

مدل دو بعدی زبری سطح کف در عملیات میکرو فرزکاری

شهریار کوراوند^۱، بهنام معتکف ایمانی^۲
Imani@um.ac.ir

پذیرش مقاله: ۸۹/۰۳/۲۵

دریافت مقاله: ۸۹/۰۲/۱۵

چکیده

فرآیند میکرو فرزکاری یکی از روشهایی است که قادر به تولید قطعات سه بعدی در مقیاس کمتر از یک میلیمتر می باشد. با کوچکتر شدن قطعات، نسبت مساحت سطح به حجم قطعه افزایش می یابد که باعث می شود سطح قطعه نقش مهمی را در کارکرد آن ایفا کند. بنابراین یافتن ارتباط پارامترهای میکرو فرزکاری با زبری و پروفیل سطح در عملیات میکرو فرزکاری اهمیت زیادی دارد. در این مقاله، با استفاده از ترکیب هندسه پروفیل انتهای ابزار و مختصات لبه اصلی برش مدلی ارائه شده است که قادر به پیش بینی پروفیل و زبری سطح کف شیار میکرو فرزکاری می باشد. هندسه ابزار در دو بخش ماکرو و میکرو مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات مربوط به مختصات لبه اصلی برش و پروفیل ابزار استخراج شده و با معرفی انواع مکانیزمهای برشی در عملیات میکروفرزکاری، تاثیر عواملی همچون برگشت الاستیک و اثر حداقل ضخامت براده برای محاسبه زبری سطح در نظر گرفته شده اند. شبیه سازی انجام شده توسط نرم افزار MATLAB اثر پیشروی، شعاع لبه انتهایی و اثر حداقل ضخامت براده را برای میکرو فرزکاری ماده ای از جنس فولاد ضد زنگ ۳۱۶ مورد مطالعه قرار می دهد. همچنین با انجام عملیات میکروفرزکاری مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشات مقایسه شده و صحت شبیه سازی تایید شده است. در ادامه آزمایشات اثر پیشروی بر روی زبری سطح و ایجاد پلیسه نیز مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

کلیدواژه:

میکرو فرزکاری - شعاع لبه - زبری - حداقل ضخامت براده - برگشت الاستیک

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، imani@um.ac.ir

۱- مقدمه

فرآیند میکرو فرزکاری یکی از روشهایی است که قادر به تولید قطعات بسیار کوچک در مقیاس کمتر از یک میلیمتر می باشد که در پزشکی، هوافضا، الکترونیک و قالب سازی کار برد دارند. مهمترین مزیت این روش نسبت به دیگر روشهای تولید میکرونی توان ساخت ۳ بعدی است. با کوچکتر شدن قطعات، نسبت مساحت سطح به حجم قطعه افزایش می یابد که باعث می شود اثر سطح قطعه کار بر کار کرد آن اهمیت زیادی داشته باشد [۱]. بنابراین یافتن روابط بین پارامترهای فرزکاری با زبری و پروفیل سطح در عملیات میکرو فرزکاری از درجه اهمیت زیادی برخوردار است. در میکرو فرزکاری پدیدههایی وجود دارند که آن را با فرزکاری سنتی متمایز می کند و بر روی مکانیزم ایجاد سطح مؤثرند. این پدیدهها از این واقعیت مهم نشأت می گیرند که وقتی اندازه ابزار به سمت ابعاد کوچک می رود تیزی لبه برنده را نمی توان به خوبی کنترل کرد. بدلیل اینکه در عملیات میکرو فرزکاری اندازه شعاع لبه برنده ابزار با ضخامت براده تولیدی قابل مقایسه است هنگامی که ضخامت براده کمتر از حد معینی است براده تشکیل نمی شود [۱] و [۳]. این تغییر در فرآیند تشکیل براده که بنام اثر حداقل ضخامت براده شناخته می شود، باعث افزایش نیروهای برشی و زبری سطح در پیشروی کم می شود. بخاطر اثر حداقل ضخامت براده، میکروماشین کاری تحت تأثیر دو مکانیزم قرار دارد: برداشت براده و شخم زنی و مالش. شخم زنی و مالش سهم مهمی در افزایش نیروهای ماشین کاری [۴] و ارتعاشات [۵] دارد که باعث بدتر شدن زبری سطح می شود [۱] و [۲]. همچنین شخم زنی به طور مستقیم باعث جریان پلاستیک از دیوارهها و تشکیل پلیسه بر روی سطح ایجاد شده جدید می شود. در مرجع [۱] با استفاده از مفهوم حداقل ضخامت براده مطالعه ای بر روی سطح ایجاد شده در میکرو فرزکاری انجام شده است. این مدل اثر پیشروی را بر زبری سطح برای مواد تک فاز (پرلیت و فریت) بررسی می کند و پیشروی بهینه را برحسب زبری سطح ناشی از اثر متقابل پیشروی سنتی و حداقل ضخامت براده مشخص می کند. در تحقیقی مشابه که بر روی زبری سطح در عملیات میکرو فرزکاری انجام شده است اثر حداقل ضخامت براده مهمترین نقش را ایفا می کند [۶]. در این مدلها هنگامی که ضخامت براده برداشته نشده از حداقل ضخامت براده کمتر باشد براده برداری انجام نمی شود. هنگامیکه ضخامت به حداقل ضخامت براده رسید از آن به بعد براده برداری به طور کامل انجام می شود.

عوامل اصلی که بر زبری سطح ماشین کاری شده در فرآیند میکرو فرزکاری مؤثرند عبارتند از: ۱- سینماتیک پروسه ۲- دینامیک پروسه ۳- هندسه لبه برش ۴- برگشت الاستیک مواد قطعه کار ۵- اثر حداقل ضخامت براده و شخم زنی/ مالش ۶- ایجاد میکروپلیسه ۷- دانه بندی. موارد ۱ الی ۳ عوامل هندسه پروسه می باشد برای

مثال حرکت مرتبط بین لبه برش و قطعه کار و عوامل ۴ الی ۷ ناشی از تغییر شکل الاستیک- پلاستیک در حد فاصل ابزار و قطعه کار و غیرهمگن بودن پروسه در اثر ریز ساختار قطعه می باشند. در این مقاله از ترکیب موقعیت لبه ابزار در حرکت Trochoidal و پروفیل لبه انتهایی ابزار مدلی برای زبری سطح دو بعدی بیان می شود. در این مدل اثر حداقل ضخامت براده و برگشت الاستیک در نظر گرفته شده اند. در ابتدا به معرفی مدل واستخراج روابط بین حرکت ابزار و موقعیت لبه برنده پرداخته می شود. سپس اثر حداقل ضخامت براده و برگشت الاستیک در نظر گرفته می شود. در مرحله بعد با نرم افزار MATLAB مدل پیشنهادی شبیه سازی می شود. در پایان عملیات میکرو فرزکاری بر روی فولاد ضد زنگ ۳۱۶ انجام شده است که در آن اثر پیشروی بر زبری و پلیسه بررسی شده است. در نهایت آزمایشهای انجام شده صحت مدل ارائه شده را تایید می نماید.

۲- مدل دو بعدی زبری سطح کف

روش پیشنهادی با استفاده از ترکیب هندسه پروفیل انتهای ابزار و مختصات لبه اصلی برش قادر به پیش بینی پروفیل سطح کف شیار می باشد. هندسه Micro-end-mill می تواند از دو منظر ماکرو و میکرو مورد توجه قرار گیرد. خصوصیتی از قبیل شعاع ابزار (R)، تعداد لبه ها (N) و زاویه آزاد α_0 در زمره پارامترهای ماکرو قرار دارند. از طرفی لبه برشی ابزار در طول لبه و در گوشه انتهایی ابزار کاملاً تیز نیست و هندسه آن نسبت به ابزار تیز ایده آل انحراف دارد. شعاع لبه ابزار که مشخصه ابزار میکرو است، در طول لبه برشی تغییر خیلی زیادی نمی کند (۲۰-۱۵٪)، فرض می شود که ثابت است و معمولاً در محدوده ۱ تا ۵ میکرومتر قرار می گیرد. در این مقاله هر دو شعاع در طول و گوشه انتهایی یکسان و برابر r_0 فرض می شود. یک ابزار Micro end mill با شعاع اسمی R و تعداد N لبه برشی در نظر بگیرد مختصات یک نقطه بر روی لبه اصلی برش در حرکت Trochoidal (شکل ۱) به این صورت بیان می شود.

$$x_f = Nf_z \frac{(\phi + t \frac{2\pi}{N})}{2\pi} + R \sin(\phi) \quad (1)$$

$$y_f = R \cos(\phi) \quad (2)$$

$$z_f = 0 \quad (3)$$

در اینجا f_z ، پیشروی ابزار به ازای هر دندان است، ϕ زاویه چرخشی ابزار و t شماره لبه برشی است. این روابط برای محاسبه ضخامت براده آنی و نقاط سطح ایجاد شده مورد استفاده قرار می گیرد.

می توان مختصات نقاط روی پروفیل انتهای ابزار را به صورت زیر بیان کرد

$$x_p = \begin{cases} r_e \sin(\varphi)(\cos(\alpha) - 1), & \frac{3\pi}{2} - \alpha_e \leq \alpha < 2\pi \\ \sin(\varphi)(-r_e + s_e \cos(\alpha)), & \pi \leq \alpha < \frac{3\pi}{2} - \alpha_e \end{cases} \quad (۴)$$

$$y_p = \begin{cases} r_e \cos(\varphi)(\cos(\alpha) - 1), & \frac{3\pi}{2} - \alpha_e \leq \alpha < 2\pi \\ \cos(\varphi)(-r_e + s_e \cos(\alpha)), & \pi \leq \alpha < \frac{3\pi}{2} - \alpha_e \end{cases} \quad (۵)$$

$$z_p = \begin{cases} r_e \sin(\alpha), & \frac{3\pi}{2} - \alpha_e \leq \alpha < 2\pi \\ s_e \sin(\alpha), & \pi \leq \alpha < \frac{3\pi}{2} - \alpha_e \end{cases} \quad (۶)$$

که s_e در اینجا برابر است با

$$s_e = \left| \frac{r_e}{\cos(\frac{3\pi}{2} - \alpha_e - \alpha)} \right| \quad (۷)$$

با استفاده از ترکیب هندسه پروفیل انتهای ابزار و مختصات لبه اصلی برش، قادر به پیش بینی زبری دو بعدی سطح کف می باشیم. بنابراین مختصات هر نقطه از پروفیل انتهای ابزار در محل برش با زاویه φ به شرح زیر است

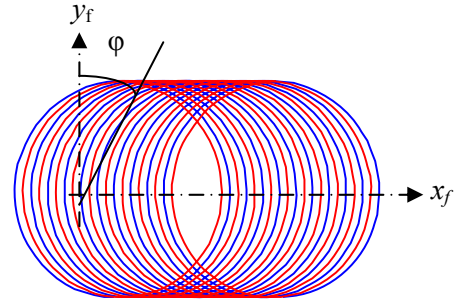
$$\begin{aligned} x &= x_f + x_p \\ y &= y_f + y_p \\ z &= z_f + z_p \end{aligned} \quad (۸)$$

۳ - الگوریتم مدل دو بعدی ایجاد سطح با در نظر گرفتن

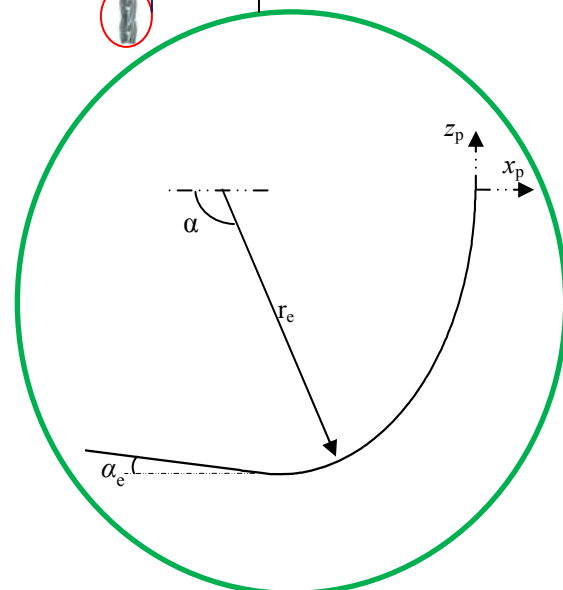
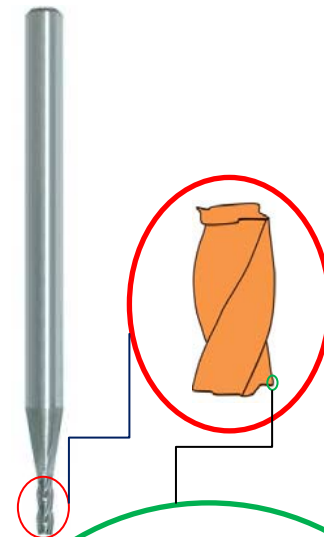
اثرات حداقل ضخامت براده و برگشت الاستیک

در اندازه گیری زبری سطح دو بعدی باید زبری سطح را روی خط مرکزی عبور ابزار اندازه گرفت که در آنجا زاویه چرخش ابزار مضرری از ۹۰ درجه می باشد. مدل در یک مجموعه‌ای از پاسهای متوالی تکمیل می‌شود. در هر گام زمانی موقعیت لبه برنده نسبت به قطعه از مسیر حرکت ابزار تعیین می‌شود. در شکل (۳) موقعیت لبه های برشی متوالی بر روی خط مرکزی عبور ابزار نشان داده شده است. برای هر پاس دندان، پروفیل ابزار به فاصله معادل f_z جابجا می شود. ضخامت براده، t_c ، به صورت کمترین فاصله تا پروفیل سطح ایجاد شده از پاس دندان قبلی تعریف می شود.

پروفیل ابزار در محل انتهای لبه برش شامل یک شعاع گوشه r_e و همراه با زاویه آزاد α_e می باشد (شکل ۲).



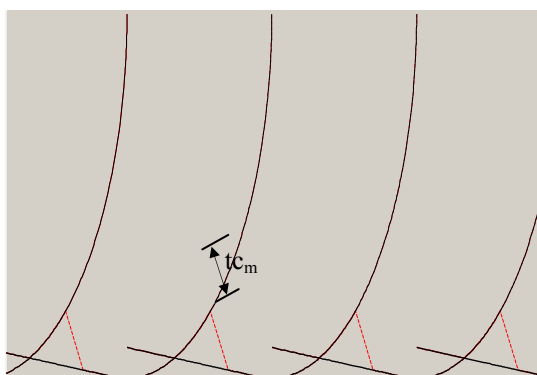
شکل (۱): حرکت Trochoidal در عملیات میکرو فرزکاری



شکل (۲): پروفیل انتهای ابزار میکرو فرزکاری

• حالت دوم : $tc_m \leq tc$

هنگامی که ضخامت براده بریده نشده از حداقل ضخامت براده بیشتر شود ماده تغییر شکل یافته تماما به عنوان براده برداشته می‌شود. پروفیل سطح جدید ترکیبی از خط برگشت الاستیک در منطقه شخم‌زنی و بخشی از پروفیل ابزار که منطقه برشی را احاطه کرده است می‌باشد. شکل (۴) پروسه تولید سطح جدید با لحاظ برگشت الاستیک (خط چین در شکل ۴) نشان می‌دهد. زبری سطح مدل برای تولید پروفیل سطح کف، در روی هر نقطه با $z(x,y)$ مشخص می‌شود. زبری سطح در جهت پیشروی می‌تواند با گسترش پروفیل سطح در جهت پیشروی در هر موقعیتی محاسبه شود. در اندازه گیری زبری سطح دو بعدی باید

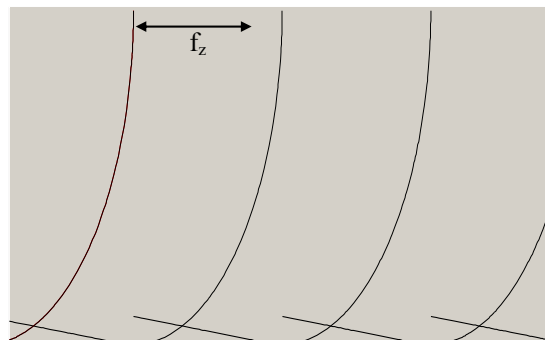


شکل (۴): پروسه تولید سطح جدید با لحاظ برگشت الاستیک

زبری سطح را روی خط مرکزی عبور ابزار اندازه گرفت که در آنجا زاویه چرخش ابزار مضرری از ۹۰ درجه می‌باشد. با حذف نواحی لبه برنده غیر درگیر با کف و با لحاظ اثر برگشت الاستیک، پروفیل سطح کف شیار باقی مانده ایجاد می‌شود (شکل ۵). با داشتن نقاط پروفیل سطح میانگین زبری سطح R_a براحتی قابل محاسبه می‌باشد.



شکل (۵): زبری سطح ایجاد شده



شکل (۳): عبور ابزار در در یک مجموعه‌ای از پاسهای متوالی

ضخامت براده در زاویه ϕ و پاس دندان i از رابطه زیر بدست می‌آید

$$tc = \max \left(0, \sqrt{(x^i - x_c^{i-1})^2 + (z^i - z_c^{i-1})^2} - r_e \right) \quad (9)$$

که در اینجا x_c^{i-1} , z_c^{i-1} و (x^i, z^i) به ترتیب مختصات مرکز انحنای لبه انتهایی ابزار در پاس دندان $i-1$ ام و موقعیت لبه انتهایی برش ابزار در پاس دندان i ام بر روی خط مرکزی عبور ابزار می‌باشد. در هنگام میکرو فرزکاری هنگامی که ضخامت براده به حداقل ضخامت براده نزدیک باشد تغییر شکل ماده تماما به صورت تغییر شکل ماندگار (plastic) نیست و بخشی از ماده تغییر شکل یافته به حالت اولیه برگردد که این پدیده برگشت الاستیک نام دارد. حداقل ضخامت براده ضریبی از شعاع لبه ابزار می‌باشد که این ضریب برحسب جنس قطعه کار متفاوت می‌باشد [۷]

$$tc_m = \lambda_e r_e \quad (10)$$

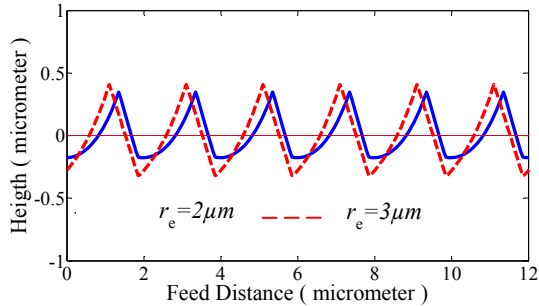
در مرجع برای تشریح چگونگی برداشت ماده باید دو حالت متفاوت در نظر گرفته شود :

• حالت اول : $tc < tc_m$

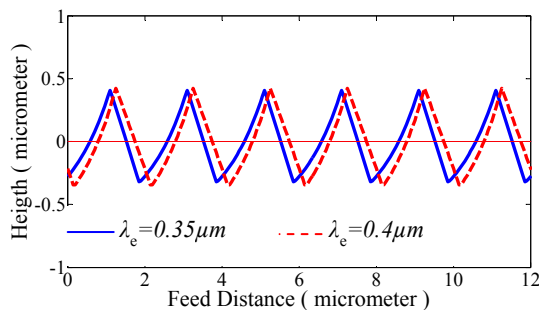
هنگامی که ضخامت براده بریده نشده ، tc ، از حداقل ضخامت براده کمتر است تغییر شکل ماده به صورت شخم‌زنی است و فقط تغییر شکل الاستیک در ماده قطعه کار رخ می‌دهد. به این صورت که ماده تغییر شکل داده شده به طور کامل به محل ابتدائی خود بر می‌گردد. بنابراین به اندازه ضخامت براده برگشت الاستیک خواهد داشت و هیچ براده ای ایجاد نمی‌شود.

۴- شبیه سازی

برای شبیه سازی مدل با نرم افزار MATLAB، ابزاری با شعاع اسمی ۰/۵ میلیمتر و با زاویه آزاد انتهایی ۵ درجه و ۴ لبه که شعاع لبه آن ۳ میکرومتر می باشد برای ایجاد شباری بر روی فولاد ضد زنگ ۳۱۶ در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه خواص مکانیکی این فولاد از قبیل مدول الاستیسیته و تنش تسلیم مشابه فریت می باشد ضریب λ_e برای این ماده همانند فریت برابر ۰/۳۵ در نظر گرفته می شود [۷]، [۸]. برای پیشروی ۲ میکرومتر برای هر دندانانه زبری محاسبه شده در مقیاس R_a برابر ۰/۱۸۶۸ میکرومتر شده است (شکل ۶). در شکل (۷) زبری سطح برای پیشروی به ازای هر دندانانه از ۲ الی ۴ میکرومتر نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش پیشروی به ازای هر دندانانه زبری سطح افزایش می یابد. همچنین در شکل (۸) زبری سطح به ازای شعاعهای لبه مختلف ابزار در پیشروی ۲ میکرومتر به ازای هر دندانانه نشان داده شده است. در شکل (۹) زبری سطح حاصل از عملیات میکرو فرزکاری روی فولاد ضد زنگ ۳۱۶ و آلیاژ آلومینیوم Al6061 با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که قبلا نیز گفته شد حداقل ضخامت براده ضریبی از شعاع لبه ابزار می باشد که این ضریب به جنس ماده قطعه کار بستگی دارد. این ضریب برای فولاد ضد زنگ ۳۱۶ برابر ۰/۳۵ و برای Al6061 برابر ۰/۴ می باشد [۷]، [۸].



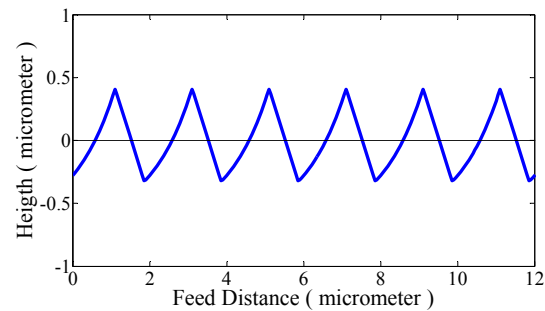
شکل (۸): زبری سطح به ازای شعاع های متفاوت لبه ابزار

شکل (۹): اثر حداقل ضخامت براده و جنس قطعه کار بر زبری سطح ایجاد شده ($r_e = 3 \mu\text{m}$)

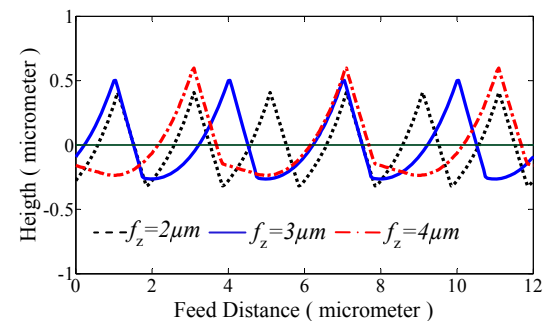
زبری محاسبه شده در میکرو فرزکاری با ابزاری به شعاع لبه ۳ میکرومتر برای فولاد ضد زنگ ۳۱۶ برابر ۰/۱۸۶۹ و برای آلیاژ آلومینیوم Al6061 برابر ۰/۱۹۶۸ شده است.

۵- تجهیزات و مواد آزمایش

دستگاه مورد استفاده در آزمایشات CNC مدل VMC850 با کنترل Siemens SMTCL و حداکثر دور اسپیندل ۸۰۰۰ rpm که با بهره گیری از یک دستگاه Spindle Speeder مدل MO10 - DMG دوران اسپیندل تا حداکثر ۲۴۰۰۰ rpm افزایش می یابد (شکل ۱۰). ابزار مورد استفاده در آزمایشات، یک ابزار فرز انگشتی از شرکت HET، با جنس TiAlN، ۴ لبه، با شعاع ۰/۵ میلیمتر، سختی RC ۵۵ و با زاویه ماریچ ۳۵ درجه می باشد. عملیات میکرو فرزکاری برای ایجاد شبیه‌هایی با عمق برش ۲۰۰ میکرومتر بر روی فولاد ضد زنگ ۳۱۶ انجام گردیده است. برای ارزیابی مدل پیشنهادی آزمایشاتی را با ۶ پیشروی متفاوت انجام داده که پیشروی از ۱/۵ الی ۲/۷۵ میکرومتر به ازای هر دندانانه تنظیم شده است. برای دقت بیشتر هر آزمایش ۲ بار تکرار می شود. جدول (۱) شرایط آزمایش را نشان می دهد. همچنین در تمام آزمایشات از سیال برای خنک کاری استفاده شده است.



شکل (۶): زبری سطح ایجاد شده با پیشروی ۲ میکرومتر

شکل (۷): زبری سطح ایجاد شده با پیشروی های متفاوت ($r_e = 3 \mu\text{m}$)



شکل (۱۱): تجهیزات و قید و بند مورد استفاده برای اندازه گیری زبری

در جدول (۲) زبری اندازه گیری شده R_a و زبری محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی گزارش شده است. در محاسبه زبری مدل، شعاع لبه ابزار ۳ میکرومتر می باشد. نتایج نشان می دهند که زبری به دست آمده از آزمایشات با زبری پیش بینی شده توسط مدل مطابقت دارد و این مطلب صحت مدل پیشنهادی را تایید می کند. شکل (۱۲) تصاویر مربوط به آثار پیشروی ابزار بر کف شیارهای میکروفرزکاری شده را زیر میکروسکوپ OLYMPUS BX60M و با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود مسیر حرکت ابزار بر کف شیار بصورت حرکت Trochoidal می باشد.

جدول (۲): آزمایشات زبری سطح میکرو فرزکاری

f_z ($\mu\text{m}/\text{flute}$)	R_a آزمایش (μm)	R_a مدل (μm)
۱/۵	۰/۲۴	۰/۱۵۷
۱/۷۵	۰/۲۲	۰/۱۷۶
۲	۰/۱۹	۰/۱۸۷
۲/۲۵	۰/۲۶	۰/۱۹۵
۲/۵	۰/۳۰	۰/۱۹۹
۲/۷۵	۰/۲۲	۰/۲۰۵

برای مطالعه پلیسه ایجاد شده باید از یک ابزار نو استفاده شود. برای این منظور، عملیات میکرو فرزکاری برای ایجاد شیارهایی بر روی فولاد ضد زنگ ۳۱۶ و با ابزار تیزی به شعاع ۰/۵ میلیمتر انجام شده است. با عکسبرداری از نمونه های میکروفرزکاری شده توسط دوربین Point Grey مدل - 14S3M FI2، پلیسه ایجاد شده بر روی نمونه ها با پیشروی های متفاوت مشاهده می شوند. شکل های (۱۳) الی (۱۵) تصاویر این شیارها را نشان می دهد. در آزمایش اول شیارهایی به عمق ۵۰۰ میکرومتر در پیشروی های کمتر از حداقل براده (۰/۵ الی ۱/۵ میکرومتر) ایجاد شد. شکلهای (۱۳) و (۱۴) نشان می دهد که در پیشروی های کمتر از مقدار حداقل براده، با افزایش پیشروی، پلیسه کمتری ایجاد می شود.



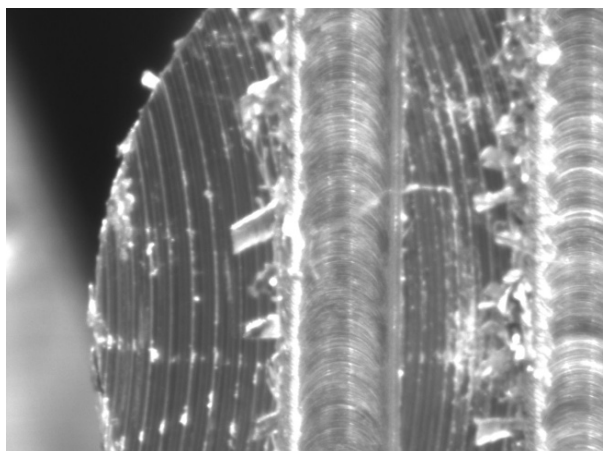
شکل (۱۰): تجهیزات آزمایشات میکرو فرزکاری

زبری سطح شیارها در طول خط مرکزی عبور ابزار توسط دستگاه زبری سنج Taylor Hobson مدل Surtronic - 25 و با دقت ۰/۰۲ میکرو متر اندازه گیری شده اند. طول Cut off و طول کل قسمت اندازه گیری شده به ترتیب ۰/۲۵ میلیمتر و ۲/۵ میلیمتر انتخاب شده است.

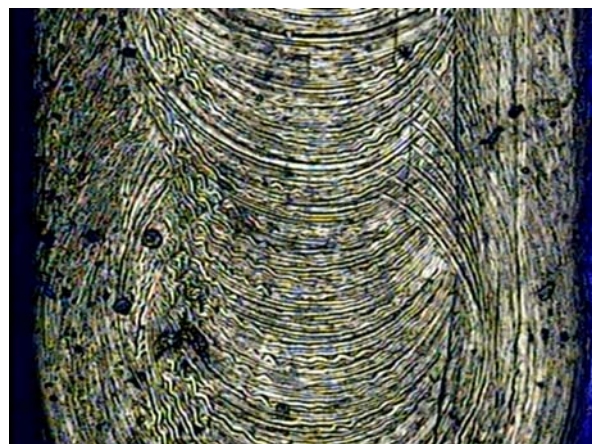
جدول (۱): شرایط آزمایش

پارامتر	مقدار
دوران	۱۸۰۰۰ Rpm
عمق برش	۲۰۰ μm
پیشروی	۱,۵, ۱,۷۵, ۲, ۲,۲۵, ۲,۵, ۲,۷۵ ($\mu\text{m}/\text{flute}$)
شعاع ابزار	۵۰۰ μm

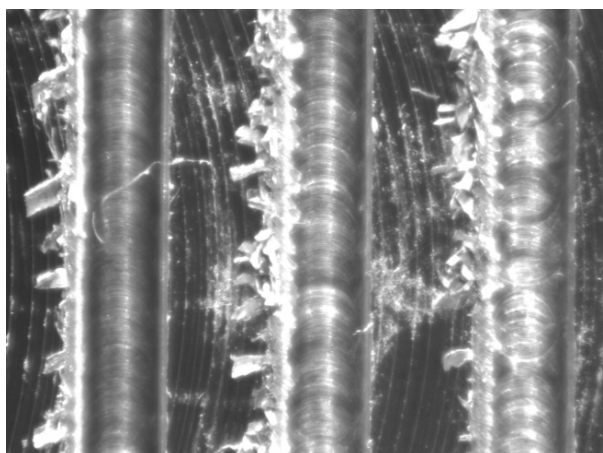
برای اندازه گیری زبری ۲ بعدی سطح، مسیر حرکت سوزن دستگاه زبری سنج باید روی خط مرکزی عبور ابزار باشد، به همین دلیل قید و بندی طراحی شده است که بتواند مسیر حرکت سوزن دستگاه زبری سنج را تصحیح نماید. شکل (۱۱) تصویر تجهیزات و قید و بند مورد استفاده برای اندازه گیری زبری را نشان می دهد.



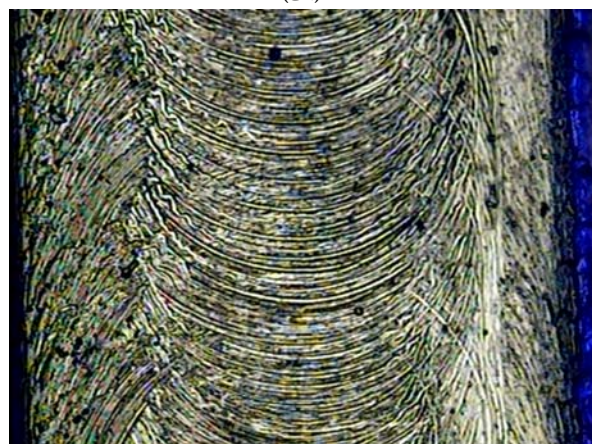
شکل (۱۳): آثار پیشروی ابزار بر کف شیار در اثر حرکت Trochoidal و پلیسه ایجاد شده در لبه شیار



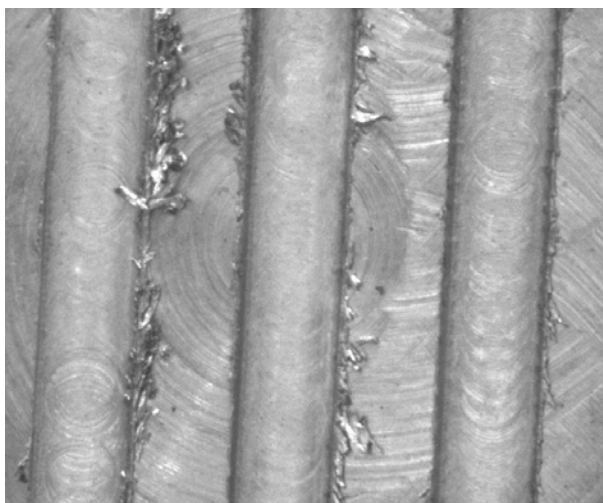
(الف)



شکل (۱۴): شیارهای فرزکاری شده- پیشروی به ازای هر دندان از چپ به راست به ترتیب برابر ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۵ میکرومتر



(ب)



شکل (۱۵): شیارهای فرزکاری شده- پیشروی به ازای هر دندان از چپ به راست به ترتیب برابر ۴/۳ و ۸ میکرومتر



(ج)

شکل (۱۲): آثار حاصل از پیشروی ابزار بر روی سطح کف شیارها، الف- $f_z = 1.5$ $\mu\text{m}/\text{flute}$ - ب- $f_z = 2$ $\mu\text{m}/\text{flute}$ - ج- $f_z = 2.5$ $\mu\text{m}/\text{flute}$

در آزمایش دوم شیارهایی به عمق ۱۰۰ میکرومتر در پیشروی های بیشتر از حداقل براده (۳ الی ۸ میکرومتر) ایجاد شد. شکل (۱۵) نشان می دهد که در پیشروی های بیشتر از مقدار حداقل براده، با افزایش پیشروی، پلیسه کمتری ایجاد می شود.

حداقل براده کمتر باشد، شخم‌زنی به طور مستقیم باعث جریان پلاستیک از دیواره‌ها و تشکیل پلیسه بر روی سطح ایجاد شده جدید می‌شود.

۷- مراجع

- [1] Vogler, M. P., Devor, R. E., and Kapoor, S. G., "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Microendmilling", Part I: Surface Generation", ASME J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 126, 2004, pp. 685-694.
- [2] Weule, H., Huntrup, V., and Trischle, H., "Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization", CIRP Ann., Vol. 50, 2001, pp. 61-64.
- [3] Kim, C. J., Bono, M., and Ni, J., "Experimental Analysis of Chip Formation in Micro-Milling", Trans. North Am. Manuf. Res. Inst. SME, Vol. 30, 2002, pp.
- [4] Vogler, M. P., Devor, R. E., and Kapoor, S. G., "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Microendmilling", Part II: Cutting Force Prediction, ASME J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 126, 2004, pp. 695-705.
- [5] Liu, X., Jun, M., Devor, R. E., and Kapoor, S. G., "Cutting Mechanisms and Their Influence on Dynamic Forces, Vibrations and Stability in Micro-End milling", Proc. of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, ASME, New Yourk, 2004, pp. 583-592.
- [6] Sun, Y., Liang, Y., Du, R., "Simulation and Analysis of Surface Generation in Micro-milling", Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Robotics, Control and Manufacturing Technology, Hangzhou, China, 2006, pp. 30-35.
- [7] Liu, X., Devor, R. E., and Kapoor, S. G., "An Analytical Model for the Prediction of Minimum Chip Thickness in Micromachining", ASME J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 128, 2006, pp. 474-481.
- [8] Liu, X., Jun, M. B. G., Devor, R. E., and Kapoor, S. G., "Cutting Mechanisms and Their Influence on Dynamic Forces, Vibrations and Stability in Micro-Endmilling", Proc. of ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Exposition, ASME, Anaheim, California, 2004.

می‌توان گفت هنگامی که پیشروی از حداقل براده کمتر باشد، شخم‌زنی به طور مستقیم باعث جریان پلاستیک بر روی دیواره‌ها و تشکیل پلیسه روی سطح ایجاد شده جدید می‌شود. شخم‌زنی و مالش سهم مهمی در افزایش نیروهای ماشین‌کاری دارد و می‌تواند باعث بدتر شدن زبری سطح شود.

۶- نتیجه گیری

مدل پیشنهادی در این تحقیق با استفاده از ترکیب هندسه پروفیل انتهای ابزار و مختصات لبه اصلی برش قادر به پیش بینی پروفیل سطح کف در عملیات میکرو فرزکاری می‌باشد. هندسه ابزار فرزانگشتی در دو بخش ماکرو و میکرو مورد توجه قرار گرفته است. خصوصیتی از قبیل شعاع ابزار، تعداد شیارها و زاویه آزاد در زمره پارامترهای ماکرو تعریف می‌شوند. از طرفی پارامترهای میکرو به عنوان انحراف هندسه لبه برشی از ابزار تیز ایده‌آل تعریف شده‌اند. معادلات مربوط به مختصات لبه اصلی برش با استفاده از مختصات لبه در حرکت Trochoidal و پروفیل هندسی انتهای ابزار استخراج شده و تاثیر عواملی همچون برگشت الاستیک و اثر حداقل ضخامت براده بر روی پروفیل سطح در نظر گرفته شده‌اند. در منطقه برش مکانیزمهای برداشت ماده برش و شخم مشاهده می‌شود. پروفیل سطح تولیدی مرکب است از قسمتی از پروفیل ابزار و ناحیه‌ای که تحت تاثیر برگشت الاستیک و شخم قرار گرفته است. با حذف نواحی عبور ابزار و با لحاظ اثر برگشت الاستیک پروفیل سطح باقی مانده ایجاد می‌شود. مدل پیشنهاد شده به خوبی می‌تواند زبری سطح را پیش بینی کند. شبیه سازی انجام شده اثرات پیشروی، شعاع لبه انتهایی و حداقل ضخامت براده بر زبری را مورد مطالعه قرار می‌دهد. زبری به دست آمده از آزمایشات به زبری محاسبه شده مدل نزدیک است. نتایج بدست آمده از آزمایشات نشان می‌دهد هنگامی که پیشروی ها از مقدار حداقل براده کمتر است، با افزایش پیشروی پلیسه بیشتری ایجاد می‌شود و در پیشروی های بیشتر از مقدار حداقل براده، با افزایش پیشروی پلیسه کمتری ایجاد می‌شود. می‌توان گفت هنگامی که پیشروی از