



## سلامت سطح در فرز کاری سرعت بالای آلیاژ Ti6Al4V در حضور سیستم روان کاری نیمه خشک

حامد حسن پور<sup>1</sup>، امیر راستی<sup>1</sup>، محمدحسین صادقی<sup>2\*</sup>

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

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

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

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 31 اردیبهشت 1394  
پذیرش: 14 تیر 1394  
ارائه در سایت: 31 تیر 1394

کلید واژگان:

فرز کاری سرعت بالا

آلیاژ Ti6Al4V

سلامت سطح

روان کاری با حداقل سیال برشی

### چکیده

فرز کاری سرعت بالای آلیاژهای تیتانیوم به علت برخورداری از بهره‌وری بالای فرایند و کیفیت خوب محصول، به صورت گسترده در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار گرفته است. پژوهش حاضر، زبری، بافت و میکروسختی سطح را در فرز کاری سرعت بالای آلیاژ Ti6Al4V به صورت تجربی مورد مطالعه قرار می‌دهد. آزمایش‌ها در حضور روان کاری کمینه انجام گردید. ابزار به کار رفته نیز، فرز انگشتی کاربایدی سرتخت به قطر 6 میلی‌متر با روکش TiAlN بود. روش فاکتوریل کامل به منظور طراحی آزمایش‌ها و تحلیل اثرات پارامترهای ماشین کاری شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی روی زبری، بافت و میکروسختی سطح به کار گرفته شد. سایر پارامترهای برش یعنی عمق برش محوری و عمق برش شعاعی نیز ثابت بودند. نتایج نشان داد که با استفاده از فرایند فرز کاری سرعت بالا می‌توان به سطوحی با کیفیت بالا و زبری سطح حدود 0/2 میکرومتر دست یافت. تغییرات میکروسختی نیز با سرعت برشی دارای طبیعتی دوگانه بود. به این معنا که در ابتدا، با افزایش سرعت برشی تا 375 متر بر دقیقه، میکروسختی بالا رفته و پس از این سرعت برشی، میکروسختی سطح به صورت چشمگیری کاهش یافت. همچنین با بیشتر شدن نرخ پیشروی، میکروسختی سطح افزایش یافته و بیشترین میکروسختی در سرعت برشی 375 متر بر دقیقه و نرخ پیشروی 0/08 میلی‌متر بر دندانه بدست آمد که نشان از افزایش 57% میکروسختی نسبت به سختی اولیه قطعه داشت. تصاویر بافت سطح نیز نشان داد که افزایش سرعت برشی تاثیر مستقیمی بر کاهش ترک‌ها و پارگی‌های سطحی دارد.

## Surface integrity in high speed machining of Ti6Al4V alloy in presence of minimum quantity lubrication

Hamed Hassanpour, Amir Rasti, Mohammad Hosein Sadeghi\*

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

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

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 21 May 2015  
Accepted 05 July 2015  
Available Online 22 July 2015

**Keywords:**  
High Speed Milling  
Ti6Al4V Alloy  
Surface Integrity  
Minimum Quantity Lubrication

### ABSTRACT

High-speed milling of titanium alloys is widely used in aerospace industries due to its high efficiency and good quality product. The paper empirically studies surface roughness, topography and microhardness variations in high speed milling of Ti6Al4V alloy. The experiments were conducted under minimum quantity lubrication environment. Carbide end mill tool with TiAlN coating and 6 millimeter diameter was used. Full factorial method was used to design experiments and analyze the effect of machining parameters including cutting speed and feed rate on surface roughness, topography and microhardness. The other cutting parameters, i.e. axial depth of cut and radial depth of cut were constant. The results showed that a high quality surface with roughness of 0.2  $\mu\text{m}$  can be obtained by using high speed machining method. Also, microhardness variations versus cutting speed has two-fold nature. It indicates that firstly, by increasing cutting speed up to 375 m/min, microhardness increases and after that declines remarkably. In addition, by increasing feed rate, surface microhardness rises and the maximum microhardness was obtained at cutting speed of 375 m/min and feed rate of 0.08 mm/tooth, which showed 57% increase with regard to hardness of the base material. The images of surface topography showed that increasing of the cutting speed has a significant effect on reduction of surface tears and smears.

### 1- مقدمه

پرونده‌های فرز کاری، فرایندی به نام ماشین کاری سرعت بالا<sup>1</sup> مطرح می‌شود.

برای دستیابی به قابلیت تولید بیشینه و کاهش زمان ماشین کاری، غالباً در

1- High Speed Machining

Please cite this article using:

H. Hassanpour, A. Rasti, M. H. Sadeghi, Surface integrity in high speed machining of Ti6Al4V alloy in presence of minimum quantity lubrication, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 35-41, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مارتنزیتی، دارای تنش پسماند و تردی بالا بوده و در نتیجه می‌تواند روی رفتار سایشی و استحکام خستگی ماده تأثیر منفی بگذارد. بنابراین کاهش سختی و تردی این لایه مورد نیاز می‌باشد [13]. خواص این لایه را می‌توان توسط اندازه‌گیری میکروسختی سطح قطعه مورد بررسی قرارداد. گفتنی است که بیشترین مقادیر میکروسختی در لایه سطحی قطعه ماشین‌کاری شده به‌وجود می‌آید [14].

مطالعه سلامت سطح در قطعات تیتانیومی، به علت بالاتر بودن احتمال رخداد عیوب سطحی مانند میکروترک‌ها در هنگام ماشین‌کاری، دارای اهمیت بسیاری است [15]. در ادامه به بررسی پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه سلامت سطح ماشین‌کاری سرعت بالای تیتانیوم پرداخته شده است. هونگ و همکاران [16]، فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیومی را با دو ابزار مختلف برای بررسی تغییرات میکروسختی سطح انجام دادند و گزارش کردند که زبری بدست آمده با ابزار PCD<sup>5</sup> بهتر از ابزار PCBN<sup>6</sup> است و علت را در سایش کمتر ابزار PCD دانستند.

آلام و همکاران [17] با بررسی توپوگرافی سطح در فرزکاری سرعت بالای تیتانیوم، چسبندگی لبه انباشته روی سطح ماشین‌کاری شده را در پیشروی پایین مشاهده کردند. این پدیده باعث افزایش زبری سطح گردید. همچنین بررسی میکروساختار نشان از عدم وجود لایه سفید در این فرایند داشت و تنها ناحیه سخت‌شده‌ای بین 0/2 تا 0/3 میلی‌متری زیر سطح ماشین‌کاری در اثر کرنش سختی مشاهده شد.

پاوار و پاواد [18] با تراش‌کاری آلیاژ تیتانیوم به‌صورت خشک نشان دادند که در سرعت‌های بالا، به علت وجود تغییرات و ترک‌های کمتر روی سطح، زبری سطح بهبود می‌یابد. همچنین سرعت عامل اصلی تأثیرگذار روی سختی قطعه بوده و تداخل نرخ پیشروی و سرعت برش نیز اثر معنی‌داری روی آن داشت.

یاو و همکاران [19] به مطالعه تغییرات سلامت سطح در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم پرداختند. آن‌ها مشاهده نمودند که افزایش مقدار پارامترهای برش باعث بالا رفتن میکروسختی سطح می‌شود. افزایش پیشروی و به دنبال آن، ازدیاد حرارت در ناحیه برش و سریع سرد شدن سطح، دلایل توجیهی برای مطالعه سختی سطح ذکر گردید. اکسید شدن سطح به دلیل حرارت ناشی از ماشین‌کاری نیز عامل دیگری در افزایش میکروسختی معرفی شد. یاو و همکاران [20] در مطالعه‌ای دیگر، فرزکاری سرعت بالا را روی آلیاژ تیتانیوم TB6 پیاده‌سازی کرده و نشان دادند که زبری سطح به ترتیب بیشترین تأثیرپذیری را از پیشروی، سرعت و عرض برش دارد. همچنین در شرایط سرعت برشی بالا، پیشروی و عرض فرزکاری پایین، زبری سطح بدست آمده کمتر از 0/8 میکرومتر بود.

وو و همکاران [21] سلامت سطح را در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که پیشروی و سرعت برشی بیشترین تأثیر را بر زبری، توپوگرافی، تنش‌های پسماند و میکروسختی سطح دارند. همچنین نشان داده شد که با کنترل و بهینه کردن شرایط برشی، می‌توان به زبری سطح زیر 0/7 میکرومتر دست یافت.

ولاسکو و همکاران [22] سلامت سطح را در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم مطالعه کرده و دریافتند که این روش علاوه بر صافی سطح مطلوب، سطحی با دانه‌های به شدت تغییر شکل یافته در جهت پیشروی تولید می‌کند.

همان‌گونه از نام آن پیداست، در این فرایند، ماشین‌کاری با سرعت دورانی اسپیندل و نرخ پیشروی بالا انجام می‌گیرد. اما تاکنون با وجود بررسی‌های مختلفی که روی فرایند ماشین‌کاری سریع صورت گرفته، هنوز تعریف دقیقی برای آن ارائه نشده است. علت این امر، وابسته بودن بازه سرعت برشی این فرایند به نوع ماده و مکانیزم باربرداری می‌باشد [1]. برای مثال، محدوده سرعت برشی برای مواد نرمی مانند آلومینیوم بسیار بالا بوده و برای مواد سخت ماشین‌کاری شونده مثل آلیاژهای تیتانیوم پائین است [2]. در دهه اخیر پیشرفت‌های بسیار زیادی در زمینه تجهیزات مورد استفاده در ماشین‌کاری سرعت بالا از قبیل دستگاه‌های ماشین سنتر<sup>1</sup>، ابزار و سیستم‌های طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر<sup>2</sup> اتفاق افتاده است. این پیشرفت‌ها در زمینه تکنولوژی فرایند برش به مراکز ساخت و تولید کمک می‌کند تا محصولاتی با هزینه کمتر، زمان تحویل کوتاه‌تر، پیچیدگی بیشتر و کیفیت بالاتر را تولید کنند [3].

از آنجا که ماشین‌کاری سرعت بالا، نیروهای باربرداری و حرارت انتقالی به قطعه را کاهش می‌دهد، این امکان فراهم می‌آید تا بتوان قطعات جدار نازک را با دقت بالا ماشین‌کاری کرد [4]. اخیراً ماشین‌کاری قطعات یکپارچه با سرعت بالا به صورت گسترده در صنایع هوایی و نیروگاهی، جایگزین تولید قطعات مونتاژی شده است. یکی از آلیاژهای پرکاربرد در این صنایع، آلیاژ پایه تیتانیومی Ti6Al4V است. مقاومت خوب به خوردگی، اکسایش و خستگی از ویژگی‌های منحصر به فرد این آلیاژ می‌باشد [5،6]. به خاطر خواص حرارتی که این مواد دارند، استحکام آن‌ها در طول عملیات ماشین‌کاری همچنان بالا باقی می‌ماند. میل زیاد این آلیاژها به ترکیب شدن با بسیاری از مواد ابزار نیز باعث سایش بیش از حد و تخریب سریع ابزار می‌گردد. از سوی دیگر، قابلیت هدایت حرارتی پایین آلیاژهای پایه تیتانیوم تولید حرارت بسیار زیاد در موضع برش را به دنبال دارد [7]. خواص مذکور باعث شده که این مواد در دسته مواد سخت ماشین‌کاری شونده قرار گیرند. در منابع، بازه فرزکاری سرعت بالا برای آلیاژهای تیتانیوم بین 150 تا 1000 متر بر دقیقه ذکر شده است [8].

سطح ماشین‌کاری به صورت مرز بین قطعه ماشین‌کاری شده و شرایط محیطی فرایند تعریف می‌شود. سلامت سطح<sup>3</sup> به مطالعه خصوصیات و ماهیت سطح ماشین‌کاری شده و تأثیر آن بر خواص مکانیکی و عملکردی قطعه‌کار می‌پردازد [9]. به طور کلی، سلامت سطح به دو بخش تقسیم می‌گردد. بخش اول مربوط به توپوگرافی خارجی سطح بوده و بخش دوم ریزساختار و خواص لایه‌های زیرسطحی قطعه کار را دربرمی‌گیرد.

از مهم‌ترین مشخصه‌های سلامت سطح، می‌توان به زبری، سختی و بافت سطح ماشین‌کاری شده اشاره کرد [10]. زبری سطحی روی عمر خستگی و دیگر خواص سطحی قطعه نهایی تأثیرگذار بوده و در بسیاری از مواقع، تنها معیار رد و یا قبول قطعه تولیدی است [11]. از سوی دیگر به سبب تغییرشکل پلاستیک سطح قطعه‌کار در فرایند فرزکاری، سختی در مقیاس میکرو، در لایه سطحی و زیرسطحی قطعه ماشین‌کاری شده بالا رفته و با پیشروی در عمق کاهش می‌یابد [12]. زمانی که درجه حرارت قطعه در طول عملیات ماشین‌کاری از دمای آستنیت فراتر رود (به علت اصطکاک، لبه انباشته و کرنش پلاستیک)، فاز آستنیت تغییر کرده و ضمن کوئنچ شدن<sup>4</sup>، لایه تغییریافته شکننده‌ای با نام لایه سفید بوجود می‌آید. این لایه

1- Machining Center

2- CAD/CAM

3- Surface Integrity

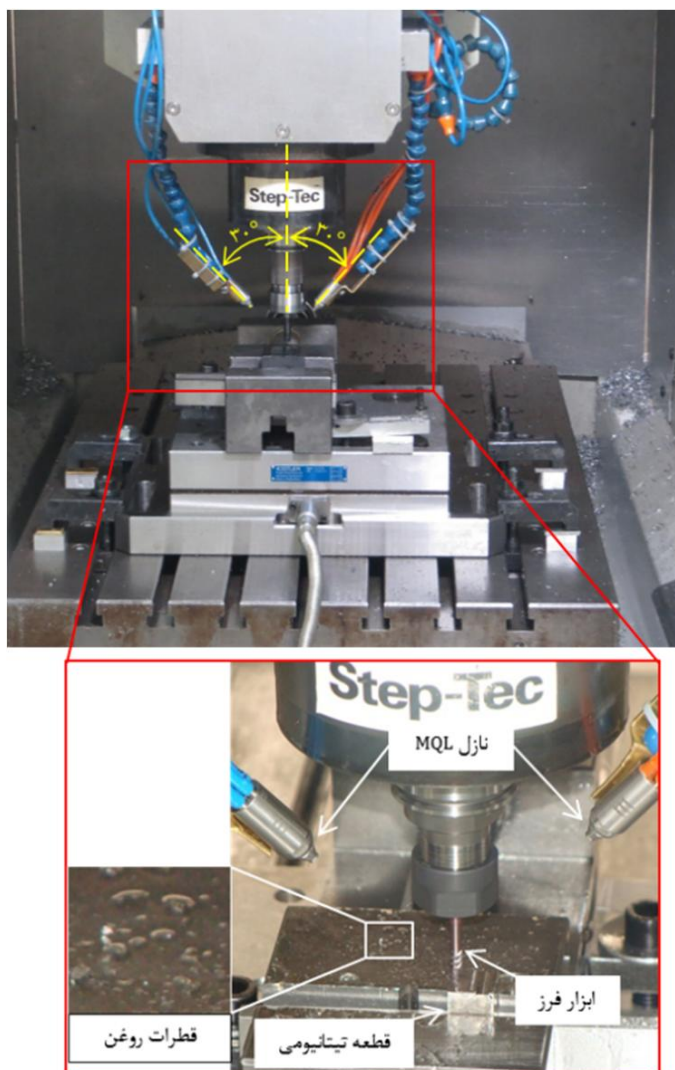
4- Quenching

5- Polycrystalline Diamond (PCD)

6- Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN)

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد آلیاژ Ti6Al4V

عنصر	درصد وزنی (%)
Ti	پایه
V	4
Al	6
N	0/05
O	0/2
H	0/01
C	0/08
Fe	0/25



شکل 1 چیدمان انجام آزمایش و نحوه اعمال روان کار در فرزکاری سرعت بالا

جدول 2 پارامترهای آزمایش فرزکاری سرعت بالا و سطوح مربوطه

پارامتر	1	2	3	4	5
سرعت برشی (m/min) ( $V_c$ )	150	225	300	375	450
پیشروی (mm/tooth) ( $f_z$ )	0/04	0/08	-	-	-
عمق برش محوری ( $a_p$ )	0/5	-	-	-	-
عمق برش شعاعی ( $a_e$ )	2	-	-	-	-

در این تحقیق زبری سطح بر اساس معیار زبری  $Ra$  و با استفاده از دستگاه زبری سنج پرتابل مار<sup>6</sup> مدل PS1 با دقت 0/001 میکرومتر اندازه گیری شد. به منظور اندازه گیری میکروسختی سطح نیز از دستگاه سختی سنج باریس<sup>7</sup> مدل وی تست<sup>8</sup> با دقت 1 ویکرز استفاده گردید. برای اندازه گیری میکروسختی، مقدار میانگین سختی اندازه گیری شده در 3 ناحیه مختلف از سطح فرزکاری شده به عنوان معیار میکروسختی آن آزمایش مد نظر

التان و ازیل [23] سلامت سطح ماشین کاری شده آلیاژهای تیتانیوم و نیکل را مطالعه کرده و نشان دادند که مقدار سختی سطح بیشتر از سختی اولیه ماده بود.

بررسی پژوهش های صورت گرفته، نشان می دهد که تحقیقات کمی در زمینه مطالعه یکپارچه میکروسختی، زبری و بافت سطح در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ Ti6Al4V در حضور روان کاری با حداقل سیال برشی<sup>1</sup> و دو نازل پاشش صورت گرفته است [24]. بنابراین با توجه به مزایای مختلف این فرایند، نیاز است تا شرایط فرزکاری سرعت بالای بهینه برای آلیاژ پراهمیت و پرمصرف Ti6Al4V توسعه داده شود. لذا هدف از تحقیق حاضر، مطالعه اثر فرزکاری سرعت بالا و پارامترهای برشی این فرایند روی زبری، میکروسختی و بافت سطح آلیاژ Ti6Al4V می باشد. به همین منظور، با توجه به بررسی پژوهش های پیشین و آزمایش های غربالگری<sup>2</sup>، طرح آزمایش عاملی کامل با دو متغیر سرعت برشی و نرخ پیشروی انتخاب شد.

## 2- مواد و روش تحقیق

ماده به کار رفته در این تحقیق، آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V آنیل شده با سختی  $300 \pm 10$  ویکرز بود. ترکیب شیمیایی بدست آمده از انجام آزمایش کوانتومتری روی این آلیاژ در جدول 1 نشان داده شده است. آزمایش های فرزکاری روی نمونه های مکعبی شکل به ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  میلی متر با وجوه سنگ خورده صورت گرفت.

تمامی آزمایش های طرح ریزی شده روی ماشین فرز کنترل عددی چهار محوره کنترل همزمان مایکرون<sup>3</sup> مدل HSM 700 با حداکثر نرخ پیشروی میز 20000 میلی متر بر دقیقه و حداکثر دوران اسپیندل 42000 دور بر دقیقه انجام گردید. در این پژوهش از ابزار تیغچه فرز انگشتی کاربرد تنگستن دو لبه با پوشش ریزساختار TiAlN به قطر 6 میلی متر و زاویه مارپیچ 30 درجه ساخت شرکت کورلوی<sup>4</sup> استفاده گردید. چیدمان آزمایش، نحوه بستن قطعه کار و موقعیت نازل های پاشش روان کار در شکل 1 آمده است.

روش روان کاری بکار رفته، روان کاری با حداقل سیال برشی و با استفاده از روغن معدنی بود. دبی روغن 240 میلی لیتر بر ساعت و فشار هوا نیز 6 بار در نظر گرفته شدند. به منظور عملکرد بهتر سیستم روان کاری، از دو نازل پاشش با زاویه 30 درجه نسبت به ابزار استفاده گردید.

قبل از طرح ریزی تست ها با در نظر گرفتن اطلاعات موجود در کاتالوگ شرکت ابزارسازی کورلوی، یک سری تست های غربالگری انجام گرفت و پس از آن، طرح تست فعلی ریخته شد. از سایر گزارشات مشابه چاپ شده نیز بهره گرفته شد [25-27]. طرح آزمایش به کار رفته در این تحقیق، روش فاکتوریل کامل<sup>5</sup> بود که در آن، دو پارامتر سرعت برشی ( $V_c$ ) و پیشروی بر دندانه ( $f_z$ ) به ترتیب در 5 و 2 سطح به عنوان متغیرهای آزمایش در نظر گرفته شدند. سایر پارامترهای برش یعنی عمق برش محوری ( $a_p$ ) و عمق برش شعاعی ( $a_e$ ) نیز ثابت و به ترتیب برابر با 0/5 و 2 میلی متر انتخاب شدند. در جدول 2 پارامترهای فرزکاری به همراه سطوح و مقادیر آن ها آمده است. آزمایش ها در حالت فرزکاری موافق انجام شد. بر اساس طرح آزمایش، در مجموع تعداد 10 آزمایش صورت گرفت و به منظور جلوگیری از خطای احتمالی نیز کلیه آزمایش ها به صورت تصادفی انجام گردیدند.

1- Minimum Quantity Lubrication

2- Screening Tests

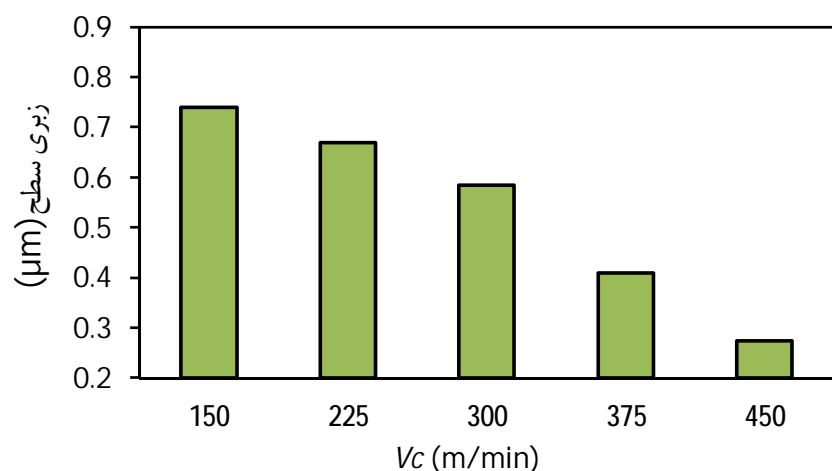
3- Mikron

4- Korloy

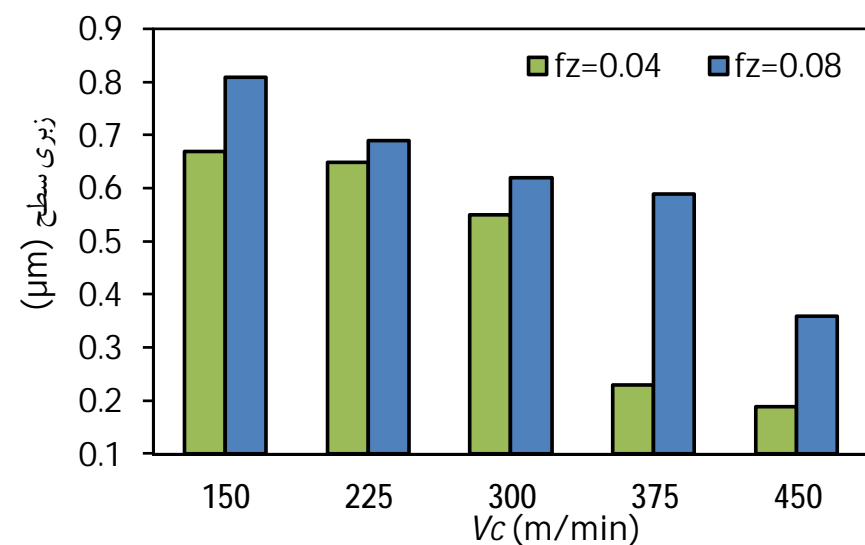
5- Full Factorial Design

6- Mahr  
7- Bareiss  
8- V-Test





شکل 2 تغییرات زبری سطح فرزکاری شده با سرعت برشی



شکل 3 تغییرات زبری سطح فرزکاری شده با سرعت برشی در دو سطح پیشروی

### 3-2- میکروسختی سطح

بررسی اولیه مقادیر میکروسختی بدست آمده نشان می‌دهد که فارغ از شرایط برشی، در تمامی آزمایش‌ها سختی سطح فرزکاری شده بالاتر از سختی ماده اولیه است. همچنین مقادیر میکروسختی با تغییر شرایط برش بین 342 تا 473 ویکرز تغییر می‌کرد که نشان از معنی‌دار بودن تاثیر شرایط برش بر میکروسختی سطح دارد.

در شکل 4 مقادیر میانگین میکروسختی سطح در دو نرخ پیشروی متفاوت آمده است. بر اساس این شکل، مقدار میکروسختی میانگین در پیشروی 0/04 میلی‌متر بر دندانه، 32% و در پیشروی 0/08 میلی‌متر بر دندانه، 41% نسبت به سختی ماده اولیه افزایش می‌یابند. در واقع با بیشترشدن نرخ پیشروی، نیروهای ماشین‌کاری بالا می‌روند. این ازدیاد نیرو باعث بیشترشدن فشار ابزار روی سطح شده و با افزایش کارسختی حاصل از این فشار، سختی سطح بالاتر می‌رود [31,30].

تغییرات سختی سطح قطعه فرزکاری شده، توسط سه مکانیزم اصلی قابل توجه است. در مکانیزم اول گردآیدان دمایی شدید ناحیه برش، باعث تغییر فاز ماده شده و با سرد شدن سریع سطح، افزایش سختی را نتیجه می‌دهد. مکانیزم دوم نیز، تغییر شکل و اندازه دانه به علت تغییر شکل پلاستیک شدید در اثر کار مکانیکی و بروز پدیده کارسختی است. مکانیزم سوم نیز، اثرات محیطی مانند واکنش نیتریده شدن و یا اکسیدشدن سطح ماشین‌کاری شده را شامل می‌شود [32]. در فرزکاری سرعت بالا، از میان این فعل و انفعالات، مکانیزم اول که ماهیت حرارتی دارد، به عنوان عامل اصلی تغییر سختی سطح شناخته می‌شود. علت این امر، کم بودن نیروهای ماشین‌کاری و بالابودن حرارت تولیدی در ناحیه برش در سرعت‌های بالاست. در مجموع، میزان اثرگذاری این مکانیزم‌ها و برهم‌کنش آن‌ها بر یکدیگر، سختی سطح نهایی را تعیین می‌کنند.

قرارگرفت و برحسب سختی ویکرز گزارش گردید. اندازه‌گیری تحت نیروی 0/5 کیلوگرمی و در مدت زمان 4 ثانیه انجام شد. همچنین تصاویر بافت سطح ماشین‌کاری شده توسط میکروسکوپ نوری الیمپوس<sup>1</sup> و میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>2</sup> تی‌اسکن مدل میرا<sup>3</sup> تهیه گردید.

### 3- نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای برشی به همراه تمامی مقادیر اندازه‌گیری شده زبری و میکروسختی سطح در هر 10 آزمایش در جدول 3 آمده است. در ادامه تحلیل نتایج حاصل در سه بخش صورت گرفته و تأثیر پارامترهای برشی به ترتیب روی زبری، میکروسختی و بافت سطح به صورت جداگانه بررسی می‌گردند.

#### 3-1- زبری سطح

براساس شکل 2، زبری سطح میانگین به‌طور معناداری با افزایش سرعت برشی کمتر شد. تغییر شکل راحت‌تر براده در اثر افزایش درجه حرارت در سرعت‌های برشی بالاتر و کاهش نیروی برش را می‌توان علت اصلی بهبود کیفیت سطح دانست. در بیشترین سرعت برشی (450 متر بر دقیقه)، بیشترین کاهش زبری سطح مشاهده گردید. مقدار میانگین زبری در این سرعت 0/27 میکرومتر بوده که نسبت به سرعت برشی 150 متر بر دقیقه، کاهش 63% را نشان می‌دهد. در واقع این نمودار توانایی روش فرزکاری سرعت بالا را در تولید سطحی نزدیک به سطح سنگ‌خورده بیان می‌کند. از دیگر علل این کاهش معنادار، اثر روش روان‌کاری MQL است. در این روش به علت میکرونی شدن قطرات روغن و فشار بالای پاشش اسپری سیال، روان‌کار به خوبی به ناحیه برش نفوذ کرده و عمل روان‌کاری را به نحو احسن انجام می‌دهد. از این رو، اصطکاک کمتر شده و کیفیت سطح بالاتر می‌رود [29,28].

شکل 3 نمودار برهم‌کنش دوتایی سرعت برشی و نرخ پیشروی را روی زبری سطح نمایش می‌دهد. در این شکل می‌توان دید که در سطح پایین نرخ پیشروی، زبری سطح در سرعت برشی 300 متر بر دقیقه با یک کاهش ناگهانی مواجه می‌شود. در واقع این سرعت همان مرز رخداد فرزکاری سرعت بالا است. اما در سطح بالای پیشروی، این تغییر ناگهانی در سرعت برشی 375 متر بر دقیقه رخ می‌دهد.

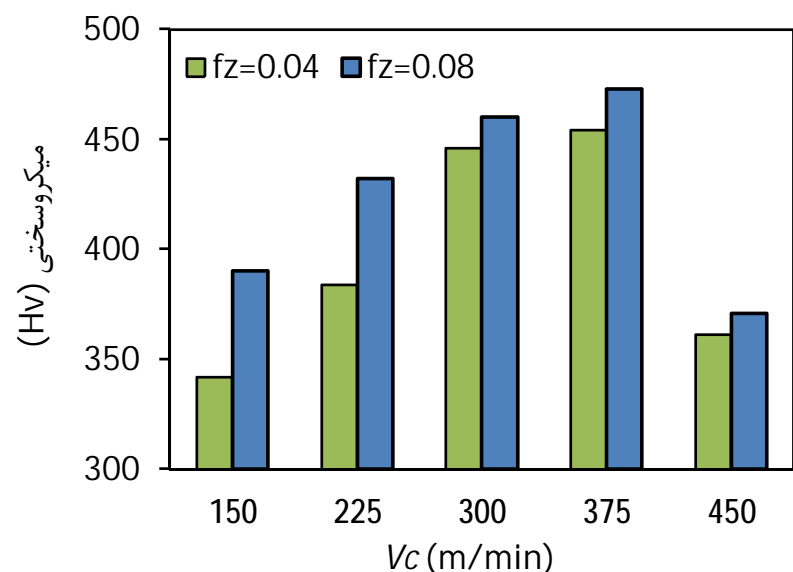
جدول 3 آرایه طراحی آزمایش فاکتوریل کامل به همراه نتایج

شماره آزمایش	Vc	fz	ap	ae	Ra (mμ)	H (HV0.5)
1	150	0/04	0/5	2	0/67	342
2	150	0/08	0/5	2	0/81	390
3	225	0/04	0/5	2	0/65	384
4	225	0/08	0/5	2	0/69	432
5	300	0/04	0/5	2	0/55	446
6	300	0/08	0/5	2	0/62	460
7	375	0/04	0/5	2	0/23	454
8	375	0/08	0/5	2	0/59	473
9	450	0/04	0/5	2	0/19	361
10	450	0/08	0/5	2	0/36	370

1- Olympus

2- Scanning Electron Microscope (SEM)

3- TESCAN MIRA3



شکل 6 تغییرات میکروسختی سطح فرزکاری شده با سرعت برشی در دو نرخ پیشروی متفاوت

### 3-3- بافت سطح

یکی دیگر از معیارهای مهم سلامت سطح، توپوگرافی سطح است که بیانگر حفره‌ها، عیوب و ناهمواری‌های ایجادشده به‌صورت سه‌بعدی در سطح پس از فرزکاری می‌باشد [35,34]. در این تحقیق برای بررسی خصوصیات توپوگرافی سطح، از تصاویر ثبت شده توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

شکل 7، بافت سطح فرزکاری‌شده را در سه سرعت برشی 150، 300 و 450 متر بر دقیقه و در نرخ پیشروی 0/04 میلی‌متر بر دندانه به تصویر می‌کشد. رد مسیر ابزار در این تصاویر مشخص است. در تصاویر بافت برای سرعت پایین (150 متر بر دقیقه)، عیوب متعددی روی سطح مشخص است و مشاهده می‌شود که در سرعت برشی متوسط (300 متر بر دقیقه)، از میزان این عیوب کاسته شده و هنگام استفاده از سرعت برشی بالاتر (450 متر بر دقیقه)، بافت سطحی یکنواخت‌تر، هموارتر و همراه با عیوب کمتری به وجود می‌آید. در واقع در ماشینکاری سرعت بالا، به دلیل کاهش شار حرارتی ورودی به قطعه‌کار، عیوب سطحی و نرم شدن حرارتی در سطح و زیرسطح قطعه ایجاد می‌شود.

به منظور بررسی بهتر عیوب سطحی، تصاویری از سطح با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه گردید. شکل 8 تصاویر سطح نمونه فرزکاری شده با سرعت برشی 150 متر بر دقیقه و نرخ پیشروی 0/04 میلی‌متر بر دندانه را در دو بزرگنمایی 200 و 1000 برابر نشان می‌دهد. در این تصاویر، تشکیل دره‌ها، لهیدگی‌ها<sup>1</sup> و پارگی‌های<sup>2</sup> سطحی در سرعت برشی پایین به وضوح قابل رویت است. دلیل دیگر تشکیل شیارها و پارگی‌های روی سطح، نفوذ لبه ساییده شده ابزار به سطح ماده بوده که این پارگی‌ها روی سطح و در راستای رد مسیر ابزار قابل مشاهده هستند.

### 4- نتیجه گیری

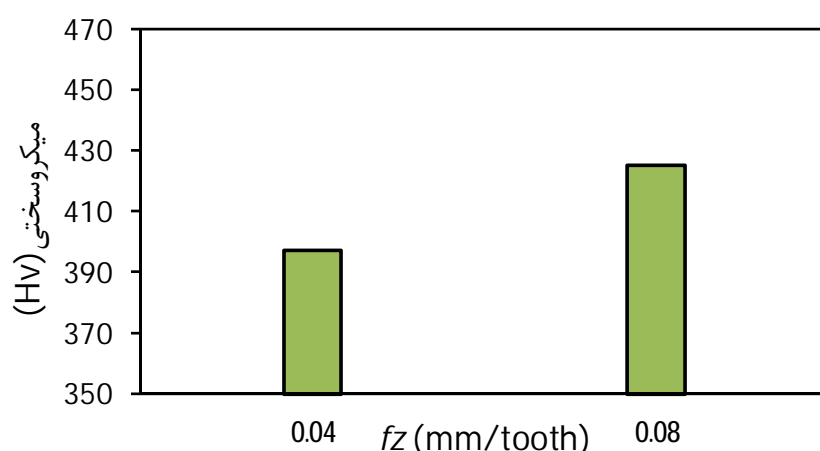
در این پژوهش اثر سرعت برشی روی زبری، میکروسختی و بافت سطح حاصل از فرزکاری سرعت بالای آلیاژ Ti6Al4V، در حضور سیستم روان کاری با حداقل سیال برشی مورد بررسی قرار گرفت. در پایان نتایج بدست آمده به صورت زیر قابل ارائه هستند.

1) بهترین صافی سطح به میزان 0/2 میکرومتر، در سرعت برشی 450 متر بر دقیقه به دست آمد که نشان از قابلیت بالای روش فرزکاری سرعت

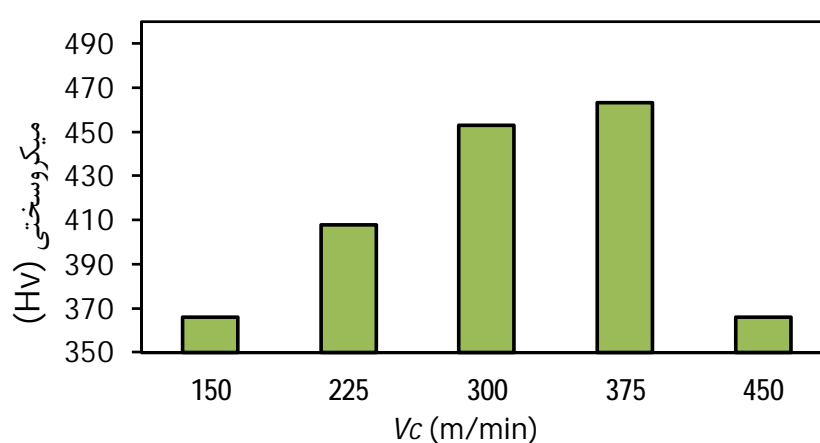
شکل 5 تغییرات میانگین میکروسختی بر حسب سرعت برشی را در 5 سطح نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییر میکروسختی با افزایش سرعت برشی دارای رفتاری دوگانه است. به این معنا که ابتدا و در ناحیه اول، با افزایش سرعت برشی تا 375 متر بر دقیقه، میکروسختی بالا می‌رود و در این سرعت، ماده بیشترین مقدار سختی را تجربه می‌کند. پس از این سرعت برشی و در ناحیه دوم نمودار، میکروسختی سطح به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد.

در واقع، در ناحیه اول شکل 5 (سرعت‌های پایین‌تر از 375 متر بر دقیقه)، حرارت تولید شده با افزایش سرعت برشی بالا می‌رود و به دنبال آن، دمای سطح فرزکاری شده نیز بیشتر می‌شود. در نتیجه افزایش سختی در اثر مکانیزم اول که قبلاً تشریح شد، قابل توجیه است. اما در ناحیه دوم (از سرعت برش 375 متر بر دقیقه تا 450 متر بر دقیقه)، به علت افزایش سرعت برش و کاهش فرصت نفوذ حرارت به قطعه، بیشتر سهم حرارت تولیدی به همراه براده از ناحیه برش خارج می‌شود. بنابراین، علی‌رغم افزایش حرارت تولیدی، دمای سطح فرزکاری کمتر شده و سختی سطحی نیز کاهش می‌یابد که این پدیده مختص ماشینکاری سرعت بالا است [33]. این تغییرات نشان‌دهنده بالا بودن اثر حرارت و ناچیز بودن سهم تغییر شکل پلاستیک در افزایش سختی سطحی در فرزکاری سرعت بالا می‌باشد.

در شکل 6 تغییرات میکروسختی با سرعت برشی، در دو نرخ پیشروی نشان داده شده است. بر اساس این نمودار، در سرعت برشی 375 متر بر دقیقه و نرخ پیشروی 0/08 میلی‌متر بر دندانه، ماده حداکثر میزان سخت‌شدگی را تجربه کرده و سختی آن از 300 ویکرز آلیاژ زمینه (قبل از ماشینکاری) به 473 ویکرز افزایش یافته است (افزایش 57%). از سوی دیگر در این شکل، وابستگی مقادیر سختی نسبت به نرخ پیشروی مشهود است. همچنین مشاهده می‌شود که در سرعت‌های برشی بالا، میزان وابستگی تغییرات میکروسختی به نرخ پیشروی به شدت کاهش می‌یابد.



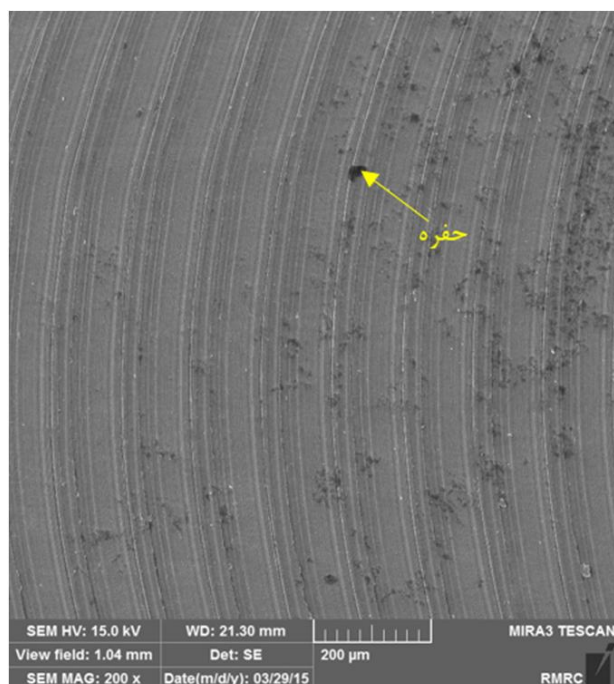
شکل 4 تغییرات میکروسختی سطح فرزکاری شده با نرخ پیشروی



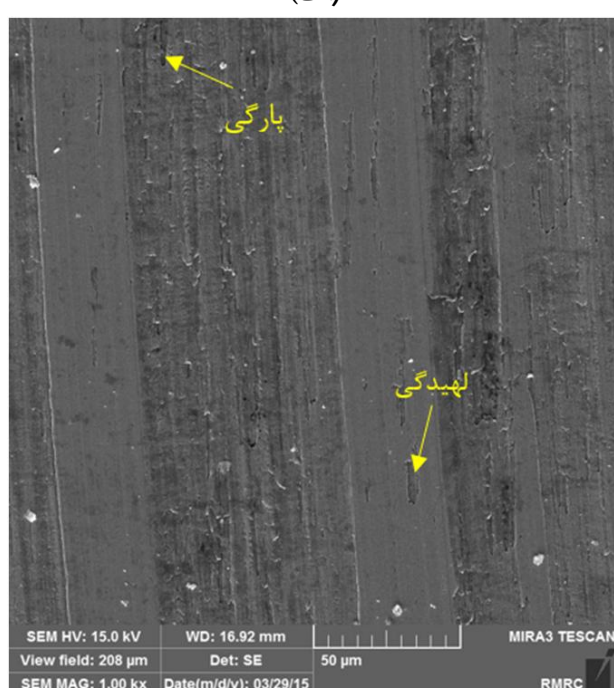
شکل 5 تغییرات میکروسختی سطح فرزکاری شده با سرعت برشی

1- Smears  
2- Tears





(الف)



(ب)

شکل 8 تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی برای نمونه الف) بزرگنمایی 200 برابر ب) بزرگنمایی 1000 برابر

چشمگیری کاهش می‌یابد. این روند به خاطر نبود فرصت کافی برای نفوذ حرارت به قطعه کار در فرزکاری با سرعت 450 متر بر دقیقه بود.

## 5- مراجع

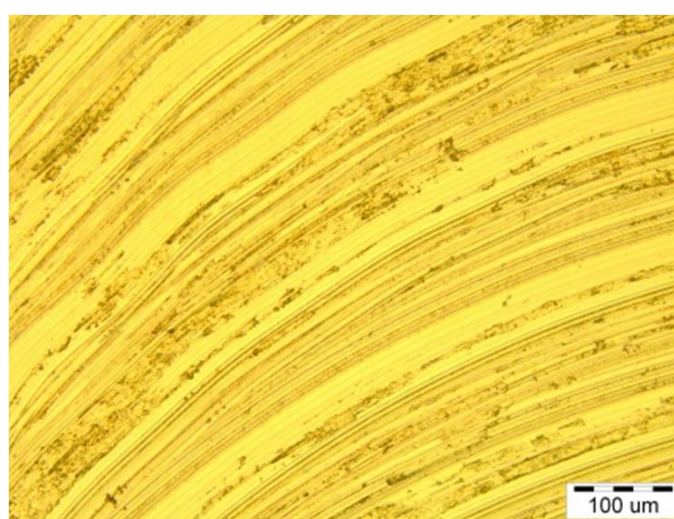
- [1] R. Dewes, E. Ng, K. Chua, P. Newton, D. Aspinwall, Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92, pp. 293-301, 1999.
- [2] A. Li, J. Zhao, Y. Dong, D. Wang, X. Chen, Surface integrity of high-speed face milled Ti-6Al-4V alloy with PCD tools, *Machining Science and Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 464-482, 2013.
- [3] W. Grzesik, *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*: Elsevier, 2008.
- [4] X. Zhang, C. Xiong, Y. Ding, X. Zhang, Stability analysis in milling of thin-walled workpieces with emphasis on the structural effect, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. 4, pp. 589-608, 2010.
- [5] W. Polini, S. Turchetta, Cutting force, tool life and surface integrity in milling of titanium alloy Ti-6Al-4V with coated carbide tools, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 0954405414558732, 2014.
- [6] J. Hughes, A. Sharman, K. Ridgway, The effect of tool edge preparation on tool life and workpiece surface integrity, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, No. 9, pp. 1113-1123, 2004.
- [7] E. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, An overview of the machinability of aeroengine alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 134, No. 2, pp. 233-253, 2003.
- [8] C. Bandapalli, B. M. Sutaria, D. V. Bhatt, High Speed Machining of Ti-alloys-A critical Review, in *Proceedings of the 1 st International and 16th*

بالا در دستیابی به سطوحی با کیفیت بالا دارد.

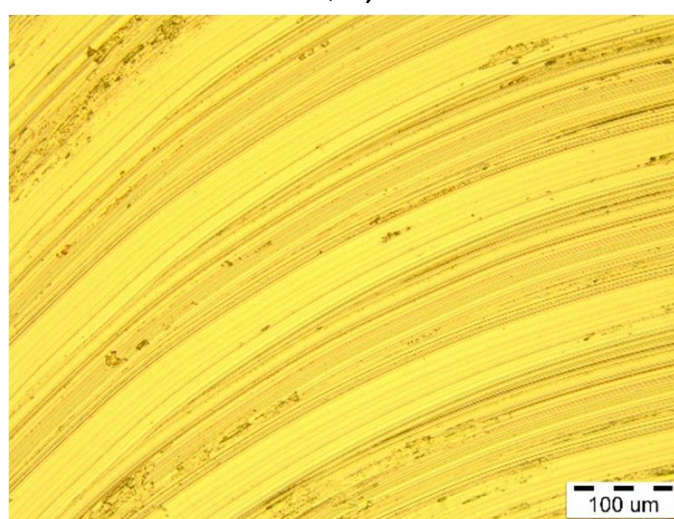
(2) در تمامی آزمایش‌ها مستقل از شرایط برشی، سختی سطح فرزکاری شده بالاتر از سختی اولیه آلیاژ بود و بالاترین میکروسختی در سرعت برشی 375 متر بر دقیقه بدست آمد که افزایش 57% را نسبت به سختی اولیه ماده نشان می‌داد.

(3) سرعت برشی بیشترین تأثیر را بر اندازه زبری و میکروسختی سطح داشت. تصاویر بافت سطح به دست آمده از میکروسکوپ نوری نیز نشان داد که افزایش سرعت برشی در فرایند فرزکاری تأثیر مستقیمی بر کاهش عیوب سطحی مانند ترک‌ها و پارگی‌های سطحی دارد. این اثر در فرزکاری با سرعت 450 متر بر دقیقه کاملاً مشهود بود.

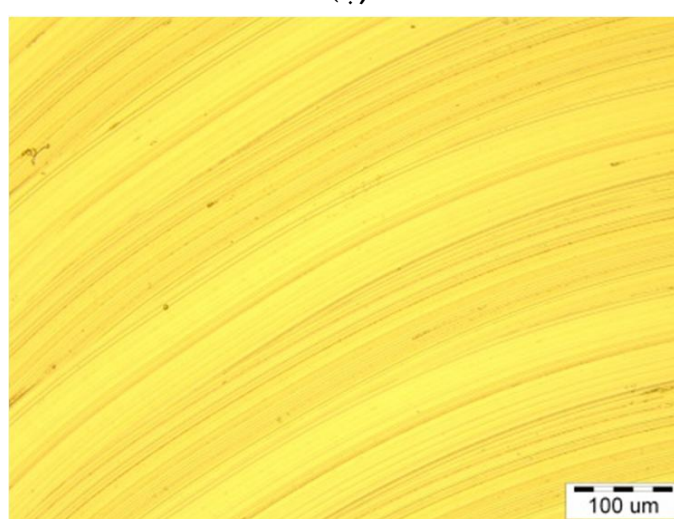
(4) تغییرات میکروسختی با سرعت برشی دارای طبیعتی دوگانه بود. به این معنا که ابتدا با افزایش سرعت برشی تا 375 متر بر دقیقه، میکروسختی بالا می‌رود و در این سرعت، ماده بیشترین مقدار سختی را تجربه می‌کند. پس از این سرعت برشی، میکروسختی سطح به صورت



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 7 توپوگرافی سطح فرزکاری شده در پیشروی 0/04 میلی‌متر بر دندانه و برای سرعت برشی الف) 150 متر بر دقیقه ب) 300 متر بر دقیقه ج) 450 متر بر دقیقه

- [23] D. Ulutan, T. Ozel, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. 3, pp. 250-280, 2011.
- [24] X. J. Cai, Z. Q. Liu, M. Chen, Q. L. An, 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*, pp. 0954405412458492, 2012.
- [25] Solid End Mills, *Korloy Catalogue & Technical Guide*, 2008.
- [26] Z. Wang, Y. Wong, M. Rahman, High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 1, pp. 105-114, 2005.
- [27] E. Ezugwu, D. Fadare, J. Bonney, R. Da Silva, W. Sales, Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 12, pp. 1375-1385, 2005.
- [28] I. H. Mulyadi, P. T. Mativenga, Random or intuitive nozzle position in high-speed milling using minimum quantity lubricant, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 228, No. 1, pp. 21-30, 2014.
- [29] H. Hassanpour, A. Rasti, M. H. Sadeghi, M. Hosein, A. R. O. Saadatbakhsh, Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, 2015.
- [30] D. Thakur, B. Ramamoorthy, L. Vijayaraghavan, Effect of high speed cutting parameters on the surface characteristics of superalloy Inconel 718, *practice*, Vol. 1, pp. 5, 2010.
- [31] H. Hassanpour, S. Shajari, A. Rasti, M. Hossein Sadeghi, Investigation of milling strategies effect on microhardness of a typical curved surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, 2015.
- [32] C. Duan, W. Kong, Q. Hao, F. Zhou, Modeling of white layer thickness in high speed machining of hardened steel based on phase transformation mechanism, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 1-4, pp. 59-70, 2013.
- [33] E. M. Trent, P. K. Wright, *Metal cutting*: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [34] G. T. Smith, *Industrial metrology: surfaces and roundness*: Springer Science & Business Media, 2002.
- [35] R. Suresh, S. Basavarajappa, V. N. Gaitonde, G. Samuel, J. P. Davim, State-of-the-art research in machinability of hardened steels, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 227, No. 2, pp. 191-209, 2013.
- National Conference on Machines and Mechanisms*, Roorkee, India, 2013.
- [9] J. P. Davim, (Eds.), *Surface integrity in machining*: Springer, 2010.
- [10] F. Hashimoto, Y. Guo, A. Warren, Surface integrity difference between hard turned and ground surfaces and its impact on fatigue life, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 81-84, 2006.
- [11] D. Aspinwall, R. Dewes, A. Mantle, The Machining of  $\gamma$ -TiAl Intermetallic Alloys, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 99-104, 2005.
- [12] J. P. Davim, (Eds.), *Machining of hard materials*: Springer, 2011.
- [13] S. Akcan, W. S. Shah, S. Moylan, S. Chandrasekar, P. Chhabra, H. Yang, Formation of white layers in steels by machining and their characteristics, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 33, No. 4, pp. 1245-1254, 2002.
- [14] S. Bosheh, P. Mativenga, White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 2, pp. 225-233, 2006.
- [15] J. Hughes, A. Sharman, K. Ridgway, The effect of cutting tool material and edge geometry on tool life and workpiece surface integrity, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, No. 2, pp. 93-107, 2006.
- [16] H. Su, P. Liu, Y. Fu, J. Xu, Tool life and surface integrity in high-speed milling of titanium alloy TA15 with PCD/PCBN tools, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 25, No. 5, pp. 784-790, 2012.
- [17] S. Alam, A. A. P. AU, Surface Texture Investigation in high Speed Flat End Milling of Ti-6Al-4V, in *Proceeding of International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Dhaka, Bangladesh, 2012.
- [18] R. Pawar, P. Raju, Surface integrity analysis in dry high speed turning of titanium alloys Ti6Al4V, in *Proceeding of*, 190-199.
- [19] C.-F. Yao, L. Tan, J.-X. Ren, Q. Lin, Y.-S. Liang, Surface Integrity and Fatigue Behavior for High-Speed Milling Ti-10V-2Fe-3Al Titanium Alloy, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 14, No. 1, pp. 102-112, 2014.
- [20] C.-f. Yao, D.-x. Wu, Q.-c. Jin, X.-c. Huang, J.-x. Ren, D.-h. Zhang, Influence of high-speed milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6 titanium alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, No. 3, pp. 650-660, 2013.
- [21] D. X. Wu, C. F. Yao, L. Tan, J. X. Ren, D. H. Zhang, Experimental Study on Surface Integrity in High-Speed End Milling of Titanium Alloy TB6, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 328, pp. 867-871, 2013.
- [22] J. P. Velásquez, B. Bolle, P. Chevrier, A. Tidu, *Surface Integrity In High Speed Machining Of Alloy*, in: *Residual Stress and Its Effects on Fatigue and Fracture*, Eds., pp. 87-95: Springer, 2006.