

اثر زاویه براده و سرعت برش روی تنش‌های پسماند در فرآیند خان‌کشی آلیاژ Ti6Al4V مورد استفاده در موتورهای هوایی

محمد کاظمی نصرآبادی¹

1- استادیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری

(دریافت مقاله: 1394/11/20 تاریخ پذیرش: 1395/04/02)

چکیده

آلیاژهای تیتانیوم به علت خاصیت مقاوم به خوردگی و نسبت مقاومت به وزن عالی، در صنایع هوانوردی و هوافضا به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرآیند ماشین‌کاری ممکن است خواص ماده و تنش‌های پسماند در سطح یا لایه‌های نزدیک به سطح قطعه‌کار را تحت تاثیر قرار دهد. تنش‌های پسماند نقش مهمی در کارایی قطعات ماشین‌کاری شده دارند. این تنش‌ها به پارامترهای ماشین‌کاری از قبیل سرعت برشی، نرخ پیشروی و زاویه براده، هندسه ابزار و شرایط روانکاری بستگی دارند. در این تحقیق شبیه‌سازی فرآیند خان‌کشی قطعه‌کار تیتانیومی آلیاژ Ti6Al4V در محیط نرم افزار آباکوس انجام می‌گردد. پس از مدل‌سازی فرآیند، اثر زاویه براده روی تنش‌های پسماند برای زوایای براده 5، 10، 15 و 20 در سرعت‌های برشی 15، 30 و 45 متر بر دقیقه آنالیز شده است. همچنین اثر سرعت برشی روی توزیع تنش‌های پسماند با استفاده از سه مقدار مختلف سرعت برشی 15، 30 و 45 متر بر دقیقه و عمق برشی ثابت 0/05 میلی‌متر و زاویه براده 5 درجه مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: ماشین‌کاری، تنش‌های پسماند، زاویه براده، سرعت برشی، خان‌کشی

The effect of rake angle and cutting speed on residual stress in broaching process of Ti6Al4V for air engines

Abstract

There is wide range usage of titanium alloys in aeronautical and aerospace industries due to corrosion resistant and excellent strength to weight ratio. Machining process may be affects material properties and residual stresses in surface or near surface layers of the work piece. In addition, residual stresses have important rule in machining work piece operation. This stresses are functions of machining parameters such as cutting speed, feed rate, rake angle, tool geometry and lubrication condition. In the current research broaching process of Ti6Al4V is simulated in abacus software. After modeling, the effect of rake angle on residual stresses is analyses for 5, 10, 15 and 20 degree rake angels for 15, 30 and 45 m/min cutting speeds. Also the effect of different cutting speeds such as 15, 30 and 45 m/min for constant cutting depth of cut of 0.05 mm and 5 degree rake angle was investigated.

Keyword: machining, residual stresses, rake angle, cutting speed, broaching

مقدمه

در عملیات برش فلزات نیروهای ترمومکانیکالی در سطح مشترک ابزار-براده ایجاد می‌شوند. این نیروها در سطح یا لایه-های زیر سطح قطعه‌کار به شکل تنش‌های پسماند ظاهر می‌شوند. تنش‌های پسماند نتیجه رویدادهای گرمایی و مکانیکی مختلف است که در ناحیه سطحی در هنگام ماشین‌کاری رخ می‌دهد. معمولاً مقدار مطلق تنش‌های پسماند نزدیک سطح قطعه‌کار بالا بوده و با نفوذ داخل سطح کاهش می‌یابد. تنش‌های پسماند می‌تواند کششی یا فشاری باشد. با توجه اینکه تنش‌های فشاری جلو رشد ترک را می‌گیرند عموماً این تنش‌ها عملکرد سازه و عمر آن را اصلاح می‌کنند. محاسبه نیروها و تنش‌های پسماند از روش آزمایش کاملاً مشکل است. موقعی که سازه‌ها در معرض بارهای متغیر یا خستگی قرار می‌گیرند تنش‌های پسماند اثر قابل توجهی روی عمر قطعات دارند. تقریباً در تمام قطعات ماشین‌کاری شده پرداخت سطح و دقت ابعادی از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین دانش اندازه تنش‌های پسماند و جهت آنها در قطعات ماشین‌کاری شده کمک بزرگی به طراحی قطعات می‌کند و این می‌تواند شکست ناگهانی یا غیرمترقبه اجزای ماشین‌کاری شده را به کمینه برساند.

پیش‌بینی تنش‌های پسماند از سال 1950 موضوع تحقیق بسیاری از محققان بوده است. تلاش‌های تحقیقاتی در این زمینه شامل یافته‌های تجربی، مدل‌سازی تحلیلی، مدل‌سازی المان‌محدود و ترکیبی از اینها بوده است. اکثر تلاش‌های اولیه در تعیین اثر ماشین‌کاری روی تنش‌های پسماند تجربی بوده است. یکی از تلاش‌های پیشگامانه در بررسی تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری آزمایشی است که روی ماشین‌کاری متعامد فولاد کم‌کربن انجام شده است [1]. که در آن این نتیجه حاصل شده است که اثرات حرارتی در تنش‌های پسماند موثرتر از اثرات مکانیکی است. در تلاشی دیگر تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری روی تنش‌های پسماند در سطح قطعه ماشین‌کاری شده تعیین شده است [2]. اثر سایش ابزار روی تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری نیز بررسی شده است [3]. در تحقیقی دیگر آزمایش برش متعامد روی AISI 4340 انجام شده و اثرات سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش را روی پروفیل تنش‌های پسماند تعیین شده است [4]. آنها نشان دادند که مقدار مطلق تنش‌های پسماند با افزایش عمق در زیر

سطح ماشین‌کاری شده افزایش یافته است. علاوه بر این، تنش‌های پسماند در سرعت‌های کم کششی بودند اما در نرخ پیشروی بالا به فشاری تبدیل می‌شوند. برخی نیز آزمایش‌های تراشکاری را روی AISI 4340 برای تعیین اثر پارامترهای ماشین‌کاری استفاده کرده‌اند [5]. تاثیرات شعاع نوک ابزار و سایش ابزار روی تنش‌های پسماند ایجاد شده در تراشکاری سخت نیز بررسی شده و نتایج آنها نشان داد که افزایش سایش روی تنش‌های پسماند تاثیر قابل توجهی دارد [6]. یکی از اولین مدل‌سازی‌ها در تنش‌های پسماند با استفاده از المان-محدود انجام شده است که تجزیه و تحلیل قابل توجهی را بر روی تنش‌های پسماند در ماشین‌کاری ارائه داده است [7]. با استفاده از تحلیل المان‌محدود اثرات پیشروی، سختی قطعه‌کار و لبه برش در تشکیل تنش‌های پسماند زیرسطح در تراشکاری سخت نیز بررسی شده است [8، 9]. در مدل‌سازی دیگری از کد متلب و آباکوس برای بررسی اثرات مداوم برش و اصطکاک ابزار تراشه روی تنش‌های پسماند در AISI 304 ماشین‌کاری شده استفاده کرده‌اند [10 و 11]. همچنین بررسی تجربی اثر پوشش ابزار و کاربرد سیال برشی روی تنش‌های پسماند در آلیاژ ماشین‌کاری شده Ti6Al4V انجام شده است [12]. محققین با استفاده از روش اشعه X و مدل‌سازی المان محدود نیز تنش‌های پسماند در آلیاژ Ti6Al4V را محاسبه نموده‌اند [13].

در تحقیق حاضر فرآیند خان‌کشی آلیاژ Ti6Al4V با استفاده از مدل‌سازی المان‌محدود شبیه‌سازی شده است. به منظور توصیف رفتار ماده قطعه‌کار، از مدل جانسون-کوک استفاده شده است. به عنوان یک نتیجه، تحلیل گرافیکی از تنش‌های پسماند در مقابل پارامترهای زاویه براده و سرعت برشی انجام خواهد شد و اثر این پارامترها روی تنش‌های پسماند مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ابتدا مقدمه‌ای در مورد تیتانیوم و قابلیت ماشین‌کاری آلیاژ Ti6Al4V ارائه می‌شود. سپس فرآیند خان‌کشی و ویژگی‌های آن آمده است. روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند موضوع مورد بحث بخش بعدی از این تحقیق است. در ادامه مدل‌سازی المان‌محدود شامل مدل المان‌محدود ماده قطعه‌کار و ابزار برش مطرح شده است. اثر زاویه براده و سرعت برشی روی تنش‌های پسماند موضوع ارائه شده در بخش‌های بعدی از این تحقیق است. نهایتاً

کاری آلیاژهای تیتانیوم نیروهای برشی، اندکی بالاتر از نیروهای متداول در ماشین‌کاری فولادها است. علت اصلی مشکل بودن ماشین‌کاری تیتانیوم سخت بودن آن نیست بلکه قابلیت هدایت حرارتی ضعیف آن می‌باشد. حرارت محلی در قسمت ماشین-کاری شده سبب مشکلاتی نظیر چسبیدن ابزار به فلز، واکنش-های تیتانیوم با هوا (اکسیژن و نیتروژن) یا شکل‌گیری آلیاژی در درجه حرارت‌های بالا می‌شود. هر چند باور بر این است که ماشین‌کاری تیتانیوم و آلیاژهای آن به سختی انجام می‌گیرد ولی می‌توان با انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری مناسب بطور نسبی آنها را ماشین‌کاری نمود. مشخصه‌های معینی از تیتانیوم وجود دارد که قابلیت ماشین‌کاری آلیاژ Ti-6Al-4V را تحت تاثیر قرار می‌دهد [17].

آلیاژ Ti-6Al-4V قابلیت هدایت حرارتی پائینی دارد، بنابراین حرارت به آسانی از سطح تماس ابزار و براده دفع نمی‌شود. ابزار سریعاً، بواسطه درجه حرارت‌های بالای ایجاد شده حرارت را جذب کرده و این منجر به کوتاه شدن عمر آن خواهد شد.

تیتانیوم یک گرایش آلیاژی قوی یا واکنش‌پذیری شیمیایی با مواد در ابزارهای برشی در درجه حرارت‌های عملیاتی ابزار دارد و این باعث جوش خوردگی و لکه‌دار شدن ابزار همراه با تخریب سریع آن خواهد شد.

تیتانیوم مدول الاستیسیته نسبتاً پائینی دارد که تقریباً نصف فولادها و آلیاژهای نیکل می‌باشد. و در نتیجه خاصیت ارتجاعی (فنری) بیشتری نسبت به فولاد دارد.

فرآیند خان‌کشی و ویژگی‌های آن

خان‌کشی یک فرآیند منحصربفرد با کارایی بسیار بالاست، که در آن تغذیه لبه‌های برنده به داخل قطعه‌کار بستگی به ابزار تراش مربوطه بنام خان‌کش دارد. سطح حاصله عکس شکل مقطع خان‌کش است و در بیشتر موارد با یک بار عبور ابزار بر روی قطعه‌کار تولید می‌شود. غالباً دقت کار خان‌کشی بیشتر از فرزکاری و برقکاری است. اگر چه حرکت نسبی بین ابزار و قطعه‌کار در خان‌کشی یک حرکت ساده خطی است اما برای ایجاد شیارهای مارپیچ نظیر محورهای خارخور مارپیچ و خان داخل لوله اسلحه می‌توان حرکت چرخشی نیز به ابزار داد. ابزار خان‌کشی با مجموعه‌ای از دندانه‌های برنده که اندازه آنها به تدریج بزرگ می‌شود برای براده‌برداری از قطعات فلزی به ویژه

آخرین بخش از این تحقیق به نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای کارهای آتی می‌پردازد.

تیتانیوم و قابلیت ماشین‌کاری آلیاژ Ti-6Al-4V

تیتانیوم به دلیل داشتن مقاومت عالی در مقابل خوردگی (با داشتن لایه اکسیدی محافظ TiO_2)، استحکام ویژه بالا و خواص مکانیکی خوب، به ویژه در دماهای نسبتاً بالا اهمیت صنعتی یافته است. آلیاژهای تیتانیوم از اهمیت خاصی برخوردارند زیرا نسبت به تیتانیوم خالص دارای خواص مکانیکی بالاتر، مقاومت خزشی بیشتر، حدود خستگی بالاتر بوده و مقاومت به خوردگی خوبی هم دارند. دلیل استفاده از آلیاژهای تیتانیوم در موتورهای جت، خواص مکانیکی و شیمیایی استثنایی آنها در درجه حرارت‌های بالا می‌باشد. این آلیاژها به طور وسیعی در کمپرسورهای فشار پایین و بالا و قطعاتی که در معرض بارهای گریز از مرکز نظیر دیسکها و پره‌هایی با قطر دورانی متغیر و بعلاوه در قطعاتی که تحت شرایط خستگی شدید کار می‌کنند مورد استفاده قرار گرفته‌اند [14]. از این آلیاژها در ساختار بدنه هواپیما در قسمت‌هایی که درجه حرارت عملیاتی متجاوز از $130^\circ C$ (درجه حرارت عملیاتی بیشینه قراردادی برای آلیاژهای آلومینیم) باشد نیز استفاده می‌شود [15 و 16].

لازم به ذکر است که انگیزه اصلی برای انتخاب و طراحی این ماده در موتورهای مورد استفاده در صنعت هوافضا و همچنین قطعات و سازه‌های هوایی، نسبت مقاومت به دانسیته بالای آن می‌باشد. و انگیزه اولیه برای استفاده در پروسه‌های شیمیایی، استفاده‌های دریایی و صنعتی مقاومت به خوردگی استثنایی آنها است.

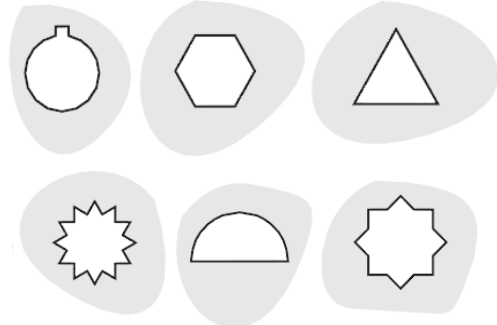
همیشه یکی از مشکلات اصلی در کاربردهای هوافضا کاهش وزن است، اگر چه تیتانیوم گرانتز از فولاد است ولی مزیت اصلی، وزن آن است که حدود یک سوم فولاد می‌باشد. بنابراین نسبت مقاومت به وزن آلیاژهای تیتانیوم منجر به استفاده آنها در قطعات متنوع می‌شود. عمومی‌ترین آلیاژهای استفاده شده در صنایع هوافضا گروه آلفا-بتا بوده و از این گروه نیز Ti-6Al-4V معمول‌ترین آلیاژ می‌باشد. اساساً بواسطه سختی بالایی که سطوح آلیاژهای تیتانیوم در درجه حرارت بالا دارند مشکلاتی در ماشین‌کاری این آلیاژها پیدا شده است بویژه موقعی که با فولادها با خواص مشابه مقایسه شده‌اند. در ماشین

زاویه براده، زاویه بین سطح برشی و جهت عمود به سطح قطعه کار است. اگرچه زوایای براده مثبت، منفی و صفر بطور معمولی در عملیات ماشین کاری استفاده می‌شوند، ولی زاویه براده در ابزارهای خان‌کشی معمولاً مثبت است. زاویه براده مثبت ابزار برشی را تیز می‌کند، توان مورد نیاز را کاهش داده و به جریان براده روی سطح براده کمک می‌کند. باید توجه شود که زوایای براده کوچک، مقاومت دندانه و نیروهای برشی را افزایش می‌دهند. در حالیکه زوایای برشی بزرگ نیروی برشی و مقاومت دندانه‌ها را کاهش می‌دهند. به منظور داشتن نیروهای برشی مناسب و مقاومت کافی، زاویه براده باید در محدوده بهینه انتخاب شود.

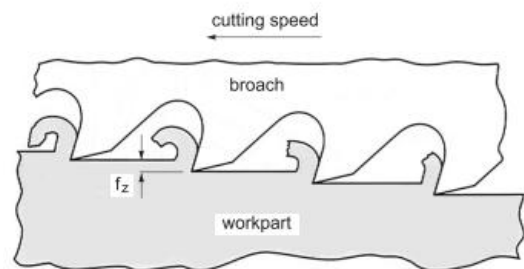
روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند

تنش‌های پسماند به ندرت از راه محاسبه اندازه‌گیری می‌شوند، زیرا اطلاعات لازم برای محاسبات اغلب کافی نیست، اما تقریباً می‌توان این تنش‌ها را بطور آزمایشی بوسیله آزاد کردن و اندازه‌گیری کرنش‌هایی که پس از آن ظاهر می‌شود، ارزیابی کرد. آزادسازی تنش‌های محصور در قطعه، مستلزم جداسازی قطعه دارای تنش است. روش‌های مختلفی از قبیل روش پوشش لاک شکننده، روش دایره‌بری و روش پراش اشعه ایکس برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند وجود دارد. در روش پوشش لاک شکننده، قطعه کار توسط پوشش لاک شکننده پوشیده می‌شود. سپس توسط مته یک حفره کوچک در منطقه‌ای از قطعه که حدس زده می‌شود دارای تنش است، ایجاد می‌شود. در نتیجه تنش‌های اطراف حفره آزاد می‌شوند. ترک‌ها در پوشش به صورت عمده بر تنش کششی اصلی که آزاد شده است نمایان می‌شوند. با توجه به جهت ترک‌ها و نزدیکی آنها به هم بزرگی تنش‌های پسماند قابل ارزیابی است. در روش دایره‌بری، از یک مته حفاری که شیارهای حلقوی از جسم بر می‌دارد، استفاده می‌شود. به منظور تعیین تنش‌های پسماند در صفحات صاف یا در یک پوسته خمیده سبک از سه یا چند کرنش‌سنج که دور مرکز سطح قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود. پراش اشعه ایکس به عنوان یکی از بهترین روش‌های بررسی ساختارهای بلوری قادر است با استفاده از اندازه‌گیری تغییرات ثابت شبکه (کرنش شبکه) تانسور تنش را در جسم اندازه‌گیری نماید.

برای پرداخت کاری سوراخ‌های مربع شکل، مستطیل شکل یا سوراخ‌هایی با شکل‌های نامنظم و نیز برای براده‌برداری جاکار در قرقره‌ها و توربین‌ها به کار می‌رود. انتخاب ابزارهای خان‌کشی وابسته به نوع عملیات خان‌کشی است. در خان‌کشی داخلی، از ابزار خان‌کشی کششی استفاده می‌شود. در خان‌کشی خارجی، فرم ابزار خان‌کشی به صورت تخت است که بر روی یک وجه آن دندانه‌های براده‌برداری قرار دارد و ابزار در شیار یک فیکسچر پشت‌بند، مهار شده و حرکت می‌کند. شکل 1 برخی از انواع شکل‌های تولید شده بوسیله فرایند خان‌کشی داخلی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 1 دیده می‌شود پروفیل جلویی وابسته به هندسه قطعه کار بوده و بر طبق آن باید طراحی شود. شکل 2 هندسه پروفیل جانبی را برای نوعی از یک ابزار خان‌کشی در فرآیند خان‌کشی نشان می‌دهد. پروفیل جانبی ابزار خان‌کشی بوسیله خصوصیات ابزار از قبیل طول گام (P)، ارتفاع دندانه (h_b)، ضخامت دندانه در سطح نوک $land(f_b)$ ، زاویه براده α ، زاویه آزاد β^2 و پیشروی بر دندانه بیان می‌شود.

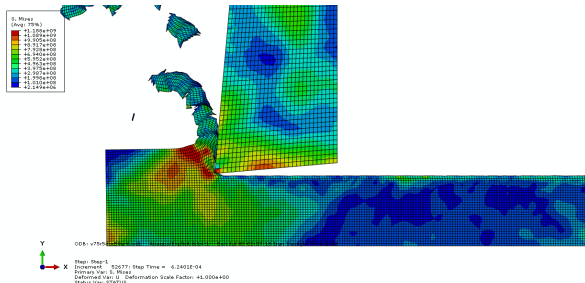


شکل 1- برخی از انواع شکل‌های تولید شده بوسیله فرایند خان‌کشی داخلی [2]



شکل 2- هندسه نوعی از پروفیل جانبی ابزار در فرآیند خان‌کشی

با توجه به اینکه فرآیند خان‌کشی ویژگی تقارن خوبی با برش متعامد دارد در شبیه‌سازی، مدل متعامد دو بعدی (2D) بجای مدل سه بعدی (3D) مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل دو بعدی المان محدود برش متعامد، در حال براده‌برداری در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل 4- شبیه‌سازی دو بعدی روش اجزای محدود برش فلز در حال براده‌برداری

برای بررسی رفتار ماده و معیار جداسازی براده از مدل جانسون-کوک [6] که برای تغییر شکل ماده در سرعت بالا و نرخ کرنش بالا مناسب است، استفاده شده است [18]. ارتباط بین تنش، کرنش و حوزه‌های دمایی توسط معادله 1 تعریف می‌شود.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}][1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m] \quad (1)$$

معادله 1 تنش واقعی را محاسبه می‌کند. در رابطه (1) نرخ کرنش سختی در پرانتز اول، جریان تنش در نرخ کرنش‌های زیاد در پرانتز دوم و نرخ نرم‌شدگی مواد در اثر براده‌برداری در پرانتز سوم تعریف می‌شود. پارامترهای A ، B ، C ، n و m ثابت‌های ماده هستند که برای آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V در جدول 1 نشان داده شده‌اند. همچنین T درجه حرارت ماده، T_r درجه حرارت رفرنس، T_m درجه حرارت ذوب ماده، ε کرنش واقعی، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش پلاستیک معادل که با نرخ کرنش رفرنس $\dot{\varepsilon}_0$ نرمالایز شده، هستند.

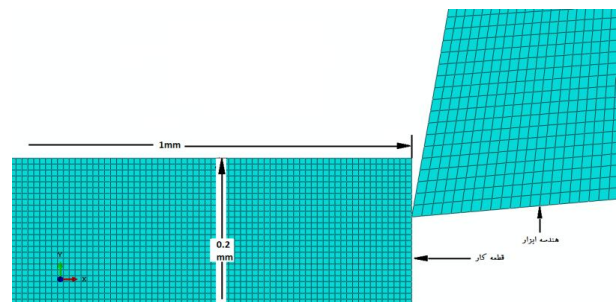
جدول 1- ثابت‌های مدل مواد جانسون کوک برای آلیاژ Ti6Al4V [19-21]

A [MPa]	B [MPa]	n	C	M	T_m (°C)	T_r (°C)
862	331	0/34	0/014	0/8	1650	25

مدلسازی المان محدود ابزار برش و قطعه کار

در این بخش، روش المان محدود (FEM) بر اساس نرم‌افزار تحلیل صریح آباکوس که می‌تواند برای انواع مختلفی از مسائل غیرخطی به کار گرفته شود انجام شده است. روش المان محدود بر اساس مدل مواد جانسون-کوک برای شبیه‌سازی تنش‌های پسماند که اندازه‌گیری آنها توسط آزمایش مشکل است، در طی فرآیند خان‌کشی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از این آنالیز شبیه‌سازی، بررسی اثر زاویه براده ابزار و سرعت برشی روی تنش‌های پسماند است.

در این تحقیق به منظور کاهش زمان محاسبات شبیه‌سازی، ابعاد قطعه کار $1\text{mm} \times 0/2\text{mm}$ ، طول ابزار $0/25\text{mm}$ و ارتفاع ابزار $0/5\text{mm}$ انتخاب شده است. پارامتر زاویه براده 5، 10، 15 و 20 درجه، زاویه آزاد 5 درجه، عمق برش $0/05\text{mm}$ و سرعت برشی 15 m/min ، 30 m/min ، 45 m/min و 75 m/min انتخاب شده است. برای ماده ابزار و قطعه کار از المان (CPE4RT)³ استفاده شده است. مدل اصطکاکی لغزشی بین سطح براده ابزار و براده بر اساس قانون اصطکاکی کولمب است. علاوه بر این، یک مش دقیق در سطح تماسی بین لبه برشی ابزار و قطعه کار، بکار برده شده است. از نقطه نظر مدل‌سازی، تصمیم‌گیری در تراکم مش مناسب اثر شدیدی روی دقت نتایج و زمان شبیه‌سازی دارد. بنابراین برای اینکه نتایج بدست‌آمده مستقل از ابعاد مش باشد تحلیل حساسیت مش بر روی مدل صورت می‌گیرد. با ریزتر نمودن مش‌ها تغییرات چندانی در نتایج بوجود نمی‌آید. بنابراین در مش‌بندی استفاده شده در قطعه کار اندازه المان‌ها $5\mu\text{m}$ و هندسه ابزار برشی نیز با کمینه اندازه المان برابر با $10\mu\text{m}$ مطابق شکل 3 مش‌بندی شده است.



شکل 3- المان‌های مش‌بندی ماده قطعه کار و هندسه ابزار برشی

جدول 3- پارامترهای قانون شکست جانسون کوک برای آلیاژ
 [20] Ti6Al4V

پارامترهای قانون آسیب	Ti-6Al-4V
کرنش شکست اولیه (d_1)	-0/09
فاکتور نمایی یا توانی (d_2)	0/25
فاکتور سه بُعدی یا سه وجهی (d_3)	0/5
فاکتور نرخ کرنش (d_4)	0/014
فاکتور دما (d_5)	3/87

بررسی اثر زاویه براده روی تنش‌های پسماند

در عملیات برش فلزات، نیروهای ترمومکانیکالی در سطح مشترک ابزار-براده ایجاد می‌شوند. این نیروها در سطح یا لایه-های زیر سطح قطعه‌کار به شکل تنش‌های پسماند ظاهر می‌شوند. محاسبه نیروها و تنش‌های پسماند از روش آزمایش کاملاً مشکل است. تنش‌های پسماند موقعی که در معرض بارهای خستگی یا بارهای متغیر قرار می‌گیرند اثر قابل توجهی روی عمر قطعات دارند. تقریباً در تمام قطعات ماشین‌کاری شده پرداخت سطح و دقت ابعادی از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین دانش اندازه تنش‌های پسماند و جهت آنها در قطعات ماشین‌کاری شده کمک بزرگی به طراحی قطعات می‌کند و این می‌تواند عمر اجزا را اصلاح کند و شکست ناگهانی یا غیرمترقبه اجزای ماشین‌کاری شده را به کمینه برساند.

معمولاً مقدار مطلق تنش‌های پسماند نزدیک سطح قطعه کار بالا بوده و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. تنش‌های پسماند می‌تواند کششی یا فشاری باشد. عموماً با توجه به اینکه تنش-های پسماند فشاری جلو رشد ترک را می‌گیرند، عملکرد سازه و عمر را اصلاح می‌کنند. در این تحقیق اثر زاویه براده و سرعت برشی روی تنش‌های پسماند در فرآیند خان‌کشی آلیاژ Ti6Al4V مورد بررسی قرار گرفته است. توزیع تنش‌های پسماند S_{33} و S_{11} ناشی از بارگذاری مکانیکی و حرارتی مطابق شکل 5 توصیف می‌شود که محور y محور خروج از صفحه رسم را نشان می‌دهد.

به منظور مطالعه اثر هندسه ابزار روی تنش‌های پسماند زاویه براده انتخاب شده است و اثر آن را روی تنش‌های پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. اثر زاویه براده روی تنش‌های پسماند برای زوایای براده 5، 10، 15 و 20 در سرعت‌های برشی 15، 30 و 45 متر بر دقیقه آنالیز شده است. شکل 6 نمودار توزیع تنش‌های پسماند محوری را در سرعت برشی 30

در شبیه‌سازی، ابزار یک ماده صلب ایده‌آل و قطعه کار یک ماده الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است. در طول فرآیند برش، قطعه کار ثابت در نظر گرفته شده و ابزار نسبت به آن دارای حرکت است. خواص ابزار برشی و ماده قطعه‌کار در جدول 2 داده شده است.

جدول 2- مشخصه‌های مکانیکی- حرارتی ابزار و قطعه‌کار [19 و 21]

پارامترهای مکانیکی و گرمایی	Ti6Al4V	Tungsten Carbide(WC)
چگالی (kg/m^3)	4430	11900
مدول یانگ (GPa)	110	540
نسبت پواسون	0/3	0/22
گرمای ویژه ($\text{J/Kg}^\circ\text{C}$)	500/525	100
هدایت حرارتی ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	6/6	50

زمانی که معیار آسیب از 1 تجاوز کند، معیار شکست دینامیکی جانسون-کوک اتفاق می‌افتد. پارامتر آسیب استفاده شده در این شبیه‌سازی به صورت معادله (2) تعریف شده است.

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pi}}{\bar{\epsilon}_f^{pi}} \right) \quad (2)$$

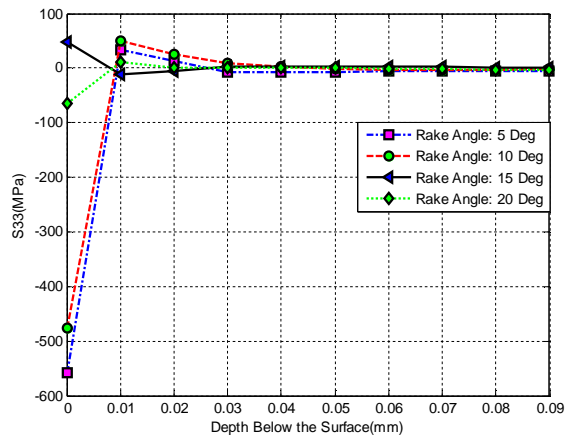
در این رابطه $\Delta \bar{\epsilon}^{pi}$ نمو کرنش پلاستیک معادل و $\bar{\epsilon}_f^{pi}$ کرنش در شکست تحت شرایط جاری است.

بر طبق قانون آسیب جانسون-کوک کرنش تجمعی در هر نمو از تحلیل، تصحیح شده و عبارت عمومی کرنش در معیار شکست $\bar{\epsilon}_f^{pi}$ فرض می‌شود که به طور جداگانه توسط معادله (3) داده شده است.

$$\bar{\epsilon}_f^{pi} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q})][1 + d_4 \ln(\frac{\epsilon_f^{pi}}{\epsilon_0^{pi}})] \quad (3)$$

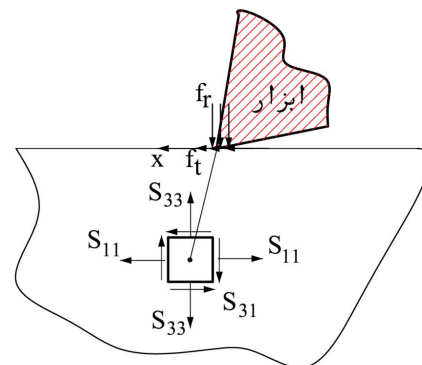
$$[1 + d_5 \frac{T - T_r}{T_{melt} - T_r}]$$

در این رابطه d_1 تا d_5 پارامترهای شکست بوده و به صورت تجربی قابل محاسبه هستند. نسبت تنش فشاری به تنش فون-میسز (p/q) تعریف شده است. شکست برشی فیزیکی زمانی که پارامتر آسیب به 1 برسد اتفاق می‌افتد. پارامترهای شکست برای آلیاژ Ti6Al4V در جدول 3 داده شده است.



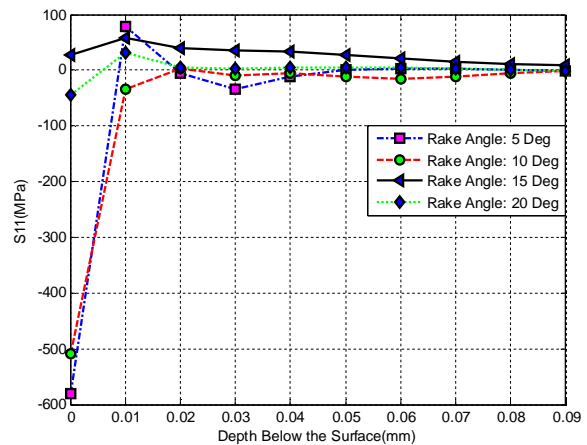
شکل 7- اثر زاویه براده روی تنش‌های پسماند محیطی

متر بر دقیقه برای زوایای براده 5، 10، 15 و 20 درجه نشان می‌دهد.



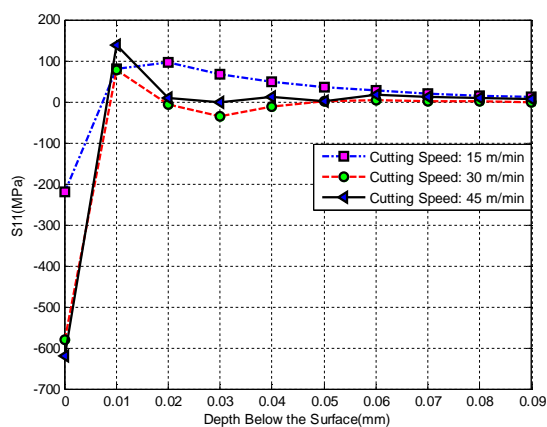
شکل 5- شماتیک تنش‌های حاصل از بارگذاری مکانیکی و حرارتی

با توجه به شکل 7 نیز مشاهده می‌شود که روند مشابهی برای تنش‌های پسماند محیطی در شبیه‌سازی‌های زاویه براده وجود دارد. گرایش مشابهی همانند نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی توسط مراجع [22-24] گزارش شده است.



شکل 6- اثر زاویه براده روی تنش‌های پسماند محوری

بررسی اثر سرعت برشی روی تنش‌های پسماند
سرعت برشی به عنوان یکی از مهمترین فاکتورها در موفقیت یا شکست هر فرآیند برشی در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق اثر سرعت برشی روی توزیع تنش‌های پسماند با استفاده از سه مقدار مختلف سرعت برشی 15، 30 و 45 متر بر دقیقه و عمق برشی ثابت 0/05mm و زاویه براده 5 درجه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی المان محدود برای تنش‌های محوری و محیطی در شکل‌های 8 و 9 نشان داده شده است.



شکل 8- اثر سرعت برش روی تنش‌های پسماند محوری با زاویه براده ثابت 5 درجه

با توجه به اینکه هدف اصلی طراحان کاهش تنش‌های پسماند کششی و یا تبدیل آنها به تنش‌های پسماند فشاری است. همانطور که از شکل 6 دیده می‌شود در بررسی اثر زاویه براده روی تنش‌های پسماند محوری، با توجه به اینکه در زاویه براده 10 درجه، روی سطح قطعه کار و لایه‌های زیرین آن تمام تنش‌های پسماند از نوع فشاری هستند، می‌توان در شرایط ماشین‌کاری داده شده برای آلیاژ Ti6Al4V این زاویه براده را بهترین زاویه دانست.

همچنین شکل 7 نمودار توزیع تنش‌های پسماند محیطی را در سرعت برشی 30 متر بر دقیقه برای زوایای براده 5، 10، 15 و 20 درجه نشان می‌دهد.

آمده از شبیه‌سازی، گرایشی مشابه با مرجع [25] که برای ماشین‌کاری فولاد کربن نوع K945 ارائه شده است را دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور مطالعه اثر هندسه ابزار روی تنش‌های پسماند، زاویه براده انتخاب شده است و اثر آن روی تنش‌های پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. اثر زاویه براده روی تنش‌های پسماند برای زوایای براده 5، 10، 15 و 20 در سرعت‌های برشی 15، 30 و 45 متر بر دقیقه آنالیز شده است.

با توجه به اینکه هدف اصلی طراحان کاهش تنش‌های پسماند کششی و یا تبدیل آنها به تنش‌های پسماند فشاری است. در بررسی اثر زاویه براده روی تنش‌های پسماند محوری و محیطی، با توجه به اینکه در زاویه براده 10 درجه روی سطح قطعه‌کار و اکثریت لایه‌های زیرین آن تنش‌های پسماند از نوع فشاری هستند، می‌توان در شرایط ماشین‌کاری داده شده برای آلیاژ Ti6Al4V این زاویه براده را بهترین زاویه در نظر گرفت.

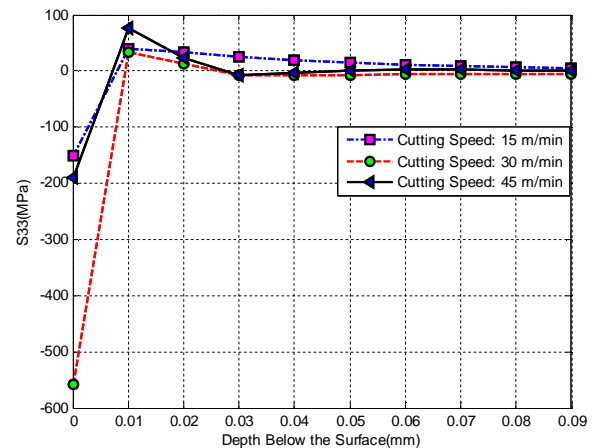
همچنین اثر سرعت برشی روی توزیع تنش‌های پسماند با استفاده از سه مقدار مختلف سرعت برشی 15، 30 و 45 متر بر دقیقه و عمق برشی ثابت 0/05 میلی‌متر و زاویه براده 5 درجه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی المان- محدود برای تنش‌های محوری و محیطی بصورت نمودارهایی به دست آمده است. با توجه به اینکه در سرعت برشی 30 متر بر دقیقه توزیع تنش در لایه‌های زیر سطحی، نزدیک به صفر و از نوع تنش‌های پسماند فشاری هستند، می‌توان این سرعت برشی را به عنوان حالتی تقریباً ایده‌آل برای ماشین‌کاری آلیاژ Ti6Al4V در نظر گرفت.

پی‌نوشت

- 1- Rake Angle
- 2- Clearance Angle
- 3- Four-Node bilinear Displacement & Temperature

مراجع

- [1] Henriksen, E.K., "Residual Stresses in Machined Surfaces", American Society of Mechanical Engineers -Transactions, 73(1): pp. 69-76, 1951.
- [2] Liu, C.R. and M.M. Barash, "Variables Governing Patterns of Mechanical Residual Stress in a Machined Surface", Journal of Engineering for Industry, Transactions ASME, 104(3): pp.257-264, 1982.



شکل 9- اثر سرعت برش روی تنش‌های پسماند محیطی با زاویه براده ثابت 5 درجه

همانطور که از شکل‌های 8 و 9 مشاهده می‌شود توزیع تنش‌های پسماند پایین محور صفر به معنای تنش‌های فشاری هستند. در شکل 8 برای سرعت برشی 15 متر بر دقیقه در نقطه‌ای دلخواه، روی سطح ماشین‌کاری شده مقدار تنش‌های پسماند فشاری بیشینه برابر 220Mpa است و در عمق 0/01 از سطح قطعه‌کار به مقدار تنش‌های پسماند کششی 79Mpa و نهایتاً در عمق 0/09 از سطح قطعه‌کار به مقدار 10/93Mpa می‌رسد. افزایش سرعت برشی به 30 متر بر دقیقه منجر به تنش‌های پسماند فشاری بالاتر برابر با 580Mpa در همان نقطه دلخواه از سطح ماشین‌کاری شده می‌شود و در عمق 0/01 از سطح قطعه‌کار به مقدار تنش‌های پسماند کششی 78/9Mpa و نهایتاً در عمق 0/09mm از سطح قطعه‌کار به تنش‌های پسماند فشاری به مقدار 0/69 Mpa می‌رسد. برای سرعت برشی 45 متر بر دقیقه نیز رفتاری مشابه اما با مقادیر تنش‌های پسماند بالاتر مشاهده می‌شود (مقدار تنش در سطح قطعه‌کار 619Mpa-، در عمق 0/01 از سطح قطعه‌کار 137Mpa و در عمق 0/09mm از سطح قطعه‌کار 5/9Mpa). با توجه به اینکه در سرعت برشی 30 متر بر دقیقه توزیع تنش در لایه‌های زیر سطحی، نزدیک به صفر و از نوع تنش‌های پسماند فشاری هستند، می‌توان این سرعت برشی را به عنوان حالتی تقریباً ایده‌آل برای ماشین‌کاری آلیاژ Ti6Al4V با شرایط برشی داده شده در نظر گرفت. در شکل 9 نیز رفتاری مشابه برای تنش محیطی S_{33} مشاهده می‌شود. نتایج به دست

- [15] R.R. Boyer, "An overview on the use of titanium in aerospace industry", Journal of Material Science and Engineering A213, pp. 103–114, 1996.
- [16] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang, "Titanium alloys and their machinability a review", Journal of Materials Processing Technology 68, pp. 262–274, 1997.
- [17] Edmund P. Leigh John K. Schueller, Scott Smith, Jiri Tlusty, "Advanced Machining Techniques on Titanium Rotor Parts", Presented at the American Helicopter Society, 56th Annual Forum, Virginia Beach, VA, May 2–4, 2000.
- [18] Iqbal S A, Mativenga P T and Sheikh M A., "Characterization of machining of AISI 1045 steel over a wide range of cutting speeds. Part 2: evaluation of flow stress models and interface friction distribution schemes", Proc. of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture 221, pp. 917–926, 2007.
- [19] Johnson, G. and Holmquist, T., "Test data and computational strength and fracture model constants for 23 materials subjected to large strain, high-strain rates, and high temperatures", Los Alamos National laboratory, p. 425, 11463-MS. (Cited on pages 9, 31, and 32.)
- [20] Johnson, G.R.: "Strength and fracture characteristics of a titanium alloy (.06al, .04v) subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressure", Naval Surface Weapons Center NSWC, pp. 86, U–144, (Cited on pages xiii and 37.), 1985.
- [21] Don Lesuer, "Experimental Investigations of Material Models for Ti-6AL4V and 2024-T", UCRL-ID-134691, may 3, 1999.
- [22] R. M'Saoubi, J.C. Outeiro, B. Changeux, J.L. Lebrun, A. Mor~ao Dias, "Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels", Journal of Materials Processing Technology 96: pp. 225–233, 1999.
- [23] V. Kalhori, "Modelling and Simulation of Mechanical Cutting", Unpublished doctoral thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2001.
- [24] M. Mohammadpour, M.R. Razfar, R. Jalili Saffar, "Numerical investigating the effect of machining parameters on residual stresses in orthogonal cutting", Simulat. Modell. Pract. Theory 18: pp. 378–389, 2010.
- [25] N C Tampu, B Chirit, E Herghelegiu & G Brabie, "Influence of the cutting regime on the residual stresses generated by carbon steel milling", Indian Journal of Engineering & Materials Sciences Vol. 21, pp.283-288, June 2014.
- [3] Xie, Q., et al. "A Study on Residual Stresses and Tool Wear Induced by the Machining Process", in NAMRC XVII.: SME, 1989.
- [4] Sadat, A.B. and J.A. Bailey, "Residual Stresses in Turned AISI 4340 Steel", Experimental Mechanics, 27(1): pp. 80-85, 1987.
- [5] Jang, D.Y., et al., "Surface Residual Stresses in Machined Austenitic Stainless Steel", Wear, 194(1-2): pp. 168-173, 1996.
- [6] Liu, M., J.-I. Takagi, and A. Tsukuda, "Effect of Tool Nose Radius and Tool Wear on Residual Stress Distribution in Hard Turning of Bearing Steel", Journal of Materials Processing Technology, 150(3): pp. 234-241, 2004.
- [7] Okushima, K. and Y. Kakino, "Residual Stress Produced by Metal Cutting", CIRP Annals, 20(1): pp. 13-14, 1971.
- [8] Hua, J., et al., "Effect of Feed Rate, Workpiece Hardness and Cutting Edge on Subsurface Residual Stress in the Hard Turning of Bearing Steel Using Chamfer + Hone Cutting Edge Geometry", Materials Science and Engineering, 394(1-2): pp. 238-248, 2005.
- [9] Hua, J., D. Umbrello, and R. Shivpuri, "Investigation of Cutting Conditions and Cutting Edge Preparations for Enhanced Compressive Subsurface Residual Stress in the Hard Turning of Bearing Steel", Journal of Materials Processing Technology, 171(2): pp. 180-187, 2006.
- [10] Liu, C.R. and Y.B. Guo, "Finite Element Analysis of the Effect of Sequential Cuts and Tool-Chip Friction on Residual Stresses in a Machined Layer", International Journal of Mechanical Sciences, 42(6): pp. 1069-1086.165, 2000.
- [11] Guo, Y.B. and C.R. Liu, "Fem Analysis of Mechanical State on Sequentially Machined Surfaces", Machining Science and Technology, 6(1): pp. 21-41, 2002.
- [12] Avadhoot Paranjpe, "residual stresses in machined titanium (ti-6al-4v) alloys", Master of Science, May 2014.
- [13] A.K. Mishra, P. Shandilya, "FEM Analysis on Residual Stresses induced in dry turning: A Review", 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th–14th, 2014.
- [14] E.O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, "An overview of the machinability of aeroengine alloys", Journal of Materials Processing Technology 134, pp.233-253, 2003.