

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

حامد رضوی<sup>۱</sup>، محمد جواد ناطق<sup>۲\*</sup>، امیر عبدالله<sup>۳</sup>، حمید سلیمانی مهر<sup>۴</sup>

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 ۱۴۱۱۵-۱۴۲

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<sup>۱</sup> را متاثر ساخته و الگوی تکرار شونده ای از نواحی لبه شده یا دندانه دار روی آن ایجاد می کند که در نتیجه کار سختی 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 تاثیرات 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. Razavi<sup>1</sup>, M. J. Nategah<sup>2\*</sup>, A. Abdullah<sup>3</sup>, H. Soleimanimehr<sup>4</sup>

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

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

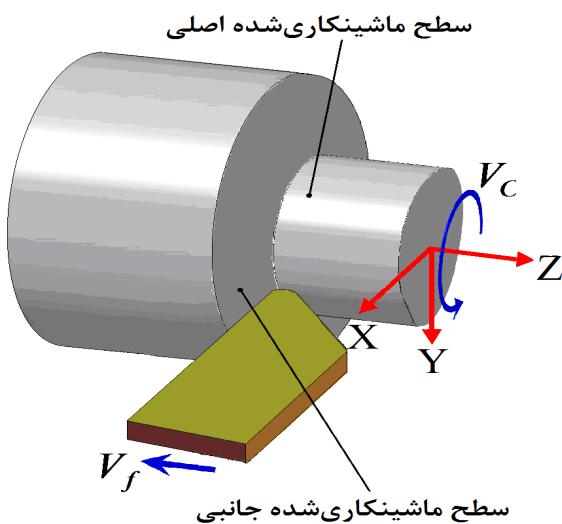
## ۱- مقدمه

به صورت ضخامت براده تغییرشکل نیافته در نظر گرفته‌اند [۱۱، ۱۳، ۲۱-۱۵] 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، به علت 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، به نظر 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 با استی ذکر نمود که در عملیات تراشکاری دو سطح ماشینکاری شده را می‌توان از هم متمایز نمود: سطح به جا 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 ماشینکاری شده جانبی). پیش‌بینی‌های حاصل از تحلیل سینماتیک فرآیند UAT با تحریک درجه 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 ماشینکاری شده جانبی مورد تحقیق و جستجو قرار می‌گیرد. بنابراین تصویر برداری با میکروسکوپ نوری و اندازه‌گیری میکرو سختی سطح ماشینکاری شده جانبی انجام گردیده است. پیش از این سختی سطح اصلی بعد انجام عملیات ماشینکاری مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱، ۱۷-۱۵]. در این مطالعات، مشاهده گردید که سختی سطح ماشینکاری شده اصلی در فرآیند UAT یک‌بعدی با ارتعاشات درجه سرعت برشی، به اندازه ۶۰ درصد کمتر از مقدار آن در CT بوده و به‌طور قابل ملاحظه‌ای نزدیک به

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<sup>۱</sup>، بدلیل موثرتر بودن ارتعاشات، از اقبال بیشتری نسبت به سایر روشها برخوردار بوده است. 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 (به عنوان 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<sup>۲</sup> از براده و جدایش سطح زیرین ابزار<sup>۳</sup> از قطعه‌کار نام برده‌اند. همچنین در سایر مقالات مربوط به تراشکاری با ارتعاشات بیضوی<sup>۴</sup> نیز جدایش ابزار از براده به‌علاوه‌ی قطعه‌کار به‌طور صحیح ذکر گردیده است [۲-۴]. 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 [۵-۹]. برخی دیگر در همین فرآیند جدایش متناوب ابزار از براده را در حین عملیات مورد توجه قرار داده‌اند [۱۰-۱۴]. 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

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

شده وجود دارد: سطح ماشینکاری شده اصلی<sup>۳</sup> 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 نمی‌ماند.



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

در تراشکاری معمولی، سرعت برآیند قطعه کار ترکیبی از سرعت برشی  $V_f$  و سرعت پیشروی  $V_C$  می‌باشد. 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 می‌گردد. در شکل ۲، نمای سه بعدی از صفحه برش و صفحه عمود بر لبه برندۀ 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  $x, y, z$  (جهت شعاعی یا عمق برش،  $y$  جهت مماسی یا سرعت برشی و  $z$  جهت محوری یا منفی جهت پیشروی)، نشان داده شده است.

3. Main Machined Surface

سختی ماده اولیه می‌باشد. این نتایج خاطر نشان می‌کند که دما و تنفس 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 روند<sup>۱</sup> باشد و منجر به لایه سخت شده کم عمق تری گردد. Sasahara [۲۲]، تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل شعاع نوک ابزار، شکل لبه برندۀ ابزار (تیز یا گرد)<sup>۲</sup> و نرخ پیشروی را روی سختی سطح ماشینکاری شده در تراشکاری معمولی مورد مطالعه قرار داده است. در تراشکاری، لایه‌های ماشینکاری شده در دوران قبلی، در مرحله حاضر به صورت برآده شکل می‌گیرد. او نشان داد نیروهای ماشینکاری، نحوه شکل‌گیری برآده 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 می‌گیرد. انتظار می‌رود حرکت ابزار منجر به دندانه‌دار شدن (له‌شده‌گی 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.

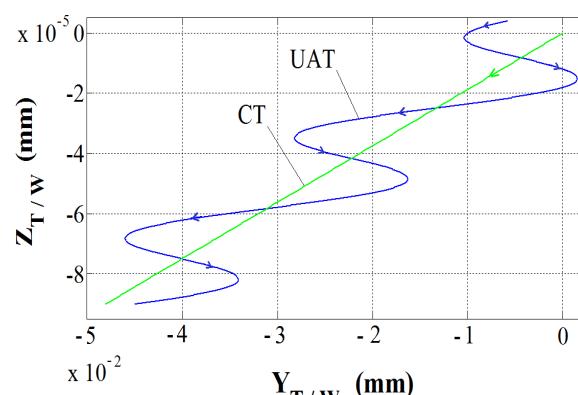
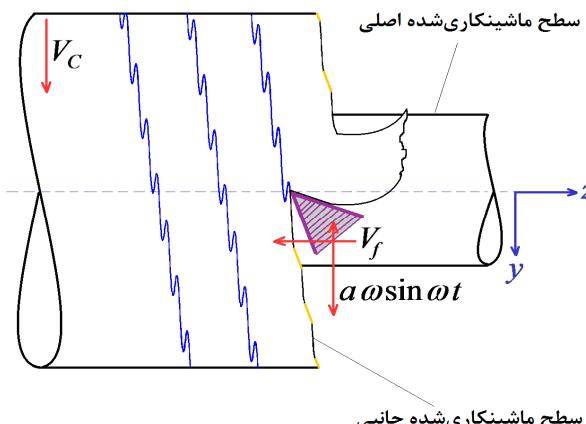
## ۲- تحلیل سینماتیک

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

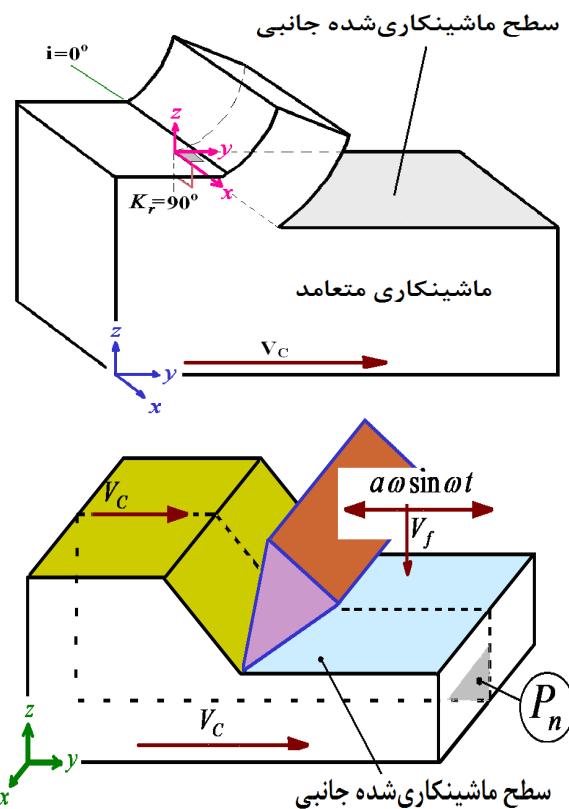
1. Intrusive  
2. Chamfered

هستند؛  $a$  دامنه ارتعاشات در جهت مماسی و  $\omega$  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 قطعه کار می‌باشد. به همین صورت سرعت برشی بر حسب متر بر ثانیه از رابطه  $V_C = \pi d n / 60000$  بدست می‌آید که  $d$  قطر قطعه کار تراشکاری بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

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



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



شکل ۲ نمای سه بعدی از نحوه شکل گیری 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 قطعه کار نسبت به ابزار در دستگاه مختصات ماشین ابزار  $xyz$ ، به صورت زیر قابل تعریف است:

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

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

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

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

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

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

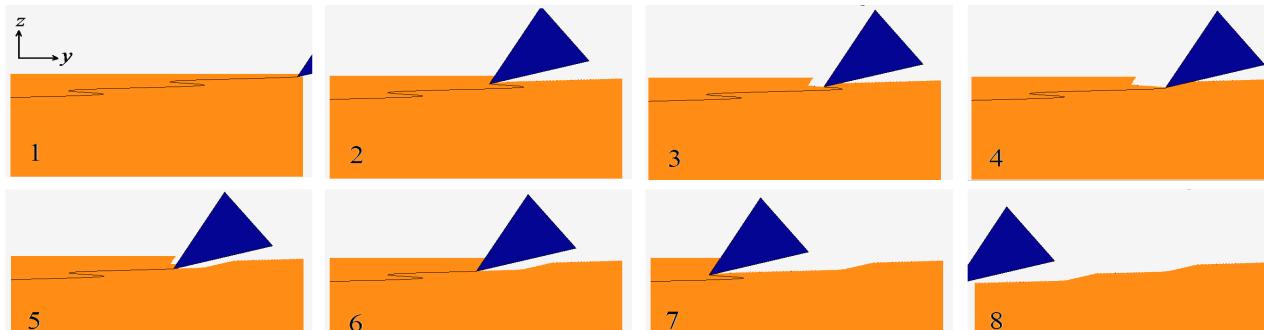
که  $Z_{W/T}(t)$  و  $Y_{W/T}(t)$ ،  $X_{W/T}(t)$ ،  $V_{Z_{W/T}}(t)$  و  $V_{Y_{W/T}}(t)$  به طور جداگانه مولفه‌های  $xyz$  موقعیت قطعه کار نسبت به ابزار برنده و  $V_{X_{W/T}}(t)$  مولفه‌های سرعت متناظر

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 ماشینکاری شده جانبی وجود دارد که روی مسیر حرکت شیبدار ابزار، قابل مشاهده می‌باشد.

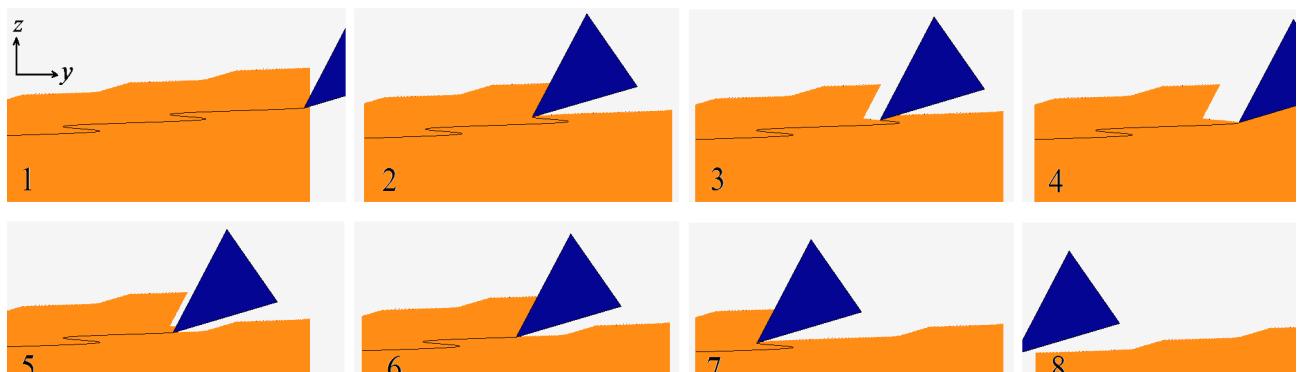
مطابق با شکل ۴ و شکل ۵، در فرآیند UAT طی مرحله ۱-۲ عملیات ماشینکاری (براده‌برداری) صورت می‌گیرد. در مرحله ۲-۴، ابزار از منطقه برش دور شده و به عقب بر می‌گردد، لذا عملیات براده‌برداری قطع می‌شود و لی بدلیل وجود سرعت پیشروی ثابت، ابزار از قطعه کار جدا نشده و بهناچار سطح ماشینکاری شده جانبی قبلی را له (فسرده)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

نکته مهم اینکه در شکل ۴ و شکل ۵، برای وضوح بیشتر نحوه حرکت نسبی ابزار و قطعه کار در حرکت رفت و برگشتی، مقدار نرخ پیشروی حدوداً ۵۰ برابر بیشتر از مقدار واقعی ( $7.5\text{mm/rev}$ ) به جای ( $0.25\text{mm/rev}$ ) در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن تاثیر سرعت پیشروی در فرآیند تراشکاری معمولی، مسیر حرکت نسبی ابزار

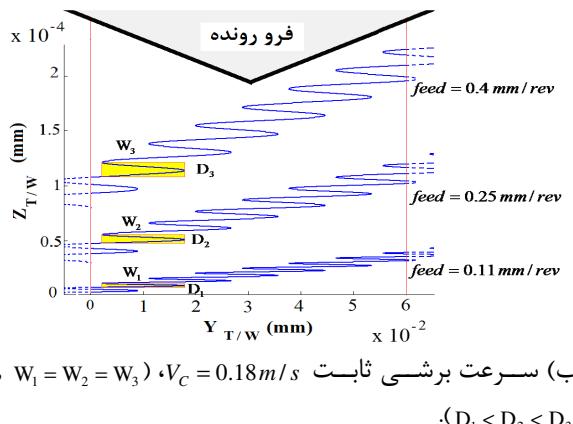
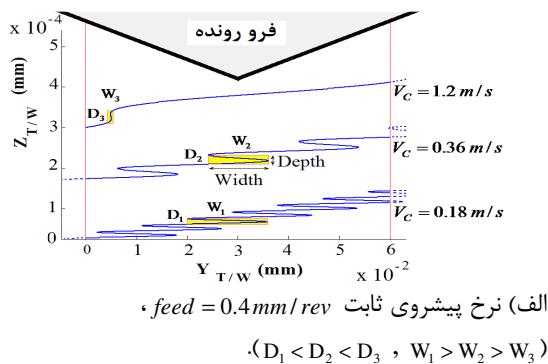


شکل ۴ شبیه‌سازی دوبعدی سطح ماشینکاری شده جانبی در تراشکاری UAT در پاس اول؛  $d = 68\text{mm}$  ،  $feed = 7.5\text{mm/rev}$  ،  $V_C = 0.36\text{m/s}$  ،  $f = 20\text{KHz}$ ،  $a = 10\mu\text{m}$



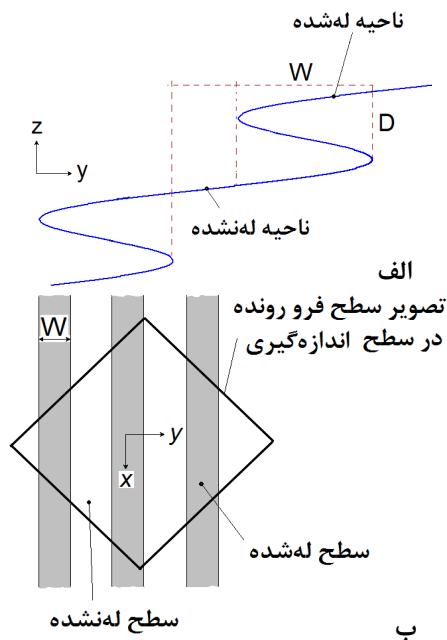
شکل ۵ شبیه‌سازی دوبعدی سطح ماشینکاری شده جانبی در پاسهای بعدی؛  $d = 68\text{mm}$  ،  $feed = 7.5\text{mm/rev}$  ،  $V_C = 0.36\text{m/s}$  ،  $f = 20\text{KHz}$ ،  $a = 10\mu\text{m}$

در شکل شماتیک ۶-۶، هنگامی که فروروندهی<sup>۱</sup> دستگاه میکرو سختی سنج روی سطح ماشینکاری شده 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، هنگامی که پهنازی لهشگی کوچک باشد، برخی نواحی از سطح اثر فرو رونده سخت نشده باقی می‌مانند، بنابراین انتظار می‌رود که مقدار سختی ناشی از پهنازی لهشگی‌ها برابر با میانگین سختی نواحی لهشده (سخت شده) و نواحی لهشده (سخت نشده) روی سطح ماشینکاری شده جانبی باشد. در شکل ۷، شبیه‌سازی عمق و پهنازی نواحی لهشده روی سطح ماشینکاری شده جانبی داخل محدوده‌ای اثر فروروندهی 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 پهنازی نواحی لهشده در سطح ماشینکاری شده جانبی.

در مرحله ۴-۶ ابزار مجدداً به سمت ناحیه برش حرکت کرده و بدلیل وجود سرعت پیشروی، ابزار یک لایه‌ی خیلی نازک از سطح ماشینکاری شده جانبی را ماشینکاری می‌کند (البته با فرض تیز بودن لبه برنده ابزار)، سپس در مرحله ۶-۸ ابزار مجدداً به براده برداری از سطح ماشینکاری شده می‌پردازد. در عمل انتظار می‌رود لهشدن سطح ماشینکاری شده جانبی طی مرحله ۲-۴ توسط سطح آزاد ابزار منجر به کارسختی سطح مذکور گردد. همچنین حرکت ابزار طی مرحله ۴-۶ نیز به علت کوچکتر بودن مولفه سرعت پیشروی در راستای محور  $Z$  از شعاع لبه برنده ابزار (در اثر تیز نبودن آن)، احتمال لایه‌برداری نازک از سطح ماشینکاری شده جانبی ناچیز بوده و سطح مذکور مجدداً فشرده (له) می‌شود. انتظار می‌رود در نواحی لهشده روی سطح ماشینکاری شده جانبی، کارسختی یا سختی سطحی افزایش یابد. لهشگی با دو مشخصه قابل بررسی است: ۱) عمق لهشگی و ۲) پهنازی لهشگی. در شکل ۶-۶، عمق  $D$  و پهنازی  $W$  ناحیه لهشده در یک سیکل ارتعاش روی سطح ماشینکاری شده جانبی، نشان داده شده است.



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

به طور طبیعی انتظار می‌رود افزایش عمق و پهنای لهشگی‌ها 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، لهشگی 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 بدينوسیله امکان بررسی اثر حرکت ارتعاشی ابزار در شرایط مختلف ماشینکاری روی سختی سطحی در مقایسه با تراشکاری معمولی به دست آید.

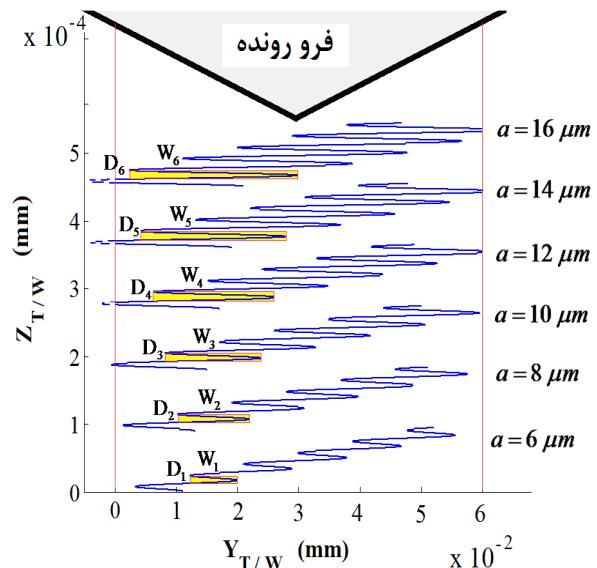
برای مقایسه سختی سطح ماشینکاری شده جانبی در فرآیند تراشکاری UAT نسبت به تراشکاری CT، تلاش برای ایجاد شرایط آزمایش یکسان صورت پذیرفت. بهمین منظور، یک میله آلومینیوم  $60 \times 61$  به قطر  $70\text{ mm}$  با شرایط ماشینکاری ( $a_p = 0.7\text{ mm}$ ,  $feed = 0.2\text{ mm/rev}$ ,  $n = 160\text{ rev/min}$ )، به میله‌ای به قطر  $68/6\text{ mm}$  خشن تراشی گردید تا به قطر مورد نظر نزدیک شده و تاثیرات احتمالی فرآیندهای شکل‌دهی قبلی حذف گردد. سپس میله آلومینیومی با شرایط ماشینکاری ( $a_p = 0.3\text{ mm}$ ,  $feed = 0.05\text{ mm/rev}$ ,  $n = 80\text{ rev/min}$ )، به میله‌ای به قطر  $68\text{ mm}$  ظرفی تراشی شد تا اثرات احتمالی نیروها، دمای بالا و تنش‌های پسماند ناشی از عملیات خشن تراشی 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  $5\text{ mm}$  و عمق  $2\text{ mm}$  (با شرایط شیارتراشی  $feed = 0.05\text{ mm/rev}$ ,  $n = 80\text{ rev/min}$ ) و با فواصل  $10\text{ mm}$  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 لهشگی عامل تغییر سختی سطحی خواهد بود؛ لذا با افزایش سرعت برشی، پهنای لهشگی‌ها کاهش یافته ( $W_1 > W_2 > W_3$ )، اما عمق لهشگی‌ها 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 لهشگی عامل تغییر سختی سطحی خواهد بود و لذا با افزایش نرخ پیشروی، پهنای لهشگی‌ها ثابت مانده ( $W_1 = W_2 = W_3$ )، اما عمق لهشگی‌ها افزایش می‌یابد ( $D_1 < D_2 < D_3$ ) (شکل ۷-b).

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



شکل ۸ تاثیر دامنه ارتعاشات آتراسونیک در تراشکاری UAT، روی عمق و پهنای نواحی لهشده سطح ماشینکاری شده جانبی

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

$$\begin{aligned} W_1 &< W_2 < W_3 < W_4 < W_5 < W_6 \\ (D_1 &= D_2 = D_3 = D_4 = D_5 = D_6) \end{aligned}$$

برای بررسی تاثیرات همزمان سرعت برشی و نرخ پیشروی روی سختی سطح ماشینکاری شده جانبی در تراشکاری UAT، باقیستی در حین انجام عملیات برادهبرداری، سرعت برشی و نرخ پیشروی همزمان متوقف گردد. در انجام آزمایشها از دستگاه تراش 40 CNC TM40 استفاده گردید. برخلاف دستگاه‌های تراش معمولی که انجام حرکت پیشروی توسط گیربکس و مرتبط با تعداد دوران اسپیندل انجام می‌شود، در ماشینهای ابزار CNC، حرکت اسپیندل و پیشروی توسط سیستم محرک جداگانه کنترل می‌شوند، لذا پس از خاموش شدن موتور سه‌نظام، پیشروی به صورت لحظه‌ای قطع می‌شود اما به علت وجود اینترسی دورانی، اسپیندل به صورت لحظه‌ای متوقف نمی‌شود، 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 می‌گردد. 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 (برادهبرداری ناخواسته) تقریباً همزمان متوقف می‌گردید اما در آزمونهایی که نیروهای ماشینکاری کمتر و با سرعت دورانی اسپیندل بیشتر بود، مشاهده گردید که با توقف لحظه‌ای حرکت پیشروی و خاموش شدن دستگاه تراش، دوران اضافی اسپیندل در حدود  $\frac{1}{3}$  تا  $\frac{1}{4}$  دور ادامه می‌یابد که بخش مذکور روی سطح ماشینکاری شده جانبی از انجام آزمون سختی‌سنگی حذف شد. در شرایط یکسان آزمایشات ۳ بار تکرار گردید و سپس نمونه‌های ماشینکاری شده شامل سطح ماشینکاری شده جانبی جداگانه بریده شده و برای آزمون میکروسختی‌سنگی آماده گردیدند.

برای اندازه‌گیری میکروسختی سطحی، از دستگاه میکروسختی‌سنگی ویکرز Bohler با وزنهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ gr اعمال بار ۱۵ ثانیه استفاده گردید. سپس فیکسچری برای بستن قطعات زیر میکروسکوپ ساخته شد و مطابق شکل ۱۰، نمونه‌ها به دفعات متعدد در نواحی

شد. سپس برای دو حالت تراشکاری CT و UAT ( $f = 20 \text{ kHz}$ ,  $a = 10 \mu\text{m}$ ) 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 آزمون‌های تراشکاری CT و UAT این مقاله، میله آلومینیومی در فرآیند تراشکاری متعامد ( $i = 0^\circ$  و  $K_r = 90^\circ$ ) از قطر ۶۴mm به قطر ۶۸mm روتراشی گردید که در شکل ۹، نشان داده شده است.

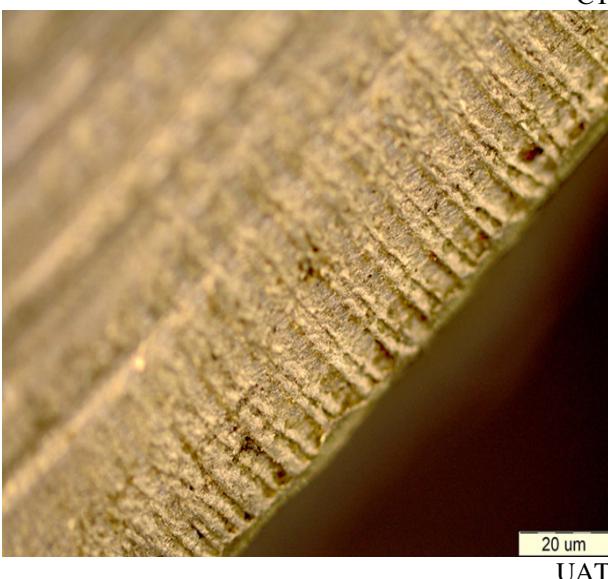
با استفاده از نتایج مطالعات قبلی در طراحی هورن و آزمایش‌های تجربی [۲۱، ۲۲-۲۳]، ارتعاشات آلتراسونیک در جهت سرعت برشی به اینسارت کاربیدی با پوشش نیترید تیتانیوم (VBMT-160404) اعمال گردید.

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 اندازه‌گیری سختی سطحی در نواحی ماشینکاری شده توسط بخش مستقیم لبه برنده ابزار انجام گردید.



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

می‌شود که با پیش‌بینی‌های تحلیل سینماتیک مطابقت دارد.



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

مختلف از سطح ماشینکاری شده جانبی مورد میکرو سختی-سنجد 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.

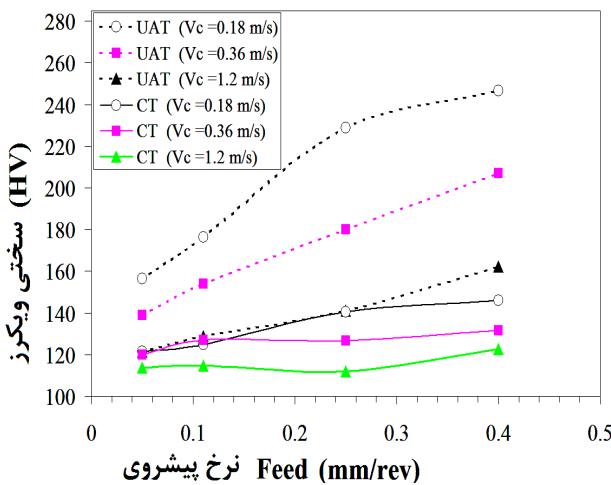


شکل ۱۰ اندازه‌گیری میکرو سختی روی سطح ماشینکاری شده جانبی در فرآیند تراشکاری UAT.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در شکل ۱۱، تاثیر ارتعاشات آلتراسونیک روی سطح ماشینکاری شده جانبی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ارتعاشات آلتراسونیک، منجر به ایجاد لهیدگی‌های متناوب در سطح ماشینکاری شده جانبی

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



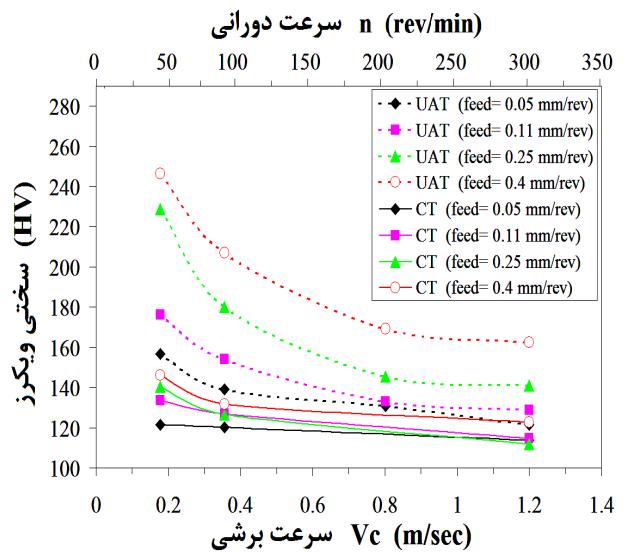
شکل ۱۳ منحنی سختی سطح ماشینکاری شده جانبی به‌ازای نرخ پیشروی  $feed$  برای فرآیندهای UAT و CT در مقادیر مختلف سرعت برشی  $V_c$ .

با افزایش نرخ پیشروی، سختی سطحی ماده روی سطح ماشینکاری شده جانبی افزایش می‌یابد، که این روند در تراشکاری UAT قابل ملاحظه‌تر بوده و با نتایج تحلیل سینماتیک مبنی بر افزایش عمق لهش‌گی با افزایش نرخ پیشروی در شکل ۷-۶ مطابقت دارد. به‌نظر می‌رسد تاثیر کاهش پهنه‌ای لهش‌گی روی کاهش سختی به‌طور همزمان بیشتر از تاثیرات افزایش عمق لهش‌گی روی افزایش سختی نشان داده شده در شکل ۱۲ می‌باشد.

در شکل ۱۴، منحنی سختی سطح ماشینکاری شده جانبی به‌ازای دامنه ارتعاشات آلتراسونیک نشان داده 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 لهش‌گی با پهنه‌ای بیشتر معرفی نمود (شکل ۸).

نتیجه دیگری که از سخت شدن سطح جانبی می‌توان گرفت این است که سختی سطحی قاعده‌تاً 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 به‌ازای سرعت برشی  $V_c$  (یا سرعت دورانی  $n$ ) برای فرآیندهای UAT و CT در مقادیر مختلف نرخ پیشروی  $feed$ .

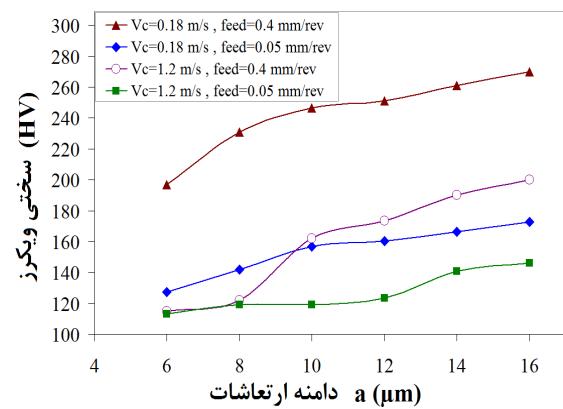
همانطور که مشاهده می‌گردد در سرعت‌های برشی پایین، اعمال ارتعاشات آلتراسونیک موجب افزایش سختی سطحی ماده روی سطح ماشینکاری شده جانبی می‌شود که با نتایج پیش‌بینی شده توسط تحلیل سینماتیک در شکل ۷-۷ مطابق است. در حقیقت با افزایش سرعت برشی، پهنه‌ای لهش‌گی‌ها کاهش و همچنین عمق آن افزایش یافته و سختی کاهش می‌یابد. مطابق با شکل ۷-۶، با کاهش پهنه‌ای لهش‌گی، 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 می‌کند که نشان‌دهنده کاهش سریع اثرات آلتراسونیک می‌باشد. لازم بهذکر است که تحلیل سینماتیک برای تراشکاری معمولی هیچگونه ایجاد لهش‌گی را در پیش‌بینی نمی‌کند.

بررسی تجربی قرار گرفت. تصاویر میکروسکوپ نوری نیز دندانه‌دار شدن و لهشگی ناشی از حرکت رفت و برگشتی ابزار روی سطح ماشینکاری شده جانبی را نشان داد که با پیش‌بینی شبیه‌سازی سینماتیک به خوبی مطابقت دارد. آزمون میکروسکوپی ویکرز نشان داد که سختی سطح ماشینکاری شده جانبی متاثر از حرکت نسبی ابزار و قطعه‌کار می‌باشد که تأثیری 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 ( $\mu m$ )	$a$
عمق برش (mm)	$a_p$
قطر قطعه‌کار (mm)	$d$
عمق ناحیه لهشده در یک سیکل ارتعاشی	$D_i$
فرکанс 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 (ماکریم) 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)	$V_{Z_{W/T}}(t)$
پهنهای 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 به همراه ارتعاشات آلتراسونیک کمتر از ماشینکاری عادی است [۲۱، ۲۲، ۲۳] 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

دستگاه مختصات ماشین ابزار:  $x$  جهت شعاعی یا عمق برش،  $y$  جهت مماسی یا سرعت برشی و  $z$  جهت محوری یا منفی جهت پیشروی موقعیت نسبی ابزار و قطعه کار در جهت عمق برش (شعاعی) (دستگاه  $xyz$  ماشین) ( $m/sec$ ) موقعیت نسبی ابزار و قطعه کار در جهت سرعت برشی (مماسی) (دستگاه  $xyz$  ماشین) ( $m/sec$ ) موقعیت نسبی ابزار و قطعه کار در جهت منفی سرعت پیشروی (محوری) (دستگاه  $xyz$  ماشین) ( $m/sec$ )

## - 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.