مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹۴، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۸۲-۸۵

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

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه زبری سطح در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم

امیر راستی[۱]، حامد حسن‌پور[۱]، محمدحسین صادقی[۲*]، سینا صباغی فرشی[۳]

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

چکیده

کیفیت سطح نهایی در فرآیند ماشین‌کاری، تاثیر زیادی بر عملکرد قطعه داشته و مهم‌ترین شاخصه سطح ماشین‌کاری‌شده است. استفاده از سیال برشی به عنوان یکی از عوامل موثر بر افزایش کیفیت سطح، با مشکلات زیست‌محیطی همراه بوده و برای سلامت اپراتور مضر است. از این رو روان‌کاری با حداقل سیال برشی به عنوان یک روش جایگزین مطرح می‌شود. در این پژوهش زبری سطح نهایی قطعاتی از جنس آلیاژ Ti-6AL-4V در فرآیند فرزکاری سرعت بالا و با استفاده روش روان‌کاری با حداقل سیال برشی مورد بررسی قرار گرفت. طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل شامل ۵ سطح سرعت برشی و ۲ سطح نرخ پیشروی انجام شد. نتایج نشان داد که با شرایط برشی مناسب و در حضور روان‌کاری نیمه خشک، صافی سطح مطلوب ۰/۲ میکرومتر در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم به دست می‌آید. هم‌چنین کمترین مقدار زبری سطح در سرعت برشی ۴۵۰ m/min و نرخ پیشروی ۰/۰۸ mm/tooth حاصل شد.

کلید واژگان: فرزکاری سرعت بالا، آلیاژ Ti-6Al-4V، روانکاری نیمه خشک، زبری سطح

Investigation of surface roughness in high speed milling of titanium alloy

Amir Rasti, Hamed Hassanpour, Mohammad Hossein Sadeghi*, Sina Sabbaghi

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

ABSTRACT

Ultimate surface quality in machining process has a great effect on the workpiece performance and is the most important characteristic of machined surface. Using cutting fluid, as an effective factor on surface integrity improvement, has environmental problems and is harmful for operator's health. As a result, using minimum quantity lubrication (MQL) is considered as an alternative method. In this study, surface roughness of Ti-6Al-4V alloy workpieces were investigated in high speed milling process and using MQL method. Full factorial experiments including 5 levels of cutting speed and 2 levels of feed rate were implemented. Results revealed that a surface roughness of 0.2 µm could be achieved in high speed milling of Ti-6Al-4V alloy in proper cutting conditions and in presence of MQL method. Furthermore, minimum surface roughness was reported in cutting conditions of Vc=450 m/min and fz=0.08 mm/tooth.

Keywords: High Speed Milling, MQL, Surface Roughness, Ti-6Al-4V Alloy

۱- مقدمه

روش ماشین‌کاری سرعت بالا[1] به عنوان روشی با ویژگی‌های سرعت دورانی اسپیندل و نرخ پیشروی بالا، غالبا در فرآیندهای فرزکاری برای رسیدن به قابلیت تولید ماکزیمم و کاهش زمان ماشین‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود مطالعات بسیار در زمینه ماشین‌کاری سریع، تعریف دقیقی برای آن وجود ندارد. دلیل این امر این است که بازه سرعت برشی این روش به نوع ماده و نوع فرآیند باربرداری بستگی دارد. برای مثال این محدوده برای مواد نرم مانند آلومینیوم بسیار بالا بوده و برای مواد سخت ماشین‌کاری شونده مانند تیتانیوم پایین است [۱]. پیشرفت‌های اخیر صورت در زمینه تجهیزات مورد استفاده در ماشین‌کاری سرعت بالا از قبیل دستگاه‌های ماشین سنتر[2] و ابزار و سیستم‌های طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر[3] به مراکز تولیدی این امکان را می‌دهد تا محصولاتی با هزینه کمتر، زمان تحویل کوتاه‌تر، پیچیدگی بیشتر و کیفیت بالاتر تولید کنند [۱]. 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. اخیرا 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 Ti-6Al-4V است. مقاومت خوب به خوردگی، اکسایش و خستگی از ویژگی‌های منحصر به فرد این آلیاژ می‌باشد.

به خاطر خواص حرارتی که این مواد دارند، قسمت اعظمی از استحکام آن‌ها در طول عملیات ماشین‌کاری همچنان بالا باقی می‌ماند. میل به ترکیب شدن زیاد این آلیاژ با بسیاری از مواد ابزار باعث سایش بیش از حد و تخریب سریع ابزار می‌گردد. از سوی دیگر، قابلیت هدایت حرارتی پایین آلیاژهای پایه تیتانیوم نیز منجر به تولید حرارت بسیار زیاد در موضع برش می‌شود [۲].

1. High Speed Machining
2. Machining Center
3. CAD/CAM

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Rasti, H. Hassanpour, M.H. Sadeghi, S. Sabbaghi, Investigation of surface roughness in high speed milling of titanium alloy, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 82-85, 2015 (in Persian فارسی)

Archive of SID

www.SID.ir

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 ۱۵۰ تا ۱۰۰۰ متر بر دقیقه ذکر شده است [۳].

سطح ماشین‌کاری به صورت مرز بین قطعه‌ی ماشین‌کاری شده و شرایط محیطی فرآیند تعریف می‌شود. سلامت سطح[1] به مطالعه خصوصیات و ماهیت لایه سطح ماشین‌کاری شده و تاثیر آن بر خواص مکانیکی و عملکردی قطعه‌کار می‌پردازد [۴]. از مهم‌ترین مشخصه‌های سلامت سطح، می‌توان به زبری سطح ماشین‌کاری شده اشاره کرد [۵]. 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.

مطالعه سلامت سطح در قطعات تیتانیومی، به علت بالاتر بودن احتمال رخداد عیوب سطحی مانند میکروترک‌ها در هنگام ماشین‌کاری، دارای اهمیت بسیاری است. در ادامه به بررسی پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه سلامت سطح در ماشین‌کاری سرعت بالای تیتانیوم پرداخته شده است.

آلام و همکاران [۶] 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. پاوار و پاواد [۷] 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 عمق برش نیز اثراتی روی آن داشت. یاو و همکاران [۸] فرزکاری سرعت بالا را روی آلیاژ تیتانیوم TB6 پیاده‌سازی کرده و نشان دادند که زبری سطح به ترتیب بیشترین تاثیرپذیری را از پیشروی، عرض و سرعت برش دارد. همچنین در شرایط سرعت برشی بالا، پیشروی و عرض فرزکاری پایین، زبری سطح بدست آمده کمتر از ۰/۸ میکرومتر بود. وو و همکاران [۹] سلامت سطح را در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که پیشروی و سرعت برشی بیشترین تاثیر را بر زبری، توپوگراقی، تنش‌های پسماند و میکروسختی سطح دارند. همچنین نشان داده شد که با کنترل و بهینه کردن شرایط برشی، می‌توان به زبری سطح زیر ۰/۷ میکرومتر دست یافت. ولاسکو و همکاران [۱۰] 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. سان و همکاران [۱۱] دریافتند که سطح تیتانیوم ماشین‌کاری شده به روش فرزکاری سرعت بالا دارای ذاتی ناهمگون بوده و زبری سطح در بازه‌ای بین ۰/۶ تا ۱ میکرومتر متغیر است. آن‌ها همچنین نشان دادند که زبری سطح با افزایش پیشروی و عمق برش بیشتر می‌شود، اما تغییرات کمی در رنج سرعت برشی بررسی شده داشت.

هدف از پژوهش حاضر، مطالعه اثر فرزکاری سرعت بالا و پارامترهای برشی این فرآیند روی زبری سطح آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از روش روان‌کاری با حداقل سیال برشی[2] با دو نازل پاشش می‌باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

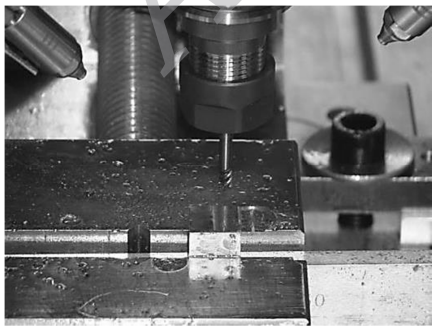
ماده‌ی به‌کاررفته در این تحقیق، آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V آنیل شده با سختی ۳۰۰ ویکرز بود. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد آلیاژ Ti-6Al-4V

عنصر	درصد وزنی (٪)
Ti	پایه
V	۴
Al	۶
N	۰/۰۵
O	۰/۲
H	۰/۰۱
C	۰/۰۸
Fe	۰/۲۵

آزمایش‌های فرزکاری روی نمونه‌های مکعبی شکل به ابعاد۲۰×۲۰×۲۰ میلی‌متر با وجوه سنگ خورده انجام گرفت. تمامی آزمایش‌های طرح‌ریزی شده روی ماشین فرز کنترل عددی چهار محوره کنترل همزمان مایکرون[3] مدل UCP710 با حداکثر دوران اسپیندل ۴۲۰۰۰ دور بر دقیقه انجام گرفت. از ابزار تیغچه فرز انگشتی کاربید تنگستن دو لبه با پوشش ریزساختار TiAlN به قطر ۶ میلی‌متر و زاویه مارپیچ ۳۰ درجه ساخت شرکت کورلوی[4] استفاده گردید. چیدمان آزمایش، نحوه بستن قطعه‌کار و موقعیت نازل‌های پاشش روان‌کار در شکل ۱ آمده است. روش روان‌کاری به کار رفته، روان‌کاری با حداقل سیال برشی و با استفاده از روغن معدنی بود. دبی روغن ۲۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت و فشار هوا نیز ۶ بار در نظر گرفته شدند. به منظور عملکرد بهتر سیستم روان‌کاری، از دو نازل پاشش با زاویه ۳۰ درجه نسبت به ابزار استفاده گردید.

طرح آزمایش به‌کار رفته در این تحقیق، روش فاکتوریل کامل[5] بود که در آن، دو پارامتر سرعت برشی (V_c) و پیشروی بر دندانه (f_z) به ترتیب در ۵ و ۲ سطح و 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 ۰/۵ و ۲ میلی‌متر انتخاب گردیدند. در جدول ۲ پارامترهای فرزکاری به همراه سطوح و مقادیر آن‌ها آمده است. آزمایش‌ها در حالت فرزکاری موافق انجام شد. بر اساس طرح آزمایش، در مجموع تعداد ۱۰ آزمایش صورت گرفت و به منظور جلوگیری از خطای احتمالی نیز کلیه آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام گردیدند. زبری‌سطح براساس معیار زبری R_a و با استفاده از دستگاه زبری‌سنج قابل حمل مار[6] مدل PS1 با دقت ۰/۰۰۱ میکرومتر اندازه‌گیری شد.



شکل ۱ چیدمان قطعه در آزمایش و موقعیت نازل‌های پاشش روان‌کار

1. Surface Integrity
2. Minimum Quantity Lubrication
3. Mikron
4. Korloy
5. Full Factorial Design
6. Mahr

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲ پارامترهای آزمایش فرزکاری سرعت بالا و سطوح مربوطه

پارامتر	سطوح				
	۱	۲	۳	۴	۵
سرعت برشی (m/min) (V_c)	۱۵۰	۲۲۵	۳۰۰	۳۷۵	۴۵۰
پیشروی (mm/tooth) (f_z)	۰/۰۴	۰/۰۸	–	–	–
عمق برش محوری (a_p)	۰/۵	–	–	–	–
عمق برش شعاعی (a_e)	۲	–	–	–	–

۳- نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای برشی به همراه تمامی مقادیر اندازه‌گیری شده زبری سطح در هر ۱۰ آزمایش، در جدول ۳ آمده است. در ادامه تحلیل نتایج صورت گرفته و تأثیر پارامترهای برشی روی زبری سطح به صورت جداگانه بررسی می‌گردند.

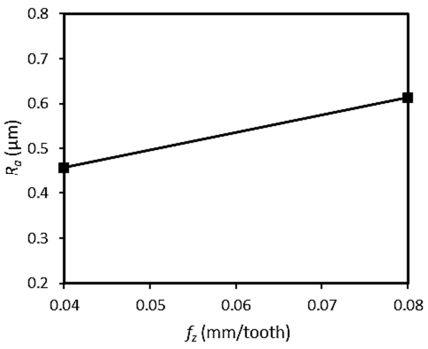
۳-۱- زبری سطح

شکل ۲ (الف) تغییرات میانگین زبری سطح آلیاژ Ti-6Al-4V را در فرآیند فرزکاری سرعت بالا و در دو نرخ پیشروی نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ پیشروی، مقدار زبری سطح میانگین ۳۴٪ افزایش می‌یابد. در واقع بالا رفتن نرخ پیشروی باعث افزایش ضخامت براده نتراشیده شده و متعاقب آن، با افزایش نیرو و ارتعاشات ابزار، زبری سطح بالاتر می‌رود.

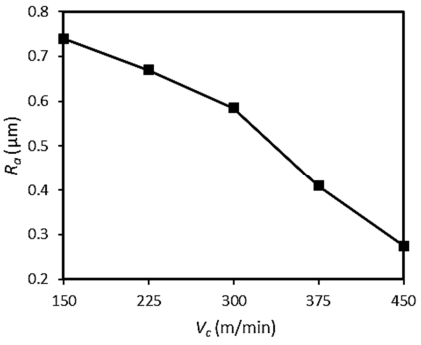
همچنین در شکل ۲ (ب)، زبری سطح میانگین به‌طور معناداری با افزایش سرعت برشی کمتر شد. در بیشترین سطح سرعت برشی (۴۵۰ متر بر دقیقه)، بیشترین کاهش زبری سطح مشاهده گردید. مقدار میانگین زبری در این سرعت ۰/۲۷ میکرومتر بوده که نسبت به‌سرعت برشی ۱۵۰ متر بردقیقه،

جدول ۳ آرایه طراحی آزمایش فاکتوریل کامل به همراه نتایج

شماره آزمایش	V_c	f_z	a_p	a_e	R_a(µm)
۱	۱۵۰	۰/۰۴	۰/۵	۲	۰/۶۷
۲	۱۵۰	۰/۰۸	۰/۵	۲	۰/۸۱
۳	۲۲۵	۰/۰۴	۰/۵	۲	۰/۶۵
۴	۲۲۵	۰/۰۸	۰/۵	۲	۰/۶۹
۵	۳۰۰	۰/۰۴	۰/۵	۲	۰/۵۵
۶	۳۰۰	۰/۰۸	۰/۵	۲	۰/۶۲
۷	۳۷۵	۰/۰۴	۰/۵	۲	۰/۲۳
۸	۳۷۵	۰/۰۸	۰/۵	۲	۰/۵۹
۹	۴۵۰	۰/۰۴	۰/۵	۲	۰/۱۹
۱۰	۴۵۰	۰/۰۸	۰/۵	۲	۰/۳۶



(الف)



(ب)

شکل ۲ تغییرات زبری سطح فرزکاری شده با الف) نرخ پیشروی ب)سرعت برشی

کاهش ۶۳٪ 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 به‌علت میکرونی شدن قطرات روغن و فشار بالای پاشش اسپری سیال، روان‌کار به خوبی به ناحیه برش نفوذ کرده و عمل روان‌کاری را به‌نحو احسن انجام می‌دهد. از این‌رو، اصطکاک کمتر شده و کیفیت سطح بالاتر می‌رود.

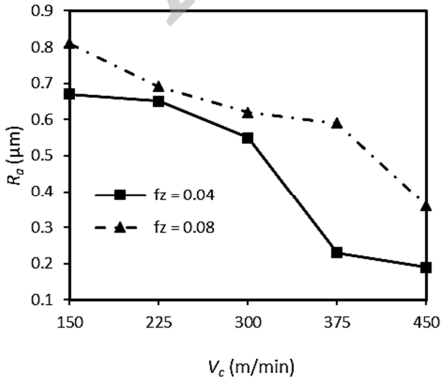
شکل ۳ نمودار برهم‌کنش دوتایی سرعت برشی و نرخ پیشروی را روی زبری سطح نمایش می‌دهد. در این شکل می‌توان دید که در سطح پایین نرخ پیشروی، زبری سطح در سرعت برشی ۳۰۰ متر بر دقیقه با یک کاهش ناگهانی مواجه می‌شود. در واقع این سرعت همان مرز رخداد فرزکاری سرعت بالا است. اما در سطح بالای پیشروی، این تغییر ناگهانی در سرعت برشی ۳۷۵ متر بر دقیقه رخ می‌دهد.

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر پارامترهای اصلی برش شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی روی زبری سطح حاصل از فرزکاری سرعت بالای آلیاژ Ti-6Al-4V، در حضور سیستم روان‌کاری با حداقل سیال برشی صورت گرفت. در پایان نتایج به دست آمده به صورت زیر قابل ارائه است.

۱) روش روان‌کاری با حداقل سیال برشی به خوبی توانست در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم مورد استفاده قرار گیرد و کیفیت سطح مطلوبی را تولید کند.

۲) با انتخاب مناسب شرایط برش می‌توان در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم به صافی سطح مطلوب ۰/۲ میکرومتر دست یافت.



شکل ۳ تغییرات زبری سطح فرزکاری شده با سرعت برشی در دو سطح پیشروی

Archive of SID
www.SID.ir

۳) سرعت برشی بیشترین تاثیر را بر اندازه زبری سطح داشت و مرز فرزکاری سرعت بالا در سطح پایین نرخ پیشروی ۳۰۰ متر بر دقیقه به دست آمد.

۵- مراجع

[1] W. Grzesik, *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*: Elsevier, 2008 .
[2] 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 .
[3] C. Bandapalli, B. M. Sutaria, D. V. Bhatt, High Speed Machining of Ti-alloys-A critical Review, in *Proceedings of the 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013)*, Roorkee, India, 2013 .
[4] J. P. Davim, *Surface integrity in machining*: Springer, 2010 .
[5] 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 .
[6] S. Alam, A. A. P. AU, Surface Texture Investigation in high Speed Flat End Milling of Ti-6Al-4V, in *Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Dhaka, Bangladesh. 2010*.
[7] R. Pawar, P. Raju, Surface integrity analysis in dry high speed turning of titanium alloys Ti6Al4V, in *International conference on trends in industrial and mechanical engineering* (*ICTIME'2012*), pp. 190-199. 2012 .
[8] 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 .
[9] 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 .
[10] 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 .
[11] J. Sun, Y. Guo, A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti–6Al–4V, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 209, No. 8, pp. 4036-4042, 2009 .

Archive of SID

www.SID.ir