



مطالعه تجربی اثر اندازه در فرایند میکروفزکاری

حامد رضایی¹، محمد حسین صادقی^{2*}، حسن خسروآبادی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی، عسلویه

* تهران، صندوق پستی 14115-143، sadeghim@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 تیر 1396

پذیرش: 29 شهریور 1396

ارائه در سایت: 28 مهر 1396

کلید واژگان:

میکروفزکاری

آلیاژ تیتانیوم

مینیمم ضخامت براده

انرژی مخصوص برش

چکیده

میکروفزکاری یکی از مهمترین فرایندهای ساخت قطعات مینیاتوری است که امروزه کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. استفاده از ابزارهای کوچکتر از 1 میلی‌متر در این فرایند باعث بروز پدیده "اثر اندازه" و مشکلات ناشی از شخم زنی در پیشروی‌های پایین می‌شود. تعیین مقدار مینیمم ضخامت براده‌ای که باعث کاهش و یا حذف اثر شخم زنی شود از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این تحقیق به بررسی نقش کاهش مقیاس در فرایندهای فرزکاری با مقیاس میکرو و ماکرو پرداخته شده است. ماده بکار رفته در این تحقیق آلیاژ تیتانیومی Ti-6Al-4V بوده است. از دو ابزار دو پره به قطرهای 0.8 و 2 میلی‌متر برای این منظور استفاده شد. تأثیر عمق برش محوری و پیشروی بعنوان پارامترهای ورودی بر مشخصه‌های خروجی فرایند نظیر انرژی مخصوص، میکروسختی، زبری سطح، توپوگرافی و تشکیل براده مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان از افزایش انرژی مخصوص برش و میکروسختی سطح ماشین‌کاری شده در مقیاس میکرو داشته است. میکروسختی سطح میکروفزکاری شده حدود 6 برابر و انرژی مخصوص برش 150% بیشتر از مقیاس ماکرو بوده است. مقدار مینیمم ضخامت براده در میکروفزکاری این آلیاژ 0.25-0.49 شعاع لبه برنده پیشنهاد می‌گردد.

An Experimental study into the size effect in micromilling process

Hamed Rezaei¹, Mohammad Hossein Sadeghi^{1*}, Hassan Khosroabadi²

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Maintenance Manager, South Pars Gas Complex, Asaluyeh, Iran

* P.O. B. 14115-143, Tehran, Iran. sadeghim@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 12 July 2017

Accepted 20 September 2017

Available Online 20 October 2017

Keywords:

Micromilling

Titanium alloy

Minimum chip thickness

Specific cutting energy

ABSTRACT

Micro end-milling is one of the main manufacturing processes of creating miniaturized parts which are increasingly in demand in many industries. Using tools with diameter less than 1 mm results in raising the so-called "size effect" and problems due to ploughing at low feeds per tooth. It is therefore crucial to estimate value of minimum chip thickness which helps to reduce or eliminate the ploughing. In this study, the role of scaling down is investigated with regard to milling operation in micro- and macro-scale. A titanium alloy Ti-6Al-4V is used as workpiece. Two-flute endmills with diameters of 0.8 and 2 mm are used, representing micro and macro-scale, respectively. Effects of axial depth of cut and feed rate as input parameters were evaluated on such output characteristics as specific cutting energy, microhardness, surface roughness, topography and chip formation. Results show higher values of microhardness and specific cutting energy in micro-scale. Microhardness and specific cutting energy in micro-scale were found to be 6 times and 150% greater than the macro-scale, respectively. The study suggests that minimum chip thickness can be varied approximately between 0.25 and 0.49 of the cutting edge radius.

1- مقدمه

"اثر اندازه" به نسبت ضخامت براده نتراشیده یا پیشروی بر شعاع لبه برنده‌ی ابزار گفته می‌شود که در مقادیر پیشروی خیلی پایین که قابل قیاس با شعاع لبه برنده است، افزایش نیروی شخم‌زنی و بدنبال آن افزایش غیرخطی انرژی مخصوص برش² را بدنبال خواهد داشت [2].

در مقایسه با فرزکاری معمولی، در شرایط میکرو که ضخامت براده نتراشیده در حد شعاع لبه برنده است، شکل‌گیری براده متأثر از مقدار مینیمم ضخامت براده‌ای³ (h_{min}) می‌شود که تعیین کننده انتقال بین دو مکانیزم برش

میکروفزکاری یکی از فرایندهای میکروماشین‌کاری از نوع مکانیکی است که در آن عموماً از ابزارهایی با قطر کمتر از 1 میلی‌متر برای ساخت قطعات مینیاتوری استفاده می‌شود. میکروفزکاری از لحاظ سینماتیکی مشابه فرزکاری معمولی است با این تفاوت که در آن بعلاوه کاهش مقیاس تفاوت‌هایی بوجود می‌آید. کاهش مقیاس از ماکرو به میکرو باعث بروز پدیده‌ی "اثر اندازه" می‌شود که تأثیر چشمگیری بر مشخصه‌های فرایند نظیر نیروی برش، سایش ابزار، سلامت سطح و تشکیل براده می‌گذارد [1].

² Specific Cutting Energy

³ Minimum Uncut Chip Thickness

¹ Size Effect

Please cite this article using:

H. Rezaei, M. H. Sadeghi, H. Khosroabadi, An Experimental study into the size effect in micromilling process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 242-248, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

چندانی در مقدار مینیمم ضخامت براده در آلیاژ آلومینیومی نداشت. در بررسی اثر خواص ماده بر مقدار مینیمم ضخامت براده، سان و همکاران [11] به مطالعه تحلیلی اثر ضریب اصطکاک در میکروفرزکاری آلیاژهای آلومینیوم، برنج و مس پرداختند. شعاع لبه برنده و ضریب اصطکاک بعنوان پارامترهای تعیین کننده در مقدار مینیمم ضخامت براده معرفی شدند. نسبت مینیمم ضخامت براده به شعاع لبه برنده برای سه ماده بین 0.18-0.24 گزارش شد.

ندیمی و کارپات [14]، به بررسی اثر لبه انباشته بر زبری و نیروی برشی حین تراشکاری متعامد آلیاژ تیتانیومی پرداختند. آنها گزارش کردند که مقدار زبری سطح به شدت وابسته به ضخامت براده نتراشیده بوده و مینیمم ضخامت براده در حضور لبه انباشته حدود 10% شعاع لبه برنده پیشنهاد شد. در جایی دیگر، دکوبو و همکاران [5] با استفاده از تغییرات انرژی مخصوص برش، مقدار مینیمم ضخامت براده را 25 درصد شعاع لبه برنده ابزار گزارش کردند.

اکثر مطالعه‌های انجام گرفته در ارتباط با مینیمم ضخامت براده در فرایندهای میکروماشین کاری تا به امروز مربوط به موادی نظیر آلومینیوم، برنج، مس و فولاد بوده است و پژوهش‌های بسیار اندکی در زمینه‌ی مواد سخت ماشین کاری شونده مانند آلیاژهای تیتانیومی صورت گرفته است. در عین حال باید اشاره داشت در تمامی کارهایی که تاکنون انجام گرفته است، تنها از روش‌های کلاسیکی استفاده شده که اثرهای زبری سطح و یا انرژی مخصوص بطور مستقل بررسی شده و ارتباط آنها با یکدیگر و با سایر مشخصه‌هایی از فرایند که می‌توانند مهم و تأثیرگذار باشند دیده نشده است و این امر مستلزم انجام تحقیق‌های بیشتری در این زمینه است. در این مقاله روش تجربی جدیدی برای محاسبه مقدار مینیمم ضخامت براده با توجه به ارتباط میان سایر مشخصه‌های فرایند از جمله انرژی مخصوص، زبری، توپوگرافی و تشکیل براده ارائه شده است. ضمن مقایسه‌ی اثر اندازه در فرایندهای میکروفرزکاری و فرزکاری معمولی، مقدار مینیمم ضخامت براده برای میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیومی Ti-6Al-4V اندازه‌گیری شده است که می‌توان از نتایج حاصله در جهت بهبود شرایط برش و کیفیت سطح ماشین کاری شده در میکروفرزکاری این آلیاژ استفاده کرد.

2- مواد و تجهیزات آزمایش

از ماشین فرز فوق دقیق کرن او¹ با حداکثر 50000 دور بر دقیقه برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. شکل 2 چیدمان بکار رفته در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. قطعه کار بکار رفته در آزمایش آلیاژ تیتانیومی Ti-6Al-4V با سختی 360 ویکرز بود. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول 1 آورده شده است. نمونه مکعبی شکل به ابعاد 8×65×65 میلی‌متر استفاده شد. آزمایش‌ها بصورت ایجاد شیارهای موازی روی سطح تست مربعی شکل به ابعاد 14 میلی‌متر بصورت نشان داده شده در شکل 2 انجام گرفت.

از دو ابزار انگشتی سر تخت دو پره به قطرهای 0.8 و 2 میلی‌متر، ساخت شرکت ژاپنی ان اس تول²، به ترتیب برای شرایط میکرو و ماکرو استفاده شد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti6Al4V (درصد وزنی، %)

Titanium	Al	V	Cr	Fe	Mo	Ni	Sn
89.1	5.91	4.21	0.009	0.069	0.060	0.043	0.54

¹ Kern evo

² NS Tool (Type: NSE320)

و شخم‌زنی است [3]. شکل 1 مکانیزم‌های مختلف تشکیل براده را با توجه به مقدار ضخامت براده نتراشیده نشان می‌دهد [4]. در ابتدا که مقدار ضخامت براده نتراشیده، h ، کمتر از مینیمم ضخامت براده است، تغییر شکل الاستیک روی می‌دهد و هیچ ماده‌ای بصورت براده جدا نمی‌شود. در ادامه که مقدار ضخامت براده نتراشیده نزدیک به مقدار h_{min} می‌شود، براده شروع به تشکیل شدن می‌کند با این وجود که هنوز برگشت الاستیک و تغییر شکل الاستیک تا حدی وجود دارد. بنابراین در این وضعیت ماده جدا شده کمتر از مقدار پیشروی اعمالی خواهد بود. در نهایت که مقدار ضخامت براده نتراشیده بزرگتر از h_{min} می‌شود، برگشت الاستیک کاهش چشمگیری کرده و ماده به طور کامل جدا شده و به شکل براده در می‌آید [5].

با توجه به نقش پر اهمیتی که مقدار مینیمم ضخامت براده در نوع باربرداری و میزان شخم‌زنی حین ماشین کاری ایفا می‌کند، تخمین مقدار مینیمم ضخامت براده برای انتخاب مناسب پارامترهای برشی جهت حذف و یا کاهش اثرات شخم زنی در فرایندهای میکروفرزکاری بسیار ضروری می‌باشد. وابستگی زیاد مقدار مینیمم ضخامت براده به هندسه ابزار [6-8]، خواص ماده [9-11] و شرایط فرایند، اندازه‌گیری مقدار مینیمم ضخامت براده را کمی دشوار می‌سازد. لنگی و دفלקشن ابزار نیز نقش مهمی در تعیین اندازه مینیمم ضخامت براده دارند و باعث پیچیده‌تر شدن اندازه‌گیری آن می‌شوند [3]. تلاش‌های بسیاری در جهت پیش‌بینی این مقدار با استفاده از روش‌های تجربی، شبیه‌سازی و حل تحلیلی انجام گرفته است [8، 12-14]. اولین تلاش‌ها در جهت اثبات وجود مینیمم ضخامت براده و اثرات آن بر زبری سطح در میکروفرزکاری توسط ویول و همکاران [8] انجام گرفت. آنها مقدار مینیمم ضخامت براده را 0.293 برابر شعاع لبه برنده بدست آوردند و نتیجه گرفتند که این مقدار وابستگی زیادی به خواص ماده دارد.

سورج و همکاران [12]، به بررسی تجربی اثر اندازه در میکروفرزکاری برنج با ابزاری به قطر 1 میلی‌متر پرداختند. مقدار انرژی مخصوص برش برای پیشروی های بین 1 تا 5 میکرومتر بر دندانه برابر 10-20 گیگاپاسکال و برای نرخ پیشروی 0.5 حدود 70 گیگاپاسکال بدست آمد که نشانگر وجود اثر اندازه بوده است. مقدار مینیمم ضخامت براده بدون اشاره به اندازه شعاع لبه برنده برابر با 0.97 میکرومتر گزارش شد.

لیو و همکاران [13] از مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی مقدار مینیمم ضخامت براده در آلیاژهای فولادی AISI 1040 و آلومینیومی Al6082-T6 استفاده کردند. نسبت مینیمم ضخامت براده به شعاع لبه برنده برای آلیاژهای فولادی و آلومینیومی به ترتیب برابر 0.2-0.3 و 0.35-0.4 گزارش شد. در مورد آلیاژ فولادی، مقدار مینیمم ضخامت براده با افزایش سرعت برشی یا شعاع لبه برنده افزایش می‌یافت و این در حالی است که تغییر این پارامترها تأثیر

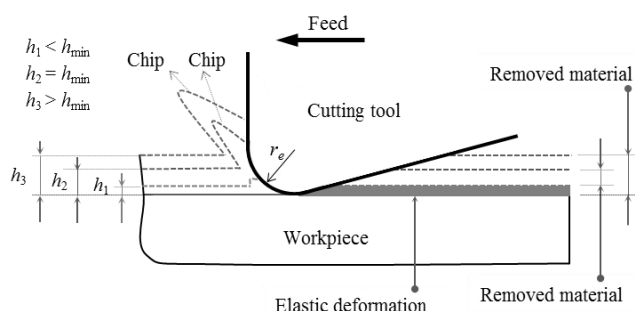


Fig. 1 Mechanisms of micro-scale cutting

شکل 1 مکانیزم‌های برش در مقیاس میکرو

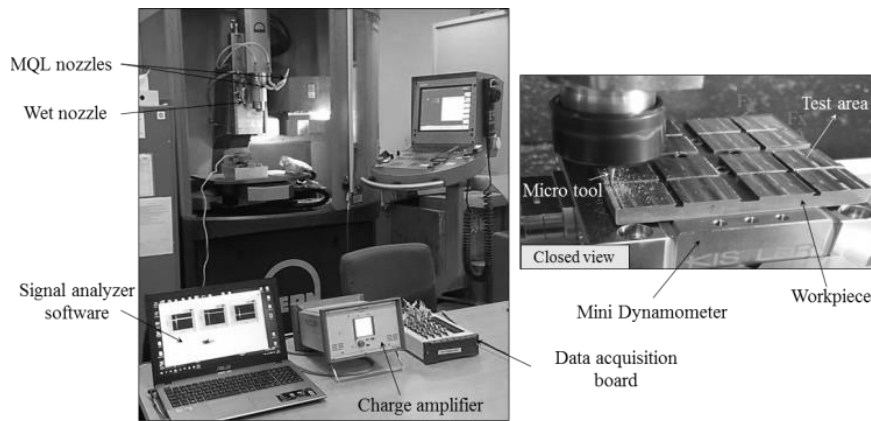


Fig. 2 Experimental set-up

شکل 2 چیدمان آزمایش

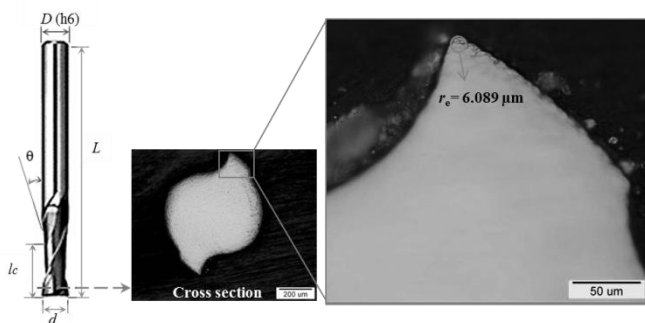


Fig. 3 Geometric characteristics of the used tools (type: MSE230)

شکل 3 مشخصه‌های هندسی میکروابزار مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول 2 پارامترهای فرزکاری و تعداد سطوح آنها

Table 2 Milling parameters and their levels

a_p (μm)	f_z ($\mu\text{m}/\text{tooth}$)	v_c (m/min)	قطر ابزار
50, 150	6, 12	60	0.8
50, 150	12, 21	60	2

برای اندازه‌گیری میکروسختی از دستگاه سختی سنج وی تست⁴ با دقت 1 ویکرز استفاده شد. بارگذاری شامل اعمال نیروی 0.1 کیلوگرم در زمان 15 ثانیه برای تمامی نمونه‌های آزمایش بوده است. اندازه‌گیری‌ها در مقطع عرضی برش و در عمق 50 میکرومتری از سطح ماشین‌کاری شده انجام گرفت و نتایج حاصل از 3 بار تکرار برای تحلیل گزارش شد.

3- نتایج و بحث

شکل 4 مقادیر میکروسختی اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در تمامی نمونه‌ها، مقادیر میکروسختی بالاتر از سختی اولیه قطعه بوده است. در مقایسه با سختی اولیه قطعه، در شرایط میکروفزکاری سختی سطح 33% افزایش داشته و این در حالی است که این مقدار برای حالت ماکرو حدود 5% بوده است. سختی بالاتر بدست آمده در شرایط میکرو نشانگر برجسته‌تر بودن نقش اثر اندازه در آن در مقایسه با فرزکاری با ابزار 2 میلی‌متری می‌باشد.

برای بررسی دقیقتر، انرژی مخصوص برش در شرایط مختلف آزمایش اندازه‌گیری و مقایسه شد. انرژی مخصوص برش عبارتست از مقدار کار مورد نیاز برای برداشتن حجم واحد ماده که به نوعی می‌تواند مشخص‌کننده‌ی

برای اندازه‌گیری شعاع لبه برنده ابزارها ابتدا مقطع آنها توسط وایرکات بریده شد و سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری الیمپیوس¹ با حداکثر بزرگنمایی 1000 برای مشاهده و تعیین دقیق مقدار آن استفاده شد. مقدار میانگین اندازه‌گیری شده برای سه ابزار برابر با 6.089 ± 0.234 میکرون بدست آمد. برای کاهش و حذف اثرات سایش ابزار بر مقادیر اندازه‌گیری شده، از ابزاری جدا و نو برای هر شرایط آزمایش استفاده شد. شکل 3 مشخصه‌های هندسی ابزار مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهد.

آزمایش‌ها در دو سری طرح ریزی شدند. در ابتدا، یک سری آزمایش‌ها برای مقایسه‌ی اثر اندازه در فرایندهای میکروفزکاری و فرزکاری معمولی طراحی شد. پارامترها و سطوح آزمایش برای این بخش در جدول 2 آورده شده است. پارامترها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که یک شرایط آزمایش ($f_z=12$, $a_p=150$) برای هر دو مقیاس میکرو و ماکرو مشترک باشد تا بتوان مقایسه را انجام داد. در شرایط آزمایش با $f_z=12$ و $a_p=150$ ، مقدار پیشروی و عمق برش بعنوان ماکزیمم برای میکرو و مینیمم برای ماکرو انتخاب شده است. کلیه آزمایش‌ها در شرایط خشک انجام شده است. عرض برش در تمامی آزمایش‌ها معادل قطر ابزار برشی بوده است. از سرعت‌های دورانی 23885 و 9549 دور بر دقیقه به ترتیب برای شرایط میکرو و ماکرو استفاده شده است به گونه‌ای که سرعت برشی ثابت 60 متر بر دقیقه را در هر دو حالت فراهم سازد.

در سری دوم، از تعداد بیشتری نرخ پیشروی (0.06, 0.3, 0.9, 1.5,) 0.06, 0.3, 0.9, 1.5, 2.1, 3, 6, 12, 21, 30, 42, 60 میکرومتر بر دندانه) برای بررسی دقیقتر شرایط برش و تعیین مینیمم ضخامت براده در میکروفزکاری این آلیاژ استفاده شد. پارامترهای خروجی مورد بررسی در این تحقیق شامل انرژی مخصوص برش (Kc)، میکروسختی (Hv)، زبری سطح میانگین (Ra)، توپوگرافی و تشکیل براده می‌باشند.

از مینی‌دینامومتر کیستلر² به همراه شارژر امپلی‌فایر نوع 5070 برای اندازه‌گیری نیروهای برشی حین فرایند استفاده شد که از طریق کارت اکتساب داده جهت پردازش و ثبت داده‌های اندازه‌گیری شده با فرکانس نمونه‌برداری 42 کیلوهرتز، به کامپیوتر منتقل شد. چیدمان آزمایش مورد استفاده برای اندازه‌گیری نیرو در شکل 2 نمایان است.

از پروفایلر سه‌بعدی بدون تماس نانوفاکوس³ برای ارزیابی زبری سطح و توپوگرافی استفاده شد.

¹ Olympus (type bx51m)

² Kistler mini-dynamometer (type 9256C1)

³ Nano Focus μSuf

⁴ V-test

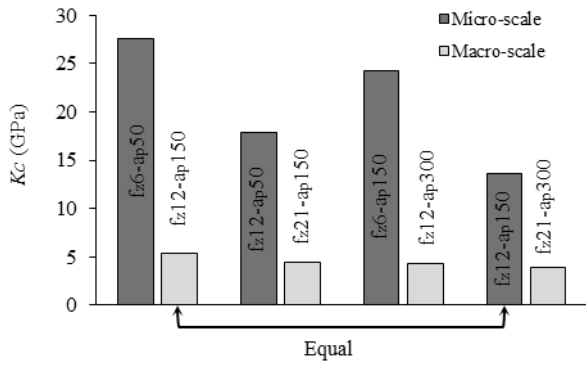


Fig. 6 Influence of milling conditions and machining scales on specific cutting force.

شکل 6 تأثیر شرایط فرزکاری و مقیاس ماشین کاری بر انرژی مخصوص

با سه برابر شدن عمق برش، انرژی مخصوص در میکروفزکاری 13% کاهش یافت که این کاهش برای حالت ماکرو حدود 6% بوده است. در نتیجه، در میکروفزکاری این آلیاژ، افزایش سطح مقطع برش در مقایسه با افزایش نیروی برش نقش برجسته‌تری در کاهش انرژی مخصوص داشته است.

همچنین، در مورد نرخ پیشروی، انرژی مخصوص به ترتیب 55% برای میکرو و 27% برای ماکرو کاهش یافت. از این رو، اثر کاهش انرژی مخصوص برش در نتیجه‌ی افزایش پارامترهای برشی (اثر اندازه) در میکروفزکاری بسیار برجسته‌تر بوده و در این میان نرخ پیشروی مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر انرژی مخصوص بوده است. تأثیر پارامترهای برشی بر مقدار انرژی مخصوص در شکل 7 آورده شده است. همانطور که از شکل پیداست، روند تغییرات انرژی مخصوص با پارامترهای برشی در هر دو مقیاس میکرو و ماکرو بصورت کاهشی است.

با توجه به شکل 6، می‌توان به تحلیل انرژی مخصوص برش مورد نیاز در شرایط برشی مشترک fz12-ap150 (مقیاس میکرو) و fz12-ap150 (مقیاس ماکرو) پرداخت. علیرغم یکسان بودن شرایط برش و سطح مقطع برش (Ac)، انرژی مخصوص برش برای میکروفزکاری ~150% بیشتر از برای حالت ماکرو بوده است. در عین حال می‌توان نتیجه گرفت با وجود یکسان بودن

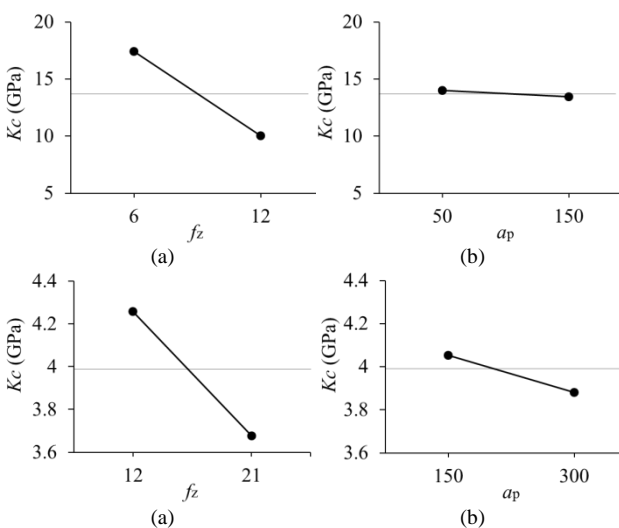


Fig. 7 Effect of cutting parameters on SCF: (a) and (b) in micro-scale, (c) and (d) in macro-scale.

شکل 7 تأثیر پارامترهای برشی بر انرژی مخصوص: (الف) و (ب) در مقیاس میکرو، (ج) و (د) در مقیاس ماکرو

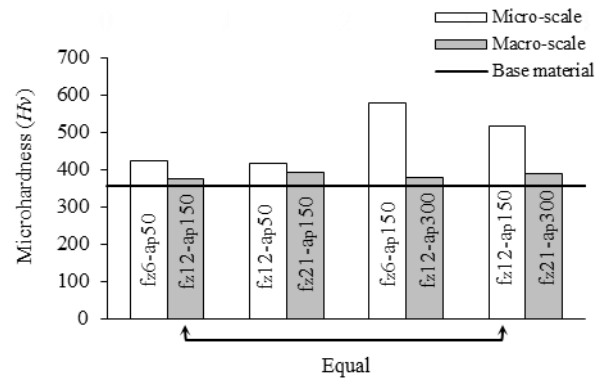


Fig. 4 Effects of milling scales on workpiece microhardness, 50 μm below the milled surface.

شکل 4 تأثیر مقیاس فرزکاری بر میکروسختی قطعه، 50 میکرون پایینتر از سطح فرزکاری شده

نقش اثر اندازه و میزان شخم زنی در فرایند برش باشد. اندازه‌گیری انرژی مخصوص برش راهی غیرمستقیم برای تعیین اثر اندازه در فرایندهای میکروماشین کاری است که از نسبت نیروی برش میانگین به سطح مقطع میانگین برش محاسبه می‌شود. سطح مقطع برش برای تمامی نمونه‌های آزمایش محاسبه شده است. در شکل 5 شماتیک سطح مقطع برش نشان داده شده است. در محاسبه‌ی سطح مقطع میانگین برش، مقدار میانگین ضخامت براده با استفاده از رابطه (1) بدست خواهد آمد:

$$h_m(\varphi) = \frac{\int_{\varphi_e}^{\varphi_s} f_z \sin(\varphi) d\varphi}{\varphi_e - \varphi_s} = f_z \frac{\cos(\varphi_s) - \cos(\varphi_e)}{\varphi_e - \varphi_s} \quad (1)$$

که در آن f_z نرخ پیشروی بر حسب دندانه، φ_e و φ_s نیز به ترتیب زوایای شروع تماس و پایان تماس ابزار با قطعه کار می‌باشند. مقادیر میانگین ضخامت براده محاسبه شده برای پیشروی‌های مختلف در جدول 3 آورده شده است.

شکل 6 ارتباط میان مقادیر انرژی مخصوص اندازه‌گیری شده در شرایط مختلف آزمایش را در مقیاس‌های میکرو و ماکرو نشان می‌دهد. انرژی مخصوص بدست آمده در شرایط میکرو تقریباً 5 برابر آن در حالت ماکرو بوده است و در راستای نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری میکروسختی، نشانگر برجسته‌تر بودن اثر اندازه در شرایط باربرداری در مقیاس میکرو است.

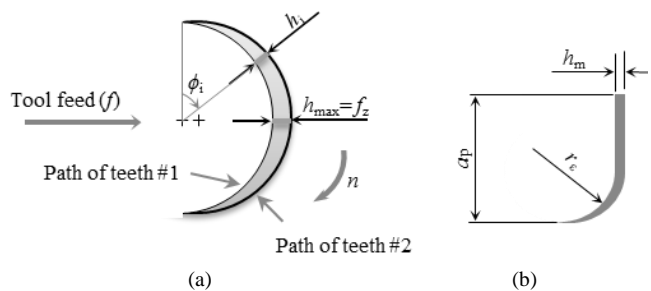


Fig. 5 (a) Scheme of the upper view of the cutting tooth paths to calculate h_m , (b) Side view of theoretical mean cutting section

شکل 5 (الف) شماتیک نمای بالای مسیر ابزار برش برای محاسبه h_m ، (ب) نمای جانبی تئوریک مقطع میانگین برش

جدول 3 مقادیر میانگین ضخامت براده برای پیشروی‌های مختلف

Table 3 Average uncut chip thicknesses calculated for different feeds

f_z	0.06	0.3	0.9	1.5	2.1	3	6	12	21	30
h_m	0.038	0.191	0.573	0.955	1.337	1.909	3.819	7.639	13.369	19.09

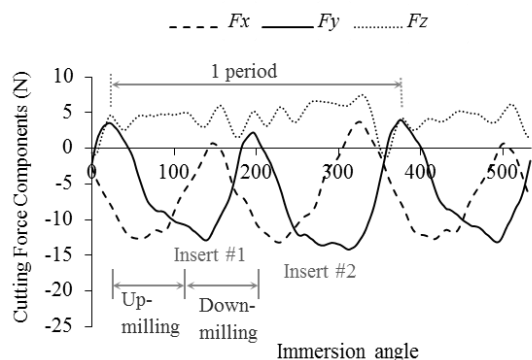


Fig. 9 Analysis of the cutting force components for cutting condition $f_z12-ap150$

شکل 9 تحلیل مولفه‌های نیروی برش برای شرایط برش $f_z12-ap150$

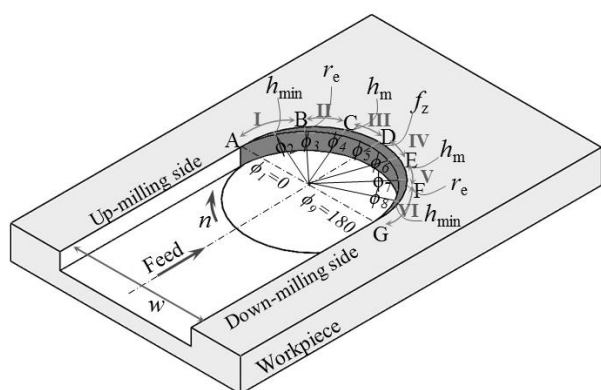


Fig. 10 Theoretical modeling related to the cutting force components for chip formation process in micromilling

شکل 10 مدل‌سازی تئوریک مرتبط با مولفه‌های نیروی برش برای فرایند تشکیل براده در میکروفزکاری

وقتی ضخامت براده برابر شعاع لبه برنده می‌شود، ناحیه 5 در محل F با $\phi_7 = 149.74^\circ$ پایان می‌یابد. یک بار دیگر لبه برنده در ϕ_8 به مینیمم ضخامت براده میرسد و در مکان G با $\phi_9 = 180^\circ$ به سیکل خود پایان می‌دهد.

با توجه به نقش برجسته‌ی اثر اندازه در مقیاس میکرو بعلت اثرگذاری بیشتر نرخ پیشروی بر انرژی مخصوص، و همچنین ارتباط موجود میان نرخ پیشروی و شعاع لبه برنده و تأثیر آنها بر اثر اندازه، شکل 11 ارتباط غیرخطی میان انرژی مخصوص و نسبت نرخ پیشروی به شعاع لبه برنده را نشان می‌دهد. نمودار را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد. قسمت اول که آنرا ناحیه میکرو مینامیم، از پایینترین مقدار نرخ پیشروی تا ~ 6 میکرومتر بر دندانه است و انرژی مخصوص در این قسمت بصورت غیرخطی و چشمگیری تغییر می‌کند. اما قسمت دوم که شامل مقادیر نرخ پیشروی ~ 6 و بالاتر از آن است مشاهده می‌شود مقدار انرژی مخصوص با افزایش پیشروی کاهش بسیار کمی دارد.

برای ناحیه ماکرو، با افزایش نرخ پیشروی، انرژی مخصوص متمایل به مقدار ثابت 4 گیگاپاسکال است. این بدین معناست که شعاع لبه برنده به علت اینکه کوچکتر از ضخامت براده نتراشیده یا پیشروی است دیگر تأثیر چندانی بر مکانیزم تشکیل براده ندارد. این در حالی است که در مقیاس میکرو، انرژی مخصوص به مقادیر بسیار بالاتر و حتی نزدیک به حالت سنگ‌زنی می‌رسد [15]. این رشد نمایی انرژی مخصوص در مقادیر پایینتر پیشروی بعلت افزایش سهم شخم زنی در فرایند برش است.

مساحت مقطع برش (A_c) در مقیاس‌های مختلف، با تغییر شکل هندسی مقطع که توسط عواملی نظیر شعاع نوک لبه و یا سایر پارامترهای برشی می‌تواند بوجود آید، انرژی مخصوص برش مورد نیاز برای باربرداری متفاوت خواهد بود.

مهمترین علت بالاتر بودن انرژی مخصوص در مقیاس میکرو می‌تواند وجود "نیروی لبه" یا "ناحیه سوم تغییرشکل" باشد که باعث تشدید پدیده‌ی شخم زنی می‌شود. با توجه به این موضوع، مقادیر "نیروی لبه" با استفاده از رگرسیون خطی برای نرخ پیشروی‌های مختلف محاسبه شده است (شکل 8). مقدار "نیروی لبه" برای مقیاس‌های میکرو و ماکرو به ترتیب برابر با 8.89 و 0.31 نیوتن بدست آمد. نتیجه بدست آمده نشان می‌دهد که در مقایسه با شرایط ماکرو، در مقیاس میکرو اهمیت و نقش "ناحیه سوم تغییرشکل" و شخم زنی بر نیروی کل برش بسیار بیشتر بوده است.

با توجه با پر اهمیت بودن نقش اثر اندازه و پدیده شخم زنی در مقیاس میکرو، یافتن مینیمم ضخامت براده در میکروفزکاری این آلیاژ اهمیت بسیاری پیدا می‌کند. شکل 9، گراف نیرویی حاصل از میکروفزکاری در شرایط برشی $f_z12-ap150$ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مولفه شعاعی برش را می‌توان با توجه به مکانیزم تشکیل براده به شش ناحیه مجزا تقسیم بندی کرد.

در شکل 10، $\phi_1 = 0^\circ$ مربوط به مکان A می‌باشد. در اینجا لبه برنده ابزار شروع به ایجاد تماس با قطعه (ناحیه 1) می‌کند که در آن نیروی شعاعی نیز همزمان افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت براده نتراشیده فرایند باربرداری بصورت مخالف انجام می‌گیرد.

در زاویه تماس ϕ_2 لبه برنده به مینیمم ضخامت براده می‌رسد. تا قبل از رسیدن به این موقعیت، تغییرشکل زیاد ماده (شخم زنی) بدون تشکیل براده روی می‌دهد. با ادامه این روند، عمل باربرداری شروع می‌شود و در محل B در $\phi_3 = 30.26^\circ$ ، مقدار ضخامت براده برابر با شعاع لبه برنده خواهد شد. محل C با $\phi_4 = 39.55^\circ$ جایی است که مقدار ضخامت براده میانگین (h_m) در آنجا ظاهر می‌شود و در این لحظه مقدار نیروی شعاعی میانگین کاملاً برابر با مقدار نیروی شعاعی لحظه‌ای در نمودار نیرویی می‌گردد. بین $\phi_4 = 39.55^\circ$ و $\phi_5 = 90^\circ$ (ناحیه 3)، ضخامت براده نتراشیده افزایش می‌یابد تا به ماکزیمم مقدار خود (f_z) در محل D برسد. بعد از این لحظه فرایند باربرداری از حالت مخالف به موافق² تغییر می‌کند. با ادامه چرخش ابزار، با شروع ناحیه 4، زاویه تماس ابزار افزایش می‌یابد و بدنبال آن ضخامت براده نتراشیده کاهش می‌یابد تا اینکه در محل E ($\phi_6 = 140.45^\circ$) به h_m برسد.

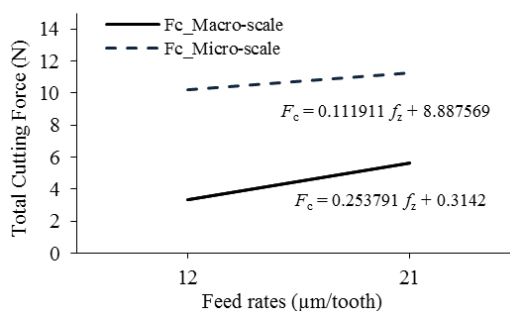


Fig. 8 Feed rate ($\mu\text{m/tooth}$) vs total cutting forces (N) derived for both micro- and macro-scale.

شکل 8 نیروی کل برش برحسب نرخ پیشروی برای هر دو مقیاس میکرو و ماکرو

¹ Up-milling

² Down-milling

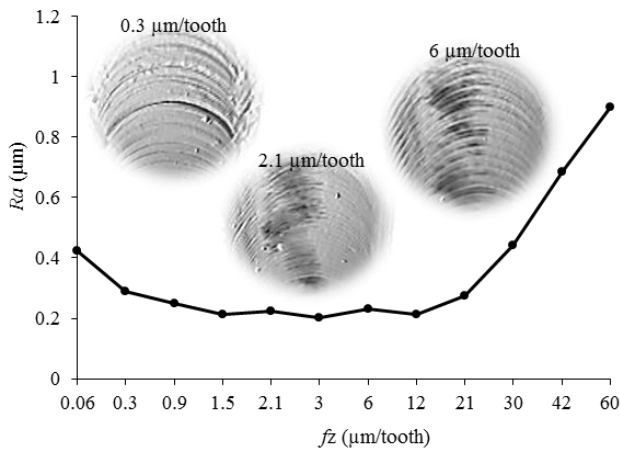


Fig. 12 Effect of feed reduction on surface roughness

شکل 12 تأثیر کاهش نرخ پیشروی بر زبری سطح

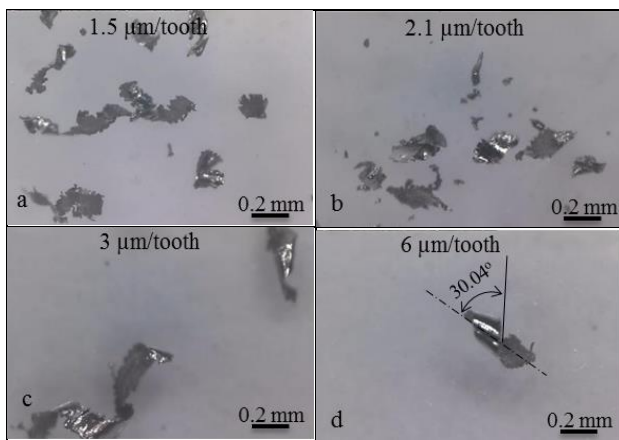


Fig. 13 Microscopic images of chip formed for micromilling

شکل 13 تصاویر میکروسکوپی برداشته شده در میکروفزکاری

مشخص، دارای یک محدوده است بطوریکه در محدود پایین آن ممکن است برداشته تشکیل شود ولی هنوز اثرات شخم زنی و زبری بالا قابل مشاهده باشد. در نهایت، برای آلیاژ مورد آزمایش در این تحقیق مقدار مینیمم ضخامت برداشته (h_{min}) بین 0.25-0.49 شعاع لبه برنده پیشنهاد می گردد (شکل 14).

4- نتیجه گیری

در این تحقیق به مقایسه‌ی "اثر اندازه" در فرایندهای فرزکاری با مقیاس میکرو و ماکرو پرداخته شد که برای این منظور تغییرات میکروسختی و انرژی مخصوص مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه از روش تجربی با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف زبری، توپوگرافی، انرژی مخصوص و تشکیل برداشته برای

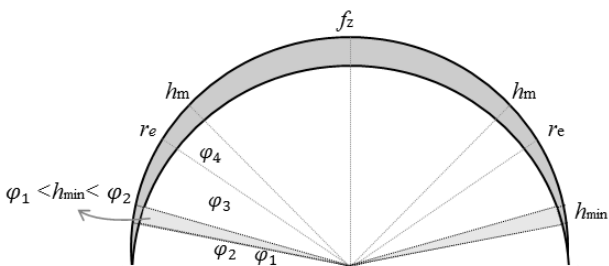


Fig. 14 Important contact angles and minimum chip thickness range

شکل 14 زوایای تماس مهم و محدوده مینیمم ضخامت برداشته

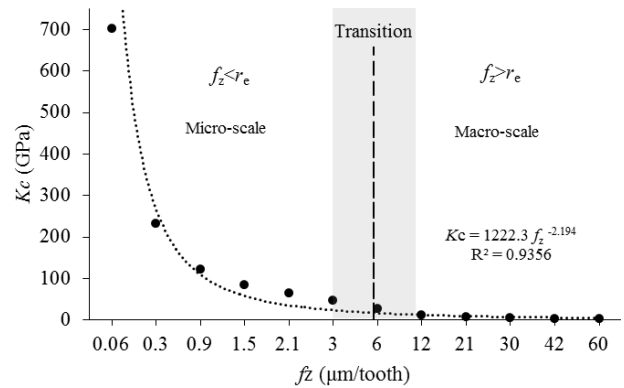


Fig. 11 Dependence of specific cutting force on feed per tooth

شکل 11 ارتباط انرژی مخصوص برش با نرخ پیشروی

با توجه به اینکه مقدار شعاع لبه برنده‌ی میکرو ابزار قبلاً اندازه‌گیری و مشخص شده است، اکنون نوبت به تعیین مینیمم ضخامت برداشته می‌رسد. برای این کار نتایج حاصل از اندازه‌گیری زبری، توپوگرافی و تشکیل برداشته به همراه انرژی مخصوص برش مورد تحلیل قرار خواهند گرفت.

شکل 12 نمودار زبری سطح اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر زبری بدست آمده می‌توان نمودار را به سه ناحیه تقسیم کرد. ناحیه اول که نرخ پیشروی بین 0.06-1.5 fz/re است، بنام ناحیه میکرو، زبری سطح میانگین با افزایش مقدار پیشروی کاهش می‌یابد. ماتیونگا و همکاران [16] نیز در میکروفزکاری آلیاژ فولادی گزارش کردند که در پیشروی‌های کمتر از شعاع لبه برنده، زبری سطح با کاهش مقدار پیشروی افزایش می‌یافت. دلیل این امر کاهش اثر شخم زنی و برگشت الاستیک ماده در پیشروی‌های کمتر از شعاع لبه برنده است.

در ناحیه دوم که نرخ پیشروی بین 1.5-6 است، بنام ناحیه گذار¹، زبری سطح تقریباً در مینیمم مقدار ممکن بدون تغییر باقی می‌ماند. در این ناحیه اثرات شخم‌زنی کاهش یافته و تقریباً ناچیز شده است.

در ناحیه سوم که نرخ پیشروی بزرگتر از 12 است $fz/re < 2$ ، بنام ناحیه ماکرو، زبری سطح میانگین با افزایش پیشروی افزایش می‌یابد. در این حالت که مقادیر پیشروی بزرگتر از شعاع لبه برنده می‌گردد، شرایط مشابه با آنچه در فرزکاری معمولی انتظار داریم روی می‌دهد [17]. با حذف اثرات شخم‌زنی و جایگزینی آن با اثر حرکتی ابزار²، سطحی تمیزتر و یکنواخت‌تر قابل مشاهده است. در این بازه انتظار می‌رود برداشته بطور کامل شکل گرفته و مقدار انرژی مخصوص به مقادیر کمتر از 4 گیگا پاسکال نشان داده شده در شکل 11 کاهش یابد.

در تکمیل تحلیل‌های فوق، برداشته‌های جمع‌آوری شده در شرایط مختلف آزمایش در شکل 13 آورده شده است. همانطور که از شکل پیداست، برای پیشروی‌های کمتر از 3، برداشته بطور کامل و پیوسته شکل نگرفته و بصورت نامنظم و بی‌شکل در آمده‌اند. این در حالی است که در پیشروی‌های بالاتر از 3، برداشته بطور کامل شکل گرفته و می‌تواند گویای این مطلب باشد که در این لحظه از مقدار مینیمم ضخامت برداشته عبور کرده است.

با ارزیابی کلی نتایج بدست آمده در تحلیل‌های انجام گرفته بر مشخصه‌های مختلف انرژی مخصوص برش، زبری، توپوگرافی و تشکیل برداشته می‌توان اشاره داشت که مقدار مینیمم ضخامت برداشته بجای یک مقدار کاملاً

¹ Transition region

² Tool feed-mark

- titanium alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 84-90, 2015. (In Persian فارسی)
- [3] X. Zhang, K. F. Ehmann, T. Yu, W. Wang, Cutting forces in micro-end-milling processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 107, pp. 21-40, 2016.
- [4] J. Chae, S. S. Park, T. Freiheit, Investigation of micro-cutting operations, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 3-4, pp. 313-332, 2006.
- [5] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre, E. Filippi, Experimental and numerical investigation of the uncut chip thickness reduction in Ti6Al4V orthogonal cutting, *Meccanica*, Vol. 52, No. 7, pp. 1577-1592, 2017.
- [6] P. K. Basuray, B. K. Misra, G. K. Lal, Transition from ploughing to cutting during machining with blunt tools, *Wear*, Vol. 43, pp. 341-9, 1977.
- [7] N. Ikawa, S. Shimada, H. Tanaka, G. Ohmori, An atomistic analysis of nanometric chip removal as affected by tool-work interaction in diamond turning, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 1, pp. 551-554, 1991.
- [8] H. Weule, V. Huntrup, H. Tritschler, Micro-Cutting of steel to meet new requirements in miniaturization, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 1, pp. 61-64, 2001.
- [9] C. J. Kim, J. R. Mayor, J. Ni, A static model of chip formation in microscale milling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering- Transaction of the ASME*, Vol. 126, pp. 710-8, 2004.
- [10] M. P. Vogler, R. E. DeVor, S. G. Kapoor, On the modelling and analysis of machining performance in micro end-milling, Part I. Surface generation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering- Transaction of the ASME*, Vol. 126, pp. 685-94, 2004.
- [11] S. M. Son, H. S. Lim, J. H. Ahn, Effect of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 529-535, 2005.
- [12] V. Sooraj, J. Mathew, An experimental investigation on the machining characteristics of microscale end milling, *International Journal of Advance manufacturing Technology*, Vol. 56, pp. 951-958, 2011.
- [13] X. Liu, R. E. Devor, S. G. Kapoor, An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, pp. 474-481, 2006.
- [14] S. N. B. Oliaei, Y. Karpat, Investigating the influence of built-up edge on forces and surface roughness in micro scale orthogonal machining of titanium alloy Ti6Al4V, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 235, pp. 28-40, 2016.
- [15] S. Malkin, *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*, second edition, pp. 127-130, New York: Industrial Press, 2008.
- [16] A. Aramcharoen, P.T. Mativenga, Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel, *Precision Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 402-407, 2009.
- [17] S. Filiz, C. M. Conley, M. B. Wasserman, O. B. Ozdoganlar, An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1088-1100, 2007.

تخمین مقدار مینیمم ضخامت برده در فرایند میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V استفاده شد. نتایج تحقیق بصورت زیر خلاصه گردید:

- سختی سطح ماشین کاری شده در مقیاس میکرو 33% نسبت به سختی اولیه قطعه افزایش داشته و این مقدار برای مقیاس ماکرو 5% بوده است.
- انرژی مخصوص برش در مقیاس میکرو 150% بیشتر از مقدار بدست آمده در شرایط ماکرو بوده است.
- مقادیر "نیروی لبه" برای مقیاس میکرو و ماکرو به ترتیب برابر با 8.89 و 0.31 نیوتن بدست آمد که نشان از سهم بیشتر شخم زنی در مقیاس میکرو است.
- تغییرات زبری سطح با پیشروی حالت دوگانه‌ای داشته است بطوریکه در پیشروی‌های کمتر از 1.5 (به علت اثر اندازه) و بیشتر از 12 (مشابه فرزکاری معمولی) مقادیر زبری افزایش می‌یافت و کمترین مقدار زبری در محدوده $1.5 < f_z < 12$ بدست آمد.
- مقدار مینیمم ضخامت برده بدست آمده در میکروفرزکاری آلیاژ Ti-6Al-4V بین 0.25-0.49 برابر شعاع لبه برنده بدست آمد.

5- تقدیر و تشکر

از شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی با توجه به پشتیبانی و حمایت مالی صورت گرفته در تحقیق حاضر، تشکر و قدردانی خود را ابراز نموده، و همچنین از پرسنل محترم آزمایشگاه ماشین کاری دانشگاه سابانچی استانبول و مسئول آزمایشگاه نمونه‌سازی مواد در دانشگاه تربیت مدرس که در انجام آزمایش‌ها و تحلیل نتایج نهایت همکاری را با بنده داشته‌اند، سپاسگزاری می‌شود.

6- مراجع

- [1] H. Rezaei, M. H. Sadeghi, 3D Finite element simulation of micro-milling process of titanium alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 555-561, 2016. (in Persian فارسی)
- [2] H. Hassanpour, H. Rezaei, M. H. Sadeghi, A. Rasti, M. M. Hadavi, Experimental study of surface roughness and burr width in micromilling of