



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

حامد حسن پور^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 کارشناسی ارشد، 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 سه بعدی 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، به صورت گسترده در کاربردهای پزشکی استفاده می شوند. به دلیل ساخت قطعات میکرو در ایمپلنت ها 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 روان کاری و خنک کاری مختلف مشتمل بر حالت های خشک، تر و حداقل سیال برشی انجام یافت. ابزار فرز انگشتی کاربایدی سرتخت به قطر ۰/۵ میلی متر با روکش TiAlN استفاده شد. از روش تاگوشی 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 نحوه روان کاری و خنک کاری، افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی، زبری سطح را کاهش داد. مینیمم زبری سطح پدست آمده برابر با ۱۱۸ nm بوده که در شرایط سرعت دورانی ۳۰۰۰ rpm، پیشروی ۰/۸ میکرومتر بر لبه برنده و عمق برش ۶۰ میکرومتر حاصل شده است.

کلید واژگان: میکروفرزکاری، زبری سطح، آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V، روان کاری و خنک کاری

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

با این تفاوت که از یک ابزار دوار به قطر ۵۰۰-۱۰۰ میکرومتر و شعاع نوک ۱-۱۰ میکرومتر استفاده می کند. با کوچک شدن مقیاس ماشین کاری از ماکرو به میکرو، ضخامت براده نتراشیده در حد شعاع لبه برنده ابزار کاهش پیدا می کند و لبه برنده را دیگر نمی توان تیز در نظر گرفت [۱]. تاکنون معیار مناسبی برای مقایسه قابلیت میکروماشین کاری مواد مختلف منتشر نشده

میکروفرزکاری یکی از فرآیندهای مستقیم و کم هزینه برای ساخت قطعات مینیاتوری با جنس های مختلف و اشکال پیچیده سه بعدی می باشد که دارای نرخ تولید بالاتری در مقایسه با سایر روش های موجود نظیر تکنولوژی های لیتوگرافی است. اصول میکروفرزکاری مشابه عملیات فرزکاری معمولی است،

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

است. به دلیل وجود نقش تأثیر اندازه در فیزیک فرآیند، دانش و تجربه موجود در فرآیندهای ماکروماشین کاری را نمی توان مستقیماً به کار گرفت. از این رو تحقیقاتی در زمینه های مختلف جهت تعیین ارتباط بین پارامترهای ماشین کاری و خروجی های 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 ماشین کاری، روی دقت و سلامت سطح تولیدی نیز نقش مهمی را ایفا می کند. تأثیر روان کاری در عملیات ماشین کاری، به شدت وابسته به انتخاب نوع سیال روان کار و سیستم پاشش آن بر محیط برش است. انواع روش های روان کاری که امروزه برای ماشین کاری مواد مختلف بکار گرفته می شوند شامل سیستم های خشک^۱، تر^۲، حداقل سیال برشی^۳ و روش های برودتی می باشند [۵].

صنعت تیتانیوم از اواخر دهه ی ۱۹۴۰ به سرعت پیشرفت کرد که دلیل عمده ی آن نیاز صنعت هوافضا بود. انگیزه اصلی این رشد، سبکی تیتانیوم است، به طوری که بیشترین نسبت استحکام به وزن مخصوص در طراحی مواد، مربوط به تیتانیوم و آلیاژهای آن می باشد. کاربرد دیگر این آلیاژها، در ایمپلنت های پزشکی است که دلیل این امر، مقاومت به خوردگی استثنایی آن ها می باشد. 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 ماشین کاری ایجاد می کند. همچنین این آلیاژها بسیار داکتیل بوده و در حین ماشین کاری به راحتی دچار کارسختی می شوند. 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 میکروشیار تراشی فولاد زنگ نزن X5CrNi18-10 توسط ابزار کارباید دو پره با قطر ۰/۵ میلی متر را بررسی کرد و نشان داد که هندسه ابزار، استراتژی ماشین کاری، سرعت های پیشروی و برشی و نوع روان کاری روی تشکیل پلیسه تأثیرگذار است.

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

تاکنون کارهای تحقیقاتی اندکی در زمینه میکروفورزکاری آلیاژ Ti6Al4V گزارش شده است. بنابراین نیاز است تا اطلاعات تکنولوژیکی برای فرآیند میکروفورزکاری این آلیاژ پراهمیت توسعه داده شود. از این رو در تحقیق حاضر، زبری سطح آلیاژ Ti6Al4V در فرآیند میکروفورزکاری 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 روان کاری و خنک کاری مختلف شامل سیستم های خشک، تر و MQL انتخاب شد. در نهایت شرایط بهینه ماشین کاری براساس معیار حداقل زبری سطح استخراج شدند.

۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش

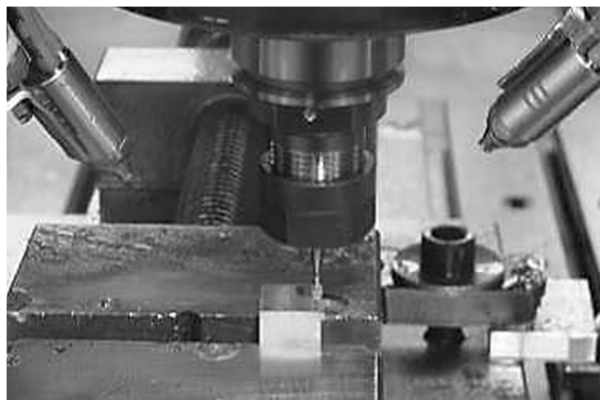
در این تحقیق آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V آنیل شده با سختی ۳۰۰HV مورد

استفاده قرار گرفت. آزمایش ها روی نمونه های مکعبی از این جنس و به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ میلی متر با وجوه سنگ خورده انجام گرفت. ابزار به کار رفته در آزمایش ها، فرز انگشتی سرتخت سه لبه از جنس کاربید تنگستن با پوشش TiAlN به قطر ۰/۵ میلی متر، زاویه ماریچ ۳۰ درجه و شعاع نوک ابزار ۴ میکرومتر ساخت شرکت همتول^۴ بود. تمامی آزمایش ها روی ماشین فرز CNC چهار محور کنترل همزمان مایکرون^۵ مدل UCP710 با حداکثر دور اسپیندل ۴۲۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. تصویر مربوط به تجهیزات آزمایش های میکروفورزکاری در شکل ۱ آمده است.

روغن برشی مورد استفاده در حالت های روان کاری و خنک کاری تر و MQL، روغن بهران برشی ۱۱ با گرانیوی ۲۴ سانتی استوکس در ۴۰ درجه سانتی گراد، نقطه اشتعال ۱۷۰ درجه سانتی گراد و چگالی ۸۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب در ۱۵ درجه سانتی گراد بود. سیستم روان کاری با دو نازل و با زاویه ۳۰ درجه نسبت به ابزار قرار گرفته بود. دبی جریان نیز ۲۴۰ میلی لیتر بر ساعت و فشار ۶ بار بود.

در ادامه، آزمایش های فرزکاری با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی طرح ریزی شدند. سه پارامتر ماشین کاری 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 ماشین کاری، تعداد سطوح و مقادیر آن ها آمده است. آزمایش ها در حالت فرزکاری موافق و در سه حالت روان کاری و خنک کاری خشک، تر و MQL انجام شدند. تعداد ۹ آزمایش از این طرح آزمایش بدست آمد که با فرض سه حالت روان کاری و خنک کاری، جمعاً ۲۷ آزمایش تجربی در این تحقیق انجام گرفت.

زبری سطح نمونه های ماشین کاری شده با استفاده از دستگاه زبری سنج مار مدل ام ۲^۶ با طول کورس ۵/۶ میلی متر اندازه گیری شد. برای تعیین زبری سطح هر نمونه، زبری سنجی در ۳ مرتبه و در محل های مختلف مربوط به هر آزمایش، انجام و میانگین به عنوان زبری سطح متوسط (Ra) ارائه گردید.



شکل ۱ تجهیزات آزمایش های میکروفورزکاری

جدول ۱ پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آن ها			
پارامترهای ماشین کاری	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

4. HAMTools
5. Mikron
6. Mahr-Perthometer M2

1. Dry
2. Wet
3. Minimum Quantity Lubrication (MQL)

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 روان کاری و خنک کاری 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 ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۰/۸ میکرومتر بر لبه برنده و عمق برش ۶۰ میکرومتر حاصل شد.

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

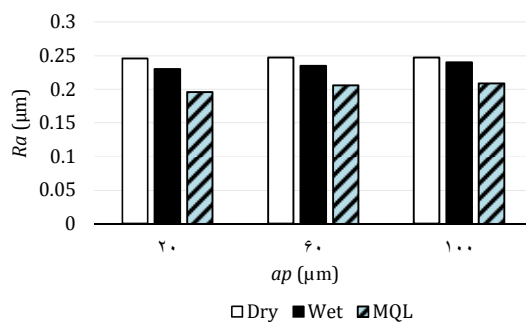
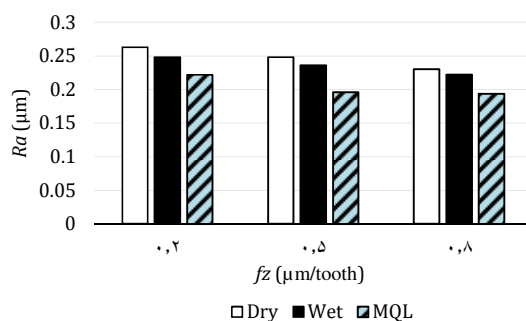
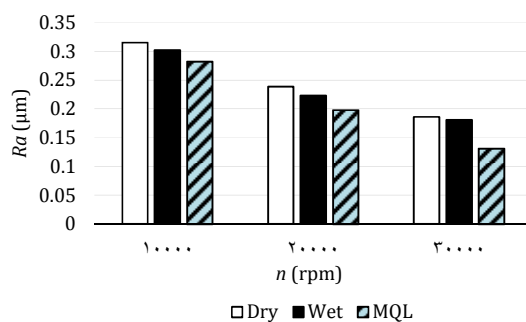
با افزایش پیشروی نیز زبری سطح کاهش یافت. دلیل این پدیده را می‌توان کاهش اثر اندازه در پیشروی‌های بالاتر دانست. در واقع، وقتی ضخامت براده نتراشیده در مقایسه با شعاع نوک ابزار خیلی کوچک باشد، اثرات اندازه و نیروهای شخم‌زنی چشمگیرتر خواهند بود. پدیده شخم‌زنی در ضخامت براده نتراشیده‌ی کوچک‌تر (پیشروی کمتر)، حاکم بر مکانیزم برش بوده و منجر به جریان پلاستیک غیریکنواخت ماده و زبری بیشتر آن می‌گردد. از سوی دیگر در فرآیند میکروفورکاری 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 تأثیر 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 تأثیر ۰/۴۱٪ در شرایط خشک، ۴/۱۷٪ در شرایط روان کاری و خنک کاری 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)		a_p (μm)	f_z ($\mu m/tooth$)	n (rpm)	
	MQL	Wet	Dry			
۱	۰/۲۸۸	۰/۳۱۱	۰/۳۳۴	۲۰	۱۰۰۰۰	
۲	۰/۲۷۴	۰/۳۰۲	۰/۳۱۶	۶۰	۱۰۰۰۰	
۳	۰/۲۸۵	۰/۲۹۲	۰/۲۹۵	۱۰۰	۱۰۰۰۰	
۴	۰/۲۲۶	۰/۲۳۴	۰/۲۵۲	۶۰	۲۰۰۰۰	
۵	۰/۱۹۱	۰/۲۳۱	۰/۲۴۴	۱۰۰	۲۰۰۰۰	
۶	۰/۱۷۸	۰/۲۰۳	۰/۲۲۱	۲۰	۲۰۰۰۰	
۷	۰/۱۵۲	۰/۱۹۸	۰/۲۰۲	۱۰۰	۳۰۰۰۰	
۸	۰/۱۲۳	۰/۱۷۵	۰/۱۸۳	۲۰	۳۰۰۰۰	
۹	۰/۱۱۸	۰/۱۷۰	۰/۱۷۴	۶۰	۳۰۰۰۰	

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 روان کاری و خنک کاری تر در فرزکاری معمولی، به دلیل خنک‌کاری بهتر آن امری بدیهی است [۱۲]. ولی نتایج زبری بدست آمده از فرآیند میکروفورکاری 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 [۱۳، ۱۴].

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 روان کاری 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 روان کاری و خنک کاری مختلف

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.

۴- نتیجه گیری

رسانایی حرارتی کم تیتانیوم مانع از انتقال موثر حرارت تولیدی حین ماشین کاری از طریق قطعه کار و براده می شود، از این رو حرارت تولیدی بایستی از طریق ابزار و سیال برشی منتقل گردد. انتخاب محیط ماشین کاری و شرایط برش از مهم ترین فاکتورهای بهبود سلامت سطح در فرآیند میکروفرزکاری می باشند و در این تحقیق اثرات این پارامترها در قالب سرعت برشی، پیشروی و عمق برش محوری در حضور سه نوع سیستم روان کاری و خنک کاری خشک، تر و MQL بر زبری سطح ماشین کاری شده ی آلیاژ Ti6Al4V مورد ارزیابی قرار گرفته است. خلاصه نتایج بدست آمده به صورت زیر می باشند:

- 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 آسان تر 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 روان کار و خنک کار، 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 سرعت های برشی بالا برجسته تر است.
- ۴) مینیمم زبری سطح بدست آمده برابر با $Ra = 118 \text{ nm}$ بوده و در شرایط سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۰/۸ میکرومتر بر لبه برنده و عمق برش ۶۰ میکرومتر حاصل شده است.

۵- 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. Uluhan, 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. Karpal, Temperature dependent flow softening of titanium alloy Ti6Al4V: An investigation using finite element simulation of machining,