منظور تحقیق نتایج پیش‌بینی شده از تحلیل سینماتیک برای فرآیند UAT، سختی سطح ماشینکاری شده جانبی در شرایط مختلف ماشینکاری در مقایسه با فرآیند CT مورد

- [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

- $x y z$ 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 قطعه کار در جهت عمق برش (شعاعی) (دستگاه $x y z$ ماشین) (m/sec)
- $Y_{W/T}(t)$ موقعیت نسبی ابزار و قطعه کار در جهت سرعت برشی (مماسی) (دستگاه $x y z$ ماشین) (m/sec)
- $Z_{W/T}(t)$ موقعیت نسبی ابزار و قطعه کار در جهت منفی سرعت پیشروی (محوری) (دستگاه $x y z$ 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.

- [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.
- 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.