



## Comparing Cooling and Lubricating Effects of Different Cutting Fluid Applications in Micromilling Process

H. Rezaei<sup>1</sup>, M. H. Sadeghi<sup>1\*</sup>, H. Khosroabadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> South Pars Gas Complex, Asaluyeh, Iran

**ABSTRACT:** Micromilling is one of the main manufacturing processes of creating miniaturized parts which are highly demanded in many industries nowadays. Like any other machining processes, cutting fluids are used for cooling and lubricating during micromilling while it can be challenging due to small cutting zone. In this study, the effects of different cooling and lubricating systems such as dry cutting, wet condition and minimum quantity lubrication systems are investigated on such characteristics as surface quality and wear of the micro tool. In case of the minimum quantity lubrication, two methods of single-nozzle and bi-nozzle spraying systems are applied and their effects on such characteristics are compared to each other. Machining tests are carried out using a two-flute micro cutter with diameter of 0.8 mm on a titanium alloy Ti6Al4V. Results show that the minimum quantity lubrication is significantly effective on the both cooling and lubricating whereas wet application has no effect on the cooling. Finally, using minimum quantity lubrication applications results in lower tool wear and better surface finish compared to those of the dry and wet conditions hence the one with two-nozzle is more advantageous in micro end-milling of this alloy.

### Review History:

Received: 5/3/2017

Revised: 6/17/2017

Accepted: 7/16/2017

Available Online: 7/24/2017

### Keywords:

Micromilling

Titanium alloy

Lubricating

Cooling

Surface finish

### 1- Introduction

Micromilling is one of the main manufacturing processes of miniaturized parts where cutting tools less than 1 mm are generally used. Down-scaling from macro- to micro-scale result in rising size effect and differentiate it from conventional milling [1]. Many factors like the vibrations, tool run-out, deflection, microstructure, etc. which can be ignored in macro-scale are of great importance in micro-scale and cause large burr formation, rapid tool wear and an unpredictable tool breakage. These can be more important when talking about difficult-to-cut materials like titanium alloys. However, applying appropriate cutting fluids as well as selecting optimum cutting parameters can strongly help to minimize these problems [2]. Using proper cutting fluids by reducing the friction and better act of cooling will provide longer tool life, lower cutting forces and better surface quality [3]. Cutting fluids are generally used to reduce the friction, to cool the workpiece and the tool and to wash away chips from cutting area [4]. There are different types of cooling/lubricating techniques including dry, wet, Minimum Quantity Lubrication (MQL) and cryogenic methods. Performance of each technique depends on the type and the way how they are applied during process.

Comparing to conventional milling, cutting fluids have great importance in micromilling. Because of smaller tool diameter and so lower bending module, the tool may deflect easily due to the fluid pressure or cutting forces. On the other hand, removing chip from small cutting area is more difficult

for the cutting fluids during micro scale machining. With these in mind, the aim of this study is to investigate the effect of different cutting fluid applications in micromilling of Ti6Al4V. cooling and lubricating effect of each condition as well as using one or two nozzles are analyzed and compared considering output characteristics as roughness, burr size, accuracy, tool wear, cutting force and temperatures.

### 2- Methodology

The material used in this study was Ti6Al4V titanium alloy with a hardness of 400 Hv. A block rectangular shape workpiece with dimension of 65×65×4 mm was used in the experiments. Tests were carried out on an ultra high precision CNC milling machine Kern-evo with a maximum 50000 rpm and equipped with two nozzle MQL system (Fig. 1).



Fig. 1. Experimental set-up

\*Corresponding author's email: sadeghim@modares.ac.ir



Two-flutes micro cutter made of NS-tool Co. with diameter of 0.8 mm were used. Separate tools were used for each milling condition in order to prevent tool wear effects on the results. Three different lubricating systems such as dry, wet and MQL were investigated. For the MQL, two ways of spraying with one-nozzle in feed direction, and two-nozzles in both feed and against feed direction were used. Experiments were conducted at constant cutting parameters of  $v_c=60$  m/min,  $ap=150$   $\mu\text{m}$ , and  $f_z=6$   $\mu\text{m}/\text{tooth}$ . Output parameters are included as surface roughness, burr width, and accuracy of micro channels. For better analysis and comparison, cutting forces, temperatures and tool wear were also measured.

### 3- Results and Discussion

Tool wears at different milling conditions were measured. Diameter loss tool and average flank wear land were used for measurements (Fig. 2). As it can be seen, dry cutting caused largest tool wear while minimum wear was achieved when using MQL particularly in two-nozzle method. Build-up edge formation and adhesion to the tool were observed in dry cutting and to some extent in wet condition; however sharp cutting edge with no build-up edge were observed in MQLs application. Fig. 3 shows the build-up edge formed when dry cutting.

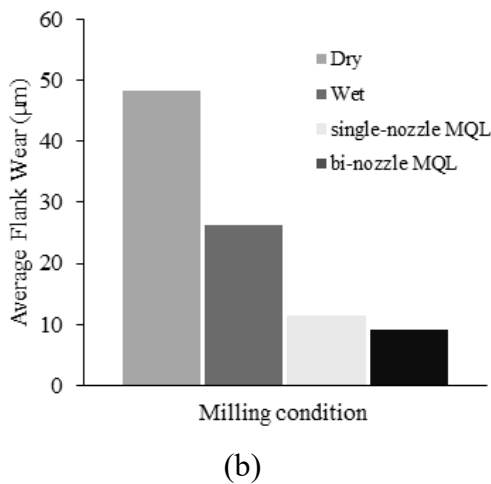
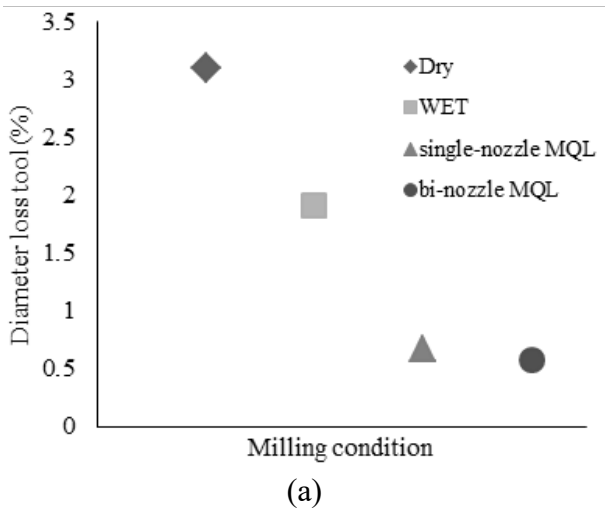


Fig. 2. (a) Diameter loss tool percentage and (b) Variation of average flank wear length

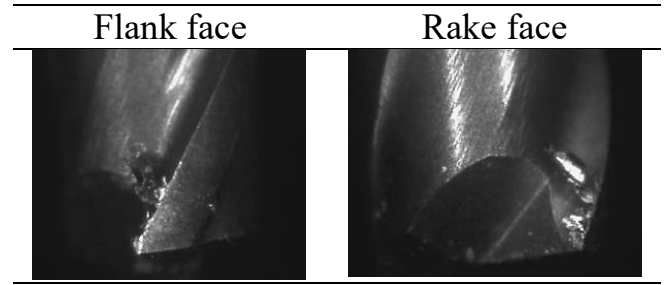


Fig. 3. Build-up edge formation observed at dry cutting

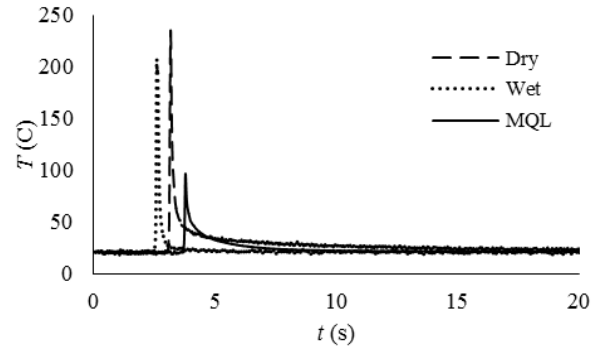


Fig. 4. Temperature rise against time for various cooling systems

To compare the cooling effect of different cutting fluids applications, cutting temperatures were measured (Fig. 4). It is clear that comparing to the dry cutting, wet condition had no great effect on cooling (about 11%) whereas MQL was effective with 58% reduction of cutting temperatures.

To compare the lubricating effect of different conditions, cutting force were measured. Obtained results are summarized in Table 1. Maximum cutting forces were produced in dry cutting while minimum forces were achieved using MQL applications particularly with two-nozzle method. From the result it can be said that MQL techniques have great influence on lubricating during micromilling while lower forces and thereby lower friction were produced.

Surface roughness measurements were done using a 3D profiler. Results are given in Table 2.

Figs. 5 show the burr formed at different milling conditions. Largest burr were formed in dry cutting while minimum burr was achieved using MQL applications. Wider burr was formed in up milling sides.

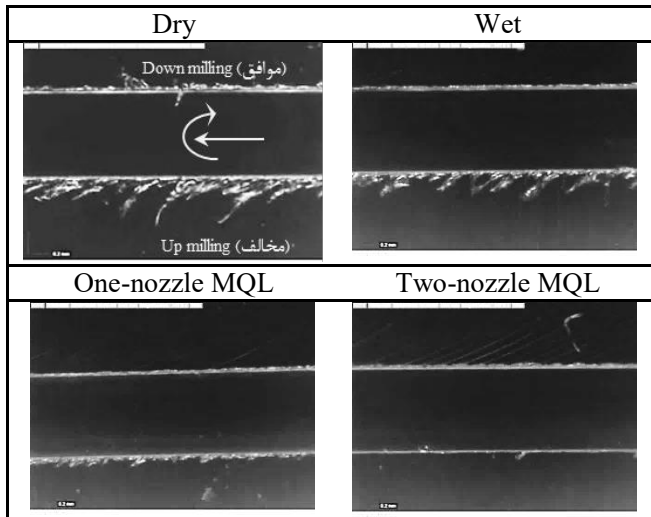
The accuracy of micro channel shapes produced at different

Table 1. Main cutting force values attained with various lubricating conditions

Two-nozzle MQL	One-nozzle MQL	Wet	Dry
2.736 N	3.002 N	4.028 N	6.077 N

Table 2. Ra surface roughness values,  $\mu\text{m}$

Two-nozzle MQL	One-nozzle MQL	Wet	Dry
0.311	0.326	0.350	0.361



**Fig. 5. Burr formation at different conditions**

conditions was compared. Best result was obtained using two-nozzle MQL system. In contrary, in wet condition, the micro channels exhibit a trapezoidal shape with larger corner radius.

#### 4- Conclusions

MQL applications had significant effect on both cooling and lubricating during micromilling of Ti6Al4V. Lowest tool wear and best surface quality was achieved using MQLs. In case of MQL systems, two-nozzle application was more advantageous.

#### References

- [1] Ding, Hongtao, Ninggang Shen, and Yung C. Shin. "Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys." *Journal of Materials Processing Technology* 212.3 (2012): 601-613.
- [2] Shokrani, Alborz, Vimal Dhokia, and Stephen T. Newman. "Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 57 (2012): 83-101.
- [3] Kunderák, J., et al. "Environmentally friendly precision machining." *Materials and manufacturing processes* 21.1 (2006): 29-37.
- [4] Çakır, O., et al. "Selection of cutting fluids in machining processes." *Journal of Achievements in materials and Manufacturing engineering* 25.2 (2007): 99-102.





## مقایسه‌ای بر نقش خنک‌کاری و روانکاری انواع سیالات برشی در فرایند میکروفرزکاری

حامد رضایی<sup>۱</sup>، محمد حسین صادقی<sup>۱\*</sup>، حسن خسروآبادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> مهندسی مکانیک، شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی، عسلویه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳-۰۲-۱۳۹۶  
بازنگری: ۲۷-۰۳-۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۵-۰۴-۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۰۲-۰۵-۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

میکروفرزکاری  
آلیاژ تیتانیوم  
روانکاری  
خنک‌کاری  
کیفیت سطح

**خلاصه:** میکروفرزکاری یکی از مهمترین فرایندهای ساخت قطعات مینیاتوری است که امروزه کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. به مانند سایر فرایندهای ماشینکاری، از سیال‌های برشی برای خنک‌کاری و روانکاری در میکروفرزکاری استفاده می‌شود با این تفاوت که به علت کوچکی ناحیه برش در مقیاس میکرو، استفاده از آنها با مشکلاتی همراه است. در این تحقیق، اثر سیستم‌های روانکاری/خنک‌کاری مختلفی همچون شرایط خشک، تر و روانکاری کمینه بر مشخصه‌هایی از فرایند نظیر سایش میکرو ابزار و کیفیت سطح مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مورد روانکاری کمینه، از دو روش پاشش تک نازله و دو نازله استفاده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. آزمایش‌ها با استفاده از میکرو ابزارهای دو پره به قطر ۰/۸ میلی‌متر بر روی آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V انجام گرفت. نتایج نشان از نقش برجسته سیستم روانکاری کمینه در هر دو عمل روانکاری و خنک‌کاری داشته است. همچنین، شرایط تر نقش مؤثری در خنک‌کاری ایفا نکرد. در نهایت، بکارگیری روانکاری کمینه در مقایسه با دو نوع دیگر خشک و تر، موجب سایش کمتر میکرو ابزار و بهبود کیفیت سطح شده و در این میان استفاده از سیستم پاشش دو نازله عملکرد مؤثرتری در میکروفرزکاری این آلیاژ داشته است.

### ۱- مقدمه

میکروفرزکاری یکی از مهمترین فرایندهای ساخت قطعات مینیاتوری است که در آن از ابزارهای برشی با قطر کمتر از یک میلی‌متر استفاده می‌شود. با کوچک شدن مقیاس براده‌برداری، پدیده اثر اندازه<sup>۱</sup> بر شرایط فرایند تأثیرگذار شده و آن را متمایز از فرزکاری معمولی می‌کند [۱]. در این شرایط به دلیل نزدیکی شعاع لبه برنده ابزار به ضخامت براده نتراشیده، براده‌برداری با سازوکارهای مختلف شخم‌زنی و برش انجام می‌گیرد. بسیاری از فاکتورهایی نظیر ارتعاشات، لنگی، انحراف ابزار، میکروساختار قطعه و ... را که می‌توان در مقیاس ماکرو نادیده گرفت، در مقیاس میکرو بسیار حائز اهمیت بوده و در اکثر مواقع باعث تشکیل پلیسه زیاد، سایش سریع ابزار و در مواقعی شکست ناگهانی و غیر قابل پیش‌بینی آن و بروز عیوب در سطوح قطعات ساخته شده می‌شوند. این مشکلات بخصوص در هنگام ماشینکاری مواد سخت ماشینکاری شونده نظیر

### 1 Size effect

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sadeghim@modares.ac.ir

آلیاژهای تیتانیومی بسیار جدی‌تر خواهند بود. آلیاژهای تیتانیوم به علت خواص بسیار خوبی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، پایداری حرارتی بالا و همچنین مقاومت به خوردگی خوبی که دارند، کاربرد گسترده‌ای در بخش‌های مختلف پزشکی، صنایع هوایی و نیروگاهی نظیر ساخت ایمپلنت‌ها، میکرو توربین‌گازی و غیره پیدا کرده‌اند. در عین حال خصوصیات مانده هدایت حرارتی پایین و ظرفیت حرارتی بالا، واکنش‌پذیری شیمیایی بالا با ابزار، کارسختی بالا به علت زمینه آستنیتی آنها، تمایل به چسبندگی و تشکیل لبه انباشته، و مقاومت برشی بالای این آلیاژ معمولاً منجر به تشکیل نیروها و دمای برش بالاتر، سایش شدیدتر ابزار و کیفیت سطح ضعیف‌تر می‌شود. بکارگیری سیال برشی مناسب و انتخاب پارامترهای برشی بهینه می‌تواند به حل این مشکلات کمک زیادی کنند [۲].

انتخاب درست سیال برشی با کاهش اصطکاک، خنک‌کاری بهتر و جلوگیری از ایجاد گرمای بیش از حد در محیط ماشینکاری [۳]، منجر به طول عمر بیشتر ابزار، کاهش نیروی برشی و بهبود کیفیت



مايع روانكار به ناحيه برش، تحت عنوان روش روانكاري كمينه استفاده كرد [۱۴]. در اين روش، مخلوط هوا و روغن به صورت اسپري با فشار بالا به ناحيه برشي پاشيده مي‌شود. در اين حالت، خنك‌كاري به علت سرعت بالاي هوا و در نتيجه ضريب انتقال حرارت بهتر مخلوط هوا/روغن، تقويت مي‌شود. در مقايسه با سيستم‌هاي تر و خشك، استفاده از روانكاري كمينه در فرايندهاي ماشينكاري مي‌تواند منجر به بهبود عمر ابزار و كيفيت سطح، و همچنين کاهش نيروها و دماي برش شود [۱۸-۱۵]. پارامترهاي مختلفی مانند زاويه پاشش سيال، نرخ جريان روغن، نرخ جريان هوا و تعداد نازل پاششي بر عملکرد فرايند تأثيرگذار هستند و انتخاب مناسب آنها نقش مهمي در بهبود عملکرد ماشينكاري خواهد داشت [۱۷ و ۱۹].

در مقايسه با فرزكاري معمولي، انتخاب تكنيك روانكاري/خنك‌كاري مناسب در ميكروفرزكاري از اهميت بيشتري برخوردار است. با كوچك شدن سايز ابزار و بدنبال آن کاهش مدول خمشي، احتمال انحراف ميكرو ابزار در اثر عوامل فشار پاشش سيال و نيروهاي ماشينكاري، بيشتري مي‌شود. از طرفي ديگر كوچك شدن موضع برش، هدايت براده به بيرون از ناحيه كوچك برش را دشوارتر مي‌كند. افزايش شعاع لبه برنده و تشكيل زاويه براده مؤثر منفي كه در اثر عوامل همچون سايز ابزار و تشكيل لبه انباشته حين فرايندهاي ميكروفرزكاري شكل مي‌گيرند، نيز باعث تغيير سازوكار باربرداري از برش به شخم‌زني مي‌شوند. اين عوامل مي‌توانند روي عملکرد سيال‌هاي برشي در مقياس ميكرو تأثيرگذار باشند. برخلاف فرزكاري معمولي كه استفاده از سيستم روانكاري تر به دليل خنك‌كاري بهتر آن كيفيت سطح بهتري را نتيجه مي‌دهد [۲۰]، در فرايندهاي ميكروفرزكاري به علت كوچكي قطر ابزار و كم بودن حجم براده برداري، کاهش گرمای توليدي حين فرايند ممكن است باعث كم‌رنگ‌تر شدن اثر خنك‌كنندگي سيال برشي شود [۲۱ و ۲۲] و نقش روانكاري برجسته‌تر گردد كه پي بردن به اين حقيقت بعنوان يكي از اهداف تحقيق حاضر، نيازمنند تحقيق بيشتري در اين زمينه است.

از اين رو به دليل كوچكي شرايط برش در فرايندهاي مقياس ميكرو اهميت بكارگيري شرايط مختلف ماشينكاري در ايفاي نقش دوگانه روانكاري و يا خنك‌كاري بسيار مهم خواهد بود كه به‌عنوان يكي از اهداف اين تحقيق با اندازه‌گيري دماها و نيروهاي برشي براي نخستين بار در ميكروماشينكاري آلياژ تيتانيومي Ti6Al4V به آن

سطح مي‌گردد [۴]. سيال برشي معمولاً به عنوان خنك‌كار<sup>۱</sup> يا روانكار<sup>۲</sup> استفاده مي‌شود. اثر خنك‌كاري نقش مهمي در کاهش دماي ابزار برشي و قطعه كار ماشينكاري شده ايفا مي‌كند. روانكار نيز با کاهش ضريب اصطكاك كمك مي‌كند تا براده راحت‌تر از سطح براده ابزار<sup>۳</sup> جدا شود كه اين كار باعث کاهش تمايل به تشكيل لبه انباشته و چسبندگي به ابزار برش مي‌شود. در نهايت هر دو باعث شستن و دور كردن براده از موضع برش مي‌شوند [۵ و ۶]. انواع تكنيك‌هاي روانكاري/خنك‌كاري كه امروزه براي ماشينكاري مواد مختلف بكار گرفته مي‌شوند شامل سيستم‌هاي خشك<sup>۴</sup>، تر<sup>۵</sup>، روانكاري كمينه<sup>۶</sup> و روش‌هاي برودتي<sup>۷</sup> هستند. ميزان اثرگذاري هر يك از اين‌ها در عمليات ماشينكاري، به شدت وابسته به انتخاب نوع سيال و سيستم پاشش آن بر موضع برش است. مقاله‌هاي مروري خوبي در زمينه كاربرد سيال‌هاي برش در فرايندهاي ماشينكاري ارائه شده است [۹-۷].

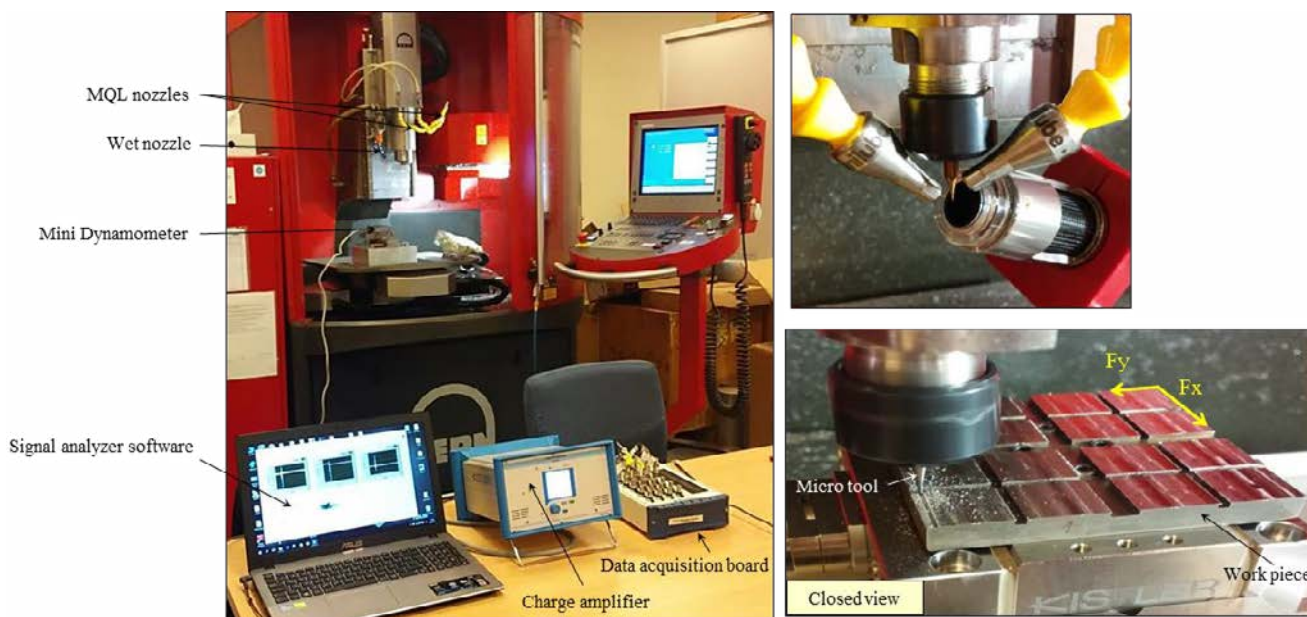
در ماشينكاري خشك، فرايند برش بدون حضور سيال برشي انجام مي‌گيرد كه در بسياري از موارد استفاده از آن به علت حذف معايب بكارگيري سيال برشي ترجيح داده مي‌شود [۱۰]. در عين حال، ماشينكاري خشك موجب تشكيل دماها و نيروهاي برش بالا مي‌شود كه با افزايش سايز و تشكيل لبه انباشته منجر به کوتاه شدن عمر ابزار و خراب شدن كيفيت سطح مي‌گردد [۱۱].

راهكار متعارف براي کاهش دماهاي برش و مشكلات مربوطه استفاده از سيالات برشي است [۱۲]. روش تر، روش متداول پاشش سيال به موضع ماشينكاري است كه عموماً با نرخ جريان بيشتري از ۱۰۰ ليتر بر ساعت بكار مي‌رود و بيشتري از انواع امولسيون پايه آبي به علت قابليت انتقال حرارت بالا و اقتصادي بودن آنها استفاده مي‌شود [۱۲]. در عين حال استفاده از سيال برشي، نگراني‌هاي زيست محيطي را بدنبال خواهد داشت كه در کنار مسائل اقتصادي و سلامت اپراتور، بكارگيري آنها را كمی مشکل‌ساز مي‌نمايد [۱۳].

بنابراين براي بهبود قابليت ماشينكاري در جهت افزايش بازده ماشينكاري و دستيابي به كيفيت سطح مطلوب، و همچنين کاهش اثرات نامطلوب ماشينكاري‌هاي خشك و تر، مي‌توان از نفوذ حداقل

- 1 Coolant
- 2 Lubricant
- 3 Rake face
- 4 Dry
- 5 Wet
- 6 Minimum Quantity Lubrication (MQL)
- 7 Cryogenic





شکل ۱: چیدمان انجام آزمایش‌ها

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti6Al4V (درصد وزنی %)

Titanium	Al	V	Fe	Mo	Ni	Sn	Mo
89/1	5/91	4/21	0/069	0/060	0/043	0/54	0/060

ابعاد  $4 \times 65 \times 65$  میلی‌متر با ترکیب شیمیایی داده شده در جدول ۱ بوده است. در انجام آزمایش‌ها از ماشین فرز فوق دقیق کرن اوو<sup>۱</sup> با بیشینه دور ۵۰۰۰۰ دور بر دقیقه، مجهز به سیستم روانکاری کمینه با دو نازل پاششی استفاده شد. شکل ۱، چیدمان آزمایش بکار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد.

آزمایش‌ها به صورت ایجاد شیارهایی موازی با یکدیگر به عرض ۸۰۰ میکرون با فواصل یکسان ۲ میلی‌متر موازی با هم روی نواحی تست به ابعاد  $14 \times 14$  میلی‌متر انجام گرفت. برای ایجاد شیارها، از میکرو ابزار دو پره از جنس تنگستن کارباید به قطر  $0/8$  میلی‌متر ساخت شرکت ژاپنی ان اس تول<sup>۲</sup> استفاده شد. مشخصات تکمیلی ابزار در شکل ۲ آورده شده است. برای جلوگیری از تأثیرگذاری سایش ابزار روی نتایج اندازه‌گیری، ابزاری جدا برای انجام آزمایش‌های مربوط به هر حالت روانکاری استفاده شد.

فرایند ماشینکاری بعد از گام‌های موفق زیر انجام می‌گرفت:

بعد از راه‌اندازی ۳۰ دقیقه‌ای دستگاه برای کاهش خطاهای

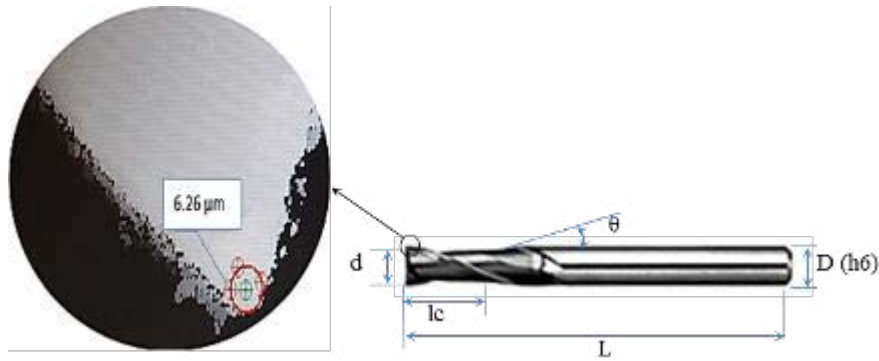
پرداخته خواهد شد. همچنین با توجه به اهمیت زاویه پاشش سیال، در این تحقیق برای اولین بار اقدام به مقایسه تأثیر حالت‌های تک-نازله و دو-نازله شده است. برای این کار از روانکاری کمینه با دو نازل پاششی برای هدایت مستقیم ذرات روغن به موضع ماشینکاری همزمان در جهت‌های پیشروی و خلاف آن استفاده شد و نتایج حاصله با حالت تک-نازله در جهت پیشروی مقایسه گردید. آزمایش‌های میکروفرزکاری با استفاده از میکرو ابزار به قطر  $0/8$  میلی‌متر و در سه حالت خشک، تر و روانکاری کمینه انجام گرفت. مشخصه‌های کیفیت سطح نظیر زبری، سایز میکرو پلیسه و توپوگرافی سطح به همراه دقت ابعادی میکرو شیار، نیروی برش و سایش ابزار به عنوان پارامترهای خروجی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

## ۲- مواد و تجهیزات آزمایش

هدف از این تحقیق مقایسه اثرهای خنک‌کاری/روانکاری سیستم‌های مختلف پاشش سیال در فرایند میکروفرزکاری است. ماده به کار رفته در این تحقیق آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V با سختی ۴۰۰ ویکرز بوده است. قطعه‌کار به صورت بلوک مستطیلی شکل به

1 Kern evo

2 NS Tool (Type: NSE320)



مقادیر	پارامترهای هندسی
0/8	قطر ابزار، $d$ ، میلی‌متر
4	قطر دنباله، $D$ ، میلی‌متر
12	زاویه مخروطی، $\theta$
45	طول کل ابزار، $L$ ، میلی‌متر
1/6	طول برش، $lc$ ، میلی‌متر
2	تعداد لبه برنده
MUGEN	پوشش ابزار

شکل ۲: مشخصه‌های هندسی میکرو ابزار بکار رفته در آزمایش‌ها

از دو روش پاشش متفاوت به صورت تک نازل در جهت پیشروی، و نیز دو نازل یکی در جهت موافق و دیگری در جهت خلاف پیشروی برای بررسی تأثیر بکارگیری همزمان دو نازل پاششی و مقایسه آن با حالت تک نازل در فرایند میکروفرزکاری، استفاده شده است.

روانکار مورد استفاده در نوع امولسیون، شامل روغن نیمه مصنوعی نئولیت اف سی<sup>۱</sup> با ویسکوزیته ۹۵ میلی‌متر مربع بر ثانیه و نسبت آمیختگی ۵٪ بود. برای روانکاری کمینه، از سیستم میکرو روانکاری دو نازل یونیلوب<sup>۲</sup> در انجام آزمایش‌ها استفاده شد. مخلوط روغن و هوا (از روغن یونیلوب<sup>۳</sup> ۲۰۳۲ با ویسکوزیته ۳۵ میلی‌متر مربع بر ثانیه با نرخ جریان ۱۵ میلی‌لیتر بر ساعت) در جریان هوای ۲۰۰ لیتر بر دقیقه در فشار ۰/۶ مگاپاسکال برای اسپری کردن به موضع ماشینکاری استفاده شدند. انتخاب پارامترهای روانکاری کمینه با توجه به نتایج تحقیق‌های قبلی مورد استفاده در ماشینکاری آلیاژهای تیتانیومی انتخاب شدند [۲۳ و ۲۴].

مقایسه اثر روانکاری/خنک‌کاری در شرایط برشی ثابت انجام گرفت.

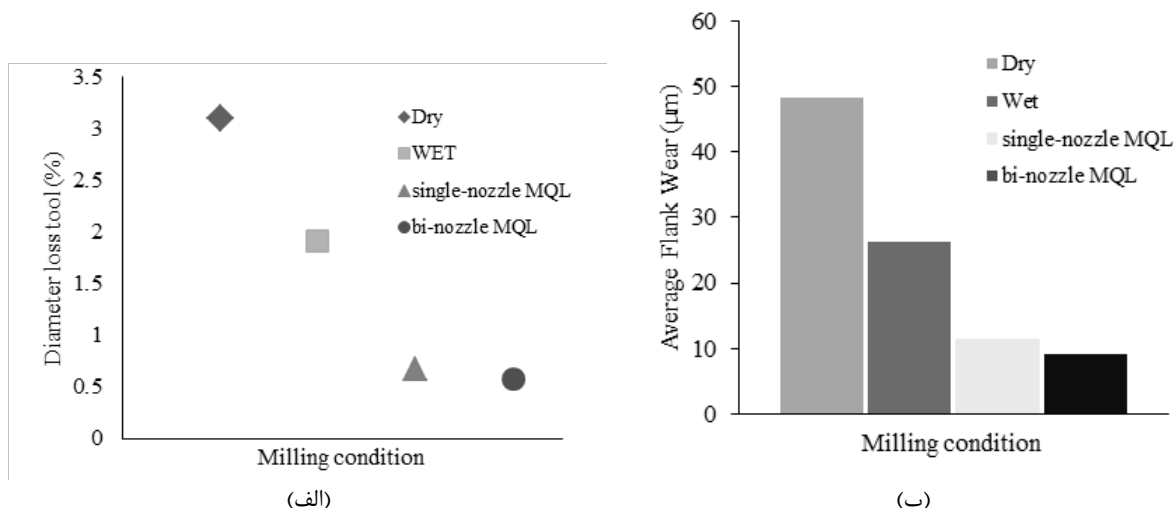
حرارتی احتمالی، ابتدا سطح قطعه‌کار به منظور دستیابی به کیفیت سطح بالا (به عنوان رفرنس برای عمق برش) با استفاده از ابزاری کاربیدی چهار پره به قطر ۱۰ میلی‌متر با جاروب کردن در راستای  $Y$  ماشین ابزار، کف تراشی شد. فرزکاری در شرایط تنظیمی با سرعت دورانی ۵۵۰۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۲۸۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۲ میلی‌متر انجام گرفت.

پیش از شروع آزمایش‌های میکروفرزکاری، کنترل لنگی استاتیکی میکرو ابزارها با استفاده از ساعت اندازه‌گیری انجام می‌گرفت تا مقدار لنگی بیشتر از ۱ میکرون نباشد. ماشینکاری شیارها در طول محور  $Y$  با میکرو ابزار قطر ۰/۸ میلی‌متر بر اساس برنامه آزمایش‌ها انجام گرفت. در هر مرحله از آزمایش که نیاز به افزایش سرعت دورانی بود، دوباره اقدام به راه‌اندازی اسپیندل می‌شد. نحوه راه‌اندازی در مراحل بعدی شامل ۵ دقیقه زمان به ازای هر ۵۰۰۰ افزایش دور اسپیندل بوده است. این کار به منظور کاهش انبساط حرارتی و بنابراین کنترل عمق برش ضروری است.

سه نوع روانکاری مختلف بصورت‌های خشک، تر و روانکاری کمینه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند که برای نوع روانکاری کمینه

1 Neolith FC A403  
2 Unilube  
3 UNILUBE 2032





شکل ۳: (الف) درصد کاهش قطر و (ب) تغییرات طول میانگین سایش سطح آزاد ابزار

### ۳- نتایج و بحث

تأثیر شرایط خنک کاری و/یا روانکاری در شرایط مختلف برشی حین میکروفزکاری آلیاژ تیتانیوم بر روی مشخصه‌های مختلفی نظیر زبری سطح، سایز میکرو پلیسه، دقت ابعادی، سایش میکرو ابزار و نیروهای برشی در ادامه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۳-۱- سایش میکرو ابزار

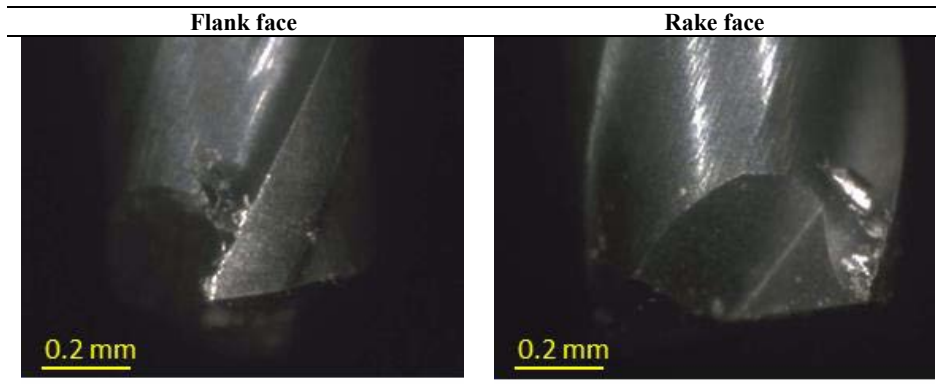
اندازه‌گیری سایش ابزار در میکرو فرز، به علت کوچک بودن سایز ابزارها چالش برانگیز بوده و از این رو معیار قابل اعتماد و معتبری در ارتباط با وضعیت لبه برنده‌ی میکرو ابزارها تاکنون ارائه نشده است. یکی از روش‌های تعیین میزان سایش میکرو ابزار، اندازه‌گیری مقدار کاهش قطر مؤثر است [۲۵]، که به علت سایش و گرد شدن لبه برنده کاهش می‌یابد. در این مطالعه، درصد کاهش قطر ابزار و طول میانگین سایش سطح آزاد ابزار بعنوان دو معیار مختلف سایش ابزار اندازه‌گیری، و نتایج بدست آمده در شکل‌های ۳ (الف) و ۳ (ب) نمایش داده شده است.

بیشترین سایش ابزار مربوط به میکروفزکاری در شرایط خشک و سپس شرایط تر بوده و این در حالی است که استفاده از روانکاری کمینه، کمترین میزان سایش ابزار را نتیجه داده و در این بین روانکاری با استفاده از دو نازل پاششی بهترین عملکرد را روی عمر ابزار داشته است. تشکیل لبه انباشته و چسبیدن آن به لبه ابزار در شرایط خشک و به مقدار کمتری در شرایط تر به چشم می‌خورد

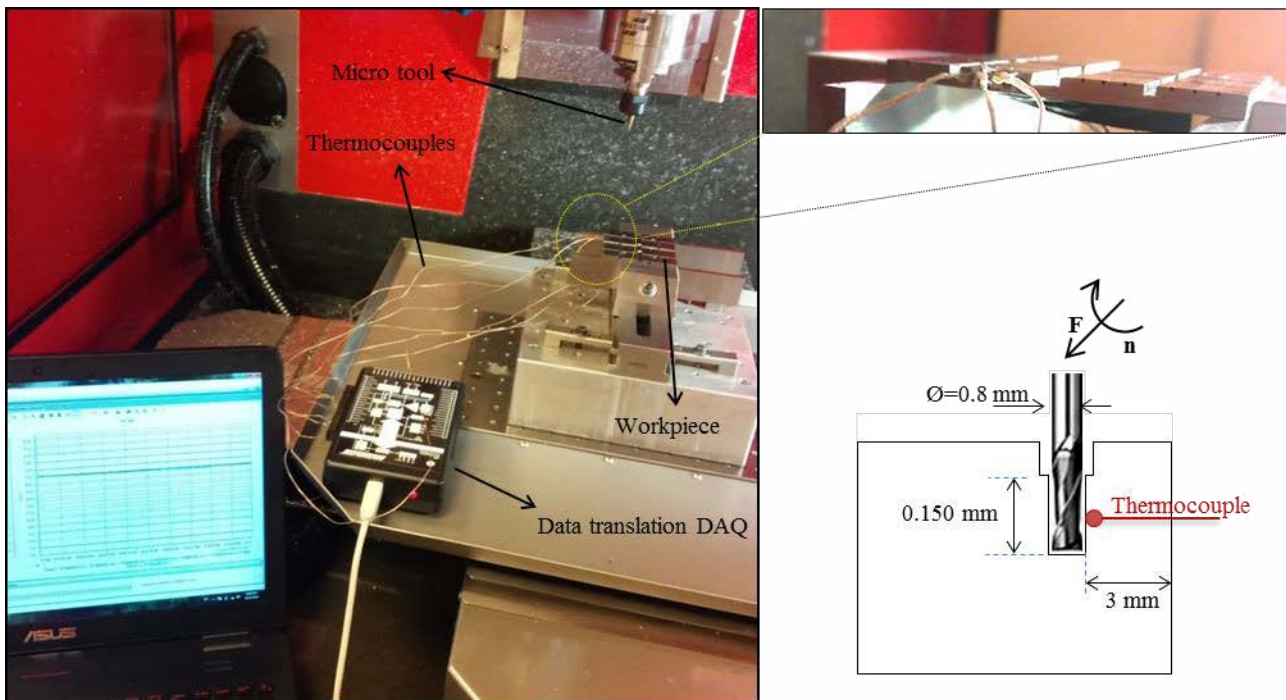
سرعت برشی،  $v_c$ ، ۶۰ متر بر دقیقه، عمق برشی،  $a_p$ ، ۱۵۰ میکرومتر و پیشروی بر واحد دندان،  $f_z$ ، ۶ میکرومتر بر دندان انتخاب شدند. عرض برش نیز برابر با قطر میکرو ابزار ۸۰۰ میکرومتر بوده است. انتخاب این پارامترها با توجه به آزمایش‌های تجربی اولیه بوده است.

مشخصه‌های خروجی مورد ارزیابی در این تحقیق شامل زبری سطح و عرض پلیسه به عنوان دو مشخصه مهم کیفیت سطح، به همراه توپوگرافی سطح و دقت ابعادی شیارها هستند که برای تحلیل بهتر و دقیقتر نتایج، نیروهای برشی، دما و سایش ابزار نیز اندازه‌گیری شدند. از مینی دینامومتر کیستلر<sup>۱</sup> به همراه شارژر امپلی‌فایر نوع ۵۰۷۰ برای اندازه‌گیری نیروهای برشی حین فرایند استفاده شد که از طریق کارت اکتساب داده جهت پردازش و ثبت داده‌های اندازه‌گیری شده با فرکانس نمونه برداری ۴۳ کیلوهرتز، به کامپیوتر منتقل شد. اندازه‌گیری سایش ابزار با میکروسکوپ پرتابل داینولایت<sup>۲</sup> انجام گرفت. از هر میکرو ابزار برای میکروفزکاری سه شیار به طول ۱۴ میلی‌متر مربوط به هر شرایط ماشینکاری استفاده شد. از پروفایلر سه‌بعدی بدون تماس نانوفاکوس<sup>۳</sup> برای ارزیابی زبری سطح، توپوگرافی و همچنین عرض میکرو پلیسه استفاده شد. برای کنترل دقت ابعادی و شکل هندسی شیارها از پروفایلر سه‌بعدی به همراه میکروسکوپ نوری الیمپوس<sup>۴</sup> با حداکثر بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر استفاده شد.

- 1 Kistler mini-dynamometer (type 9256C1)
- 2 Dino-Lite (type AM7915)
- 3 Nano focus µSurf
- 4 Olympus (type bx51m)



شکل ۴: تشکیل لبه انباشته در شرایط خشک



شکل ۵: چیدمان آزمایش اندازه‌گیری دمای برش

بیشتر ابزار برشی می‌شود. شرایط تقریباً مشابهی در شرایط تر روی داده است. بکارگیری روش تر، نقش چندان مؤثری در کاهش دمای برش و در نتیجه سایش ابزار نداشته است. هر دو نوع روانکاری کمینه با یک و دو نازل پاششی، کمترین میزان سایش ابزار را نتیجه دادند که این امر ناشی از پاشش مؤثر روانکار به موضع کوچک برش به علت فشار بالای آن بوده و باعث نفوذ ذرات روغن در عمق برش و لمس کردن لبه برنده میکرو ابزار گردیده است. جهت پاشش نازل با هدایت جریان روغن به روی هر یک از سطوح آزاد و براده میکرو ابزار برشی، می‌تواند بر میزان سایش ابزار در آن

درحالی‌که در شرایط روانکاری کمینه لبه های ابزار کماکان تیز بوده و عاری از هرگونه تشکیل لبه انباشته یا چسبیدن مواد به ابزار بوده‌اند. شکل ۴، تشکیل لبه انباشته در میکرو ابزار را در شرایط خشک نشان می‌دهد.

سایش زیاد ابزار در وضعیت خشک، ناشی از دمای بالا و اصطکاک زیاد بین ابزار برشی و قطعه‌کار است که این موضوع در مورد آلیاژ تیتانیوم به علت هدایت حرارتی پایین و ظرفیت حرارتی بالا چشمگیرتر است. ماشینکاری این آلیاژ معمولاً در شرایط خشک، به علت دما و فشار بالا باعث تشکیل لبه انباشته و در نهایت سایش

به درون آن ناحیه در شرایط تر به راحتی امکان پذیر نبوده و لذا عملکرد مؤثری در خصوص خنک کاری نخواهد داشت. حال آنکه در روانکاری کمینه به علت فشار پاشش و اسپری شدن مخلوط روغن و هوا به سمت ناحیه برش، امکان نفوذ سیال و برقراری تماس با سطوح ابزار راحت تر انجام می گیرد و روانکاری مؤثر سطح برخورد بین لبه برنده ابزار و براده با کاهش اصطکاک در این سطح برخورد، موجب کاهش حرارت تولیدی می شود و از جوش خوردن براده به ابزار که در برش های بعدی می بایست با آن مواجه شود جلوگیری می کند. از سویی دیگر، افزایش نرخ جریان و سرعت پاشش نیز با افزایش ضریب انتقال حرارت و پخش سریعتر حرارت، مستقیماً کاهش دما را به همراه خواهند آورد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که نقش خنک کنندگی شرایط کمینه در میکروفرزکاری این آلیاژ بهتر از سایر شرایط بوده است.

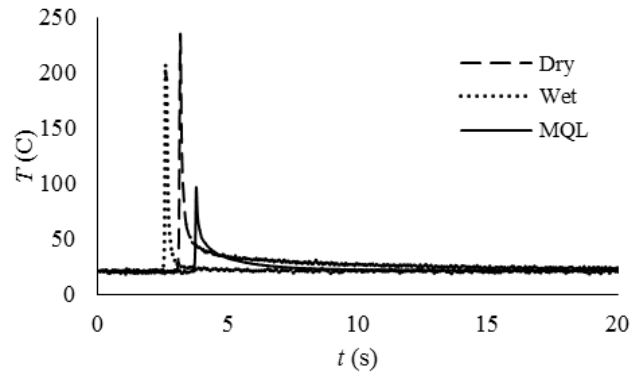
### ۳-۲- نیروی برش

به منظور مقایسه نقش روانکاری و تحلیل بهتر نتایج، مقادیر نیروهای برشی در تمامی آزمایش ها، اندازه گیری و ثبت شده اند. شکل ۷، گراف مربوط به نیروهای برشی اندازه گیری شده در شرایط مختلف روانکاری را نشان می دهد که در آن،  $F_x$  مؤلفه نیروی برش در راستای پیشروی،  $F_y$  مؤلفه شعاعی، و  $F_z$  نیز مؤلفه نیروی برش در راستای محور ابزار هستند. برای مقایسه کمی برآیند نیروهای برشی در شرایط مختلف آزمایش، مقدار میانگین برآیند سه مؤلفه نیروی  $F_x$ ،  $F_y$  و  $F_z$  محاسبه و در جدول ۲ خلاصه شدند.

در بین تمامی شرایط آزمایش، بیشترین نیروی برشی در شرایط ماشینکاری خشک بدست آمده است. شرایط تر (به دلیل استفاده از روغن نیمه مصنوعی و وجود ۲-۳٪ روغن در آنها) و به خصوص روانکاری کمینه موجب کاهش نیروهای برشی شده اند که در این بین روانکاری کمینه با دو نازل پاششی بهترین عملکرد را با کمترین مقدار نیروی برشی دارا بود. سایش کمتر ابزار و تیز ماندن لبه برنده (شکل ۳)، در کنار عملکرد مؤثرتر روانکاری در حالت کمینه در کاهش

### جدول ۲: مقادیر نیروی برش میانگین در شرایط مختلف روانکاری

خشک	تر	روانکاری کمینه تک-نازله	روانکاری کمینه دو-نازله
6/077 N	4/028 N	3/002 N	2/736 N

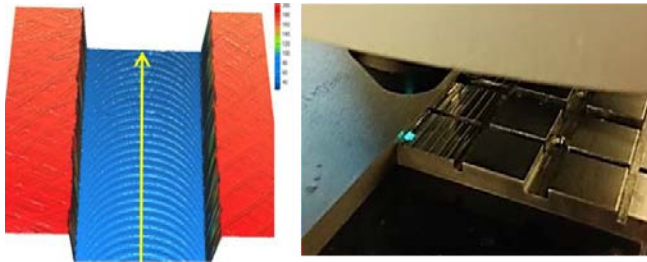


شکل ۶: پروفیل تاریخچه دمایی اندازه گیری شده برای سیستم های خنک کاری مختلف

نواحی تأثیرگذار گردد. اگرچه پاشش روغن در جهت پیشروی در مقایسه با جهت مخالف آن، با توجه به چرخش ساعتگرد ابزار منجر به نگهداری بیشتر روغن درون ناحیه برش و در نتیجه سایش کمتر سطح آزاد میکرو ابزار می گردد، اما پاشش همزمان نازل از دو طرف، باعث هدایت روغن به هر دو سطح آزاد و براده از ابزار برشی شده و ضمن نگهداری روغن در موضع برش منجر به کاهش سایش در هر دو سطح آزاد و براده از میکرو ابزار می گردد. از این رو استفاده از روانکاری با دو نازل پاششی موجب کاهش بیشتر سایش ابزار در هر دو سطح آزاد و براده بخصوص در سرعت های برشی بالاتر می گردد.

برای مقایسه نقش خنک کاری سیستم های مختلف روانکاری، دمای برش به روش تجربی اندازه گیری شده است. از ترموکوپل نوع K به قطر ۰/۱۲۵ میلی متر مطابق شکل ۵، برای اندازه گیری دمای برش در سه حالت خشک، تر، و روانکاری کمینه دو-نازله استفاده شد. پروفیل تاریخچه دمایی حاصل از میکروفرزکاری در شرایط برشی با سرعت ۶۰ متر بر دقیقه، پیشروی ۷۱۶/۵۲ میلی متر بر دقیقه و عمق برش ۱۵۰ میکرومتر، در شکل ۶ نشان داده شده است. قله نمودار معرف دمای بیشینه برش در هر شرایط روانکاری است. واضح مشاهده می شود که شرایط تر، نقش چندانی در کاهش دمای برشی در مقایسه با شرایط خشک نداشته (حدوداً ۱۱٪)، و این در حالی است که استفاده از روانکاری کمینه کاهش زیاد دمای بیشینه برش (حدوداً ۵۸٪) را بدنبال داشته است.

در توضیح علل کاهش دمای بدست آمده در شرایط روانکاری کمینه می توان به نقش مؤثر روانکاری و خنک کاری در آن اشاره کرد. در میکروفرزکاری بدلیل کوچکی ناحیه برش امکان نفوذ سیال



شکل ۸: چیدمان اندازه‌گیری زبری سطح

جدول ۳: مقادیر زبری میانگین سطح بر حسب میکرومتر

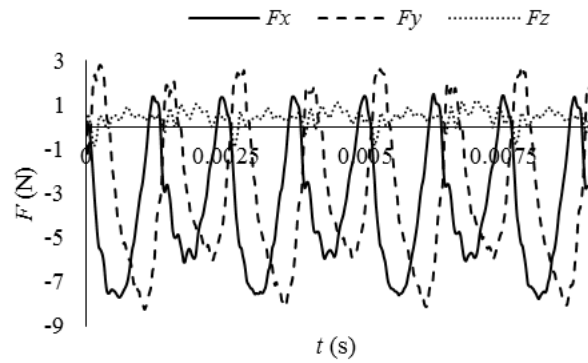
خشک	تر	نیمه خشک تک-نازله	نیمه خشک دو-نازله
0/361	0/350	0/326	0/311

ضریب اصطکاک (شکل ۷)، را می‌توان از علل اصلی کاهش بیشتر نیروهای برش در استفاده از روانکاری کمینه در مقایسه با شرایط تر و خشک حین میکروفرزکاری این آلیاژ دانست.

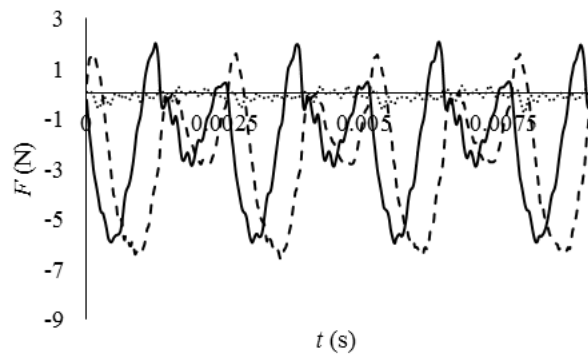
### ۳-۳- زبری سطح

زبری سطح یکی از مهمترین مشخصه‌های ارزیابی کیفیت سطح شناخته می‌شود. عوامل مختلفی نظیر پارامترهای برشی، نوع روانکاری، انحراف ابزار، اثر اندازه، لنگی و ارتعاشات ماشینکاری می‌توانند بر مقدار زبری سطح تأثیرگذار باشند [۲۶ و ۲۷]. در این تحقیق، اندازه‌گیری زبری سطح با استفاده از پروفایلر سه‌بعدی به روش غیرتماسی در جهت پیشروی و در خط مرکز شیارها به صورتی که در شکل ۸ نشان داده شده است، انجام گرفت. با توجه به محدوده مقادیر زبری از طول کات آف<sup>۱</sup> برابر ۸۰۰ میکرون طبق استاندارد DIN EN ISO 4288 برای اندازه‌گیری استفاده شد. زبری سنجی با ۳ بار تکرار و در ۵ محل مختلف مربوط به هر تست، انجام و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان زبری سطح متوسط،  $Ra$ ، در جدول ۳ خلاصه گردید.

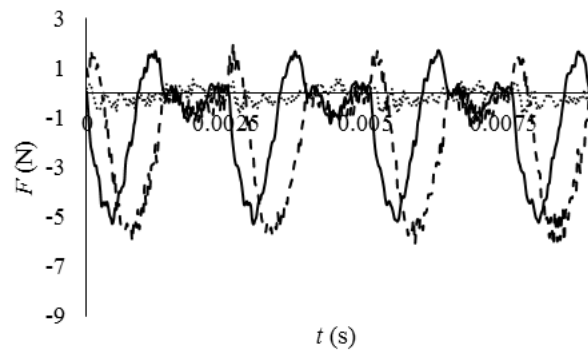
نتایج حاکی از آن است که سیستم روانکاری کمینه و شرایط خشک، به ترتیب دارای بهترین و بدترین صافی سطح هستند. زبری سطح بدست آمده در شرایط تر اختلاف چندانی با شرایط خشک نداشته و در این بین روانکاری کمینه با دو نازل پاششی کمترین زبری



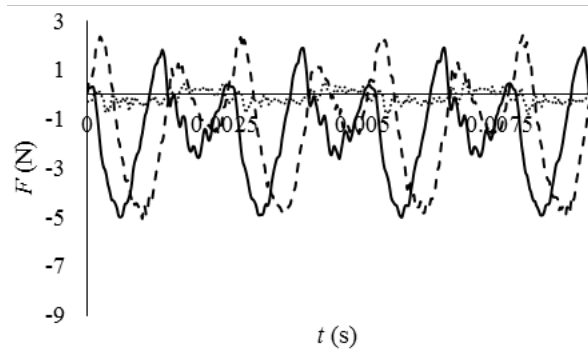
(الف)



(ب)



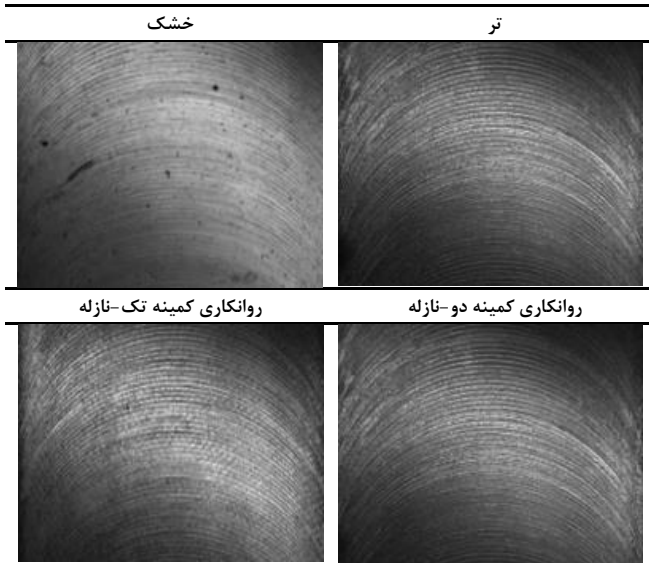
(ج)



(د)

شکل ۷: گراف نیرویی در شرایط (الف) خشک، (ب) تر، (ج) روانکاری کمینه تک نازل، و (د) روانکاری کمینه دو نازل

1 Cut off



شکل ۹: بافت سطحی بدست آمده میکروشیارها در شرایط مختلف روانکاری

علت وجود شرایط شخم‌زنی و اثرات اندازه، تشکیل پلیسه مشاهده می‌شود [۲۸].

جهت مقایسه کمی اثر تکنیک‌های مختلف روانکاری بر اندازه‌های عرض پلیسه، مقادیر اندازه‌گیری شده در شرایط مختلف آزمایش در شکل ۱۲ به تفکیک در نواحی مخالف و موافق نشان داده شده است. روانکاری‌های مختلف نقش پررنگی بر اندازه عرض پلیسه‌های تشکیل یافته دارند بطوری که روانکاری‌های خشک و تر، با سایش شدیدتر ابزار و تشکیل لبه انباشته که افزایش شعاع لبه برنده را بدنبال دارند، منجر به تشکیل پلیسه‌هایی عریض‌تر در مقایسه با روانکارهای کمینه می‌شوند. از روابط بین سایش ابزار، زبری و تشکیل پلیسه می‌توان نتیجه گرفت که کاهش اندازه پلیسه تشکیل یافته در شرایط روانکاری کمینه تا بخش زیادی ناشی از سایش کمتر ابزار و تیز ماندن آن در غیاب لبه انباشته بوده است.

در مورد روانکاری‌های کمینه نیز نوع تک-نازله در مقایسه با حالت دو-نازله منجر به تشکیل پلیسه‌های تقریباً کوچکتری به ویژه در سمت مخالف (حدود ۳۳ میکرون) شده است. این اختلاف اندازه پلیسه ناشی از ارتعاشات میکرو ابزار می‌تواند باشد. زاویه پاشش سیال بر میزان ارتعاشات میکرو ابزار تأثیرگذار بوده که این خود عاملی بر افزایش اندازه پلیسه است [۲۹]. از این رو، در مقایسه با حالت تک-نازله، تشکیل پلیسه‌های بزرگتر در حالت دو-نازله می‌تواند ناشی از ارتعاشات بیشتر میکرو ابزار به علت استفاده از نازل‌های پاششی در

سطح را نتیجه داده است. اختلاف موجود در مقادیر زبری سطح ناشی از عوامل سایش و انحراف ابزار می‌تواند باشد. سایش کمتر ابزار و حفظ شرایط تیزی ابزار در شرایط روانکاری کمینه، موجب دستیابی به کیفیت سطح بهتر شده است و این در حالی است که افزایش نیروهای برشی در شرایط خشک و تر، با انحراف بیشتر ابزار موجب خراب شدن سطح ماشینکاری شده می‌شوند. این برتری حتی در سرعت‌های برشی و عمق برشی بالاتر می‌تواند چشمگیرتر باشد.

تصاویر مربوط به توپوگرافی سطوح میکروفزکاری شده در شرایط مختلف روانکاری در شکل ۹ آورده شده است. در مقایسه میان روانکاری‌های مختلف مشاهده شده است که روانکاری کمینه در مقایسه با روانکاری تر و بخصوص خشک، به علت سایش کمتر ابزار و تیز بودن لبه برنده و همچنین عدم تشکیل لبه انباشته، سطحی یکنواخت‌تر و منظم‌تر تولید کرده است.

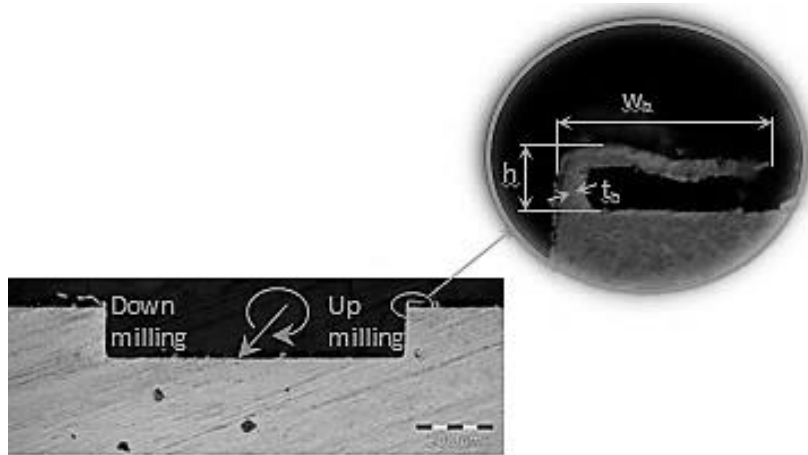
### ۳-۴- میکرو پلیسه

تشکیل پلیسه در شرایط مختلف روانکاری به صورت کیفی و کمی مورد ارزیابی قرار گرفت. سه پارامتر مهم تعیین کننده هندسه پلیسه عبارتند از: عرض پلیسه ( $W_p$ )، ارتفاع پلیسه ( $h_p$ ) و ضخامت پلیسه ( $t_p$ ) (شکل ۱۰). در این تحقیق عرض پلیسه عمود بر راستای پیشروی اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه عرض میکرو پلیسه در طول شیار یکسان نیست، لذا برای اطمینان از اندازه‌گیری درست آن، سطح بالای شیار با استفاده از پروفایلر سه‌بعدی اسکن شده و عرض پلیسه در ۱۰ محل مختلف در طول شیارها، اندازه‌گیری و میانگین آنها برای تحلیل استفاده شد. از آنجاکه تشکیل پلیسه در دو سمت دیواره با توجه به دو نوع باربرداری مختلف موافق<sup>۱</sup> و مخالف<sup>۲</sup> در آنها متفاوت خواهد بود، لذا در این تحقیق به مقایسه مشخصه‌های پلیسه در هر دو سمت پرداخته شده است.

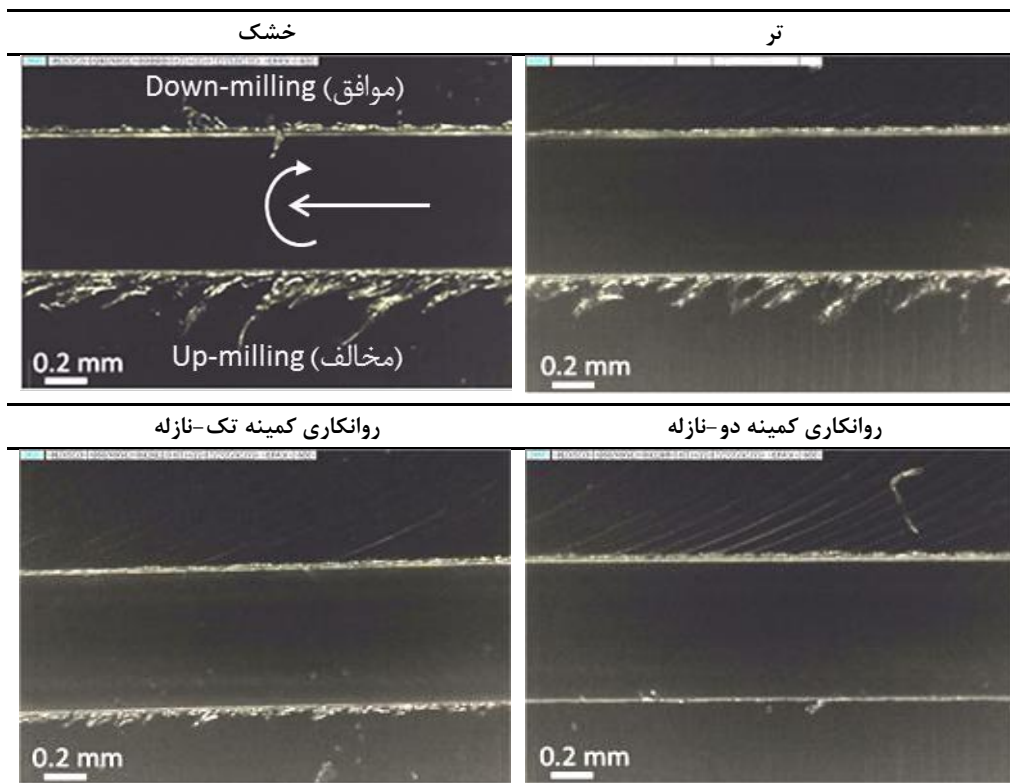
تصاویر گرفته شده از نمونه‌ها جهت مقایسه کیفی عرض پلیسه در شکل ۱۱ آورده شده است. بیشترین عرض پلیسه در شرایط خشک و بدنبال آن در شرایط تر، روانکاری کمینه تک-نازله و دو-نازله ایجاد شد. با توجه به اینکه شرایط آزمایش در پیشروی ۶ میکرومتر بر دندانه (تقریباً در اندازه‌های شعاع لبه برنده ابزار که ۶/۲۶ میکرون است) انجام گرفت، لذا در تمامی شرایط روانکاری مورد استفاده به

- 1 Down-milling
- 2 Up-milling





شکل ۱۰: مشخصه‌های هندسی پلیسه



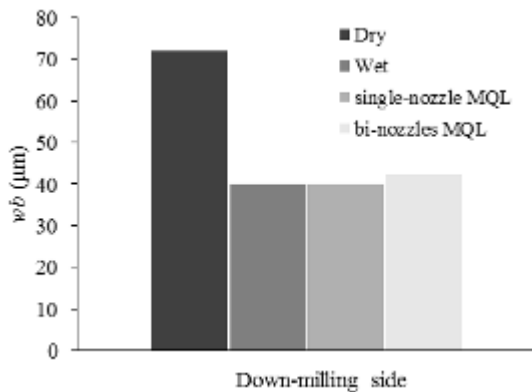
شکل ۱۱: تأثیر شرایط مختلف روانکاری بر اندازه میکرو پلیسه

می‌تواند باشد [۳۲ و ۳۳]. در نیم دور چرخش ابزار که به صورت باربرداری مخالف انجام می‌گیرد، براده برداشته به قدری نازک است که ابزار تمایل به سر خوردن روی ماده دارد و تا زمان رسیدن به مقدار کمینه ضخامت براده<sup>۱</sup> مورد نیاز برای شروع برش، سازوکار شخم‌زنی و ساییدن ماده انجام می‌گیرد که این امر در نهایت با تغییر شکل بیشتر

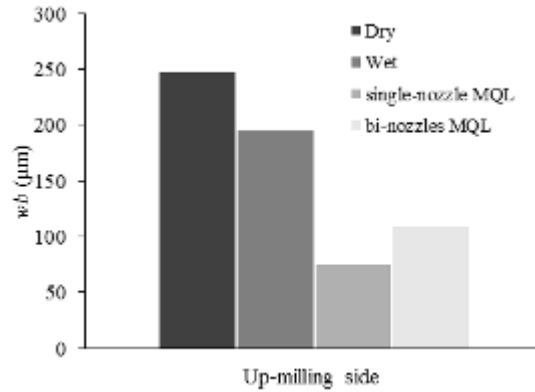
1 Minimum chip thickness

دو طرف ابزار باشد. در مورد حالت فرزکاری نیز، مستقل از نوع روانکار بکار رفته، پلیسه‌های بسیار بزرگتری در سمت مخالف تشکیل شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) که مشابه نتایجی است که دودزینسکی [۳۰] و اوزیل [۳۱] در میکروفزکاری آلیاژ تیتانیوم گزارش کردند. اختلاف اندازه پلیسه در دو حالت فرزکاری ناشی از سازوکارهای تشکیل پلیسه و ارتعاشات





(ب)



(الف)

شکل ۱۲: اندازه عرض پلیسه (الف) سمت مخالف (ب) سمت موافق

- روانکاری کمینه عملکرد مؤثری در خنک کاری و روانکاری حین میکروفرزکاری این آلیاژ داشت، این در حالی است که شرایط تر برخلاف روش‌های فرزکاری معمولی نقش چندان مؤثری بر خنک کاری نداشته است. دلیل این امر، عدم توانایی سیال برشی در نفوذ مؤثر به درون ناحیه کوچک برش در میکروفرزکاری بوده است.
- بیشترین اندازه نیروهای برشی در شرایط خشک و سپس تر بوده است، درحالیکه هر دو حالت روانکاری کمینه تک-نازله و دو-نازله کمترین نیروهای برشی را نتیجه دادند.
- بیشترین سایش ابزار در شرایط خشک و سپس تر بوجود آمد که شامل چسبیدن براده به ابزار و تشکیل لبه انباشته بود. در حالیکه در استفاده از روانکاری کمینه، بخصوص در هنگام استفاده از دو نازل پاششی، کمترین سایش ابزار بدست آمد.
- در مورد زبری سطح، بهترین و بدترین صافی سطح به ترتیب در میکروفرزکاری در شرایط روانکاری کمینه و خشک بدست آمد و استفاده از روانکاری کمینه با دو نازل پاششی بهترین عملکرد را در بهبود کیفیت سطح داشته است.
- در تمامی شرایط روانکاری بکار رفته در این تحقیق، میکرو پلیسه‌هایی مشاهده شد که در این بین روانکاری کمینه بهترین عملکرد را در کاهش اندازه پلیسه‌های تشکیل شده داشته است. اختلاف چشمگیری در اندازه میکرو پلیسه‌های تشکیل شده در استفاده از پاشش تک-نازله و دو-نازله مشاهده نشد.
- میکرو شیارهای دقیق‌تری در استفاده از روانکاری کمینه بدست آمد بطوری‌که استفاده از شرایط خشک و تاحدی نیز شرایط

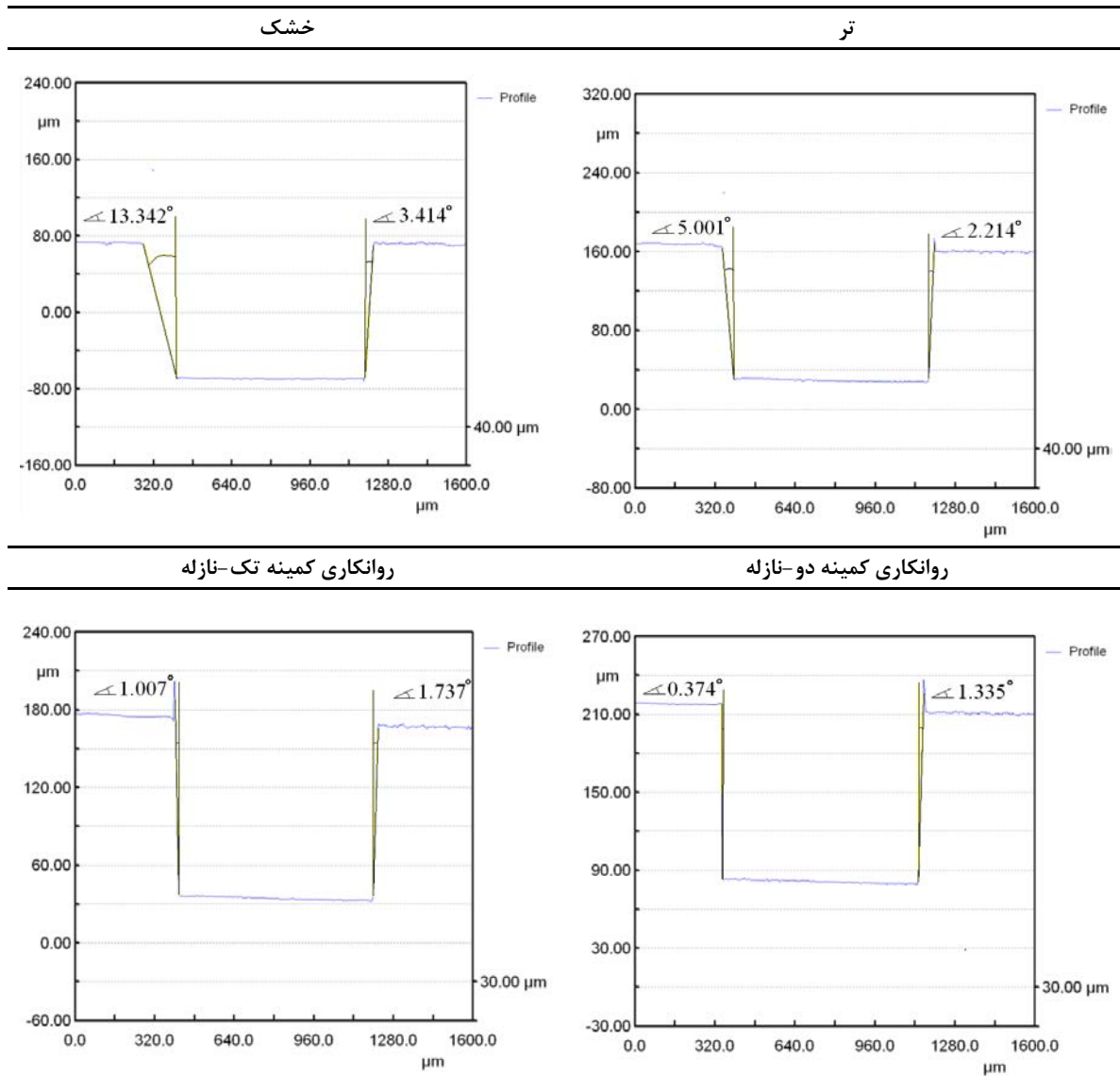
ماده موجب افزایش اندازه پلیسه‌های تشکیل یافته می‌شود.

#### ۵-۳- دقت ابعادی

تأثیر شرایط مختلف روانکاری بر دقت ابعادی شیارها و شکل هندسی آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۱۳، مقطع عرضی شیارهای ایجاد شده را در قسمت میانی در شرایط مختلف روانکاری نشان می‌دهد. به منظور مقایسه کمی دقت ابعادی شیارها، زاویه دیواره در دو طرف شیارها با استفاده از پروفایلر سه بعدی اندازه‌گیری و آورده شده است. بهترین دقت ابعادی در استفاده از روانکاری‌های کمینه بدست آمده است و این در حالی است که میکرو شیارهای زده شده در حالت خشک از دقت ابعادی چندان بر خوردار نبوده و بجای مقطع مربعی، تقریباً دوزنقه‌ای شکل شدند. از مهمترین علل کاهش دقت ابعادی شیارهای زده شده، افزایش انحراف ابزار ناشی از نیروهای اعمالی بیشتر، سایش شدیدتر ابزار برشی و همچنین تشکیل لبه انباشته را می‌توان برشمرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر شرایط مختلف روانکاری و خنک کاری بر مشخصه‌های مختلف زبری، میکرو پلیسه، سایش ابزار، نیروی برشی و دقت ابعادی میکروشیارها در میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V مورد ارزیابی قرار گرفت. شرایط خشک، تر و روانکاری کمینه به صورت‌های تک نازله و دونازله بکار گرفته شدند و نتایج زیر حاصل گردید:



شکل ۱۳: تصاویر شکل هندسی میکروشیارها در شرایط مختلف روانکاری

آزمایش‌ها و تحلیل نتایج نهایت همکاری را با نویسندگان این مقاله داشتند، سپاسگزاری می‌گردد.

### مراجع

- [1] Ding, Hongtao, Ninggang Shen, and Yung C. Shin. "Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys." *Journal of Materials Processing Technology* 212.3 (2012): 601-613.
- [2] Shokrani, Alborz, Vimal Dhokia, and Stephen T. Newman. "Environmentally conscious machining of

تر، منجر به تشکیل میکرو شیارهای دوزنقه‌ای شکل شدند.  
 - در نهایت، بهترین عملکرد در استفاده از روانکاری کمینه با دو نازل پاششی بدست آمد که سایش کمتر ابزار و کیفیت بهتر سطح میکروفرزکاری شده را نتیجه داده است.

### تقدیر و تشکر

از شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی با توجه به پشتیبانی و حمایت مالی صورت گرفته، تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از پرسنل محترم آزمایشگاه ماشینکاری دانشگاه سابانچی استانبول و مسئول آزمایشگاه نمونه‌سازی مواد در دانشگاه تربیت مدرس که در انجام

- [13] Jun, Martin B., et al. "An experimental evaluation of an atomization-based cutting fluid application system for micromachining." *Journal of manufacturing science and engineering* 130.3 (2008): 031118.
- [14] Heisel, Uwe, et al. "Application of minimum quantity cooling lubrication technology in cutting processes." (1994).
- [15] Sadeghi, M. H., et al. "An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique." *International Journal of Material Forming* 3.4 (2010): 241-251.
- [16] Frățilă, Domnița Florina, and Cristian Caizar. "Assessment of cooling effect and surface quality to face milling of AlMg3 using several cooling lubrication methods." *Materials and Manufacturing Processes* 27.3 (2012): 291-296.
- [17] Cai, Xiao Jiang, et al. "An experimental investigation on effects of minimum quantity lubrication oil supply rate in high-speed end milling of Ti-6Al-4V." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 226.11 (2012): 1784-1792.
- [18] Sun, J., et al. "Effects of coolant supply methods and cutting conditions on tool life in end milling titanium alloy." *Machining Science and Technology* 10.3 (2006): 355-370.
- [19] Liu, Z. Q., et al. "Investigation of cutting force and temperature of end-milling Ti-6Al-4V with different minimum quantity lubrication (MQL) parameters." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 225.8 (2011): 1273-1279.
- [20] Su, Y., et al. "Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47.6 (2007): 927-933.
- [21] Karpat, Yiğit. "Temperature dependent flow softening of titanium alloy Ti6Al4V: An investigation using finite element simulation of machining." *Journal of Materials Processing Technology* 211.4 (2011): 737-749.
- difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 57 (2012): 83-101.
- [3] Kundrák, J., et al. "Environmentally friendly precision machining." *Materials and manufacturing processes* 21.1 (2006): 29-37.
- [4] Oberg, Erik, and Erik Oberg. *Machinery's Handbook & Guide to Machinery's Handbook*. Industrial Press, 2008.
- [5] Adler, D. P., et al. "Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns." *Machining Science and technology* 10.1 (2006): 23-58.
- [6] Çakır, O., et al. "Selection of cutting fluids in machining processes." *Journal of Achievements in materials and Manufacturing engineering* 25.2 (2007): 99-102.
- [7] Singh, Talwinder, et al. "A review of near dry machining/minimum quantity lubrication machining of difficult to machine alloys." *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 18.3 (2016): 213-251.
- [8] Sharma, Vishal S., GurRaj Singh, and Knut Sørby. "A review on minimum quantity lubrication for machining processes." *Materials and manufacturing processes* 30.8 (2015): 935-953.
- [9] Revuru, Rukmini Srikant, et al. "Application of cutting fluids in machining of titanium alloys—a review." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 1-22.
- [10] Klocke, F. A. E. G., and G. Eisenblätter. "Dry cutting." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 46.2 (1997): 519-526.
- [11] Dawood, Abdulhameed, Gregory K. Arbuckle, and Muhammad P. Jahan. "A comparative study on the machinability of Ti-6Al-4V using conventional flood coolant and sustainable dry machining." *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 17.6 (2015): 507-528.
- [12] Byers, Jerry P., ed. *Metalworking fluids*. Crc Press, 2016.

- “Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel.” *Procedia CIRP* 1 (2012): 190-195.
- [29] Zheng, Xiaohu, et al. “Experimental study on micro-milling of Ti6Al4V with minimum quantity lubrication.” *International Journal of Nanomanufacturing* 9.5-6 (2013): 570-582.
- [30] Piquard, Romain, et al. “Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation.” *Precision Engineering* 38.2 (2014): 356-364.
- [31] Thepsonthi, Thanongsak, and Tuğrul Özel. “Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 63.9-12 (2012): 903-914.
- [32] Aramcharoen, A., and P. T. Mativenga. “Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel.” *Precision Engineering* 33.4 (2009): 402-407.
- [33] Mian, Aamer J., Nicholas Driver, and Paul T. Mativenga. “A comparative study of material phase effects on micro-machinability of multiphase materials.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 50.1 (2010): 163-174.
- [22] Basturk, S., et al. “Titanium machining with new plasma boronized cutting tools.” *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 59.1 (2010): 101-104.
- [23] Zhao, Wei, Ning He, and Liang Li. “High speed milling of Ti6Al4V alloy with minimal quantity lubrication.” *Key engineering materials*. Vol. 329. Trans Tech Publications, 2007.
- [24] Li, Kuan-Ming, and Shih-Yen Chou. “Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling.” *Journal of materials processing technology* 210.15 (2010): 2163-2170.
- [25] Jun, M., et al. “Experimental investigation of machinability and tool wear in micro-endmilling.” *Trans of NAMRI/SME* 36 (2008): 201-208.
- [26] Arizmendi, M., et al. “Model for surface topography prediction in peripheral milling considering tool vibration.” *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 58.1 (2009): 93-96.
- [27] Arizmendi, M., et al. “Model development for the prediction of surface topography generated by ball-end mills taking into account the tool parallel axis offset. Experimental validation.” *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 57.1 (2008): 101-104.
- [28] Denkena, Berend, Jens Koehler, and Michael Rehe.