مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹۴، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۷۸-۸۱

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱۴ آبان ۱۳۹۴

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# بررسی تجربی زبری سطح حاصل از میکروفرزکاری آلیاژ Ti6Al4V تحت شرایط روان-کاری و خنک‌کاری مختلف

حامد حسن‌پور[۱]، امیر راستی[۱]، محمدحسین صادقی[۲*]، جواد هاشمی خسروشاهی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، sadeghim@modares.ac.ir

## چکیده

میکروفرزکاری روشی مناسب به منظور ساخت قطعات مینیاتوری با هندسه سه‌بعدی پیچیده است. این روش کاربرد بسیاری در تولید قطعات میکرو در تجهیزات پزشکی دارد. آلیاژهای تیتانیومی به دلیل نسبت مقاومت به وزن بالا، مقاومت به خوردگی عالی و همچنین زیست سازگاری مناسب، به‌صورت گسترده در کاربردهای پزشکی استفاده می‌شوند. به دلیل ساخت قطعات میکرو در ایمپلنت‌ها و تجهیزات پزشکی، مطالعه و بررسی میکروفرزکاری آلیاژهای تیتانیومی اهمیت بسیاری یافته است. در این مطالعه نیز زبری سطح حاصل از فرآیند میکروفرزکاری در آلیاژ Ti6Al4V مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت دورانی اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش محوری به عنوان متغیرهای برش در نظر گرفته شدند. عملیات میکروفرزکاری تحت سه سیستم روان‌کاری و خنک‌کاری مختلف مشتمل بر حالت‌های خشک، تر و حداقل سیال برشی انجام یافت. ابزار فرز انگشتی کاربایدی سرتخت به قطر ۰/۵ میلی‌متر با روکش TiAlN استفاده شد. از روش تاگوچی برای طراحی و تحلیل آزمایش استفاده گردید. نتایج نشان داد که زبری سطح در حضور سیستم حداقل سیال برشی، کمترین مقدار را دارد. همچنین مستقل از نحوه‌ی روان‌کاری و خنک‌کاری، افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی، زبری سطح را کاهش داد. مینیمم زبری سطح بدست آمده برابر با ۱۱۸ nm بوده که در شرایط سرعت دورانی ۳۰۰۰۰rpm، پیشروی ۰/۸ میکرومتر بر لبه برنده و عمق برش ۶۰ میکرومتر حاصل شده است.

***کلید واژگان:*** میکروفرزکاری، زبری سطح، آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V، روان‌کاری و خنک‌کاری

# An experimental investigation of surface roughness produced by micromilling of Ti6Al4V alloy under different lubrication and cooling conditions

**Hamed Hassanpour, Amir Rasti, Mohammad Hossein Sadeghi*, Javad Hashemi**

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran. sadeghim@modares.ac.ir

## ABSTRACT

Micromilling is a suitable method for fabrication of miniature parts with 3D complex geometries. This method has wide applications in fabricating of medical micro tools. Titanium alloys were used in medical applications extensively due to their high strength-to-weight ratio, corrosion resistance and biocompatibility. Owing to the fabricating of micro parts in implants and medical tools, studying the micromilling of titanium alloys becomes more important. In this study, the surface roughness produced by micromilling of Ti6Al4V alloy is investigated. Spindle speed, feed rate and axial depth of cut have been considered as cutting parameters. Micromilling has been done with three lubricating and cooling conditions: dry, wet and minimum quantity lubrication (MQL). TiAlN coated carbide micro-end mill tool with the diameter of 0.5mm were used. Taguchi method has been used to design and analyze the experiments. The results showed that the surface roughness is minimized by the use of the minimum quantity of lubricant. Surface roughness decreased with the increase in cutting speed and feed, regardless of the lubrication and cooling condition. The minimum surface roughness was 118 nm in the condition of spindle speed= 30000 rpm, feed rate= 0.8 µm/tooth and depth of cut= 60 µm.

***Keywords:*** Lubrication and Cooling, Micromilling, Surface Roughness, Ti6Al4V Titanium Alloy

## ۱- مقدمه

میکروفرزکاری یکی از فرآیندهای مستقیم و کم هزینه برای ساخت قطعات مینیاتوری با جنس‌های مختلف و اشکال پیچیده سه‌بعدی می‌باشد که دارای نرخ تولید بالاتری در مقایسه با سایر روش‌های موجود نظیر تکنولوژی‌های لیتوگرافی است. اصول میکروفرزکاری مشابه عملیات فرزکاری معمولی است، با این تفاوت که که از یک ابزار دوار به قطر ۵۰۰-۱۰۰ میکرومتر و شعاع نوک ۱۰-۱ میکرومتر استفاده می‌کند. با کوچک شدن مقیاس ماشین‌کاری از ماکرو به میکرو، ضخامت براده نتراشیده در حد شعاع لبه برنده ابزار کاهش پیدا می‌کند و لبه برنده را دیگر نمی‌توان تیز در نظر گرفت [۱]. تاکنون معیار مناسبی برای مقایسه قابلیت میکروماشین‌کاری مواد مختلف منتشر نشده

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

**Please cite this article using:**

H. Hassanpour, A. Rasti, M.H. Sadeghi, J. Hashemi An experimental investigation of surface roughness produced by micromilling of Ti6Al4V alloy under different lubrication and cooling conditions, Modares Mechanical Engineering, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 78-81, 2015 (in Persian فارسی)

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.70.0 ]

است. به‌دلیل وجود نقش تأثیر اندازه در فیزیک فرآیند، دانش و تجربه موجود در فرآیندهای ماکروماشین‌کاری را نمی‌توان مستقیماً به‌کار گرفت. از این‌رو تحقیقاتی در زمینه‌های مختلف جهت تعیین ارتباط بین پارامترهای ماشین‌کاری و خروجی‌های آن نظیر سلامت سطح در دست انجام است [۲-۴].

از سوی دیگر، انتخاب صحیح سیال برشی در عین اثرگذاری بر کاهش اصطکاک و گرمای محیط ماشین‌کاری، روی دقت و سلامت سطح تولیدی نیز نقش مهمی را ایفا می‌کند. تأثیر روان‌کاری در عملیات ماشین‌کاری، به شدت وابسته به انتخاب نوع سیال روان‌کار و سیستم پاشش آن بر محیط برش است. انواع روش‌های روان‌کاری که امروزه برای ماشین‌کاری مواد مختلف بکار گرفته می‌شوند شامل سیستم‌های خشک[1]، تر[2]، حداقل سیال برشی[3] و روش‌های برودتی می‌باشند [۵].

صنعت تیتانیوم از اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰ به سرعت پیشرفت کرد که دلیل عمده‌ی آن نیاز صنعت هوافضا بود. انگیزه اصلی این رشد، سبکی تیتانیوم است، به‌طوری‌که بیشترین نسبت استحکام به وزن مخصوص در طراحی مواد، مربوط به تیتانیوم و آلیاژهای آن می‌باشد. کاربرد دیگر این آلیاژها، در ایمپلنت‌های پزشکی است که دلیل این امر، مقاومت به خوردگی استثنایی آن‌ها می‌باشد. اما از سوی دیگر، قابلیت هدایت حرارتی آلیاژهای پایه تیتانیوم، ۳ تا ۸ برابر کمتر از فولاد است، که این امر حرارت بسیار زیادی را در موضع ماشین‌کاری ایجاد می‌کند. همچنین این آلیاژها بسیار داکتیل بوده و در حین ماشین‌کاری به راحتی دچار کارسختی می‌شوند. این امر کاهش سلامت سطحی قطعات تولیدی را در پی خواهد داشت [۶-۸].

در همین راستا بیرمن [۹]، در آزمایش تجربی تشکیل پلیسه در میکروشیارتراشی فولاد زنگ نزن X5CrNi18-10 توسط ابزار کاربراید دو پره با قطر ۰/۵ میلی‌متر را بررسی کرد و نشان داد که هندسه ابزار، استراتژی ماشین‌کاری، سرعت های پیشروی و برشی و نوع روان‌کاری روی تشکیل پلیسه تأثیرگذار است.

انجی و همکارانش [۱۰] به مطالعه تجربی میکروفرزکاری پرداخته و گزارش کردند که زبری سطح در ضخامت‌های براده نتراشیده بزرگتر از شعاع لبه، افزایش می یابد. این می‌تواند به علت تأثیر فرآیند شخم زنی باشد. فرآیند شخم زنی موجب کنار زدن مواد به کناره و جلوی ابزار شده و سطحی خشن‌تر در مقایسه با عملیات برش ایجاد می‌کند.

تاکنون کارهای تحقیقاتی اندکی در زمینه میکروفرزکاری آلیاژ Ti6Al4V گزارش شده است. بنابراین نیاز است تا اطلاعات تکنولوژیکی برای فرآیند میکروفرزکاری این آلیاژ پراهمیت توسعه داده شود. از این‌رو در تحقیق حاضر، زبری سطح آلیاژ Ti6Al4V در فرآیند میکروفرزکاری به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. طرح آزمایش تاگوچی با سه پارامتر سرعت اسپیندل، پیشروی و عمق برش محوری، در سه سطح و با استفاده از سه نوع سیستم روان‌کاری و خنک‌کاری مختلف شامل سیستم‌های خشک، تر و MQL انتخاب شد. در نهایت شرایط بهینه ماشین‌کاری براساس معیار حداقل زبری سطح استخراج شدند.

## ۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش

در این تحقیق آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V آنیل شده با سختی ۳۰۰HV مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها روی نمونه‌های مکعبی از این جنس و به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ میلی‌متر با وجوه سنگ خورده انجام گرفت. ابزار به کار رفته در آزمایش‌ها، فرز انگشتی سرتخت سه لبه از جنس کاربید تنگستن با پوشش TiAlN به قطر ۰/۵میلی‌متر، زاویه مارپیچ ۳۰ درجه و شعاع نوک ابزار ۴ میکرومتر ساخت شرکت همتولز[4] بود. تمامی آزمایش‌ها روی ماشین فرز CNC چهار محور کنترل همزمان مایکرون[5] مدل UCP710 با حداکثر دور اسپیندل ۴۲۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. تصویر مربوط به تجهیزات آزمایش‌های میکروفرزکاری در شکل ۱ آمده است.

روغن برشی مورد استفاده در حالت‌های روان‌کاری و خنک‌کاری تر و MQL، روغن بهران برشی ۱۱ با گرانروی ۲۴ سانتی استوکس در ۴۰ درجه سانتی‌گراد، نقطه اشتعال ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و چگالی ۸۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب در ۱۵ درجه سانتی‌گراد بود. سیستم روان‌کاری با دو نازل و با زاویه ۳۰ درجه نسبت به ابزار قرار گرفته بود. دبی جریان نیز ۲۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت و فشار ۶ بار بود.

در ادامه، آزمایش‌های فرزکاری با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی طرح‌ریزی شدند. سه پارامتر ماشین‌کاری شامل سرعت دورانی اسپیندل ($n$)، پیشروی بر دندانه ($f_z$) و عمق برش محوری ($a_p$) در ۳ سطح تغییر داده شدند. در جدول ۱، پارامترهای ماشین‌کاری، تعداد سطوح و مقادیر آن‌ها آمده است. آزمایش‌ها در حالت فرزکاری موافق و در سه حالت روان‌کاری و خنک‌کاری خشک، تر و MQL انجام شدند. تعداد ۹ آزمایش از این طرح آزمایش بدست آمد که با فرض سه حالت روان‌کاری و خنک‌کاری، جمعاً ۲۷ آزمایش تجربی در این تحقیق انجام گرفت.

زبری سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده با استفاده از دستگاه زبری‌سنج مار مدل ام۲[6] با طول کورس ۵/۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای تعیین زبری سطح هر نمونه، زبری‌سنجی در ۳ مرتبه و در محل‌های مختلف مربوط به هر آزمایش، انجام و میانگین به عنوان زبری سطح متوسط ($Ra$) ارائه گردید.

**شکل ۱** تجهیزات آزمایش‌های میکروفرزکاری

**جدول ۱** پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آن‌ها

| پارامترهای ماشین‌کاری | سطوح | | |
|---|---|---|---|
| | ۱ | ۲ | ۳ |
| عمق برش محوری ($a_p$) (µm) | ۲۰ | ۶۰ | ۱۰۰ |
| سرعت پیشروی ($f_z$) (µm/tooth) | ۰/۲ | ۰/۵ | ۰/۸ |
| دوران اسپیندل $n$ (rpm) | ۱۰۰۰۰ | ۲۰۰۰۰ | ۳۰۰۰۰ |

1. Dry
2. Wet
3. Minimum Quantity Lubrication (MQL)
4. HAMTools
5. Mikron
6. Mahr-Perthometer M2



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-27 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.70.0 ]

## ۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا تأثیر پارامترهای برشی مختلف نظیر سرعت اسپیندل، پیشروی و عمق برش محوری، ارزیابی شده و پس از آن، نقش سیستم‌های روان‌کاری و خنک‌کاری اعم از حالت‌های خشک، تر و MQL روی زبری مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. جدول ۲ مقادیر پارامترهای برش را به همراه عدد زبری اندازه‌گیری شده در هر آزمایش نشان می‌دهد. بیشترین مقدار زبری ۰/۳۳۴ میکرومتر مربوط به شرایط خشک و در سرعت دورانی ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۰/۲ میکرومتر بر لبه برنده و عمق برش ۲۰ میکرومتر بود. کمترین میزان زبری نیز برابر با ۰/۱۱۸ میکرومتر و در سیستم MQL، سرعت دورانی ۳۰۰۰۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۰/۸ میکرومتر بر لبه برنده و عمق برش ۶۰ میکرومتر حاصل شد.

شکل ۲ تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر زبری سطح قطعات میکروفرزکاری شده را نشان می‌دهد. سرعت دوران اسپیندل با ضریب تاثیر ۶۹/۳۵٪ در شرایط خشک، ۶۶/۸۵٪ در شرایط روان‌کاری و خنک‌کاری تر و ۱۱۵/۲۷٪ در سیستم MQL، بیش‌ترین تاثیر را بر زبری سطح آلیاژ Ti6Al4V در فرآیند میکروفرزکاری داشت. دلیل این امر را می‌توان آسان‌تر شدن تغییر شکل پلاستیک ماده، افت تنش سیلان و کاهش اصطکاک در سطوح تماس به دلیل افزایش درجه‌حرارت دانست. علاوه بر این، افزایش سرعت برشی با کاهش احتمال تشکیل لبه انباشته موجب بهبود صافی سطح می‌گردد.

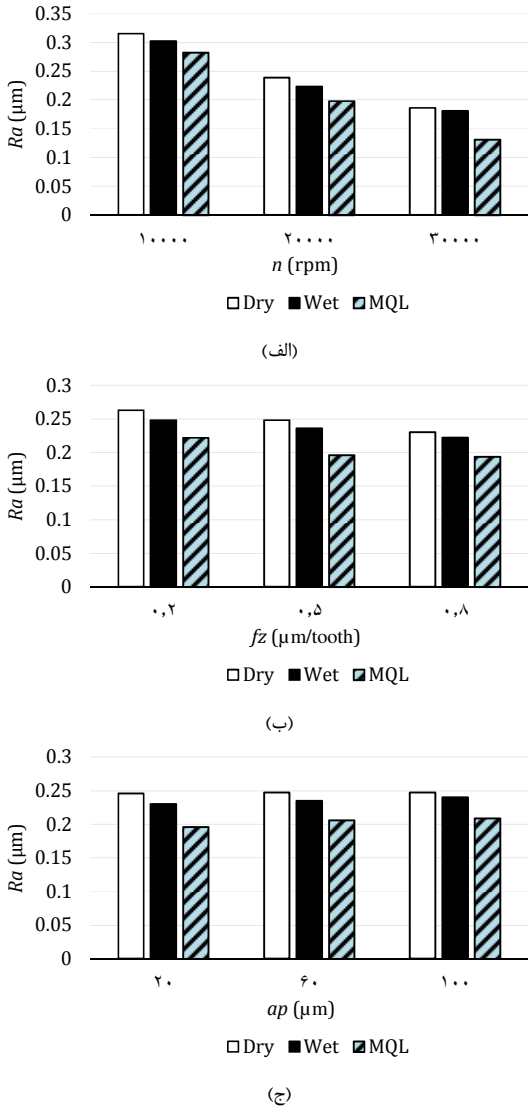
با افزایش پیشروی نیز زبری سطح کاهش یافت. دلیل این پدیده را می‌توان کاهش اثر اندازه در پیشروی‌های بالاتر دانست. در واقع، وقتی ضخامت براده نتراشیده در مقایسه با شعاع نوک ابزار خیلی کوچک باشد، اثرات اندازه و نیروهای شخم‌زنی چشمگیرتر خواهند بود. پدیده شخم‌زنی در ضخامت براده نتراشیده‌ی کوچک‌تر (پیشروی کمتر)، حاکم بر مکانیزم برش بوده و منجر به جریان پلاستیک غیریکنواخت ماده و زبری بیشتر آن می‌گردد. از سوی دیگر در فرآیند میکروفرزکاری و در مقیاس میکرو، ناهمگن بودن خواص قطعه‌کار، تغییرات سختی ماده و نیز کوچک بودن مدول خمشی ابزار، موجب بروز ارتعاشات بیشتر در مقایسه با فرزکاری معمولی می‌شود. معمولاً این اثرات در پیشروی و سرعت‌های برشی پایین‌تر برجسته‌تر بوده و منجر به زبری سطح بیشتر می‌گردد [۱۱]. ضریب تاثیر سرعت پیشروی بر زبری سطح نیز در شرایط خشک ۱۴/۳۵٪، در حالت تر ۱۱/۷۱٪ و در سیستم MQL ۱۴/۴۳٪ بود. همچنین عمق برشی، با ضریب تاثیر ۰/۴۱٪ در شرایط خشک، ۴/۱۷٪ در شرایط روان‌کاری و خنک‌کاری تر و ۶/۶۳٪ در شرایط MQL، اثر ناچیزی روی زبری سطح نمونه‌های میکرو فرزکاری داشت.

**جدول ۲** نتایج زبری‌سنجی به همراه شرایط ماشین‌کاری

| شماره آزمایش | پارامترها و سطوح | | | *Ra* (µm) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $n$ (rpm) | $f_z$ (µm/tooth) | $a_p$ (µm) | Dry | Wet | MQL |
| ۱ | ۱۰۰۰۰ | ۰/۲ | ۲۰ | ۰/۳۳۴ | ۰/۳۱۱ | ۰/۲۸۸ |
| ۲ | ۱۰۰۰۰ | ۰/۵ | ۶۰ | ۰/۳۱۶ | ۰/۳۰۲ | ۰/۲۷۴ |
| ۳ | ۱۰۰۰۰ | ۰/۸ | ۱۰۰ | ۰/۲۹۵ | ۰/۲۹۲ | ۰/۲۸۵ |
| ۴ | ۲۰۰۰۰ | ۰/۲ | ۶۰ | ۰/۲۵۲ | ۰/۲۳۴ | ۰/۲۲۶ |
| ۵ | ۲۰۰۰۰ | ۰/۵ | ۱۰۰ | ۰/۲۴۴ | ۰/۲۳۱ | ۰/۱۹۱ |
| ۶ | ۲۰۰۰۰ | ۰/۸ | ۲۰ | ۰/۲۲۱ | ۰/۲۰۳ | ۰/۱۷۸ |
| ۷ | ۳۰۰۰۰ | ۰/۲ | ۱۰۰ | ۰/۲۰۲ | ۰/۱۹۸ | ۰/۱۵۲ |
| ۸ | ۳۰۰۰۰ | ۰/۵ | ۲۰ | ۰/۱۸۳ | ۰/۱۷۵ | ۰/۱۲۳ |
| ۹ | ۳۰۰۰۰ | ۰/۸ | ۶۰ | ۰/۱۷۴ | ۰/۱۷۰ | ۰/۱۱۸ |

همچنین در شکل ۲ مشاهده می‌شود که سیستم MQL و حالت خشک، به ترتیب دارای بهترین و بدترین صافی سطح می‌باشند. کاهش زبری در حالت روان‌کاری و خنک‌کاری تر در فرزکاری معمولی، به‌دلیل خنک‌کاری بهتر آن امری بدیهی است [۱۲]. ولی نتایج زبری بدست آمده از فرآیند میکروفرزکاری در این تحقیق بیانگر برتری ناچیز حالت تر نسبت به حالت خشک می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان کوچک بودن قطر ابزار و کم بودن حجم باربرداری در مقیاس میکرو دانست که موجب کاهش گرمای تولیدی حین فرآیند و کم‌رنگ تر شدن اثر خنک‌کنندگی سیال برشی می‌شود [۱۴،۱۳].

همان‌طور که قبلاً بیان شد، استفاده از سیستم MQL در فرآیند میکرو فرزکاری این آلیاژ با این شرایط آزمایش، دارای کمترین زبری بود. علت این امر، موثر بودن فشار پاشش روغن به علت کوچک بودن منطقه برش و روان‌کاری و خنک‌کاری موثرتر آن در مقایسه با دو حالت خشک و تر می‌باشد. این برتری خصوصاً در سرعت‌های برشی بالا چشمگیرتر است.




**شکل ۲** تغییرات زبری سطح با الف) دوران اسپیندل ب) نرخ پیشروی ج) عمق برش محوری، تحت شرایط روان‌کاری و خنک‌کاری مختلف

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-27 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.70.0 ]

## ٤- نتیجه‌گیری

رسانایی حرارتی کم تیتانیوم مانع از انتقال موثر حرارت تولیدی حین ماشین‌کاری از طریق قطعه‌کار و براده می‌شود، از این‌رو حرارت تولیدی بایستی از طریق ابزار و سیال برشی منتقل گردد. انتخاب محیط ماشین‌کاری و شرایط برش از مهم‌ترین فاکتورهای بهبود سلامت سطح در فرآیند میکروفرزکاری می‌باشند و در این تحقیق اثرات این پارامترها در قالب سرعت برشی، پیشروی و عمق برش محوری در حضور سه نوع سیستم روان‌کاری و خنک‌کاری خشک، تر و MQL بر زبری سطح ماشین‌کاری شده‌ی آلیاژ Ti6Al4V مورد ارزیابی قرار گرفته است. خلاصه نتایج بدست آمده به صورت زیر می‌باشند:

۱) در بین پارامترهای برشی، سرعت برشی به عنوان موثرترین پارامتر روی زبری سطح آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V تشخیص داده شد. افزایش سرعت برشی به دلیل آسان‌تر شدن تغییر شکل پلاستیک ماده، افت تن سیلان، کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه و همچنین کاهش احتمال تشکیل لبه انباشته باعث بهبود صافی سطح شد.

۲) مستقل از نوع روان‌کار و خنک‌کار، زبری سطح با افزایش سرعت برشی و پیشروی و نیز کاهش عمق برش محوری بهبود پیدا کرده است.

۳) زبری سطح بدست آمده در حضور حداقل سیال برشی (MQL) به دلیل موثر بودن فشار پاشش روغن همواره بهتر از شرایط خشک و یا تر بوده است و این تأثیر در سرعت‌های برشی بالا برجسته‌تر است.

۴) مینیمم زبری سطح بدست آمده برابر با $Ra$= ۱۱۸ nm بوده و در شرایط سرعت دورانی ۳۰۰۰۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۰/۸ میکرومتر بر لبه برنده و عمق برش ۶۰ میکرومتر حاصل شده است.

## ٥- مراجع


[1] M. P. Vogler, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part II: Cutting force prediction, *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Vol. 126, No. 4, pp. 695-705, 2004.

[2] F. Klocke, G. Eisenblätter, Dry cutting, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 46, No. 2, pp. 519-526, 1997.

[3] M. P. Vogler, R. E. DeVor, S. G. Kapoor, On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part I: Surface generation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Vol. 126, No. 4, pp. 685-694, 2004.

[4] H. Weule, V. Hüntrup, H. Tritschler, Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 50, No. 1, pp. 61-64, 2001.

[5] E. Oberg, C. J. McCauley, *Machinery's Handbook & Guide to Machinery's Handbook*: Industrial Press, 2004.

[6] K. Weinert, V. Petzoldt, Machining NiTi micro-parts by micro-milling, *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 481, pp. 672-675, 2008.

[7] T. Thepsonthi, T. Özel, Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 63, No. 9-12, pp. 903-914, 2012.

[8] T. Özel, T. Thepsonthi, D. Ulutan, B. Kaftanoğlu, Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti–6Al–4V alloy with uncoated and cBN coated micro-tools, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 60, No. 1, pp. 85-88, 2011.

[9] D. Biermann, M. Steiner, Analysis of micro burr formation in austenitic stainless steel X5CrNi18-10, *Procedia CIRP,* Vol. 3, pp. 97-102, 2012.

[10] C. K. Ng, S. N. Melkote, M. Rahman, A. S. Kumar, Experimental study of micro-and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 46, No. 9, pp. 929-936, 2006.

[11] G. Zhang, S. Kapoor, Dynamic generation of machined surfaces, part 2: construction of surface topography, *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Vol. 113, No. 2, pp. 145-153, 1991.

[12] Y. Su, N. He, L. Li, A. Iqbal, M. Xiao, S. Xu, B. Qiu, Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 47, No. 6, pp. 927-933, 2007.

[13] Y. Karpat, Temperature dependent flow softening of titanium alloy Ti6Al4V: An investigation using finite element simulation of machining, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 211, No. 4, pp. 737-749, 2011.

[14] S. Basturk, F. Senbabaoglu, C. Islam, M. Erten, I. Lazoglu, T. Gulmez, Titanium machining with new plasma boronized cutting tools, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 59, No. 1, pp. 101-104, 2010.


[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-27 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.70.0 ]