مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، دی 1399، دوره 7، شماره 10، ص‌ص. 34 - 45

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی تأثیر ارتعاشات و سایش ابزار بر توپوگرافی سطح قطعه‌کار در ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V با استفاده از رویه‌نگاری لیزری سطح

مهدی دانش[1*]، علی رحیمی[2]

1- استادیار، مکانیک، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، قزوین

2- کارشناسی ارشد، مکانیک گرایش ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شرق تهران، تهران

* بویین زهرا، صندوق پستی 3451745346، Danesh@bzte.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 فروردین 1399

داوری اولیه: 20 خرداد 1399

پذیرش: 31 تیر 1399

کلیدواژگان:

توپوگرافی

سایش ابزار

آلیاژ Ti6Al4V

ارتعاشات

رویه‌نگاری لیزری

چکیده

ارتعاشات بین ابزار و قطعه‌کار و همچنین سایش ابزار، به سبب تأثیر مخرب آنها بر بافت و کیفیت سطح، پدیده‌هایی نامطلوب در فرآیند ماشین‌کاری محسوب می شوند. در ماشین‌کاری آلیاژهای تیتانیوم به سبب واکنش پذیری بالا، ضریب هدایت حرارتی پایین و مدول الاستیسیته نسبتاً پایین این ماده، مشکل تخریب بافت سطح حادتر است. در این تحقیق، تأثیر ارتعاشات و سایش ابزار بر توپوگرافی سطح قطعه‌کار آلیاژ تیتانیومTi6Al4V در فرآیند تراشکاری خشک، مورد بررسی قرار گرفته است. در انجام آزمایش‌های براده‌برداری، با تغییر سطح ارتعاشات ابزار در دو راستای مماسی و پیشروی، تأثیر ارتعاشات بر توپوگرافی سطح مورد بررسی قرار گرفته است. تغییر ارتعاشات ابزار در راستای مماسی با استفاده از افزایش طول تعلیق ابزار و تغییر سطح ارتعاشات در راستای پیشروی توسط روتراشی قطعه طویل انجام شده است. اندازه‌گیری ارتعاشات توسط سنسورهای شتاب‌سنج نصب شده بر روی بدنه ابزارگیر صورت گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش تأثیر ارتعاشات مماسی بر توپوگرافی سطح قطعه‌کار نشان داد افزایش ارتعاشات مماسی ابزار موجب افزایش تخریب توپوگرافی سطح می‌شود. نتایج حاصل از بررسی تأثیر سایش ابزار بر ارتعاشات و بافت سطح نشان داد افزایش ارتعاشات ناشی از سایش سطح آزاد موجب بی نظمی بافت سطح وکاهش کیفیت آن می‌شود. استفاده از فن‌آوری رویه‌نگاری لیزری سه بعدی در ارزیابی بافت سطح ماشین‌کاری، اطلاعات جامع‌تری در مقایسه با روش‌های اندازه‌گیری دوبعدیِ متداول ارائه می‌دهد.

Effect of cutting tool vibration and tool wear on the surface topography of workpiece while machining Ti6Al4V Titanium alloy using laser profilometry

Mahdi Danesh[1*], Ali Rahimi[2]

1- Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Ghazvin, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, East Branch, Tehran, Iran

* P.O.B. 3451745346, Buein Zahra, Ghazvin, Iran, danesh@bzte. ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 6 April 2020
First Decision: 9 June 2020
Accepted: 21 July 2020

Keywords:
Topography
Tool wear
Ti6Al4V Alloy
Vibration
Laser profilometry

Abstract

Some undesirable phenomena in the machining process include vibrations between the cutting tool and the workpiece as well as tool wear due to the destructive effect of vibrations on the surface quality. In machining of titanium alloys, the deterioration of the surface is more critical due to such properties as low modulus of elasticity, low thermal conductivity, and high chemical reactivity. This study has investigated the effect of vibration and flank wear on the surface topography of Ti6Al4V titanium alloy in the process of dry turning. Variation of induced tangential vibration is conducted by increasing tool overhang and the induced feed vibration is conducted by longitudinal turning of a slender part. The results of the investigation of the effect of vibrations on the surface topography of the workpiece show that the increasing of tangential vibration increases the deterioration of surface topography. In addition, study on the effect of tool wear indicates that vibrations resulting from tool wear increase the irregularities on the topography of the surface. Application of laser profilometry for the evaluation of machined surface textures provides more comprehensive information than the traditional two-dimensional measurement.

1- مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم، عمدتاً بواسطه دارا بودن دو ویژگی مهم مورد توجه قرار گرفته‌اند: 1- استحکام ویژه بالا به نسبت وزن (این خاصیت حتی در دماهای بالا نیز حفظ می‌شود). 2- مقاومت در برابر خوردگی عالی.

امروزه هوافضا هنوز هم نخستین مصرف‌کننده تیتانیوم و آلیاژهای آن است، اما بازارهای دیگر مانند معماری، پتروشیمی، پزشکی، مولدبرق، دریایی، ورزش و حمل و نقل در حال افزایش

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Danesh, A. Rahimi, Effect of cutting tool vibration and tool wear on the surface topography of workpiece while machining Ti6Al4V Titanium alloy using laser profilometry, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 10, pp. 34- 45, 2020 (in Persian)

استفاده از این فلز هستند [1]. قابلیت ماشین‌کاری تیتانیوم و آلیاژهای آن به خاطر چند ویژگی ذاتی آن (به‌شرح زیر)، بطور کلی ضعیف است و در دسته مواد با قابلیت ماشین‌کاری سخت محسوب می شوند:

- تیتانیوم از لحاظ شیمیایی بسیار واکنش‌پذیر است و بنابراین تمایل به واکنش شیمیایی با ابزار، حین ماشین‌کاری دارد و همین باعث تخریب پیش از موعد ابزار می گردد.

- ضریب هدایت حرارتی پایین این آلیاژ باعث بالا رفتن دما در محل تماس ابزار با قطعه شده و به شدت بر عمر ابزار تأثیر می‌گذارد.

- مـدول الاستیسیته آنها نسبتاً پایین است و لذا فنریت آن از فولاد بیشتر بوده و این ویژگی باعث افت قابلیت ماشین‌کاری این آلیاژ می‌شود[1].

ماشین‌کاری آلیاژهای تیتانیوم توأم با عمرپایین ابزار، سلامت سطح کم، بهره‌وری پایین و هزینه تولید بالاست. این مشکلات آلیاژ باعث شده Ti-6Al-4V جزء موادی که ماشین‌کاری آنها مشکل است قرار گیرد [2].

کاربرد روزافزون آلیاژهای تیتانیوم خصوصاً آلیاژ Ti-6Al-4V در صنایع مختلف و از طرف دیگر مشکلات ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم موجب شده تحقیقات وسیعی در سالهای اخیر بر روی ماشین‌کاری آلیاژهای تیتانیوم انجام شود. آنتونیالی و همکارانش در مطالعه‌ای بر روی تحلیل ارتعاشی نیروی ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم تأثیر زاویه ورود ابزار بر پایداری فرآیند و عمر ابزار را مورد بررسی قرار دادند [3].

کومار و همکارانش با استفاده از مشخصه‌های استخراج شده از سیگنال ارتعاشات و وارد نمودن آن به الگوریتم تصمیم‌گیری روشی جهت پیش‌بینی وضعیت ابزار در فرزکاری آلیاژ تیتانیوم ارائه نمودند. نتایج آنها نشان داد شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با الگوریتم درخت تصمیم‌گیری J45 نتایج بهتری را در دسته بندی سایش ابزار ارائه می‌دهد [4]. سدرگرن و همکارانش تأثیر میکروساختار ماده قطعه‌کار بر ارتعاشات ماشین‌کاری آلیاژ Ti-6Al-4V ریخته‌گی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد میکروساختار و مشخصات سازه‌ای سیستم ماشین‌کاری بر روی پاسخ دینامیکی سیستم تأثیر دارند [5]. رائو و همکارانش دریافتند اینسرتهایی که برروی آنها بافتی از سوراخهای میکرونی وجود دارد اصطکاک سطح براده را کاهش می‌دهند و در نتیجه ارتعاشات، دمای برش، سایش ابزار، و زبری سطح به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [6]. در همین زمینه، میشرا و همکارانش نیز با استفاده از تحلیل اجزاء محدود سه بعدی عملکرد اینسرت‌های بافت‌دار با شکل‌های هندسی مختلف را در ماشین‌کاری آلیاژهای تیتانیوم Ti6Al4V بررسی نمودند [7].

سیلوا و همکارانش مدلی جهت پیش بینی ارتعاشات و نیروهای ماشین‌کاری در فرزکاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V توسط ابزار چنبره‌ای ارائه نمودند [8]. پلازا و همکارانش چهار روش استخراج مشخصه سیگنال را برای بهینه سازی پایش پرداخت سطح قطعه کار تیتانیومی مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آنها بیشتر بر روی تحلیل سیگنال‌های ارتعاشات تمرکز شده بود و سعی شده بود بین اندازه‌های آماری سیگنال و باندهای فرکانسی با زبری سطح رابطه برقرار نمایند. پلازا و همکارانش به این نتیجه رسیدند که با به‌کارگیری روش سیگنال ارتعاشات و تبدیل بسته موجک[1] می‌توان کیفیت سطح قطعه کار را با دقت و قابلیت اطمینان بالا در ماشین‌کاری سی‌ان‌سی پایش نمود [9]. یی و همکارانش به منظور بررسی تأثیر نانو سیال اکسید گرافیت بر قابلیت ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V، سایش ابزار، نیروهای ماشین‌کاری و ارتعاشات را مورد مطالعه قرار دادند و کاهش قابل ملاحظه نیروهای ماشین‌کاری، سایش و ارتعاشات را گزارش نمودند [10].

زاچاریا و همکارانش در تحقیقی بر روی تشخیص شرایط ماشین‌کاری بدون چتر و پیش‌بینی چتر در ماشین‌کاری با سرعت بالا بر روی آلیاژ Ti-6Al-4V از الگوریتم یادگیری ماشین[2] استفاده کردند. مشخصه‌های آماری از سیگنال ارتعاشات استخراج و الگوریتم درخت تصمیم‌گیری جهت انتخاب مشخصه غالب مورد استفاده قرار گرفت [11].

بابیک و همکارانش به تعیین ویژگی‌های سطح ایجاد شده در فرزکاری میکرونی آلیاژهای تیتانیوم با هدف کاربرد در ایمپلنت-های دندانی پرداختند [12]. ووجیک و همکارانش فن‌آوری‌های مختلف در اندازه‌گیری چند مقیاسی توپوگرافی سطح درسنگ-زنی و پرداخت آلیاژ تیتانیوم را مورد بررسی قرار دادند [13].

لیانگ و همکارانش در تحقیقی با موضوع بررسی تأثیر سایش تدریجی ابزار بر توپوگرافی سطح قطعه‌کار از جنس Ti6Al4V عیوب سطحی ایجاد شده بر اثر سایش ابزار مانند علائم پیشروی ابزار، شیارها، جریان جانبی، جریان پلاستیک و ذرات ماده چسبنده را مورد مطالعه قراردادند [14].

در این تحقیق تأثیر ارتعاشات و سایش ابزار بر بافت سطح قطعه‌کار از جنس آلیاژ تیتانیومTi6Al4V مورد بررسی قرار

[1] Wavelet Packet Transform
[2] Machine Learning

گرفته است. بررسی تأثیر ارتعاشات ابزار بر بافت سطح قطعه‌کار در دو راستای مماسی و پیشروی به صورت جداگانه بررسی شده است. تحلیل بافت سطح قطعه‌کار با استفاده از رویه‌نگاری لیزری سطح انجام شده است. در بررسی تأثیر سایش ابزار بر توپوگرافی سطح، افزایش ارتعاشات ناشی از سایش ابزار به عنوان عامل اصلی تخریب توپوگرافی سطح مورد بررسی قرار گرفته است.

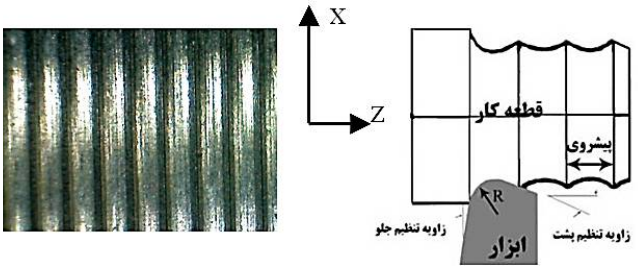
2- بافت سطح قطعه‌کار در فرآیند تراش‌کاری

در فرآیند تراش‌کاری، براده با استفاده از ابزار تک لبه از قطعه استوانه‌ای در حال دوران جدا می‌شود. در حین فرآیند تراش‌کاری، با عبور ابزار بر روی سطح قطعه‌کار، یک پروفیل مارپیچی بر روی سطح قطعه ایجاد می‌شود که به آن علائم پیشروی گفته می‌شود. وجه تمایز بافت سطح ایجاد شده در فرآیند ماشین‌کاری نسبت به سایر سطوح، تشکیل علائم پیشروی ابزار بر سطح قطعه‌کار است (شکل 1). در حالت کلی، بافت به مشخصات سطحی و ظاهری یک شیء با استفاده از اندازه، شکل، دانسیته، ترتیب و تناسب اجزاء بنیادی آن گفته می‌شود. عبارت بافت سطح به صورت بی نظمی‌هایی که به دفعات در سرتاسر سطح تکرار می‌شود و تمایل به ایجاد الگو یا بافت دارد تعریف می‌شود. لازم به ذکر است روش‌های زبری و بافت قابل تفکیک نیستند و به طور مشابهی مکمل یکدیگر هستند [15].

برآیند زبری سطح ایجاد شده توسط ماشین‌کاری ترکیبی از دو مقدار مستقل زبری ایده‌آل و زبری طبیعی می‌باشد. زبری سطح ایده‌آل که تنها تابعی از پیشروی و هندسه ابزار است بهترین پرداخت سطح قابل دست‌یابی برای هندسه ابزار و پیشروی داده شده می‌باشد. زبری سطح ایده‌آل تنها در صورت حذف کامل سایش ابزار، ارتعاشات خود برانگیخته، لبه انباشته و بی دقتی در حرکات ماشین ابزار قابل دست‌یابی است. زبری سطح طبیعی نتیجه بی نظمی در فرآیند ماشین‌کاری است. ارتفاع، شکل، ترتیب و جهت این بی‌نظمی‌های سطحی به عواملی مانند: متغیرهای ماشین‌کاری، هندسه ابزار، سایش ابزار، تشکیل لبه انباشته، ترکیب جنس ابزار و قطعه‌کار و خواص مکانیکی آنها و ارتعاشات بین قطعه، ابزار برشی و ماشین ابزار بستگی دارد [16]. در واقع زبری سطح انحراف از سطح اسمی با مرتبه سه تا شش است (شکل 2). مرتبه انحراف در استاندارد بین‌المللی تعریف شده است. انحراف مرتبه اول و دوم به ترتیب مربوط به فرم و موجی بودن سطح می‌باشد و به سبب خطاهای ماشین ابزار، اعوجاج قطعه‌کار و ناهمگنی جنس قطعه‌کار ایجاد می‌شود. انحرافات مرتبه سه و چهار مربوط به شیارهای تناوبی علائم پیشروی ابزار، شرایط ابزار برش، تشکیل براده وسینماتیک فرآیند می‌باشد. انحرافات مرتبه پنج و شش مربوط به ساختار جنس قطعه‌کار است و مرتبط با مکانیزمهای شیمیایی- فیزیکی (لغزش، نفوذ، اکسیداسیون، تنش‌های پسماند و غیره) در مقیاس دانه و شبکه می‌باشد. انحرافات با مرتبه مختلف روی هم قرار گرفته و پروفیل زبری سطح را تشکیل می‌دهند [17].

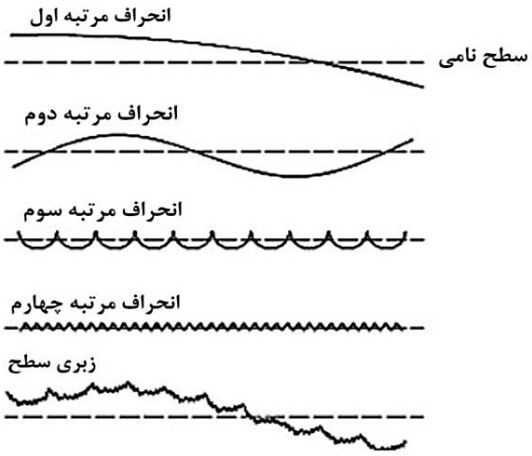
فن‌آوری‌های مختلفی برای اندازه‌گیری سطح وجود دارد که هر کدام بخش متفاوتی از سطح مورد مطالعه را ارائه می‌دهد (شکل 3). لازم است تأکید گردد برخی از فن‌آوری‌های اندازه‌گیری امکان تحلیل کیفی (مانند با استفاده بدست آمده از OM، SEM، AFM) و برخی دیگر امکان تحلیل کمّی را فراهم می‌کنند (مانند CMM، WLI، SEM/EDS).

نتایج تحقیقات ووچیک و همکارانش نشان می‌دهد به کارگیری تحلیل کمّی به تنهایی و یا تحلیل کیفی به تنهایی رضایت بخش نیست [13].



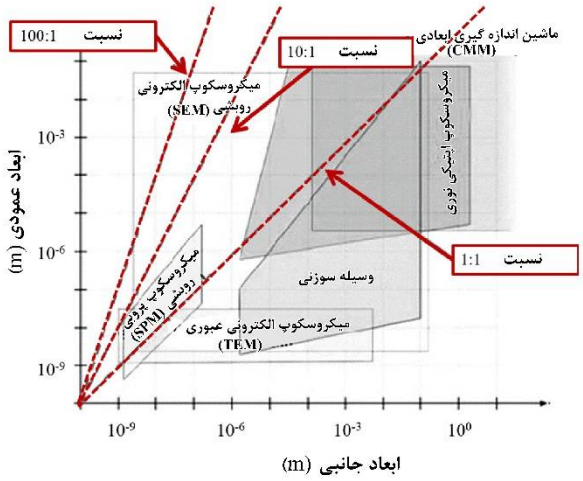
شکل 1 شکل گیری علائم پیشروی بر روی سطح قطعه‌کار در فرآیند تراش‌کاری [15]

Fig. 1 Feed marks formation on the surface of workpiece in turning process [15]



شکل 2 انحرافات فرم سطح [18].

Fig. 2 Surface form deviations [18]



شکل 3 فن‌آوری‌های مختلف در تحلیل بافت سطح [19]

Fig. 3 Surface measurement technologies [19]

2-1- اثر ارتعاشات بر بافت سطح قطعه‌کار

در فرآیند ماشین‌کاری سه نوع مختلف از ارتعاشات مکانیکی به سبب عدم صلبیت سیستم ماشین‌ابزار (ابزار، ابزارگیر، قطعه‌کار و ماشین ابزار) وجود دارد. این ارتعاشات عبارتند از ارتعاشات اجباری، ارتعاشات آزاد و ارتعاشات خود برانگیخته (چتر). ارتعاشات آزاد به علت شوک و ارتعاشات اجباری ناشی از تأثیرات عدم تعادل در اجزاء ماشین ابزار مانند چرخ دنده‌ها، یاتاقان‌ها، اسپیندل و غیره می‌باشد. ارتعاشات آزاد و اجباری را می‌توان به سادگی تشخیص و حذف نمود. اما ارتعاشات خود برانگیخته به سبب طبیعت پیچیده آن هنوز به طور کامل درک نشده است [20]. ارتعاشات خود برانگیخته به سبب رفتار ناپایدارش که باعث جابجایی نسبی زیاد بین ابزار و قطعه‌کار می‌شود نقش تعیین کننده‌تری در پرداخت سطح و عمر ابزار دارد [21]. در چنین حالتی علائم پیشروی ابزار دچار تغییر شده و بافتی نامنظم و موجی حاصل‌می‌شود.

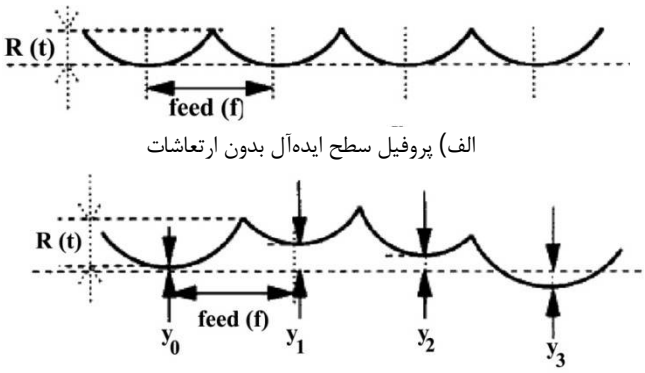
در بیشتر موارد، ابزار در جهت پیشروی ارتعاش می‌کند که به آن ارتعاشات خود برانگیخته نوع A گفته می‌شود. ارتعاشات خود برانگیخته نوع A در مواردی که طول تعلیق ابزار کوتاه و نسبت طول به قطر قطعه‌کار زیاد باشد اتفاق می‌افتد. در نوع دیگری از ارتعاشات خود برانگیخته که در اثر بلند بودن طول تعلیق ابزار ایجاد می‌شود و به آن ارتعاشات خود برانگیخته نوع B گفته می‌شود لبه برش در راستای برشی ارتعاش می‌کند و یا مولفه‌ای در این جهت دارد [22]. همان‌طور که در ابتدای بخش 2 گفته شد، سطح شکل گرفته توسط فرآیند تراش‌کاری نتیجهٔ تکرار هندسه نوک ابزار بر روی قطعه‌کار است. در اثر ارتعاش نسبی ابزار و قطعه‌کار، پروفیل سطح دچار انحراف می‌شود (شکل 4). در مواردی که طول قطعه‌کار در مقایسه با قطر آن زیاد است، اعوجاج قطعه‌کار منبع اصلی انحراف پروفیل سطح است در حالی که در تراش‌کاری توسط ابزارهای با طول تعلیق زیاد، انحراف ابزار عامل اصلی تخریب سطح قطعه‌کار می‌باشد[23].

شکل 5 تصویر شبیه سازی سه بعدی بافت سطح حاصل از ارتعاشات ابزار در راستای مماسی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 5 ارتعاشات ابزار در راستای مماسی موجب ایجاد علائمی در راستای عمودی می‌شود.

ابزار را می‌توان یک تیر یک‌سرگیرداری در نظر گرفت که نیروی برشی Fc بر محور آن وارد می‌شود. در این حالت مقدار جابجایی ابزار از رابطه (1) محاسبه می‌شود.

$$\delta = -\frac{F_c L^3}{3EI} \qquad (1)$$

که در آن F_c نیروی برشی، L طول تعلیق ابزار، E مدول الاستیسیته و I ممان اینرسی مقطع ابزار می‌باشد. تغییر شکل الاستیک ابزار با افزایش طول تعلیق افزایش می‌یابد و موجب افزایش ارتعاشات، افزایش زبری سطح و ناپایداری شکل براده می‌شود [25].

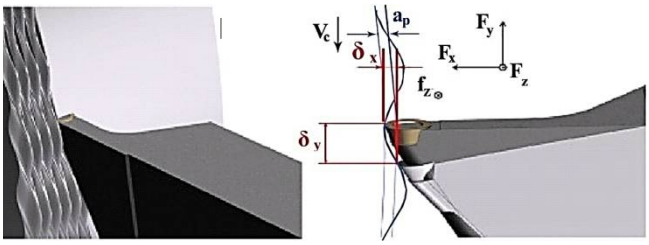


الف) پروفیل سطح ایده‌آل بدون ارتعاشات

ب) پروفیل سطح با ارتعاشات

شکل 4 پروفیل سطح با در نظر گرفتن ارتعاشات نسبی ابزار و قطعه‌کار [24].

Fig. 4 Surface profile considering relative vibration between tool and workpiece [24]



شکل 5 تأثیر ارتعاشات ابزار در راستای مماسی بر بافت سطح قطعه در عملیات رو تراشی [22]

Fig. 5 Effect of tangential vibration of cutting tool on the surface of workpiece for longitudinal turning operation [22]

مقدار زبری سطح قابل دست‌یابی به مقدار زیادی به سفتی ابزارگیر (نسبت طول تعلیق به قطر ابزار) بستگی دارد.

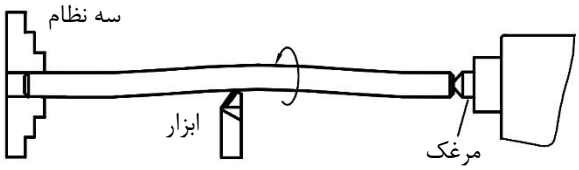
کاهش فرکانس طبیعی ابزار موجب افزایش جابجایی دینامیکی آن می‌شود [22].

$$\vartheta = \frac{k}{k_{cy} \cdot b}\left[\left(\frac{\omega_c}{\omega_n}\right)^2 - 1\right] \quad (2)$$

فاکتور جابجایی دینامیکی ابزار (υ) از سفتی مودال (k)، فرکانس طبیعی سیستم (ω_n)، نیروی برشی ویژه (k_{cy})، طول درگیری ابزار در حین ماشین‌کاری (b) و فرکانس ارتعاشات (ω_c) بدست می‌آید.

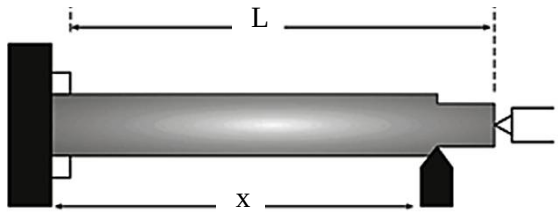
ارتعاشات در راستای پیشروی بیشتر در تراشکاری قطعات طویل وجود دارد. عامل اصلی تشدید ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی، انحراف قطعه‌کار بر اساس موقعیت ابزار بر روی قطعه-کار است (شکل 6). به طوری که در دو انتهای قطعه‌کار بافت سطح منظم و در وسط قطعه و کمی نزدیکتر به مرغک حداکثر ارتعاشات و در نتیجه حداکثر تخریب بافت سطح ماشین‌کاری اتفاق می‌افتند [27]. در فرآیند تراشکاری می توان قطعه‌کار را بر اساس تیر مدلسازی نمود. با استفاده از معادله تیر، انحراف قطعه‌کار از رابطه (3) بدست می‌آید[22].

$$y(x) = F_r x^2 \frac{3L[(L-x)^2 - L^2] + [3L^2 - (L-x)^2]}{12EIL^3} \quad (3)$$



شکل6 انحراف قطعه‌کار حین تراشکاری قطعات بلند [26]

Fig. 6 Deviation of workpiece when turning slender pars [26]



شکل7 خطای فرم در تراشکاری قطعات طویل [23]

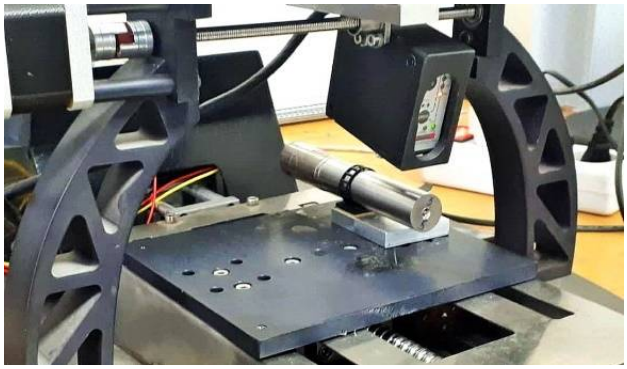
Fig. 7 Turning of a slender workpiece resulting in form errors [23]

3- مواد، تجهیزات و روش انجام کار

قطعه‌کار بکار رفته در کلیه آزمایش‌ها، آلیاژ تیتانیومTi6Al4V به‌صورت میلگرد با قطر 20 میلی‌متر می‌باشد که با گشتاور یکسان بسته شده است. در عملیات براده‌برداری از اینسرت نو مدل CNMG432PR و گرید KC 5010 و نگهدارنده ابزار مدل PCLNR 2525M12 استفاده شد. از دو عدد سنسور تک محوره نصب شده بر روی بدنه ابزارگیر (در جهت y و z دستگاه تراش) و نرخ داده برداری 10240 نمونه بر ثانیه توسط دستگاه داده‌برداری و تحلیل ارتعاشاتECON AVANT انجام شد. آزمایش‌های مربوط به بررسی تأثیر ارتعاشات در راستای مماسی و ارتعاشات در راستای پیشروی به صورت جداگانه انجام شده است. رویه‌نگاری سطوح قطعه‌کار توسط دستگاه رویه‌نگار لیزری سطوح مدل LPM-D1 ساخت شرکت فناوری کهربا انجام شد (شکل 8). محدوده اندازه‌گیری رویه نگاری لیزری سطح همانند وسایل زبری‌سنج سوزنی است (شکل 3) با این تفاوت که خروجی آن به جای منحنی دو بعدی، رویه سه بعدی است که اطلاعات کاملتری را در اختیار قرار می‌دهد.

3-1- بررسی تأثیر ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی بر روی بافت سطح قطعه‌کار

جهت انجام آزمایش‌های بررسی اثر ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی بر روی بافت سطح قطعه‌کار، قطعه با طول 500mm و قطر 20mm جهت انجام عملیات تراشکاری استفاده شد. شکل9 تجهیزات به کار رفته را نشان می‌دهد. سنسور شتاب‌سنج بر روی سطح بالای ابزار نصب شده است. پارامترهای ماشین‌کاری، مقادیر ثابت و مطابق جدول 1 اعمال گردیده است.



شکل8 رویه‌نگاری لیزری سطح

Fig. 8 Laser profilometer for surface inspection

جدول 1 پارامترهای ماشین‌کاری برای آزمایش ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی

Table 1 cutting parameter for vibration test in feed direction

عنوان پارامتر	دور اسپیندل (rev/min)	سرعت پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)
مقدار	500	0/28	0/5

طول‌تعلیق ابزار نیز مقدار ۳۰ میلی‌متر (حداقل مقدار در دسترس جهت کاهش ارتعاشات مماسی) در نظر گرفته شد.

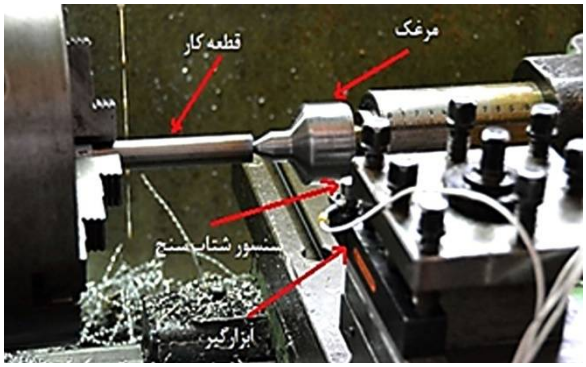
3-2- بررسی تأثیر ارتعاشات ابزار در راستای مماسی بر روی بافت سطح قطعه‌کار

در آزمایش‌های تجربی مربوط به بررسی تأثیر ارتعاشات مماسی ابزار بر روی بافت سطح قطعه‌کار، با استفاده از افزایش طول تعلیق ابزار، ارتعاشات مماسی ابزار افزیش داده شده و تأثیر آن بر بافت سطح بررسی شده است. طول تعلیق‌های بکار رفته مطابق جـــدول 2 و پارامترهای ماشین‌کاری مطابق جدول 3 می‌باشد.

جدول 2 طول تعلیق ابزار

Table 2 Cutting tool overhang

شماره	1	2	3	4	5	6	7	8
طول تعلیق (mm)	40	50	60	70	80	90	100	110



شکل 9 تنظیمات تجربی مربوط به آزمایش ارتعاشات مماسی ابزار

Fig. 9 Experimental setup for vibration analysis in tangential direction

جدول 3 پارامترهای ماشین‌کاری برای آزمایش ارتعاشات ابزار در راستای مماسیپپ

Table 3 Cutting parameter for vibration test in tangential direction

عنوان پارامتر	دور اسپیندل (rev/min)	سرعت پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)
مقدار	500	0/08	0/5

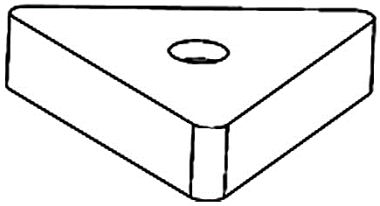
3-3- بررسی تأثیر سایش ابزار بر بافت سطح قطعه‌کار

در این آزمایش که در شرایط ماشین‌کاری خشک انجام شد پارامترهای ماشین‌کاری مطابق جدول 3 اعمال گردیده است

در این آزمایش، طول تعلیق‌ابزار حداقل مقدار در دسترس (35 میلی‌متر) در نظر گرفته شد.

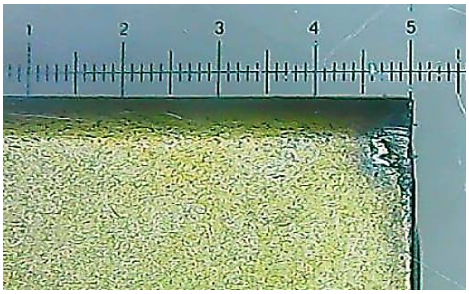
ابزار برشی انتخاب شده برای آزمایش‌های تأثیر سایش ابزار بر سطح قطعه‌کار چهار عدد اینسرت از نوع DNMG 150604 انتخاب گردید. این ابزارهای برشی مطابق جدول 4 با اعداد 1 تا 4 شماره‌گذاری شده است. میزان سایش سطح آزاد این ابزارها در سطوح B و D اینسرت، توسط دستگاه میکروسکوپ دیجیتال Insize و لام مدرج اندازه گیری شده است.

در شکل 10 مناطق اصلی سایش روی لبه اینسرتها نشان داده شده است. (A) سطح براده، (B) سطح آزاد پیشرو، (C) سطح آزاد پسرو و (D) شعاع نوک می باشد. در شکل 11 تصویر منطقه سایش ابزار و نحوه اندازه‌گیری آن توسط لام مدرج در زیر میکروسکوپ نشان داده شده است.

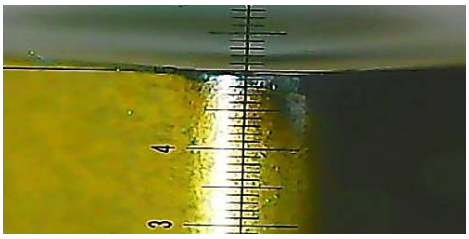


شکل 10 مناطق سایش روی اینسرت

Fig. 10 Cutting tool wear areas



الف) سایش سطح آزاد پیشرو (V_B)



ب) سایش سطح نوک (V_D)

شکل 11 اندازه‌گیری منطقه سایش ابزار

Fig. 11 Measurement of cutting tool wear land

جدول4 میزان سایش اینسرت‌ها

Table 4 Flank wear values of inserts

شماره اینسرت	V_B (mm)	V_D (mm)
1	0	0
2	0/15	0/05
3	0/3	0/1
4	0/6	0/2

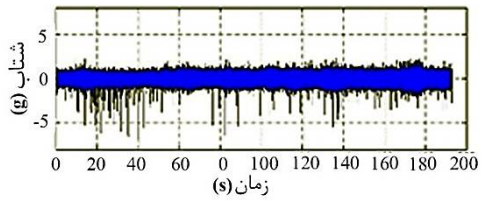
4- نتایج و بحث

4-1- تحلیل نتایج آزمایش بررسی ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی

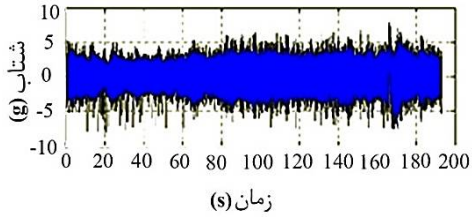
همان‌طور که در بخش 3 بیان شد، ارتعاشات در راستای پیشروی در مواردی که طول‌تعلیق ابزار کوتاه و نسبت طول به قطر قطعه‌کار زیاد باشد ایجاد می‌شود. شکل 12 ارتعاشات در دو راستای مماسی (y) و پیشروی (z) را نشان می‌دهد. در حوزه فرکانس، مشخصات سیگنال توسط چگالی طیفی توان(PSD[1]) بیان شده است. شکل 13 طیف فرکانسی سیگنال‌های شکل 12 را در فواصل زمانی 1 ثانیه نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 13- ب مقدار حداکثر PSD در راستای پیشروی در ابتدای ماشین‌کاری از سمت مرغک پس از درگیری اولیه با قطعه‌کار به صورت پایدار است و در ادامه به دلیل اعوجاج قطعه‌کار تقریباً مطابق الگوی نشان داده شده در شکل 6 نوسان می‌کند. بر اساس رابطه (3) و شکل 7، تغییر شکل قطعه‌کار حین فرآیند روتراشی تابع موقعیت ابزار است. تغییرات مقدار ارتعاشات به تغییر شکل قطعه‌کار مربوط می‌شود اعوجاج قطعه‌کار و ارتعاشات ناشی از آن به دلیل پایین بودن مدول الاستیسیته آلیاژ تیتانیوم (با توجه به رابطه 3) دور از انتظار نیست. مقدار حداکثر PSD در راستای مماسی (شکل 13- الف) بر خلاف راستای پیشروی روند ثابتی دارد.

شکل 14 مقایسه چگالی طیفی توان ارتعاشات ابزار را در دو راستای پیشروی و مماسی نشان می‌دهد.



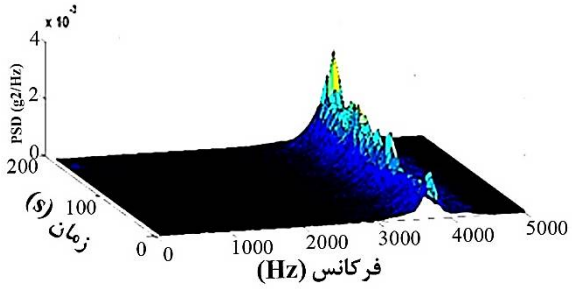
(الف) راستای y



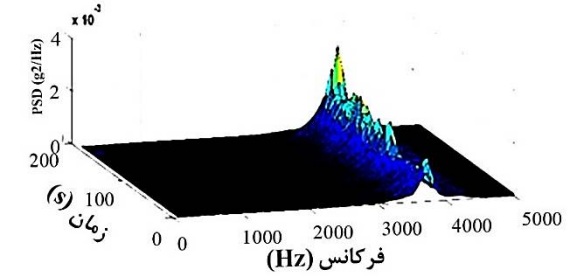
(ب) راستای z

شکل 12 سیگنال ارتعاشات حاصل از تراشکاری قطعه طویل در حوزه زمان (192 ثانیه)

Fig. 12 Vibration signal obtained from slender part turning in time domain (192 s)



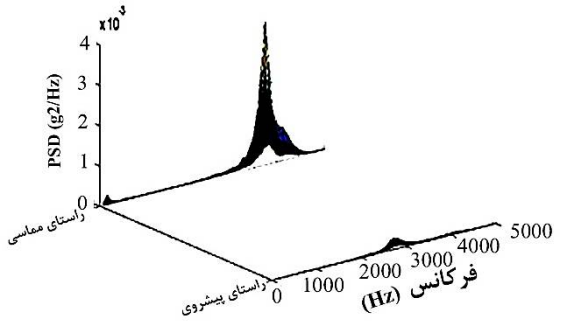
(الف) راستای مماسی



(ب) راستای پیشروی

شکل 13 طیف فرکانسی حاصل از تراشکاری قطعه طویل در حوزه فرکانس

Fig. 13 Frequency spectra resulted from slender part turning in domain



شکل 14 مقایسه طیف فرکانسی سیگنال‌های ارتعاشات در دو راستای مماسی و پیشروی

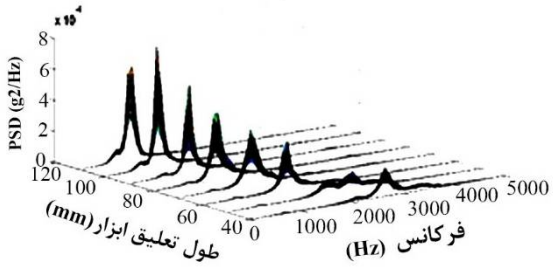
Fig. 14 Comparison of frequency spectra for vibration signal of tangential and feed directions

4-2- تحلیل نتایج آزمایش‌های بررسی ارتعاشات در راستای مماسی

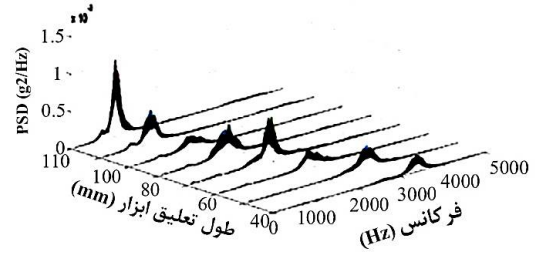
شکل 15 تغییرات طیف فرکانسی ارتعاشات مماسی با افزایش طول تعلیق ابزار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار طول تعلیق ابزار مقدار ارتعاشات افزایش می‌یابد اما فرکانس روند کاهشی دارد. علت این پدیده کاهش فرکانس طبیعی سیستم در اثر افزایش طول تعلیق ابزار است که موجب افزایش جابجایی دینامیکی ابزار بر اساس رابطه (2) می‌شود. شکل 16 تغییرات مقدار حداکثر PSD و مقدار فرکانس آن را با افزایش طول تعلیق ابزار نشان می‌دهد.

[1] Power Spectrul Density

نمودارهای شکل 16 از نمودارهای طیف فرکانس نشان داده شده در شکل 15 استخراج شده است.



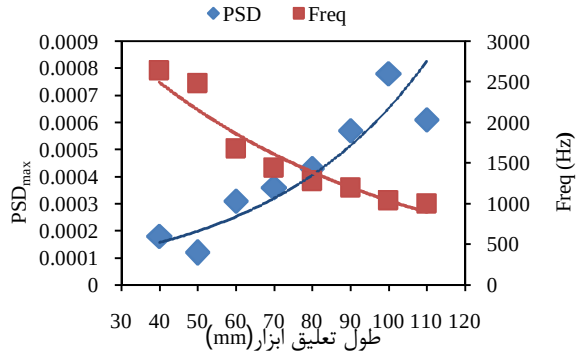
الف) راستای y



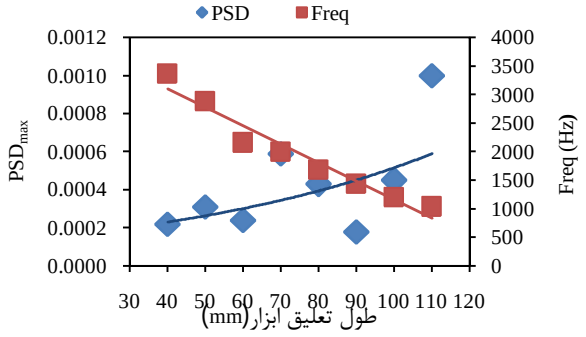
(ب) راستای z

شکل 15 PSD سیگنال‌های ارتعاشات در دو راستای y و z

Fig. 15 PSD of vibration signal for y and z directions



(الف) راستای مماسی



(ب) راستای پیشروی

شکل 16 تغییرات فرکانس و PSD با افزایش طول تعلیق ابزار

Fig. 16 Variation of PSD and frequency respect to overhang length

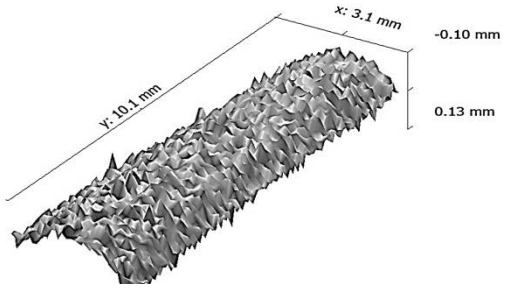
شکل 16 حداکثر مقدار چگالی طیفی توان و تغییرات فرکانس آن را با افزایش طول تعلیق ابزار به ترتیب در جهت‌های مماسی و پیشروی نشان می‌دهد.

4-3- تحلیل نتایج تأثیر ارتعاشات ابزار بر توپوگرافی سطح قطعه‌کار توسط رویه نگاری لیزری

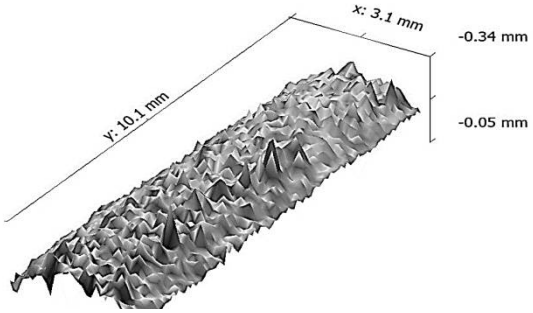
شکل 17 توپوگرافی سطح مربوط به قطعات 1 و 8 جدول 2 که طول تعلیق ابزار در آنها به ترتیب 40 و 110 میلی‌متر است را نشان می‌دهد. وجود قله‌های با ارتفاع بیشتر در سطح قطعه‌ی با طول تعلیق 140 میلی‌متر در اثر افزایش سطح ارتعاشات و کاهش فرکانس ارتعاشات کاملاً مشخص است. شکل 18 مقدار RMS سطوح قطعات که به ترتیب با ابزار با طول تعلیق ابزار ۷۰،۴۰ و 110 میلی‌متر ماشین‌کاری شده‌اند را نشان می‌دهد. علاوه بر این، در تصویر نشان داده شده تخریب علائم پیشروی ابزار و تصادفی بودن قله‌ها و دره‌ها، غیرقابل اطمینان بودن روش‌های اندازه‌گیری دو بعدی زبری سطح را نشان می‌دهد.

4-4- تحلیل نتایج آزمایش‌های بررسی تأثیر سایش ابزار بر سطح قطعه‌کار

شکل 19 تغییرات سطح ارتعاشات ابزار در حوزه زمان را با افزایش میزان سایش سطح جانبی ابزار نشان می‌دهد.



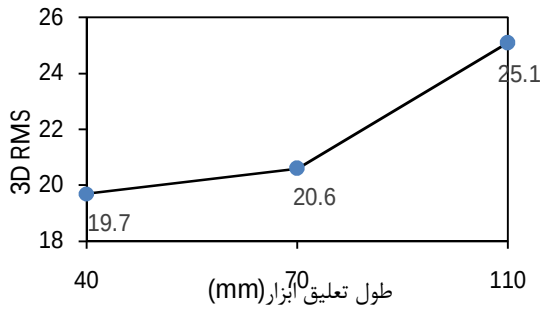
(الف) طول تعلیق ابزار 40 میلی‌متر



(ب) طول تعلیق ابزار 110 میلی‌متر

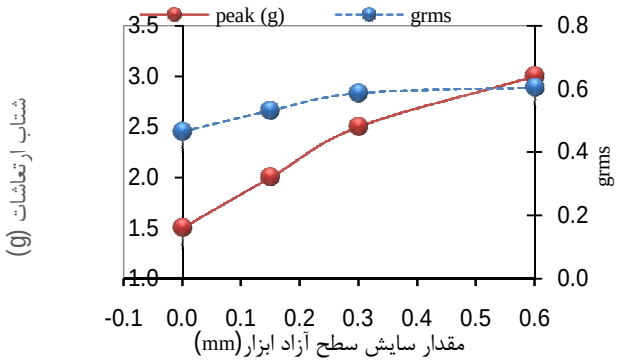
شکل 17 بافت سطح ایجاد شده در اثر افزایش ارتعاشات ابزار

Fig. 17 Surface texture due to increased vibration

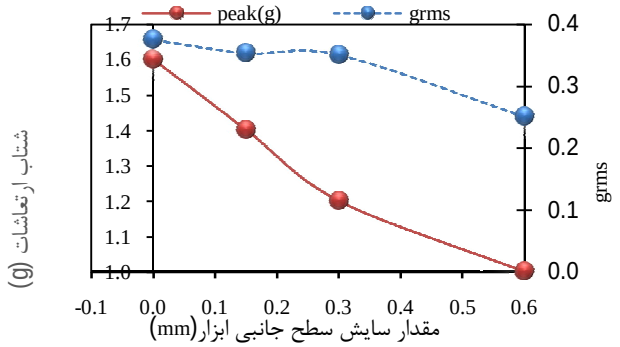


شکل 18 تأثیر افزایش طول تعلیق ابزار و افزایش ارتعاشات حاصل از آن بر روی زبری سطح

Fig. 18 Effect of increasing tool overhang and resulted vibration on the surface roughness



الف) راستای مماسی

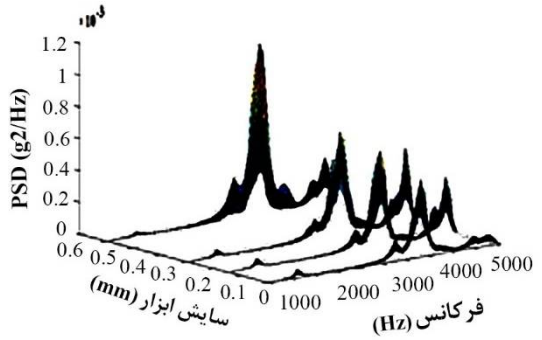


(ب) راستای پیشروی

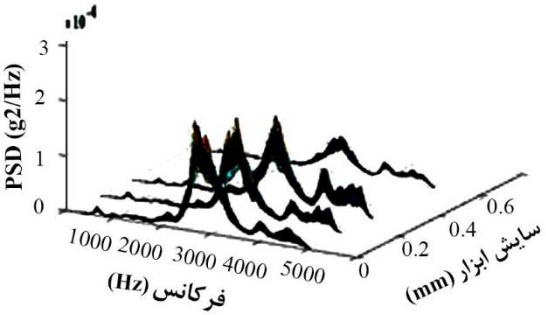
شکل 19 تغییرات سطح ارتعاشات با افزایش سایش سطح آزاد ابزار

Fig. 19 Variation of vibration level with increasing flank tool wear

با توجه به شکل 19- الف با افزایش سایش سطح جانبی ابزار مقادیر ارتعاشات ابزار در راستای مماسی افزایش می‌یابد اما در شکل 19- ب بر خلاف انتظار، مقدار ارتعاشات در راستای پیشروی کاهش یافته است. در بسیاری از موارد، تعیین مقدار ارتعاشات ناشی از سایش ابزار توسط سیگنال حوزه زمان امکانپذیر نیست [28] به همین دلیل طیف فرکانس سیگنال ارتعاشات که در شکل 20 نشان داده شده است جهت تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت. شکل 21 مقادیر حداکثر PSD و فرکانس آن را که از طیف فرکانس نشان داده در شکل 20 استخراج شده است را نشان می‌دهد.



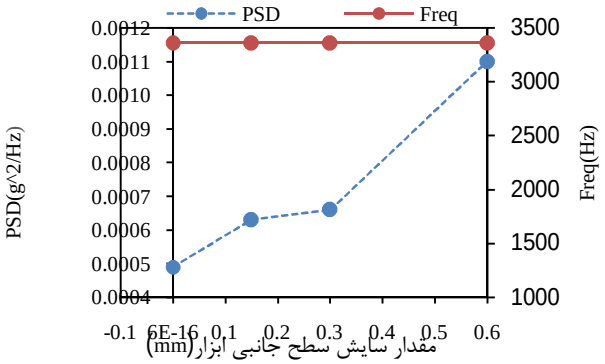
(الف) راستای مماسی



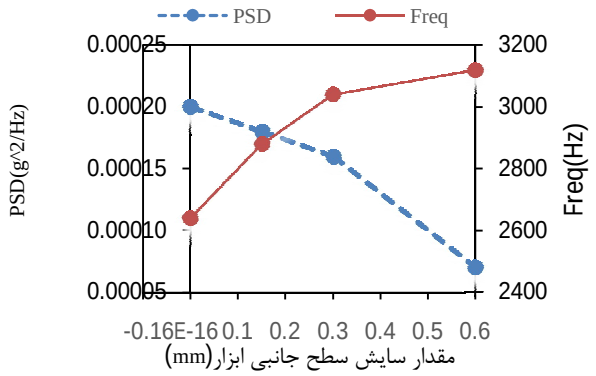
(ب) راستای محوری

شکل 20 PSD سیگنال‌های ارتعاشات در دو راستای y و z

Fig. 20 PSD of vibration signal for x and y directions



(الف) راستای مماسی



(ب) راستای پیشروی

شکل 21 تغییرات فرکانس و چگالی طیفی توان با افزایش سایش ابزار

Fig. 21 Variation of PSD and frequency respect to flank tool wear

همان‌طور که در شکل 21 نشان داده شده است در راستای مماسی، با افزایش سایش ابزار تغییری در فرکانس مشاهده نمی‌شود (شکل 21- الف) اما در راستای پیشروی فرکانس ارتعاشات افزایش می‌یابد (شکل 21- ب). علت تغییر فرکانس در راستای پیشروی را می‌توان به بزرگتر بودن منطقه سایش سطح آزاد پیشرو ابزار در ابزار با سایش بیشتر نسبت داد. در تحقیق یی و همکارانش [10] بر روی تأثیر نانو سیال اکسید گرافیت بر سایش ابزار در تراشکاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V نیز افزایش فرکانس ارتعاشات در راستای پیشروی مشاهده شده است.

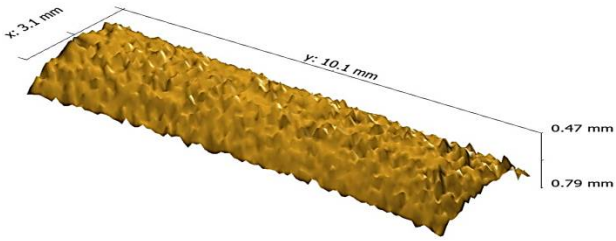
با توجه به شکل 21 مقدار حداکثر PSD در راستای مماسی (شکل 21- الف) افزایش یافته و در راستای پیشروی (شکل 21- ب) بر خلاف انتظار کاهش یافته است. دلیل اینکه با افزایش سایش ابزار، ارتعاشات در راستای مماسی افزایش یافته و در راستای پیشروی کاهش یافته است را می‌توان به ایجاد تأثیر وایپر در اثر سایش سطح آزاد نسبت داد.

در ابزارهای وایپر افزایش شعاع انحنای لبه ابزار موجب پایداری بیشتر ماشین‌کاری می‌شود [29]. حتی ممکن است در اثر سایش زیاد سطح ابزار زبری سطح نیز کاهش یابد [28]. مسطح شدن سطح آزاد پیشرو موجب خواباندن قله‌های زبری بر روی دره‌ها شده و کیفیت سطح را بهتر و ارتعاشات را کاهش می‌دهد. البته باید تأثیر مخرب افزایش ارتعاشات در راستای مماسی و سایش سطح آزاد نوک ابزار بر پروفیل سطح را نیز در نظر گرفت.

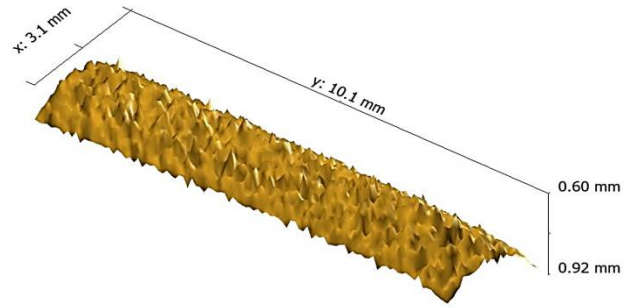
4-4-1- تحلیل تأثیر سایش ابزار بر توپوگرافی سطح قطعه توسط رویه‌نگار لیزری

در شکل 22 توپوگرافی سطح ایجاد شده در تراشکاری با اینسرتهایی با درجات مختلفی از سایش که در جدول 4 آمده است را نشان می‌دهد.

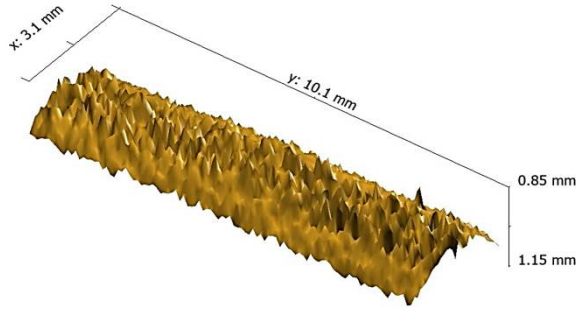
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افرایش سایش سطح آزاد ابزار، ارتفاع قله‌ها و دره‌ها افزایش یافته است. شکل 23 مقادیر RMS مربوط به سطوح نشان داده شده در شکل 22 را نشان می‌دهد.



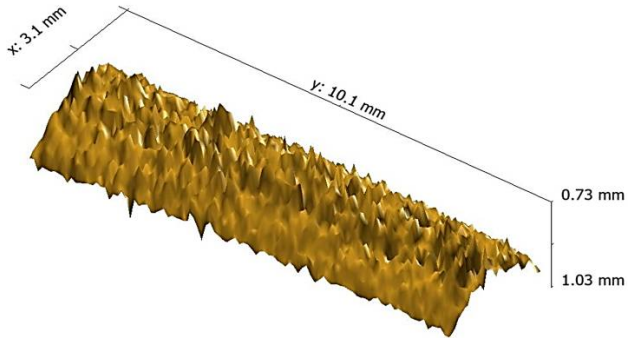
(الف) V_B=0mm



(ب) V_B=0/15 mm



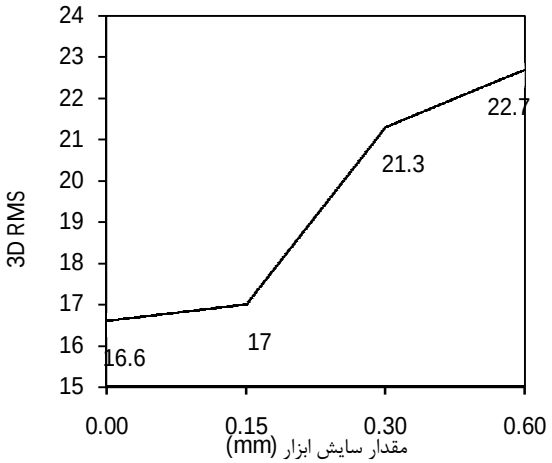
(ج) V_B=30mm



(د) V_B=0/60mm

شکل 22 اثر سایش ابزار بر توپوگرافی سطح قطعه‌کار

Fig. 22 Surface deterioration due to tool wear



شکل 23 تأثیر سایش ابزار بر زبری سطح

Fig. 23 Effect of flank tool wear on the surface roughness

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر ارتعاشات ایجاد شده در دو راستای مماسی و پیشروی و همچنین ارتعاشات ناشی از سایش ابزار بر روی توپوگرافی سطح قطعات از جنس Ti6Al4V با استفاده از رویه‌نگاری لیزری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌های انجام شده در این تحقیق، به شرح زیر است:

- در بررسی ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی که توسط تراشکاری قطعه‌ای طویل انجام شد، نتایج بدست آمده نشان داد که شدت ارتعاشات در راستای پیشروی به مراتب بیشتر از راستای مماسی است و به میزان اعوجاج قطعه‌کار وابسته است. علت مشهود بودن وابستگی ارتعاشات به موقعیت ابزار، مدول الاستیک نسبتاً پایین تیتانیوم است که با توجه به رابطه (3) توضیح داده شد.

- در بررسی تأثیر ارتعاشات مماسی ابزار بر روی توپوگرافی سطح قطعه‌کار که با استفاده از تغییر طول تعلیق ابزار انجام شد مشاهده گردید با افزایش طول تعلیق ابزار، به علت کاهش فرکانس طبیعی سیستم جابجایی دینامیکی ابزار افزایش یافته و موجب تخریب علائم پیشروی ابزار و افزایش بی‌نظمی توپوگرافی سطح می‌شود.

بررسی تأثیر ارتعاشات ناشی از سایش سطح آزاد ابزار بر توپوگرافی سطح قطعه‌کار نشان داد با افزایش سایش ابزار، ارتعاشات در راستای مماسی افزایش و در راستای پیشروی کاهش می‌یابد. علت کاهش ارتعاشات در راستای پیشروی را می توان به اثر وایپر شدن ابزار در اثر سایش نسبت داد. در این حالت، افزایش شعاع انحنای لبه ابزار و مسطح شدن ناحیه سطح آزاد پیشرو ابزار موجب پایداری بیشتر ماشین‌کاری و بهبود کیفیت سطح از طریق خواباندن قله‌های زبری بر روی دره‌ها می‌شود.

البته باید تأثیر مخرب افزایش ارتعاشات در راستای مماسی و سایش سطح آزاد نوک ابزار بر پروفیل سطح که اثر غالب‌تری دارند را نیز در نظر گرفت. به طور کلی با افزایش سایش سطح آزاد ابزار مقدار پارامتر RMS سه بعدی زبری سطح افزایش می‌یابد.

6- مراجع

[1] C. Leyens, Peters. M, Titanium and titanium alloys: Fundamentals and Applications. *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim*, pp. 1-35, 2003.

[2] A. Shokrani, I. Al-Samarrai, S. T. Newman, Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 43, pp. 229–243, 2019.

[3] A. S. Antonialli, A. E. Diniz, R. Pederiva, Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 1, pp. 65-74, 2010.

[4] P.K .kumar, K. Rameshkumar, K.I. Ramachandran , Tool Wear Condition Prediction Using Vibration Signals in High Speed Machining (HSM) of Titanium (Ti-6Al-4 V) Alloy, *Procedia Computer Science*, Vol. 50, pp. 270-275, 2015.

[5] S. Cedergren, C. Frangoudis, A. Archenti, R. Pederson, G. Sjöberg, Influence of work material microstructure on vibrations when machining cast Ti-6Al-4V, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol. 84, pp. 2277–2291, 2016 .

[6] C. M. Rao, S. S. Rao, M. A. Herbert, Development of novel cutting tool with a micro-hole pattern on PCD insert in machining of titanium alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 36, pp. 93–103, 2018.

[7] S. K. Mishra, S. Ghosh, S. Aravindan, 3D finite element investigations on textured tools with different geometrical shapes for dry machining of titanium alloys, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 141, pp. 424–449, 2018.

[8] V. A. D. Silva, R. Pederiva, H. K. Neto, A. E. iniz , Prediction of cutting forces and vibration in titanium alloy milling using a toroidal cutter, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, pp. 2115–2124, 2018.

[9] E.G. Plaza, P.J.N. López, E.M.B. González, Efficiency of vibration signal feature extraction for surface finish monitoring in CNC machining, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 44, pp. 145-157, 2019.

[10] S. Yi, J. Ji Zhu, X. Wang, J. Mo, S. Ding, Investigation of machining Ti-6Al-4V with graphene oxide nanofluids: Tool wear, cutting forces and cutting vibration, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 49, pp. 35-49, 2020.

[11] K. Zacharia, P.K. kumar, Chatter Prediction in High Speed Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) using Machine Learning Techniques, *Material Todays*, Vol. 24, No. 2, pp. 350-358, 2020.

[12] O. Babík, A. Czán, J. Holubjak, Roman Kameník, Jozef Pilc, Identification of surface characteristics created by miniature machining of dental implants made of titanium based materials, *Procedia Engineering*, Vol. 192, pp. 1016-1021, 2017.

[13] M. N. Wójcik, Multi-sensor measurements of titanium alloy surface texture formed at subsequent operations of precision machining process, *Measurement*, Vol. 96, pp. 8–17, 2017.

[14] X. Liang, Z. Liu, G. Yao, B. Wang, X. Ren, Investigation of surface topography and its deterioration resulting from tool wear evolution when dry turning of titanium alloy Ti-6Al-4V, *Tribology International*, Vol. 135, pp. 130-142,

applications and practices, pp. 30–32, *Springer*, 2008.

[24] D. Y. Jang, Y. G. Choi and H. G. Kim, Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manu*facture, Vol. 36, No.4, pp.453–464, 1996.

[25] M. N. Amin, F. R. Nashron, W. W. D. Zubaire, Role of the frequency of secondary serrated teeth in chatter formation during turning of carbon steel AISI 1040 and stainless steel, Proc 1st Int. Conf & 7th AUN/SEED-Net, *Fieldwise Semin Manuf Mater Process*, pp.181–186, 2006.

[26] G. Jianliang, H. Rongdi, A united model of diametral error in slender bar turning with a follower rest, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1002–1012, 2006.

[27] M. Danesh, K. Khalili, Chatter detection in turning process using machine vision, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 10 pp. 94-104, 2013. (in Persian فارسی)

[28] B. S. Prasad, M. PrakashBabu, Correlation between vibration amplitude and tool wear in turning: Numerical and experimental analysis, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 20, No. 1, pp. 197-211, 2017.

[29] S. Fujimaki, T. Shibayama, T. Hayasaka, E. Shamoto, Proposal of “Curved-Profile Wiper Turning” for efficient, stable, and smooth finishing, *Precision Engineering*, Vol. 61, pp. 152-159, 2020.

2019.

[15] M. Danesh, K. Khalili, Determination of Tool Wear in Turning Process Using Undecimated Wavelet Transform and Textural Features, *Procedia Technology*, Vol. 19, pp. 98 – 105, 2015.

[16] G. Boothroyd, *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, Third Edition, pp. 174-181, CRC Press, 1988.

[17] P.G. Benardos, G. C. Vosniakos, Predicting surface roughness in machining: a review, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 833–844, 2003.

[18] DIN4760, Form Deviations; Concepts; Classification System, Deutches Institut Fuer Normung, e.V, 1982.

[19] M. B. Bauza, S. C. Woody, B. A. Woody, S.T. Smith, Surface profilometry of high aspect ratio features, *Wear*, Vol. 271, pp. 519–522, 2011.

[20] M. Siddhpura, R. Paurobally, A review of chatter vibration in turning. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 51, pp. 27–47, 2012.

[21] M. Kayhan, E. Budak, An experimental investigation of chatter effects on tool life, proceeding of the Institution of Mechanical Engineering, Part B. *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 223, pp. 1455–1463, 2009.

[22] G. Urbikain, A. Fernandez, L. N. L. Lacalle, M. E. Gutierrez, Stability lobes for general turning operations with slender tools in the tangential direction, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 67, pp. 35–44, 2013.

[23] K. Cheng, *Machining dynamics: fundamentals,*