



مطالعه زبری، بافت سطح و دقت ابعادی در رزوه تراشی گردابی پیچ از جنس آلیاژ Ti6Al4V

امیر راستی^{۱*}، محمد ترشیزی^۲، علی زین العابدین بیگی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: a.rasti@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۲ خرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۴ تیر ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

رزوه تراشی گردابی

پیچ ستون فقرات

Ti6Al4V

یکی از چالش‌های ساخت پیچ‌های ارتوپدی از جنس آلیاژ Ti6Al4V، نیاز به فرایند تولید سریع، مقرون به صرفه و با قابلیت ماشین‌کاری فلزات سخت ماشین‌کاری شونده می‌باشد. بر همین اساس، در این مطالعه سینماتیک فرایند رزوه‌تراشی گردابی جهت ساخت پیچ‌های ارتوپدی از جنس آلیاژ Ti6Al4V توسعه داده شده است و اثر پارامترهای برش بر دقت ابعادی و بافت سطح پیچ‌های ستون فقرات مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این روش می‌توان به سرعت بالای تولید در عین حفظ دقت بسیار بالا دست پیدا کرد. به همین منظور پارامترهای اصلی فرایند شامل سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی قطعه‌کار در دو سطح تغییر یافتند و در مجموع چهار نمونه ساخته شد. پارامترهای مورد بررسی شامل زبری، بافت سطح ریشه رزوه و دیواره جانبی پروفیل و همچنین اندازه زاویه رزوه بودند. نتایج نشان داد که استفاده از نرخ پیشروی بالاتر باعث زبرتر شدن سطح ریشه رزوه شده و اثر شخم‌زنی را کاهش می‌دهد. این افزایش زبری با توجه به رشد بهتر سلول‌های بافت روی سطح و افزایش استحکام پیچ در بافت استخوانی ایده‌آل بود. از سوی دیگر، افزایش سرعت برشی، علی‌رغم ایجاد بافت دندان‌های روی دیواره رزوه، به واسطه کاهش نیروی برش و حذف خرابی تاج رزوه، باعث افزایش کیفیت پیچ نهایی گردید. اثر پارامترهای برش بر اندازه زاویه رزوه با توجه به تولرانس ساخت مدنظر قابل چشم‌پوشی بود.

Study of surface roughness, texture, and dimensional accuracy in thread whirling of Ti6Al4V screw

Amir Rasti^{1*}, Mohammad Tarshizi², Ali Zeinolabedin-Beygi³

1- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- MSc Graduate, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- PhD Student, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: a.rasti@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 1 June 2024

Accepted: 14 July 2024

Keywords:

Thread Whirling

Pedicle Screw

Ti6Al4V

Abstract

The production of orthopedic screws of Ti6Al4V alloy presents challenges due to the need for a fast, cost-effective method of cutting difficult-to-cut alloys. This study addresses these issues by determining the kinematics of thread whirling for orthopedic screws made of Ti6Al4V alloy and investigating the effect of cutting parameters on the dimensional accuracy and texture of spinal screws. The proposed method enables rapid production while maintaining high precision. The main process parameters, such as tool rotational speed and workpiece feed rate, were varied at two levels for a total of four samples. The output parameters included surface roughness, thread root surface texture, sidewall profile, and thread angle. The results showed that a higher feed rate produced a rougher thread root surface and a lower ploughing effect. This increased roughness was considered ideal because it promotes cell growth on the screw surface and improves screw osteointegration in bone tissue. Furthermore, increasing the cutting speed, while creating a serrated texture on the thread wall, improved overall screw quality by reducing cutting force and eliminating crown thread defects. Within the specified manufacturing tolerance, the effect of cutting parameters on thread angle was negligible.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Rasti A, Tarshizi M, Zeinolabedin-Beygi A. Study of surface roughness, texture, and dimensional accuracy in thread whirling of Ti6Al4V screw. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jun 21;11(4):1-12. doi: 10.22034/IJME.2024.460623.1966 [In Persian]

۱- مقدمه

آلیاژ Ti6Al4V به‌عنوان یکی از پرکاربردترین آلیاژهای تیتانیوم به دلیل خواص مکانیکی عالی، مقاومت به خوردگی بالا و نسبت استحکام به وزن مناسب، در صنایع هوافضا، پزشکی و خودروسازی به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. یکی از چالش‌های اساسی در ساخت پیچ‌های پزشکی با استفاده از این جنس، قابلیت ماشین‌کاری پایین آلیاژهای تیتانیوم به‌دلیل ضریب هدایت حرارتی ضعیف آن بوده که باعث کاهش شدید عمر ابزار می‌گردد. لذا همیشه تولید قطعات از جنس Ti6Al4V همواره یکی از چالش‌های صنعت بوده است. یکی از کاربردهای این آلیاژ در ساخت پیچ‌های ارتوپدی می‌باشد [۱]. در حالت عادی، ساخت چنین پیچ‌هایی نیازمند ترکیبی از فرایندهای تراشکاری، سوراخکاری، فرزکاری و رزوه‌تراشی می‌باشد که نیاز به زمان و هزینه طولانی داشته و محدودیت‌های ذکر شده در ماشین‌کاری آلیاژهای تیتانیوم برای آن باقی است. در این بین، فرایند رزوه‌تراشی گردابی^۱ به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته در تولید رزوه‌های دقیق است. این فرایند به دلیل توانایی در ایجاد رزوه‌هایی با کیفیت بالا و سرعت تولید بالا، مورد توجه قرار گرفته است [۲]. با این حال، مطالعات اندکی در این خصوص، به‌ویژه در آلیاژهای سخت ماشین‌کاری شونده گزارش شده است. در ادامه به مهم‌ترین مطالعات انجام شده در زمینه رزوه‌تراشی گردابی اشاره شده است.

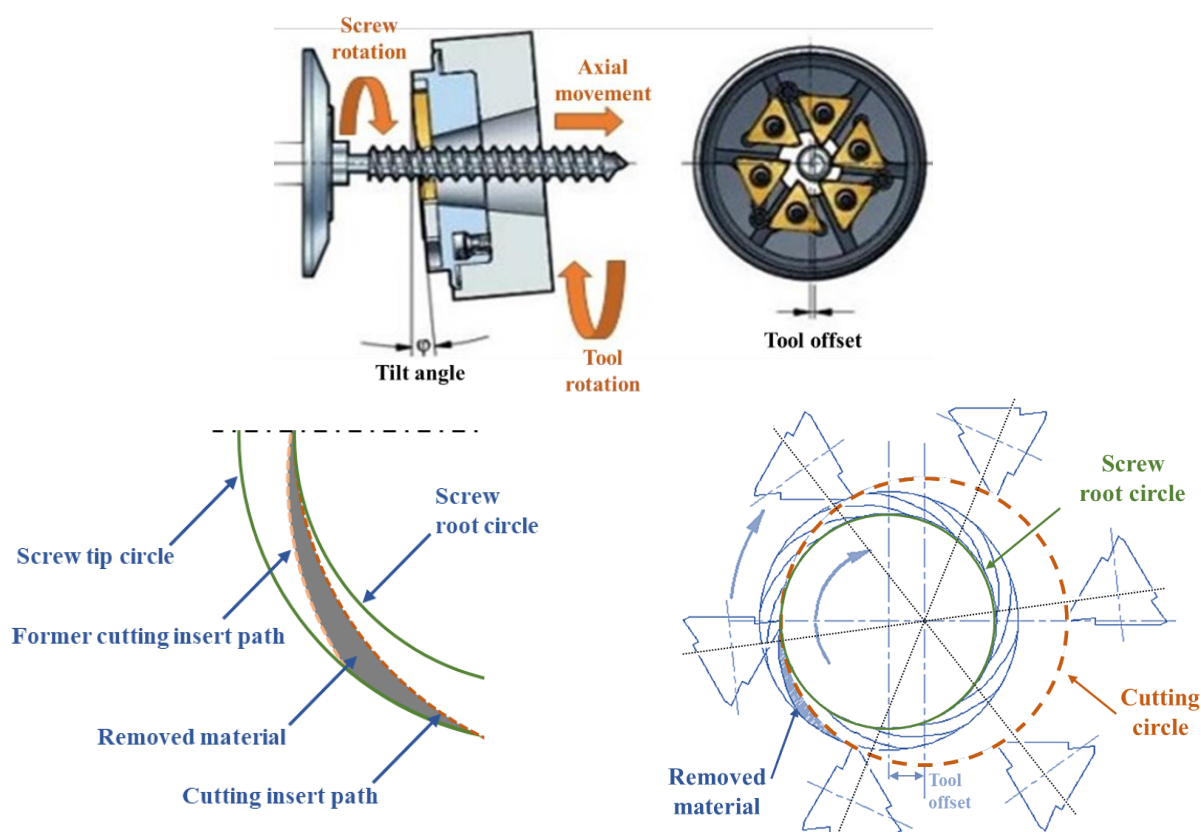
شنگ و همکاران [۳] هندسه رزوه ایمپلنت‌های دندانی را در رزوه‌تراشی گردابی بررسی نموده و نتیجه گرفتند که در تولرانس زاویه تنظیم هولدر کمتر از ۰.۵ درجه، خطای ایجاد شده در هندسه رزوه قابل قبول است. سوشی و همکاران [۴] تولید ایمپلنت‌ها به روش رزوه‌تراشی گردابی را با استفاده از ابزارهای مختلف برشی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان از برتری ابزارهای CBN نسبت به ابزارهای PCD در سرعت‌های برشی بالا داشت. مطالعه وانگ و همکاران [۵] نشان داد که مدل‌سازی دینامیکی و تحلیل ارتعاشات در سیستم رزوه‌تراشی گردابی با سرعت بالا می‌تواند به بهبود زبری سطح کمک کند. این مطالعه نشان داد که کاهش ارتعاشات به بهبود زبری سطح منجر می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، بوتاک و همکاران [۶] به بررسی بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری بر اساس اندازه‌گیری زبری و ارتعاشات قطعات تولید شده با روش گردابی روی ماشین تراش پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که تنظیم دقیق پارامترهای ماشین‌کاری می‌تواند زبری سطح را به طور قابل توجهی کاهش دهد. سوزاوا و همکاران [۷] در مطالعه‌ای روی میکرو رزوه‌تراشی گردابی نشان دادند که بافت سطح تولید شده می‌تواند بهینه‌سازی شود تا استحکام و دوام قطعه افزایش یابد. همچنین، دایچون و همکاران [۸] به بررسی پارامترهای هندسی در فرایند رزوه‌تراشی گردابی پرداختند و نشان دادند که پارامترهای مختلف ماشین‌کاری تاثیر مستقیم بر بافت سطح دارند. این مطالعه بر اهمیت تنظیم دقیق پارامترهای ماشین‌کاری برای بهبود بافت سطح تاکید داشت. مطالعه سونگ و ژو [۹] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند گردابی بر اساس حجم برش معادل پرداخت و نشان داد که کنترل دقیق پارامترهای ماشین‌کاری می‌تواند دقت ابعادی را بهبود بخشد. سولواو و همکاران [۱۰] در تحلیل تکنولوژی‌های پیشرفته ماشین‌کاری پیچ‌های ترانسپدیکولی نشان دادند که استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند دقت ابعادی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. در یکی از جدیدترین پژوهش‌های منتشر شده، دنکنا و همکاران [۱۱] بافت سطح جانبی رزوه‌های دوزنقه‌ای را بررسی کرده و دو مدل تحلیلی و عددی برای پیش‌بینی بافت سطح نهایی رزوه ارائه کردند.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در فرایند رزوه‌تراشی گردابی و کاربرد گسترده آن در تولید پیچ‌های دقیق، هنوز برخی زمینه‌ها و چالش‌های تحقیقاتی وجود دارند که نیازمند بررسی و تحقیق بیشتر هستند. یکی از مهم‌ترین این زمینه‌ها، تأثیر پارامترهای مختلف این فرایند و تعاملات پیچیده بین این پارامترها بر کیفیت نهایی پیچ‌های ساخته شده از آلیاژ Ti6Al4V است. علاوه بر پارامترهای سلامت سطح، دقت ابعادی در مجموعه‌های مونتاژی نقش مهمی را ایفا کرده و جزو پارامترهای اصلی پذیرش نهایی قطعه محسوب می‌شود. در این مقاله، به مطالعه زبری سطح و دقت ابعادی پیچ‌های ارتوپدی ساخته شده از آلیاژ Ti6Al4V با استفاده از فرایند رزوه‌تراشی گردابی پرداخته شد. ابتدا سینماتیک این روش توسعه داده شده است و در ادامه، این فرایند روی آلیاژ Ti6Al4V از منظر بافت سطح و دقت ابعادی مورد بحث قرار گرفته است که جزو نوآوری‌های مقاله حاضر می‌باشد. هدف نهایی این تحقیق، ارائه راهکارهایی برای بهبود کیفیت سطح و دقت ابعادی پیچ‌های تولید شده و افزایش کارایی فرایند رزوه‌تراشی گردابی است.

¹ Thread Whirling

۲- سینماتیک فرایند رزوه‌تراشی گردابی

در رزوه‌تراشی گردابی بر خلاف روش‌های سنتی رزوه‌تراشی، هم ابزار و هم قطعه‌کار حرکت دورانی دارند. شکل ۱ سینماتیک رزوه‌تراشی گردابی را به تصویر کشیده است. در این فرایند سه نوع حرکت همزمان وجود دارد که شامل حرکت دورانی ابزار تحت زاویه حول محور خود، حرکت دورانی خلاف جهت و جابه‌جایی محوری قطعه‌کار می‌باشد. حرکت دورانی و محوری قطعه‌کار باعث ایجاد هندسه رزوه مورد نظر شده است و حرکت دورانی ابزار باعث انجام فرایند براده‌برداری می‌شود [۱۲]. مطابق شکل ۱، براده‌برداری در انحراف^۱ جانبی ابزار نسبت به قطعه‌کار و تداخل دایره تشکیل شده توسط اینسرت‌های برشی^۲ با دایره خارجی قطعه‌کار صورت می‌پذیرد. بر این اساس هر لبه برشی در ضخامت براده صفر با قطعه‌کار درگیر شده و درگیری به صورت تدریجی بیشتر می‌شود. برای افزایش عمر ابزار، ابزار و قطعه‌کار در یک جهت دوران می‌کنند.



شکل ۱ سینماتیک رزوه‌تراشی گردابی

بیشینه ضخامت براده وابسته به مسیر اینسرت درگیر شده قبلی می‌باشد. پس از رسیدن به ضخامت براده بیشینه، مجدد درگیری اینسرت کاهش یافته و پس از رسیدن به قطر داخلی رزوه، ضخامت براده به صفر می‌رسد. مشخص است که فارغ از اندازه رزوه ایجاد، ضخامت براده بیشینه، وابسته به تعداد اینسرت‌های برشی روی محیط ابزار رزوه‌تراشی گردابی دورانی می‌باشد. در این روش، به دلیل اینکه حجم مورد نیاز برداشت ماده برای هر رزوه بین لبه‌های برشی اینسرت‌ها تقسیم می‌شود، نیروهای برشی به شدت کاهش می‌یابد که کاهش نیروهای برش و بهبود کیفیت سطح را به‌ویژه در آلیاژهای سخت ماشین‌کاری شونده به دنبال دارد. این سینماتیک مشابه ایجاد سوراخ به روش فرزکاری مارپیچ می‌باشد [۱۳]. بر اساس سینماتیک ارائه شده، زاویه تنظیم ابزار (φ) در رزوه‌تراشی گردابی نیز از رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$\tan \varphi = P / P_{AV} \quad (1)$$

¹ Offset

² Cutting Circle

که در این رابطه، P اندازه گام پیچ و P_{AV} محیط متوسط پیچ می‌باشد که از رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$P_{AV} = \pi \left(\frac{D_{sr} + D_{st}}{2} \right) \quad (2)$$

که در این رابطه، D_{sr} قطر دایره ریشه و D_{st} قطر دایره سر دندانه یا همان قطر خارجی پیچ می‌باشد. بر اساس سینماتیک ارائه شده، ماکزیمم عمق برش (a_{p-max}) از رابطه ۳ قابل محاسبه می‌باشد [۹].

$$a_{p-max} = \sqrt{2e \sin \frac{\varphi}{2} + \left(\frac{D_t}{2} \right)^2 - 2eD_t \sin \frac{\varphi}{2} \cos \left(\frac{\pi - \varphi}{2} + \frac{(D_{st})^2}{eD_t} \right) - \frac{D_t}{2}} \quad (3)$$

که در این رابطه e انحراف مرکز ابزار نسبت به مرکز قطعه کار و D_t قطر دایره تشکیل دهنده نوک اینسرت‌های برشی می‌باشند. سرعت پیشروی قطعه کار (V_m یا V_f) برای ایجاد گام مشخص P از رابطه ۴ و ۵ قابل محاسبه است.

$$V_f (mm/min) = P n_s \quad (4)$$

$$V_m (deg/min) = 360 n_s \quad (5)$$

که در این روابط، n_s سرعت دورانی قطعه کار می‌باشد. علت بیان سرعت پیشروی بر حسب درجه بر دقیقه، انجام تنظیمات دستگاه بر این اساس می‌باشد. چون، ابزار در راستای زاویه روزه قرار می‌گیرد. برای محاسبه سرعت پیشروی در راستای ابزار رزوه‌تراشی گردابی (V_{ft})، سرعت برشی مماسی پیچ (V_{cs}) حساب شده و در راستای ابزار تبدیل می‌شود. این سرعت از رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$V_{ft} (mm/min) = \frac{V_{cs}}{\cos \varphi} = \frac{\pi D_{st} n_s}{\cos \varphi} \quad (6)$$

بنابراین، نرخ پیشروی به ازای هر لبه برشی برای ابزار (f_z) طبق رابطه ۷ بدست می‌آید.

$$f_z \left(\frac{mm}{tooth} \right) = \frac{V_{ft}}{z n_t} = \frac{\pi D_{st} n_s}{z n_t \cos \varphi} = \frac{\pi D_{st} n_s}{z \cos \varphi n_t} \quad (7)$$

که در این رابطه، n_s سرعت دورانی قطعه کار، n_t سرعت دورانی ابزار و z تعداد لبه‌های برشی (اینسرت) ابزار برشی می‌باشد. مشاهده می‌شود که پیشروی به ازای دندانه با فرض هندسه پیچ و ابزار ثابت، رابطه مستقیم با نسبت سرعت دورانی پیچ به ابزار برشی دارد. در واقع افزایش سرعت دورانی ابزار و کاهش سرعت دورانی قطعه کار باعث کاهش این نرخ پیشروی می‌گردد. با فرض مشخص بودن f_z ، نسبت سرعت دورانی پیچ از رابطه ۸ قابل محاسبه است.

$$n_s (rpm) = \frac{z f_z n_t \cos \varphi}{\pi D_{st}} \quad (8)$$

سرعت برشی ابزار رزوه‌تراشی گردابی (v_c) نیز طبق رابطه ۹ بدست می‌آید.

$$v_c (m/min) = \frac{\pi D_t n_t}{1000} \quad (9)$$

۳- مواد و روش انجام آزمایش

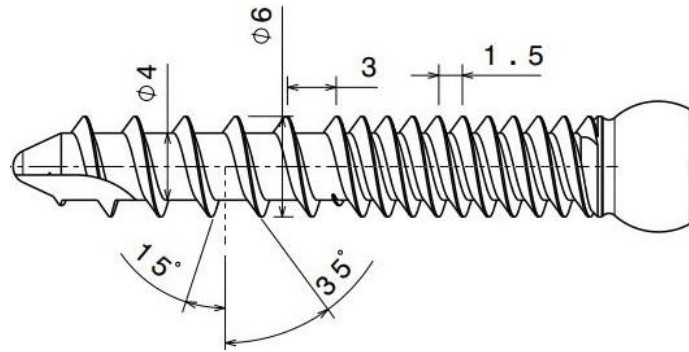
همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش اثر پارامترهای اصلی فرایند شامل سرعت دورانی ابزار رزوه‌تراشی گردابی و نرخ پیشروی قطعه کار بر سلامت سطح و دقت ابعادی یک پیچ ارتوپدی مورد بررسی قرار گرفت. جنس قطعه کار در این پژوهش میل‌گرد با قطر ۸ میلی‌متر از آلیاژ تیتانیوم گرید Ti6Al4V می‌باشد. خروجی آزمایش‌های تجربی، ساخت پیچ ستون فقرات^۱ مطابق هندسه ارائه شده در شکل ۲ (دارای دو روزه با گام‌های مختلف) می‌باشد. قطر اصلی پیچ ۶ میلی‌متر، قطر پای دنده ۴ میلی‌متر، گام پیچ ۳ میلی‌متر و اندازه زاویه بین دنده‌ها ۵۰ درجه است. نیمی از پیچ به صورت یک‌راهه^۲ و نیم دیگر آن، به صورت دوراهه^۳ می‌باشد. جهت ایجاد روزه روی نمونه‌ها نیز، از ماشین‌ابزار مدل سوئیسی^۴ از برند TORNOS DECO 2000 با سرعت اسپیندل بیشینه ۸۰۰۰ دور بر دقیقه مطابق شکل ۳ استفاده شد.

¹ Pedicle Screw

² Single Lead

³ Double Lead

⁴ Swiss-Type

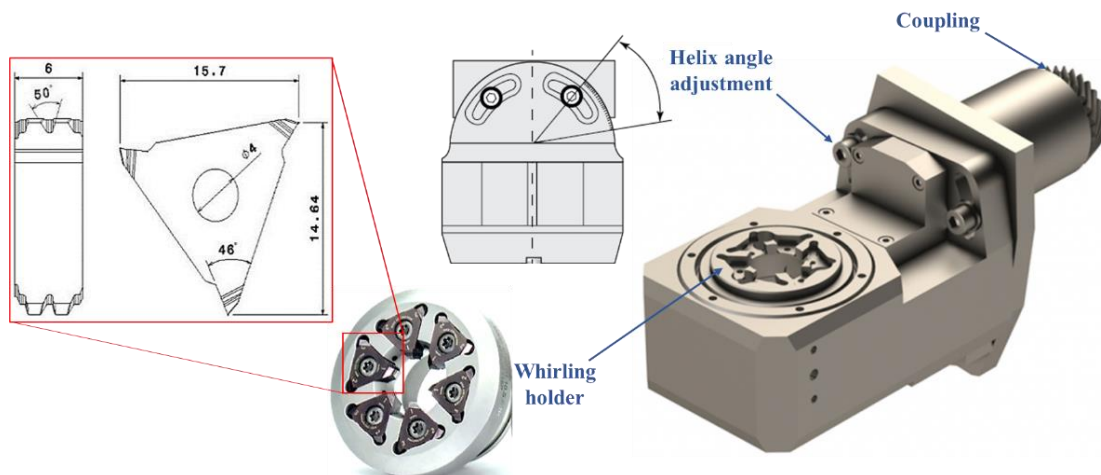


شکل ۲ نقشه هندسه رزوه نهایی پیچ ستون فقرات از جنس آلیاژ Ti6Al4V



شکل ۳ ماشین ابزار مدل سوئیسی برند TORNOS DECO 2000 مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی رزوه‌تراشی گردابی آلیاژ Ti6Al4V

به منظور انجام رزوه‌تراشی گردابی، از یک تجهیز رزوه‌تراشی گردابی برند GenSwiss مدل STA-SV32-W20 مطابق شکل ۴ بهره گرفته شد. این تجهیز توسط یک تسمه دندانه‌دار با محور دورانی دستگاه درگیر می‌شود. هولدر به همراه ۶ اینسرت برشی در قسمت پیشانی تجهیز نصب تنظیم می‌گردد. این تجهیز جهت تنظیم زاویه ابزار برای ایجاد زاویه مارپیچ رزوه، مجهز به یک ورنیه تنظیم زاویه می‌باشد که توسط پیچ‌های قفل کننده مقید می‌شود. هولدر مورد استفاده از برند HORN با شماره سریال LM302.12.WF01.10.5.6 می‌باشد. اینسرت‌های برشی نیز از برند HORN با مدل WSP Type 314 مطابق شکل ۴ به کار گرفته شد. اینسرت‌ها دارای پوشش TiAlN می‌باشند.



شکل ۴ ماژول رزوه‌تراشی گردابی به همراه هولدر و هندسه اینسرت‌های مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌های تجربی رزوه‌تراشی گردابی آلیاژ Ti6Al4V

جهت بررسی فرایند، پارامترهای اصلی برش شامل سرعت دورانی اسپیندل و نرخ پیشروی قطعه‌کار در دو سطح تغییر داده شدند. با فرض طراحی آزمایش فاکتوریل کامل، در مجموع ۴ نمونه آزمایشی پیچ تولید گردید. جدول ۱ پارامترهای مورد بررسی را به همراه سطوح تغییرات آن‌ها نشان می‌دهد. به دلیل حائز اهمیت بودن قسمت یک راهه پیچ، این قسمت از پیچ به همراه قسمت تلاقی با روزه دو راهه مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری زبری توسط زبری‌سنج ماهر مدل PS-1 انجام شد. به توجه به شعاع سطح پیچ، اندازه‌گیری زبری در کمترین کورس به طول ۱/۷۵ میلی‌متر و در سه ناحیه مختلف صورت گرفت. به دلیل حائز اهمیت بودن قسمت یک راهه پیچ، این قسمت از پیچ به همراه قسمت تلاقی با روزه دو راهه از نظر ابعادی و بافت سطح بررسی شد. در این اندازه‌گیری‌ها از میکروسکوپ مدل Olympus-SZX16 استفاده گردید.

جدول ۱ پارامترهای برشی به همراه سطوح تغییرات در فرایند رزوه‌تراشی گردابی آلیاژ Ti6Al4V

سطوح تغییرات		پارامترهای برش
سطح 2	سطح 1	
2500	1500	سرعت دورانی اسپیندل (n_t rpm)
0.02	0.002	نرخ پیشروی (f_z mm/tooth)

۴- نتایج و بحث

همان‌گونه که مطرح شد بر اساس طراحی آزمایش صورت گرفته، ۴ نمونه پیچ ارتوپدی با در نظر گرفتن معادلات و پارامترهای بالا تولید گردید که در جدول ۲ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در تنظیم پارامترهای دستگاه، عمدتاً دو پارامتر سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی برحسب درجه بر دقیقه به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای زبری و بافت سطح، زاویه رزوه و کیفیت رزوه پیچ ستون فقرات روی این نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۲ مقادیر پارامترهای عددی بدست آمده برای هر نمونه را نشان می‌دهد. در ادامه خروجی‌های به‌دست آمده به تفکیک مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

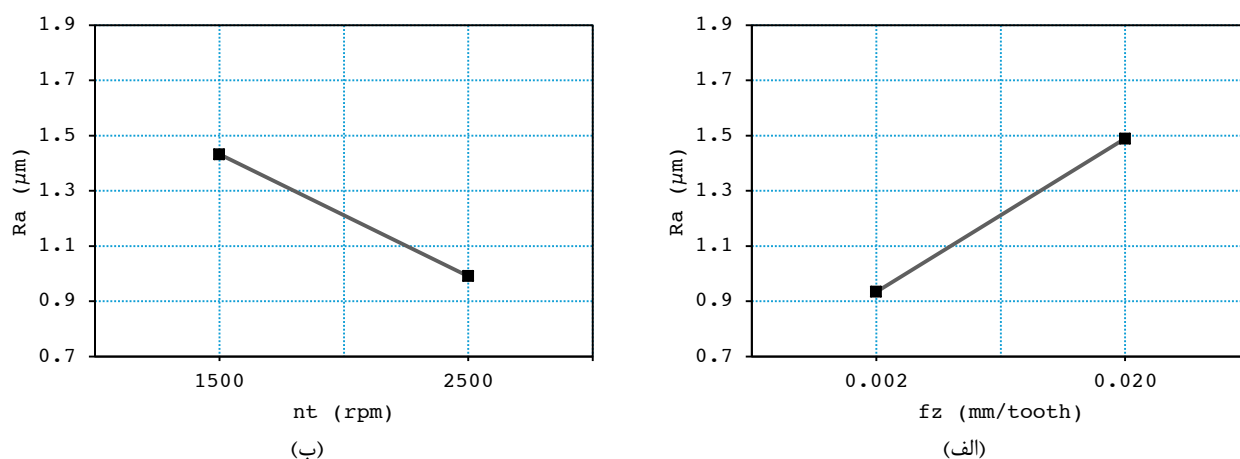
جدول ۲ پارامترهای برش مورد استفاده در هر آزمایش

شماره آزمایش	پارامترهای ورودی			خروجی‌های اندازه‌گیری شده		
	سرعت دورانی ابزار (n_t rpm)	سرعت برشی (V_c m/min)	نرخ پیشروی (f_z mm/tooth)	سرعت پیشروی (V_f mm/min)	سرعت (V_f °/min)	زبری (R_a μm)
1	1500	56.5	0.002	3	337.7	1.114
2	2500	94.2	0.002	5	562.8	0.754
3	1500	56.5	0.020	28	3376.7	1.750
4	2500	94.2	0.020	47	5627.9	1.228

۴-۱- زبری و بافت سطح

همان‌طور که پیشتر اشاره گردید، اندازه‌گیری زبری در سطح ریشه رزوه صورت گرفت. مقادیر زبری سطح بین ۰/۷۵ تا ۱/۷۵ میکرومتر متغیر بود. لازم به ذکر است که بر خلاف سایر قطعات ماشین‌کاری و بر اساس مراجع، برای افزایش رشد استخوان حول پیچ‌های ارتوپدی، زبری سطحی در حدود ۲ میکرومتر پیشنهاد می‌گردد [۱۴، ۱۵]. این مقدار زبری اجازه قرارگیری راحت‌تر سلول‌ها روی سطح پیچ را ممکن ساخته و باعث ممزوج شدن سریع‌تر آن با بافت استخوان می‌گردد [۱۶]. لذا در محدوده مورد بررسی، بهترین نتیجه در آزمایش شماره ۳ شامل سطح بالای نرخ پیشروی و سطح پایین سرعت برشی به‌دست آمد.

شکل ۵ تغییرات زبری را بر حسب پارامترهای برش در فرایند رزوه‌تراشی گردابی را نشان می‌دهد. بر این اساس، با افزایش سرعت برشی، زبری سطح تا ۳۰٪ کاهش می‌یابد. افزایش نرخ پیشروی نیز باعث بالارفتن زبری سطح تا ۵۵/۰ میکرومتر گردید. دلیل این روند تغییرات زبری با پارامترهای برشی در مراجع ماشین‌کاری به وفورد مورد بررسی قرار گرفته و در اینجا نیز صادق است. نکته حائز اهمیت در این بررسی، سهم بیشتر پارامتر نرخ پیشروی بر زبری سطح است. همان‌طور که در قسمت سینماتیک فرایند نیز مشاهده شد، نرخ پیشروی به ازای دندان، علاوه بر سرعت حرکت خطی قطعه‌کار، بر سرعت دورانی آن هم تأثیرگذار است. این سرعت دورانی در مقایسه با سرعت دورانی ابزار، سرعت نسبی برشی بین ابزار و قطعه‌کار را تعیین می‌کند.

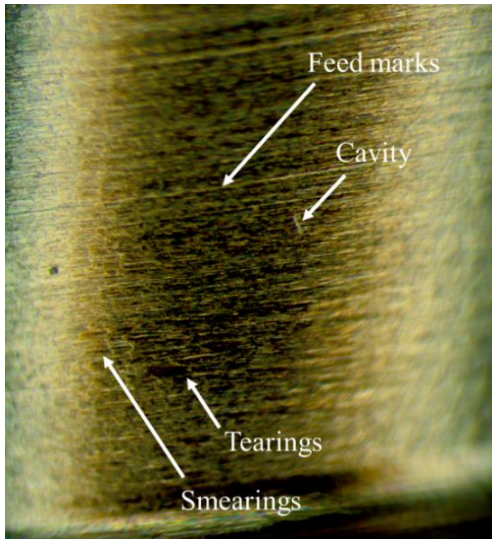


شکل ۵ تغییرات زبری در رزوه‌تراشی گردابی آلیاژ Ti6Al4V بر حسب پارامترهای برشی (الف) نرخ پیشروی (ب) سرعت دورانی ابزار

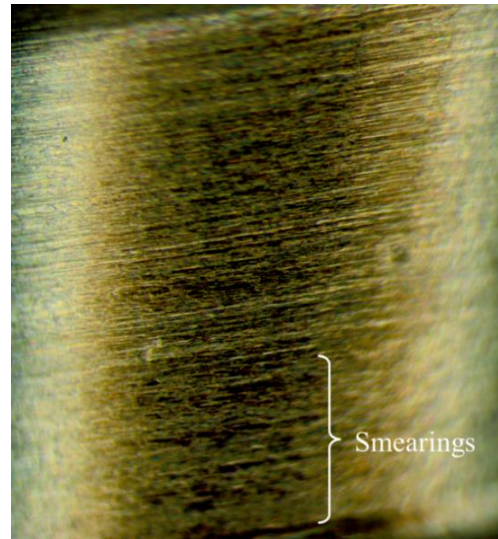
۴-۲- بافت سطح

بررسی بافت سطح بر روی سطح ریشه پیچ صورت گرفت. با توجه به استوانه‌ای بودن سطح، تصویربرداری از کل سطح امکان‌پذیر نبود و تنها به تصویری باریک از سطح اکتفا شد. در شکل ۶ تصاویری از بافت سطح نمونه‌های تولید شده طبق جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود. بر اساس این شکل، تصاویر رد ابزار در تمامی نمونه‌ها مشهود است. نکته قابل توجه دیگر بروز پدیده شخم‌زنی در سطح تمامی نمونه‌های تولید شده به روش رزوه‌زنی گردابی می‌باشد. این شخم‌زنی به‌واسطه سینماتیک درگیری لبه‌های برشی و پایین بودن ضخامت براده نتراشیده می‌باشد. بر اساس تئوری برش، این ضخامت تقریباً برابر با نرخ پیشروی به ازای لبه برشی می‌باشد [۱۷]. این شخم‌زنی در نرخ پیشروی پایین (شکل ۶-الف و شکل ۶-ب) مشهودتر است. شخم‌زنی باعث ایجاد عیوبی مانند پارگی‌ها و لهیدگی‌های متعدد سطحی شده است که در تمام سطح نمونه قابل مشاهده است. این لهیدگی‌ها می‌توانند عدد زبری سطح را پایین آورده ولی افت شدید خواص سطحی را سبب شوند [۱۸، ۱۹]. در استفاده پزشکی، این لهیدگی‌ها می‌توانند باعث جلوگیری از تمیزی کامل سطح شده و در حین عملکرد نیز، جدایش از سطح قطعه و آلودگی بافت را به دنبال داشته باشند. در بافت سطح نمونه‌های به‌دست آمده در آزمایش‌های ۳ و ۴، به‌واسطه افزایش نرخ پیشروی، اثر شخم‌زنی کمتر شده و به‌ویژه، لهیدگی کمتری روی سطح مشاهده می‌شود. در واقع تصاویر بافت سطح نشان می‌دهد که در نرخ پیشروی بالاتر، علی‌رغم زبری اندازه‌گیری شده بیشتر، بافت سطحی یکنواخت‌تر با عیوب سطحی کمتر به‌دست می‌آید.

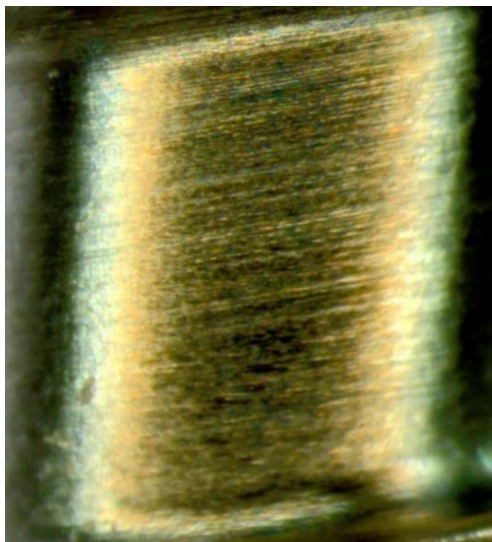
بافت سطح روی دیواره و تاج رزوه‌های ایجاد شده نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۷ خرابی تاج رزوه را در نزدیکی محل تلاقی قسمت تک‌راهه و دوراهه پیچ نشان می‌دهد. در این موقعیت، تاج رزوه‌ها عمدتاً دچار لهیدگی شدند و بعضاً لبه‌های تیز در تاج رزوه ایجاد شده است. در واقع، به‌واسطه تغییر حجم براده‌برداری در این ناحیه، ماهیت ارتعاشی فرایند دچار تغییر شده و دیواره رزوه‌ها تحت تأثیر مستقیم این ارتعاش قرار می‌گیرند. علاوه بر این دقت ابعادی رزوه نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بیشترین لرزش و خرابی تاج رزوه در نمونه تولیدی با کمینه سرعت برشی و بیشینه نرخ پیشروی مطابق شکل ۷ مشاهده شد. چنین پروفیل رزوه‌ای به‌واسطه امکان ایجاد خرابی و ترک در بافت استخوان قابل قبول نیست [۲۰، ۲۱].



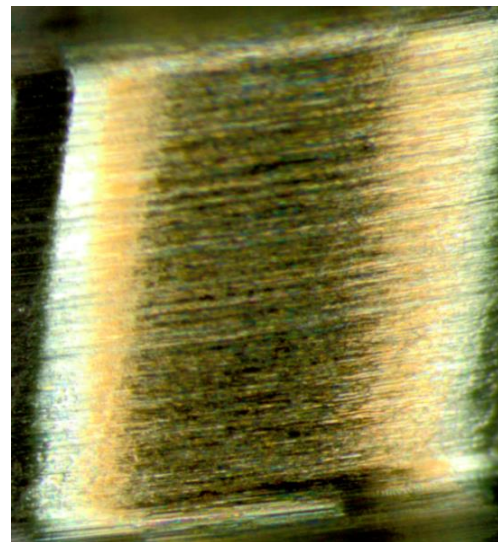
(ب)



(الف)

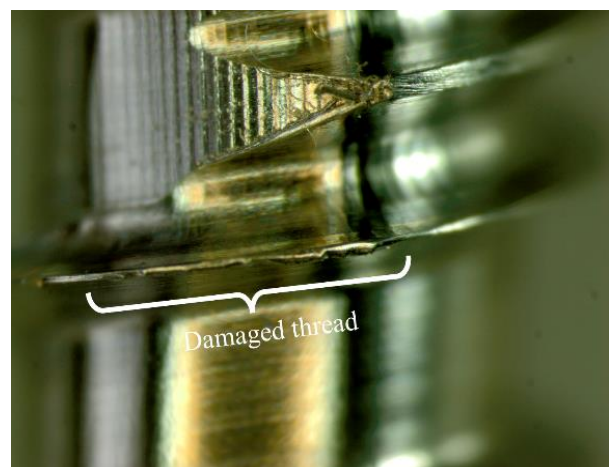
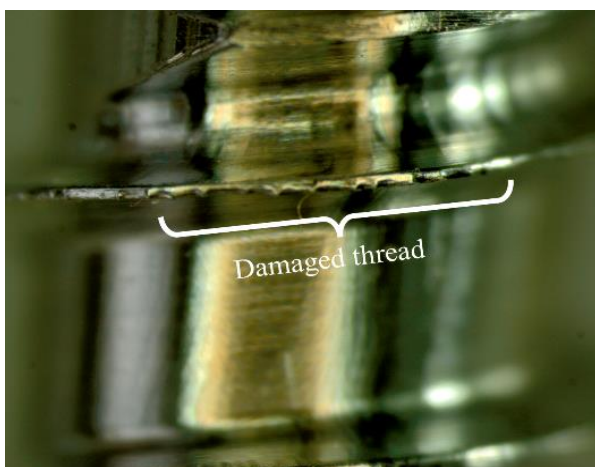


(د)



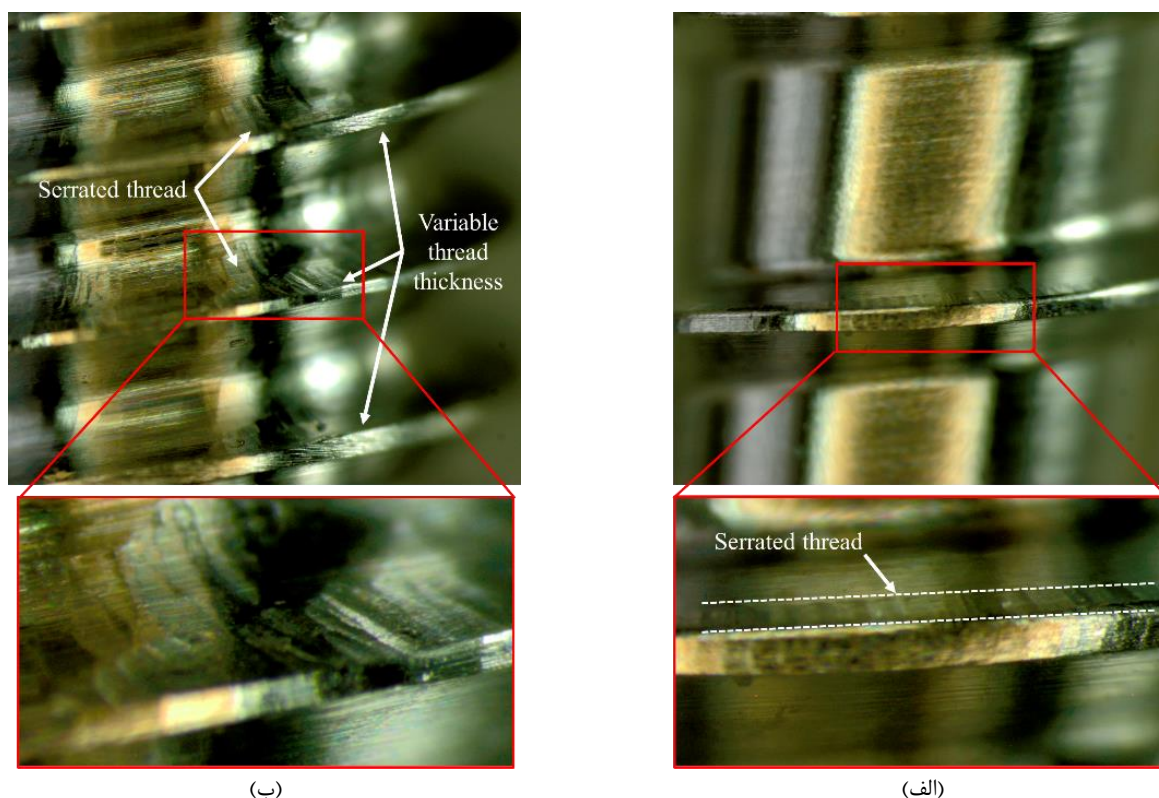
(ج)

شکل ۶ بافت سطح ریشه پیچ‌های ساخته شده توسط فرایند رزوه‌تراشی گردابی آلیاژ Ti6Al4V در آزمایش شماره الف) ۱ (ب) ۲ (ج) ۳ (د) ۴



شکل ۷ خرابی پروفیل تاج رزوه در آزمایش شماره ۳ در فرایند رزوه‌تراشی گردابی آلیاژ Ti6Al4V

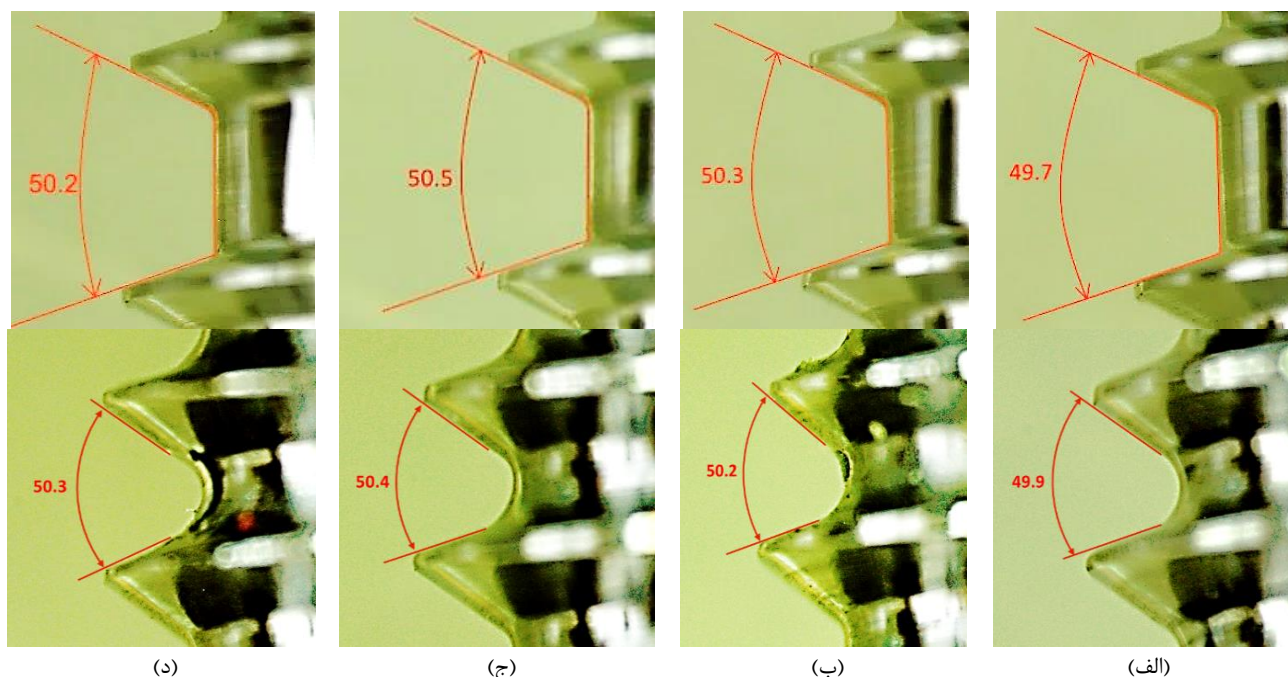
شکل ۸ ایجاد سطحی دندانهای روی دیواره جانبی رزوه را نشان می‌دهد. این سطح دندانهای به واسطه ارتعاش ابزار حین فرایند بوجود آمده و اثر خود را روی دیواره جانبی گذاشته است. مطابق شکل ۸-ب، بیشترین مقدار این آسیب در آزمایش شماره ۴ (سطوح بالای پارامترهای برشی) مشاهده شد. در آزمایش شماره ۲ (شکل ۸-الف) نیز که سرعت برشی در سطح بالای خود قرار داشت، این آسیب در ناحیه کوچکتری نزدیک به تاج رزوه مشاهده گردید. این گونه می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سرعت برشی، علی‌رغم کاهش زبری در سطح ریشه رزوه می‌تواند با ایجاد ارتعاش در ابزار خان‌کشی دورانی، باعث خرابی دیواره رزوه گردد. این آسیب در آزمایش شماره ۴ باعث تغییر در ضخامت رزوه نیز شد. لازم به ذکر است عیوب مشاهده شده در شکل ۸، باعث عدم پذیرش پیچ نخواهد بود.



شکل ۸ شخم‌زنی سطح پروفیل رزوه در فرایند رزوه‌تراشی گردابی آلیاژ Ti6Al4V و در آزمایش شماره الف) ۲ و ب) ۴

۴-۳- زاویه رزوه پیچ ستون فقرات

اندازه‌گیری زوایای نمونه‌های تولیدشده توسط میکروسکوپ (شکل ۹) نشان داد که زاویه رزوه ایجاد شده در قسمت تک راهه پیچ، در رنج ۴۹/۷ تا ۵۰/۵ درجه متغیر می‌باشد. اندازه نامی پیچ ۵۰ درجه بود که در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به استاندارد پیچ‌های ارتوپدی ستون فقرات، تولرانس مجاز زاویه پیچ در بازه ± 0.5 درجه قرار دارد [۲۲]. لذا محدوده تغییرات به دست آمده تغییر معنی‌داری در تولرانس زاویه پیچ ایجاد نمی‌کند. با این حال، اندازه‌گیری نشان می‌دهد که تغییر نرخ پیشروی می‌تواند زاویه پروفیل رزوه را تا ۰/۴ درجه تغییر دهد. این تغییر برای سرعت برشی ناچیز بود. بررسی اندازه زاویه رزوه در حالت دوراچه نیز، سطح کمتر تغییرات زاویه رزوه را نسبت به حالت یک‌راهه نشان داد. این کاهش دقت ابعادی به واسطه افزایش نرخ پیشروی در شکل ۷ قابل مشاهده بود.



شکل ۹: زاویه رزوه ایجاد شده توسط فرایند رزوه‌تراشی گردابی آلیاژ Ti6Al4V در آزمایش شماره الف) ۱، ب) ۲، ج) ۳ و د) ۴

۵- نتیجه‌گیری

- در این مطالعه، سینماتیک فرایند رزوه‌تراشی گردابی جهت ساخت پیچ‌های ارتوپدی از جنس آلیاژ Ti6Al4V توسعه داده شده است و اثر پارامترهای برش بر دقت ابعادی و بافت سطح پیچ‌های ستون فقرات مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج در ادامه آمده است:
- کمترین زبری سطح رزوه در سطح پایین نرخ پیشروی و سطح بالای سرعت برشی (علی‌رغم ایجاد سطح دندان‌های و به علت عدم خرابی تاج رزوه) مشاهده شد.
 - در محدوده پارامترهای برش مورد بررسی، تمام پیچ‌ها در محدوده تولرانس قرار داشتند. افزایش نرخ پیشروی باعث انحراف زاویه پروفیل تا ۰/۴ درجه گردید. این تغییر برای سرعت برشی ناچیز بود.
 - از منظر رشد سلولی در پیچ‌های ارتوپدی، بهترین نمونه پیچ در نرخ پیشروی بالاتر و به علت حذف پدیده شخم‌زنی به دست آمد.

فهرست علائم

a_{p-max}	ماکزیمم عمق برش
D_{sr}	قطر دایره ریشه
D_{st}	قطر خارجی پیچ
D_t	قطر دایره تشکیل دهنده نوک اینسرت‌های برشی
e	انحراف مرکز ابزار نسبت به مرکز قطعه کار
f_z	نرخ پیشروی به ازای هر لبه برشی
n_s	سرعت دورانی پیچ
n_t	سرعت دورانی ابزار
P	اندازه گام پیچ
P_{AV}	محیط متوسط پیچ
v_c	سرعت برشی ابزار رزوه‌تراشی گردابی

سرعت برشی مماسی پیچ	V_{cs}
سرعت پیشروی پیچ	V_f, V_m
سرعت پیشروی در راستای ابزار	V_{ft}
تعداد اینسرت‌های ابزار برشی	z
زاویه تنظیم ابزار	φ

Reference

- [1] Campanelli LC. A review on the recent advances concerning the fatigue performance of titanium alloys for orthopedic applications. *Journal of Materials Research*. 2021 Jan 15;36:151-65. doi: 10.1557/s43578-020-00087-0
- [2] Wang L, He Y, Wang Y, Li Y, Liu C, Wang S, Wang Y. Analytical modeling of material removal mechanism in dry whirling milling process considering geometry, kinematics and mechanics. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020 Apr 15;172:105419. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105419
- [3] Cheng EH, Lin MJ, Tsai TL, Yeh NM. Study on machining dental implants by whirling approach. *Applied Mechanics and Materials*. 2012 Jan 20;117:1506-13. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.1506
- [4] Soshi M, Rigolone F, Sheffield J, Yamazaki K. Development of a directly-driven thread whirling unit with advanced tool materials for mass-production of implantable medical parts. *CIRP Annals*. 2018 Jan 1;67(1):117-20. doi: 10.1016/j.cirp.2018.03.016
- [5] Wang Y, Li L, Zhou C, Guo Q, Zhang C, Feng H. The dynamic modeling and vibration analysis of the large-scale thread whirling system under high-speed hard cutting. *Machining science and technology*. 2014 Oct 2;18(4):522-46. doi: 10.1080/10910344.2014.955366
- [6] Botak Z, Pisačić K, Horvat M, Tomić T. Determination of Optimal Machining Parameters Based on Roughness and Vibration Measurements of Pieces Produced by Whirling on a Lathe Machine. *Machines*. 2024 May 10;12(5):328. doi: 10.3390/machines12050328
- [7] Serizawa M, Suzuki M, Matsumura T. Microthreading in whirling. *Journal of Micro-and Nano-Manufacturing*. 2015 Dec 1;3(4):041001. doi: 10.1115/1.4030704
- [8] Diachun A, Vasyukiv V, Korol O, Myhailiuk V, Golovaty I, Kuras A. Investigation of geometrical parameters in screw surfaces whirling process. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2021 Mar 23;101(1):68-78.
- [9] Song SQ, Zuo DW. Modelling and simulation of whirling process based on equivalent cutting volume. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2014 Mar 1;42:98-106. doi: 10.1016/j.simpat.2013.12.011
- [10] Savilov AV, Pyatykh AS, Timofeev SA. Analysis of advanced transpedicular screw machining technologies. *iPolytech Journal*. 2021 Jan 11;24(6):1190-8. doi: 10.21285/1814-3520-2020-6-1190-1198
- [11] Denkena B, Bergmann B, Wege C, Gereke-Bornemann H, von Soden M. Simulative surface topography prediction of tribological surfaces on whirled thread flanks. *Procedia CIRP*. 2024 Jan 1;123:511-6. doi: 10.1016/j.procir.2024.05.089
- [12] Merticaru V, Mihalache MA, Nagit G, Dodun O, Slătineanu L. Some aspects about the significant parameters of the thread whirling process. *Applied Mechanics and Materials*. 2016 May 19;834:96-101. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.834.96
- [13] Saadatbakhsh MH, Rasti A, Sadeghi MH, Hassanpour H, Omiddodman AR. Compare and study of hole quality characteristics in helical milling and conventional drilling. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 Apr 1;14(16):332-8. [In Persian]
- [14] Costăchescu B, Niculescu AG, Grumezescu AM, Teleanu DM. Screw Osteointegration—Increasing Biomechanical Resistance to Pull-Out Effect. *Materials*. 2023 Aug 11;16(16):5582. doi: 10.3390/ma16165582
- [15] Schulze M, Riesenbeck O, Vordemvenne T, Raschke MJ, Evers J, Hartensuer R, Gehweiler D. Complex biomechanical properties of non-augmented and augmented pedicle screws in human vertebrae with reduced bone density. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2020 Dec;21:1-3. doi: 10.1186/s12891-020-3158-z
- [16] Schwartz Z, Raz P, Zhao G, Barak Y, Tauber M, Yao H, Boyan BD. Effect of micrometer-scale roughness of the surface of Ti6Al4V pedicle screws in vitro and in vivo. *JBJS*. 2008 Nov 1;90(11):2485-98. doi: 10.2106/JBJS.G.00499
- [17] Khatir FA, Sadeghi MH, Akar S. Investigation of surface integrity in the laser-assisted turning of AISI 4340 hardened steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021 Jan 1;61:173-89. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.09.073

- [18] Rasti A, Sadeghi MH, Farshi SS. An investigation into the effect of surface integrity on the fatigue failure of AISI 4340 steel in different drilling strategies. *Engineering Failure Analysis*. 2019 Jan 1;95:66-81. doi: [10.1016/j.engfailanal.2018.08.022](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.08.022)
- [19] Tahmasbi V, Zeinolabedin-Beygi A, Elahi SH, Ashtiani MA. Statistical modeling, optimization and sensitivity analysis of dried turning of aluminum bronze alloy. *Sādhanā*. 2022 Nov 9;47(4):232. doi: [10.1007/s12046-022-01955-7](https://doi.org/10.1007/s12046-022-01955-7)
- [20] Tahmasbi V, Pak A, Zeinolabedin Beygi A, HassanPour P. Experimental Analysis and Optimization of Thrust Force in the Orthopedic Drilling Process Using the Tool Coated with Titanium Nitride Nano Coating by the Physical Vapor Deposition Method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Jul 23;9(5):49-59. doi: [10.22034/IJME.2022.160059](https://doi.org/10.22034/IJME.2022.160059) [In Persian]
- [21] Liu MY, Tsai TT, Lai PL, Hsieh MK, Chen LH, Tai CL. Biomechanical comparison of pedicle screw fixation strength in synthetic bones: Effects of screw shape, core/thread profile and cement augmentation. *PLoS One*. 2020 Feb 21;15(2):e0229328. doi: [10.1371/journal.pone.0229328](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229328)
- [22] Tarshizi M, Jafari D, Rasti A. Study of The Thread Whirling Process in Manufacturing of Pedicle Screws. *Modares Mechanical Engineering*. 2022;22(10):13-7. [In Persian]