مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۱-٤

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱٤ آبان ۱۳۹٤

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری متعامد آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) به‌روش المان محدود

محمدرضا ذاکریان*، میلاد ابراهیمی، یاسین فتحعلی‌زاده آبادی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱٦٤۷٦۸۷۸۱۱، Haghdoost@ut.ac.ir

چکیده

در این مقاله هدف شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری متعامد آلیاژ تیتانیوم با استفاده از روش المان محدود می‌باشد. شبیه‌سازی به روش المان محدود درک فرآیند برش را آسان و طراحی ابزار را در جهت افزایش عمر ابزار و کاهش نیروهای ماشین‌کاری بهینه می‌نماید. شبیه‌سازی به‌صورت سه بعدی و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS۶,۱۳ انجام شده است. تاثیر تغییرات پارامترهای ماشین‌کاری شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی بر روی نیروهای اصلی و پیشروی و تنش برشی و عمر ابزار بررسی گردیده است. برای صحه‌گذاری بر نتایج نرم‌افزار، از آزمایش‌های تجربی انجام شده در این زمینه استفاده گردیده و نتایج با مقادیر حاصل از آزمایش‌های مذکور مقایسه گردیده‌اند. بررسی‌ها نتایج نشان می‌دهد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق خوبی با مقادیر تجربی دارد.

کلید واژگان: ماشین‌کاری متعامد، ABAQUS 6.13، شبیه‌سازی المان محدود، هندسه ابزار، پارامترهای ماشین‌کاری

Simulation of orthogonal machining process of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by finite element method

Mohammadreza Zakerian*, Milad Ebrahimi, Yasin Fathalizadeh

Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
*P.O.B 1647687811, Tehran, Iran, Haghdoost@ut.ac.ir

ABSTRACT

This study aims to simulate the orthogonal machining process of titanium alloy using finite element method. Simulation with finite element method makes the cutting process easy to understand, increases tool life and reduces the cutting forces. Three-dimensional simulation was performed using the Abaqus software. The effects of machining parameters include the cutting speed and feed rate on the cutting and feed forces, shear stress and tool life were assessed. To validate the results of the application, the experiments were carried out in the field and the results were compared with the values obtained from the tests. The results showed that the simulation results are in good agreement with the experimental data.

Keywords: Abaqus, Finite Element Method, Machining Parameters, Orthogonal Cutting, Tool Geometry

۱- مقدمه

ماشین‌کاری یکی از روش‌های مهم در بین فرآیندهای تولید بوده و دارای گستره بسیار بزرگی از عملیات‌های مختلف از قبیل فرزکاری، سنگ‌زنی، تراش‌کاری، سوراخ‌کاری و غیره است. آزمایش‌ها و مطالعات بسیاری برای شبیه سازی، پیش‌بینی و بهینه کردن این فرآیند در سال‌های گذشته انجام شده است. پژوهش‌هایی در زمینه نحوه حرکت براده، نیروهای وارد بر آن برای فرآیند ماشین‌کاری متعامد حین سرعت‌های ۱۵ تا ۲۰۰ متر بر دقیقه انجام شده است [۱]. همچنین آزمایش‌هایی برای تشخیص حرکت براده در سرعت‌های بالا در بازه ۳۰۰ تا ۴۸۰۰ متر بر دقیقه نیز انجام گرفته است [۲]. این مقاله برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار ABAQUS۶,۱۳ بهره گرفته که در آن از روش لاگرانژین برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شده است. این روش برای مواردی که واپیچش نسبتا کم و تغییر شکل زیاد نیست، مناسب است. برای شبیه‌سازی برش فلزات روش لاگرانژین ارجحیت دارد زیرا تشکیل براده از ابتدای فرآیند تا رسیدن به حالت پایدار را، راحت‌تر شبیه‌سازی می‌کند. هندسه براده در این روش قابل پیش‌بینی نیست و آن را تابعی از تغییر شکل، پارامترهای ماشین‌کاری و خواص ماده در نظر می‌گیرند. از معایب این روش در مقایسه با سایر روش‌ها افزایش زمان و همچنین کاهش پایداری در مواقعی است که واپیچش المان‌ها بسیار زیاد است [۳]. هدف ما بررسی تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی بر روی نیروهای ماشین‌کاری شامل نیروی اصلی و نیروی پیشروی با استفاده از روش المان محدود است. سپس نتایج با مقادیر تجربی صحه‌گذاری شده‌اند.

۲- مدل سازی خواص مواد

تنش تسلیم و استحکام لحظه‌ای مواد تحت کارسختی بستگی به دما، نرخ کرنش و کرنشی دارد که در آن ماده تحت کار سختی قرار می‌گیرد. تخمین استحکام و جریان تنش مواد معمولا به صورت تجربی و از طریق انجام آزمایش تعیین می‌شود و مدل‌های متنوعی برای توصیف منحنی جریان تنش مواد وجود دارد. یکی از این مدل‌ها که در این مقاله از آن استفاده شده است مدل جانسون- کوک است. این مدل در دهه ۸۰ میلادی توسعه پیدا کرد و برای تغییرشکل‌های سریع و یا تغییر شکل‌هایی که کرنش در آنها بالاست- مثل فرآیند ماشین‌کاری- کاربرد دارد [۴]. رابطه جانسون-کوک شامل نرخ کرنش پلاستیک، کرنش پلاستیک، توان کرنش سختی n، نرخ کرنش پلاستیک اولیه، دمای ذوب (T_{melt})، دمای اتاق (T_{room}) و توان حساسیت نرخ کرنش m است. A، B و C ثابت‌های معادله هستند.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M.R. Zakerian, M. Ebrahimi, Y. Fathalizadeh, Simulation of orthogonal machining process of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by finite element method, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 1-4, 2015 (in Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.84.4]

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\frac{\varepsilon^p}{\varepsilon^0})(1 - \left(\frac{T-T_{room}}{T_{melt}-T_{room}}\right)^m) \quad (۱)$$

زمانی شکست در قطعه اتفاق می‌افتد که پارامتر شکست D در ماده از حد معین شده برای آن تجاوز کند. پارامتر شکست به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$D = \sum(\frac{\Delta\varepsilon^p}{\varepsilon^f}) \quad (۲)$$

که $\Delta\varepsilon$ نمو کرنش پلاستیک معادل و ε کرنش معادل برای شکست تحت نرخ کرنش، دما، فشار و تنش معادل در حالت مشابه است، که به‌صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon^f = \left[d_1 + d_2\exp\left(d_3\frac{p}{q}\right)\right][1 + d_4\ln\left(\frac{\varepsilon^p}{\varepsilon^0}\right)][1 + d_5\frac{T-T_{room}}{T_{melt}-T_{room}}] \quad (۳)$$

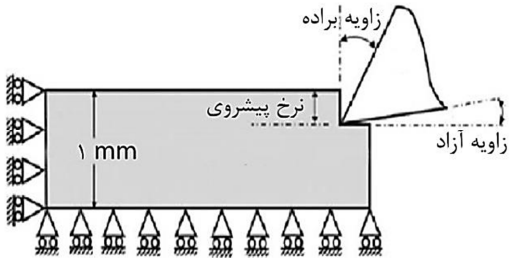
که p فشار، q تنش فون مایسز و d_1 و d_5 ثابت‌هایی هستند که با آزمایش تعیین می‌شوند.

خصوصیات حرارتی و مکانیکی قطعه‌کار و ابزار در جدول ۱ بیان شده است.

توانایی نرم‌افزارهای المان محدود در مش‌زنی مجدد و تولید شبکه مش بسیار فشرده در نزدیکی نوک ابزار که ناحیه‌ای است که در آن تغییرات شدید کرنش، نرخ کرنش و دما وجود دارد، بسیار مهم است. در این زمینه تعریف معیاری برای جدایش براده و حذف مش‌های معیوب ضروری است. به علاوه فشردگی بالای مش‌ها در اطراف لبه برنده این اجازه را می‌دهد که مش‌های دارای واپیچش زیاد در این ناحیه به‌طور خودکار حذف شوند بدون این‌که هیچ وقفه‌ای در فرآیند ایجاد شود. در نرم‌افزار در صورتی که مقدار تغییر شکل و کرنش مش‌ها از یک حد بحرانی از پیش تعیین شده تجاوز کند، قطعه مش‌زنی مجدد می‌شود. همچنین یک حد بحرانی تخریب برای جدایش ماده از قطعه کار تعیین شده است. بنابراین المان‌ها در نوک ابزار زمانی حذف می‌شوند که به یک اندازه بحرانی تخریب برسند. برای این‌کار از مقیاس تخریب کاکرافت- لادم استفاده شده است [۵]. همچنین نرم‌افزار این توانایی را دارد که ابزار را به‌عنوان یک جسم الاستیک در نظر گرفته و توزیع تنش را در ابزار پیش‌بینی کند. در این مقاله برای شبیه‌سازی المان محدود برش متعامد، قطعه‌کار آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) و ابزار فولاد تندبر (HSS) در نظر گرفته شده است. قطعه‌کار به‌صورت الاستیک- پلاستیک و ابزار به صورت جسم الاستیک مدل‌سازی شده‌اند. روش تعریف شرایط مرزی در قطعه کار در شکل ۱ نشان داده شده است. در پایین المان نشان داده شده، تمام درجات آزادی به جز در راستای محور X گرفته شده و در سمت چپ آن قطعه فقط در راستای Y آزاد است. ابزار از سمت راست به چپ با سرعتی که نشانگر سرعت برشی است حرکت می‌کند.

جدول۱ مشخصه‌های مکانیکی– حرارتی ابزار و قطعه کار

ویژگی‌های گرمایی و مکانیکی	Ti4Al4V	فولاد HSS
چگالی (g/cm³)	۴۴۳۵	۷۸۰۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۱۰	۲۱۰
ضریب پواسون	۰/۳۵	۰/۳
گرمای ویژه (J/Kg/° C)	۶۱۲	۵۶۵
رسانش گرمایی (W/ m° C)	۶/۸	۳۷/۲
ضریب انبساط (µm/m° C)	۴/۷	۱/۰۷



شکل ۱ نوع شرایط مرزی در المان در نرم افزار

۳- معرفی نرم‌افزار

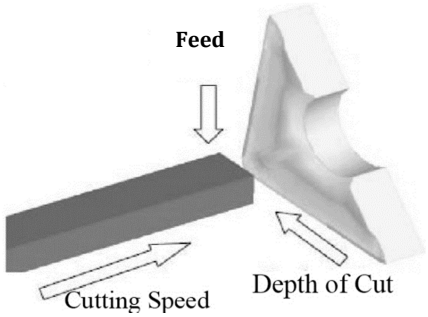
نرم‌افزار آباکوس قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار مدل موردنظر را پس از ایجاد، المان‌بندی کرده و با استفاده از روش انتگرال‌گیری ضمنی آن را تحلیل می‌کند. این نرم‌افزار این توانایی را دارد که با مشخص کردن پارامترهای مربوط به جنس ابزار و قطعه کار و همچنین پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه ابزار، خروجی‌های از قبیل نیروهای اصلی و پیشروی و همچنین توزیع دما، کرنش و نرخ کرنش را محاسبه کند. مدل المان فرض شده به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای انجام شبیه‌سازی ابتدا فرایند به صورت یک کوپل حرارتی- مکانیکی معرفی شده و از المان RT4CPE که یک المان چهار گره‌ای دو بعدی با فرض کرنش صفحه‌ای است برای تحلیل استفاده می‌شود. با این روش می‌توان کرنش‌ها، آهنگ‌های کرنش و حالت تغییر شکل را برای کوچک‌ترین جز از جسم به صورت موضعی توصیف نمود. در این کار شبیه‌سازی، قطعه کار به عنوان یک مدل الاستو- پلاستیک به‌صورت یک مستطیل و مشخص کردن ابعاد المان‌ها و پارتیشن‌بندی مناسب مش‌بندی می‌شود. سپس در قسمت نوع المان[1]، حالت حل این مسئله را به دلیل وجود تغییرشکل‌های زیاد و احتمال خرابی مش‌ها، حل صریح[2] را در نظر می‌گیریم و همچنین حالت حذف المان‌ها را فعال می‌کنیم تا کنده شدن براده را نیز شاهد باشیم. ابزار نیز به صورت یک مدل الاستیک با زاویه براده صفر درجه و زاویه آزاد پنج درجه آن‌جائی که شعاع نوک دماغه ۰/۰۲ است مدل‌سازی و مش‌بندی می‌شود. پارامترهای ماشین‌کاری در این حالت به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

سرعت برشی ۳۰۰ متر بر دقیقه نرخ پیشروی ۰/۲ میلی‌متر بر دور عمق برش ۲ میلی‌متر. در شکل ۳ نوع قرارگیری ابزار و قطعه‌کار نسبت به یکدیگر به صورت دو بعدی نمایش داده شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

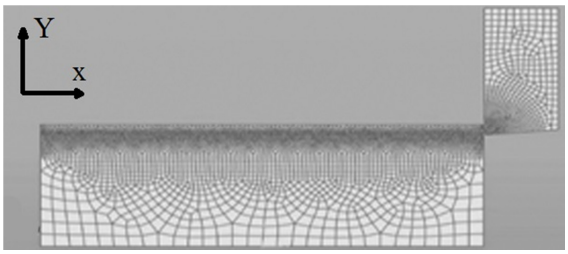
در شبیه‌سازی انجام شده، جنس ابزار فولاد تندبر و جنس قطعه‌کار آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) می‌باشد و آزمایش‌های تجربی صرفا به‌دلیل صحه‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



شکل۲ روش المان‌گیری در نرم‌افزار

1. Element Type
2. Explicit

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.84.4]



شکل ۳ شبیه سازی و نحوه قرارگیری ابزار برشی و قطعه‌کار

۴-۱- بررسی تأثیر سرعت برشی بر نیروهای ماشین‌کاری

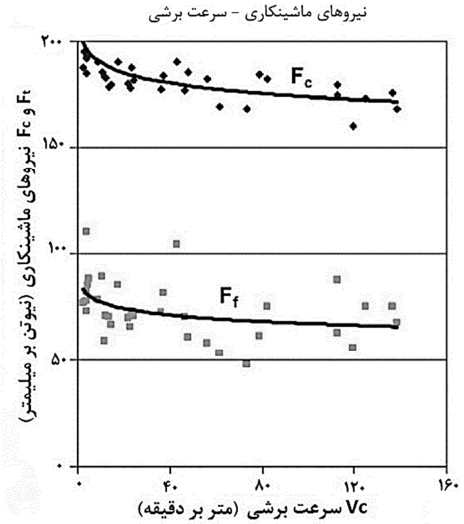
نتایج تجربی به همراه نتایج المان محدود برای تغییرات سرعت برشی در شکل‌های ۴و ۵ نشان داده شده است. به طورکلی با افزایش سرعت برشی، تغییر شکل براده و در نتیجه نیروی وارد به قلم کاهش پیدا می‌کند، لذا انرژی مخصوص تراش کمتر می‌شود. با افزایش سرعت برشی براده نازک‌تر شده و نیروهای برش کاهش می‌یابند. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی نیز این مطلب را تایید می‌کند. دلایل کاهش نیرو با افزایش سرعت برشی عبارتند از:

الف) با افزایش سرعت برش مساحت صفحه برش و حجم ناحیه تغییر شکل اولیه کاهش می‌یابد. زاویه صفحه برش کاهش یافته و در نتیجه انرژی کمتری صرف جدا شدن براده می‌گردد.

ب) در صورتی که لبه انباشته تشکیل نشود، با افزایش سرعت برش نیروی اصطکاک روی سطح قلم کاهش می‌یابد. همچنین به علت کاهش سطح تماس براده و کاهش مقاومت برشی ماده، نیرو کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت برشی ماده به این دلیل است که با افزایش سرعت برشی، درجه حرارت افزایش یافته و در نهایت مقاومت برشی افت می‌کند [۷]. همان‌طور که در شکل۴ و ۵ مشاهده می‌شود در سرعت‌های برشی بالای ۱۲۰ متر بر دقیقه نیروی ماشین‌کاری به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد.

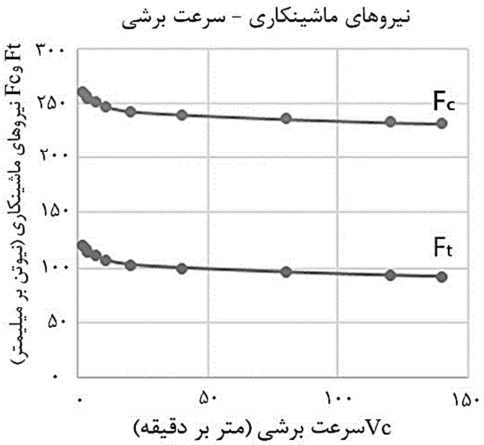
۴-۲- بررسی تأثیر سرعت برشی بر عمر ابزار

در عملیات ماشین‌کاری انرژی مکانیکی در نتیجه تغییر شکل پلاستیک به انرژی حرارتی تبدیل می‌گردد. این افزایش ناگهانی دما منجر به کاهش عمر ابزار می‌شود. شکل رابطه سرعت برشی با درجه حرارت ابزار را نشان می‌دهد. از طرفی هرچه درجه حرارت در ابزار افزایش یابد، عمر ابزار کاهش پیدا

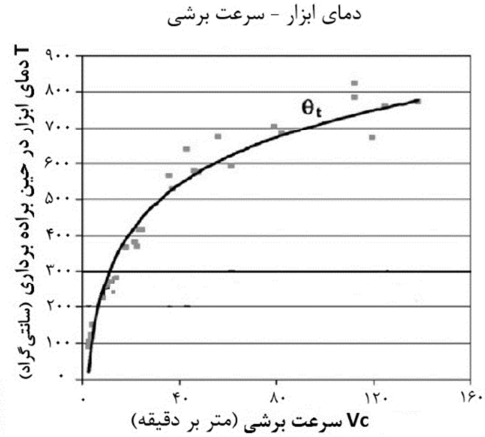


شکل ۴ نمودار تجربی تغییرات نیروها به سرعت برشی [۶]

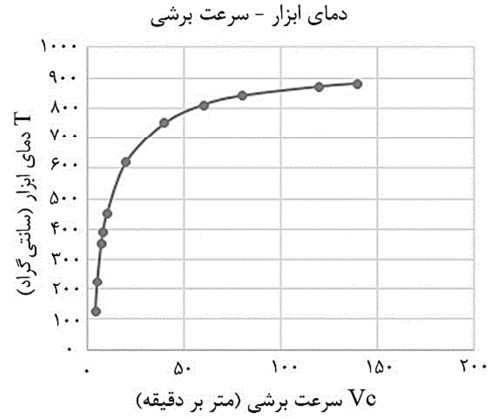
می‌کند پس با توجه به نمودار شکل ۶ و ۷ هرچه سرعت برشی افزایش پیدا کند عمر ابزار کاهش می‌یابد. دلیل اصلی این امر ضعیف شدن ابزار، در دمای بالا می‌باشد [۷]. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در سرعت‌های برشی بالای ۱۲۰ متر بر دقیقه دمای ابزار به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد.



شکل ۵ نمودار المان محدود تغییرات نیروها به سرعت برشی

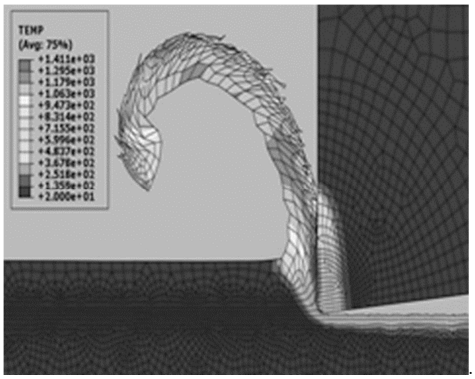


شکل ۶ نمودار تجربی تغییرات دمای ابزار به سرعت برشی [۶]



شکل ۷ نمودار المان محدود تغییرات دمای ابزار به سرعت برشی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.84.4]

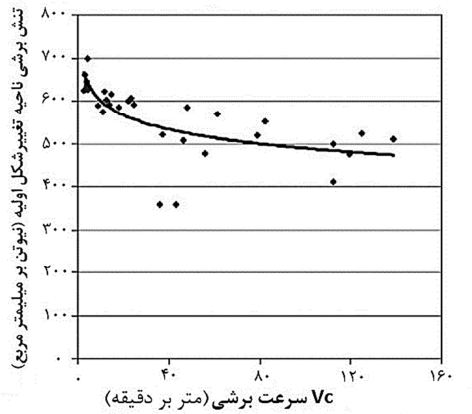


شکل۸ توزیع حرارت هنگام ماشین‌کاری تیتانیم

۴-۳- بررسی تأثیر سرعت برشی تنش برشی ناحیه تغییر شکل اولیه

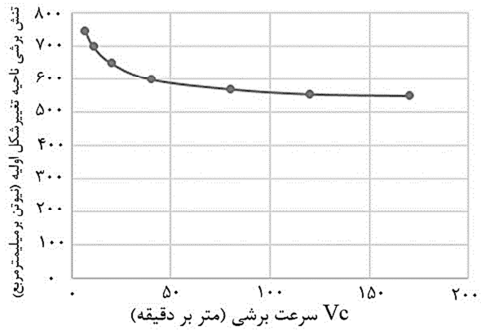
ناحیه تغییر شکل اولیه[1] ناحیه‌ای بین لبه برنده قلم و تقاطع بیرونی سطح براده با سطح ماشین‌کاری است. این ناحیه، ناحیه اصلی تغییر فرم پلاستیک است و بیشترین حرارت در این ناحیه ایجاد شده و سهم زیادی از توان مصرفی ماشین‌کاری تحت شکل گیری را دارا می‌باشد [۷]. شکل ۹ و ۱۰ رابطه سرعت برشی با تنش برشی در ناحیه تغییر شکل اولیه را بیان می‌کند. با توجه به این نمودار با افزایش سرعت برشی تنش برشی در ناحیه مذکور کاهش می‌یابد.

تنش برشی ناحیه تغییرشکل اولیه - سرعت برشی

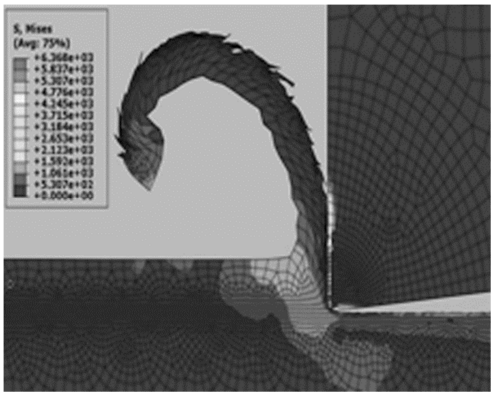


شکل۹ نمودار تجربی تغییرات تنش برشی به سرعت برشی [۶]

تنش برشی - سرعت برشی



شکل۱۰ نمودار المان محدود تغییرات تنش برشی نسبت به سرعت برشی



شکل ۱۱ توزیع تنش هنگام ماشین‌کاری تیتانیم

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری متعامد با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی به صورت دوبعدی و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.13 انجام شده است. تاثیر تغییرات پارامترهای ماشینکاری شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی بر روی نیروهای اصلی و پیشروی و تنش برشی و عمر ابزار بررسی گردید. برای صحه‌گذاری بر نتایج نرم‌افزار، از آزمایش‌های تجربی انجام شده در این زمینه استفاده گردیده و نتایج با مقادیر حاصل از آن آزمایش‌ها مقایسه گردید. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برشی نیروی اصلی ماشین‌کاری نیز افزایش می‌یابد، همچنین با افزایش سرعت برشی دمای ابزار بالا رفته، موجب کاهش عمر ابزار و باعث افزایش تنش برشی در ناحیه تغییر شکل اولیه می‌شود. نتایج بیان می‌کند که در سرعت‌های برشی بالا افزایش سرعت برشی تأثیر محسوسی بر نتایج نداشته و نمودار روند تقریباً ثابتی را طی می‌کند.

۶- مراجع

[1] J. Barry, G. Byrne, D. Lennon, Observations on Chip formation and Acoustic Emission in Machining Ti-6Al-4V Alloy, *International Jornal of Machine Tools and Manufacture*, 2001.
[2] A. Gente, H. Hoffmeister, *Chip formation in Machining Ti-6Al-4V at Extremely High Cutting Speeds*, *Annuals of the CIRP*, 2001.
[3] J. Zouhar, M. Piska, Modelling The Orthogonal Maching Process Using Cutting Tools With Different Geometry, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008.
[4] Halil Bil, S. Engin Kilic. A. Erman Tekkaya, A comparison of Orthogonal Cutting Data From Experiments With Three Different Finite Element Models, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004.
[5] Tugrul Ozel, The influence of friction models on finite element simulations of machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006.
[6] Mattew Catterell, Gerry Byrne, Characterisation of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 1*, 2008.
[7] M. razfar, *Machining and Machine tools principles*, Department of Mechanical Engineering, Amir Kabir University, Tehran, Iran, 2000. (In Persian)

1. Primary Deformation Zone

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.84.4]