مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ٤٤-٤٨

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ١٤ آبان ۱۳۹٤

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی فرایند تشکیل براده در ماشین‌کاری مایل آلیاژ آلومینیوم به روش المان محدود

امیر راستی[۱]، جواد هاشمی خسروشاهی[۲]، سینا صباغی فرشی[۲]، محمدحسین صادقی[۳*]

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

چکیده

شبیه‌سازی فرایند ماشین‌کاری مایل به دلیل نیاز به استفاده از مدل سه بعدی در روش المان محدود و همچنین بالا بودن زمان حل، همواره با محدودیت‌هایی مواجه بوده و کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. برای رفع این محدودیت در این پژوهش، مدلی ۲/۵ بعدی برای مطالعه فرایند ماشین‌کاری مایل توسعه داده شد و شبیه‌سازی فرایند تشکیل براده در این نوع ماشین‌کاری ایجاد گردید. ابزار و قطعه‌کار هر دو به عنوان دو قطعه تغییرشکل پذیر مدل‌سازی گردیدند. از مدل موادی و معیار شکست جانسون- کوک نیز در مدل بهره گرفته شد. سپس با استفاده از این مدل، تاثیر پارامترهای زاویه براده ابزار، زاویه تمایل ابزار و عمق برش بر تشکیل براده در آلیاژ آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که با کاهش مقدار زاویه براده، براده‌های ریزتری تشکیل می‌شوند. افزایش زاویه تمایل ابزار نیز باعث مخروطی‌تر شدن براده‌ها و افزایش طول آن‌ها شد. همچنین افزایش عمق برش به دلیل افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و میزان تنش، منقطع شدن براده‌ها را در پی داشت.

کلید واژگان: روش المان محدود، ماشین‌کاری مایل، تشکیل براده

Finite element simulation of chip formation process in oblique cutting of aluminum alloy

Amir Rasti, Javad Hashemi Khosroshahi, Sina Sabbaghi, Mohammad Hossein Sadeghi*

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

ABSTRACT

Due to a need for a 3D finite element simulation model and having a high solution time, simulation of an oblique cutting process has some limitations and has been studied less. In this study, for solving these limitations, a 2.5D model was developed for analyzing the oblique cutting process and simulation of chip formation in this cutting process was established. Two deformable parts were modeled as tool and workpiece. Johnson-Cook material model and Johnson-Cook damage criteria were used. Then the effect of tool-rake angle, cutting edge inclination angle and cutting depth on aluminum-alloy chip morphologies were analyzed and it was seen that by decreasing the rake-angle, the chips became smaller. The increase in cutting edge inclination angle causes the chips become more conical and more continuous. There were segmented chips by increasing the cutting depth, as a result of increasing the undeformed chip thickness and amount of stress.

Keywords: Shape sensitivity analysis Shape sensitivity analysis Shape sensitivity analysis Shape sensitivity analysis Shape sensitivity .

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر، روش المان محدود[۱] به‌صورت گسترده در بررسی فرایند ماشین‌کاری متعامد مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌های پیچیده‌ای برای فرایند ماشین‌کاری ارائه شده‌اند و اغلب هدف از شبیه‌سازی در آن‌ها به دست آوردن مقدار تنش و کرنش پسماند، توزیع دما، تغییر شکل و تشکیل براده و پیش‌بینی نیروهای ماشین‌کاری است. بررسی تشکیل براده به منظور کنترل آن یکی از مهم‌ترین جنبه‌های بهبود فرآیند ماشین‌کاری است. در ادامه به بررسی پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه شبیه‌سازی ماشین‌کاری و تشکیل براده پرداخته شده است.

سه‌شادری و همکاران [۱] شبیه‌سازی المان محدود فرآیند ماشین‌کاری متعامد را در آلیاژ AL 2024 T351 با هدف ارزیابی و اعتباربخشی به معادله جانسون-کوک[۲] در مدل‌سازی رفتار تغییر شکل این آلیاژ انجام دادند. نتایج المان محدود به‌دست آمده برای نیروی برشی، ضخامت براده و دما با نتایج تجربی مقایسه شده و مشخص گردید که پیش‌بینی ضخامت براده با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد. محدوده نیروی برشی پیش‌بینی شده با مدل جانسون-کوک در سرعت‌های برشی بالا و پیشروی‌های بالا مطابقت بیش‌تری با نتایج تجربی داشتند. در پیش‌روی بالا این مدل انحراف بسیار کمی از نیروهای برشی به دست آمده از آزمایش تجربی نشان داد.

چن و همکاران [۲] نیز تشکیل براده، نیروهای برشی، تنش، کرنش و توزیع دما را در فرآیند ماشین‌کاری عمودی با استفاده از یک مدل المان محدود دوبعدی شبیه‌سازی کردند که مقایسه نتایج به دست آمده در مورد نیروهای برشی با نتایج تجربی رضایت بخش بود، هرچند اختلافاتی بین نتایج تجربی و عددی وجود داشت که با توجه به عدم قطعیت ضرایب مربوط به رفتار ماده، قابل قبول بود.

ژانگ و همکاران [۳] شبیه‌سازی تشکیل براده را با در نظر گرفتن تنش برشی در ناحیه مرزی براده و ابزار انجام داده و تاثیر سرعت برشی، ضریب اصطکاک

1. Finite element method (FEM)
2. Johnson-Cook model

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Rasti, J. Hashemi Khosroshahi, S. Sabbaghi, M.H. Sadeghi, Finite element simulation of chip formation process in oblique cutting of aluminum alloy, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 44-48, 2015 (in Persian فارسی)

و زاویه براده ابزار را بر تشکیل براده مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که در سرعت برشی یا نرخ پیشروی بالاتر منقطع شدن براده‌ها محتمل‌تر است. هم‌چنین با تبدیل زاویه براده مثبت به منفی پدیده منقطع شدن براده بیشتر اتفاق می‌افتد.

ملکوت و همکاران [۴] مدلی پیشرفته بر پایه فیزیک ماده را برای شبیه‌سازی تشکیل براده منقطع در ماشین‌کاری عمودی تیتانیوم خالص تجاری ارائه کردند. این مدل با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود دوبعدی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که بطورکلی ضخامت براده با افزایش سرعت برشی و کاهش پیشروی کاهش می‌یابد.

کوترل و برن [۵] دینامیک تشکیل براده را در ماشین‌کاری متعامد آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که فرکانس منقطع شدن براده با افزایش سرعت برشی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.

دوکوبو و همکاران [۶] سه مدل المان محدود را برای مکانیزم تشکیل براده در ماشین‌کاری عمودی آلیاژ Ti-6Al-4V ارائه کردند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با تئوری‌های متفاوت نشان داد که ترکیب باند برشی آدیاباتیک و انتشار ترک منجر به شناسایی مکانیزمی از تشکیل براده می‌شود که نزدیک‌ترین مکانیزم به حالت تجربی است.

لورنزن و همکاران [۷] مدل‌سازی تشکیل براده را در ماشین‌کاری سوپرآلیاژ ۷۱۸ به‌منظور بررسی چگونگی تشکیل براده منقطع انجام دادند. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که تغییر براده از حالت پیوسته به حالت منقطع تحت تاثیر هر دو عامل نرم شدن حرارتی و شکست ماده است.

هونبینگ و سندی [۸] تشکیل براده منقطع را با استفاده از مدل جانسون-کوک در آلیاژ تیتانیوم در سرعت‌های برشی بالا مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که میزان منقطع شدن براده با افزایش زاویه براده ابزار کمتر می‌شود. علاوه بر این، زاویه ابزار بزرگ‌تر می‌تواند سبب بهبود کیفیت برش در ماشین‌کاری با سرعت بالای آلیاژ TC21 گردد.

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی ماشین‌کاری مایل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، مدلی از شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری مایل بر پایه رابطه لاگرانژ و با استفاده از نرم‌افزار تجاری آباکوس[1] ارائه شد. مدل پلاستیسیته جانسون- کوک برای مدل مواد و معیار شکست جانسون-کوک برای ایجاد براده‌ها به‌کار گرفته شدند. هندسه‌های متفاوتی از زاویه براده[2] و زاویه تمایل[3] برای ابزار برشی در نظر گرفته شد. همچنین تاثیر عمق برش نیز بر تشکیل براده مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مدل عددی

در این پژوهش، مدلی ۲/۵ بعدی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل المان محدود ABAQUS-6.14 به منظور شبیه‌سازی ماشین‌کاری مورب ایجاد شد. تحلیل با فرمول‌بندی لاگرانژی و به‌صورت دینامیکی صریح انجام شد. در روش دینامیکی صریح، گسسته‌سازی المان محدود از معادلات تعادل مکانیکی مانند رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$M\ddot{u}_n + C\dot{u}_n + F_n^{int}(u_n) = F_n^{ext}(t_n) \qquad (۱)$$

که در آن $\ddot{u}$، $\dot{u}$ و u به ترتیب بیانگر شتاب، سرعت و تغییر مکان گره در زمان t_n می‌باشند. M و C نیز ماتریس جرم و استهلاک و F^{int} و F^{ext} نیز به‌ترتیب نیروهای داخلی و خارجی هستند. اساس تحلیل المان محدود صریح مشتمل بر قانون دوم نیوتن است که به فرم ماتریسی نوشته می‌شود و در ابتدای هر گام از زمان تعریف می‌شود. تعادل دینامیکی هنگامی صورت می‌پذیرد که رابطه (۲) ارضا شود:

$$\{a_t\} = [M]^{-1}\left(\{F_t^{ext}\} - \{F_t^{int}\}\right) \qquad (۲)$$

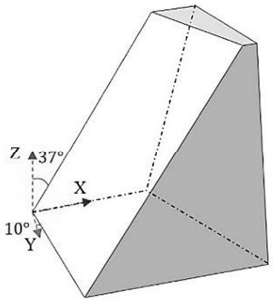
که در آن $\{a_t\}$ بردار شتاب در زمان t است، $[M]$ ماتریس جرم، $\{F_t^{ext}\}$ بردار نیروهای خارجی اعمال شده در زمان t و $\{F_t^{int}\}$ نیز بردار نیروهای داخلی در زمان t است.

به این دلیل که ماشین‌کاری به‌صورت مورب است، ابزار دارای زاویه تمایل می‌باشد. زوایای ابزار در شکل ۱ نشان داده شده است. قطعه‌کار و ابزار هر دو به‌صورت تغییرشکل‌پذیر تعریف شدند. به‌منظور مش‌زنی، قطعه‌کار به دو قسمت تقسیم شد. سطح براده‌برداری با عمق یک میلی‌متری، با المان‌هایی در جهت طولی موازی با عرض مقدار براده‌برداری مش‌زنی شد. مابقی قسمت‌ها با المان‌هایی بزرگ‌تر مش‌زنی شدند (شکل ۲).

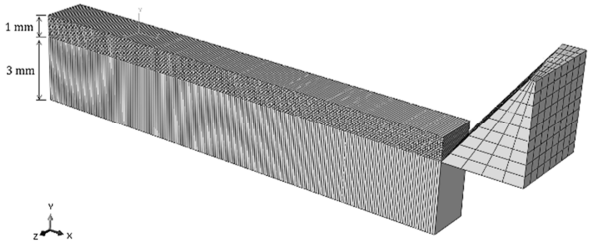
جنس ابزار فولاد و جنس قطعه‌کار آلومینیوم در نظر گرفته شد. خصوصیات فیزیکی مواد در جدول ۱ آمده است. همچنین به‌منظور مدل‌سازی رفتار پلاستیکی مواد، از مدل پلاستیسیته جانسون- کوک استفاده شد. این مدل به خوبی پذیرفته شده است و به‌صورت گسترده در مطالعات مدل‌سازی و شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل تنش سیلان را به‌عنوان نتیجه‌ای از کرنش، نرخ کرنش و عبارات وابسته به زمان نمایش می‌دهد [۹]. رفتار پلاستیک مواد در مدل جانسون-کوک به‌صورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$\sigma_y = [A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n]\left[1 + C\,ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^p}{\dot{\varepsilon}^0}\right)\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right] \qquad (۳)$$

در این معادله، σ_y نرخ کرنش پلاستیک، $\bar{\varepsilon}^p$ کرنش پلاستیک معادل، n ضریب کرنش سختی، $\dot{\bar{\varepsilon}}^p$ نرخ کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\varepsilon}^0$ نرخ کرنش پلاستیک اولیه بی بعد، T_{melt} دمای ذوب قطعه، T_{room} دمای اتاق و m توان حساسیت نرخ کرنش است. مقدار ضرایب ثابت A، B و C و همچنین مقادیر n و m در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱ زوایای ابزار مدل شده



شکل ۲ مدل مش‌زنی شده ابزار و قطعه‌کار

1. ABAQUS
2. Rake angle
3. Cutting edge inclination angle

جدول ۱ خصوصیات فیزیکی مواد

ماده	چگالی (kg/m³)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسن
فولاد	۷۸۷۰	۲۰۰	۰/۲۹
آلومینیوم	۲۷۰۰	۷۰	۰/۳۳

جدول ۲ مقادیر متغییرهای معادله مدل پلاستیسیته جانسون-کوک

ماده	A (MPa)	B (MPa)	n	m
فولاد	۳۷۵	۵۵۲	۰/۴۵۷	۰
آلومینیوم	۳۲۴/۱	۱۱۳/۸	۰/۴۲	۰

برای مدل‌سازی نحوه‌ی ایجاد براده از معیار شکست جانسون-کوک (رابطه ۴) استفاده شد:

$$\varepsilon^f = \left[D_1 + D_2 exp\left(D_3 \frac{p}{q}\right)\right]\left[1 + D_4\, ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}^0}\right)\right]\left[1 + D_5\left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)\right] \quad (۴)$$

که در آن ε^f کرنش شکست، p فشار و q تنش موثر ون میسس است. D_1، D_2، D_3، D_4 و D_5 ثابت‌های مواد هستند که مقدار آن‌ها برای ابزار فولادی و قطعه‌کار آلومینیومی در جدول ۳ آورده شده است. به‌منظور جلوگیری از بهم خوردن مش‌ها در تغییر شکل‌های شدید نیز، میزان جابجایی رشد آسیب برای قطعه‌کار ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار عاملی کلیدی در تماس بین آن‌ها است اما پارامترهای اصطکاک در سطح تماس به سختی تشخیص داده می‌شوند. در این شبیه سازی، به منظور ساده‌سازی فرآیند، ضریب اصطکاک ثابت μ به مقدار ۰/۱۵ در سطوح تماس در نظر گرفته شد.

در مدل ارائه شده، هر شش درجه‌ی آزادی حرکت صفحه زیرین قطعه‌کار گرفته شد. حرکت ابزار نیز به صورت یکنواخت و در یک جهت در نظر گرفته شد و سرعت حرکت آن نیز تعریف شد.

۳- نتایج و بحث

شکل ۳ شبیه‌سازی ماشین‌کاری مایل با سرعت برشی ۲۰ متر بر ثانیه، عمق برش ۰/۵ میلی‌متر، زاویه براده ۳۷ درجه و زاویه تمایل ۱۰ درجه را به همراه تنش‌های فون میزز نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی تغییرات هر یک از این پارامترها، طول براده‌ها در نرم‌افزار آباکوس اندازه‌گیری شد و براساس این اندازه‌گیری، نتایج با هم مقایسه گردید.

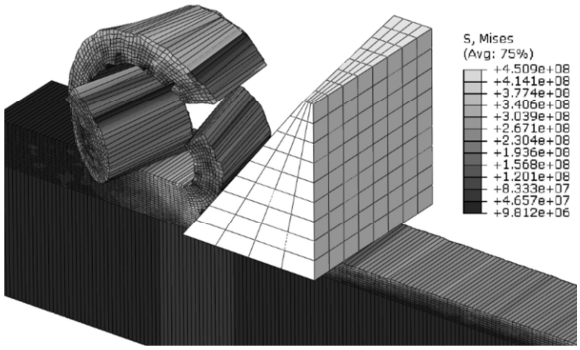
۳-۱- تاثیر زاویه براده

با توجه به اطلاعات منتشر شده از انجمن مواد آمریکا[1]، زاویه براده ابزار در تراش‌کاری آلیاژهای آلومینیوم‌هایی با قابلیت ماشین‌کاری کم (گریدهای C، D و E) در حدود ۳۰ الی ۴۰ درجه است [۱۰]. به همین دلیل و به منظور مشاهده تاثیر زاویه براده در تشکیل براده، ماشین‌کاری با سه زاویه براده ۳۲، ۳۷و ۴۲ درجه بررسی شد. در این حالت سرعت برشی به مقدار ۲۰ متر بر ثانیه، عمق برش ۰/۵ میلی‌متر و زاویه تمایل ۱۰ درجه به‌صورت ثابت در نظر

جدول ۳ مقادیر ثابت معادله شکست جانسون-کوک

ماده	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
فولاد	۰/۲۵	۴/۳۸	۲/۶۸	۰	۰
آلومینیوم	-۰/۷۷	۱/۴۵	-۰/۴۷	۰	۰

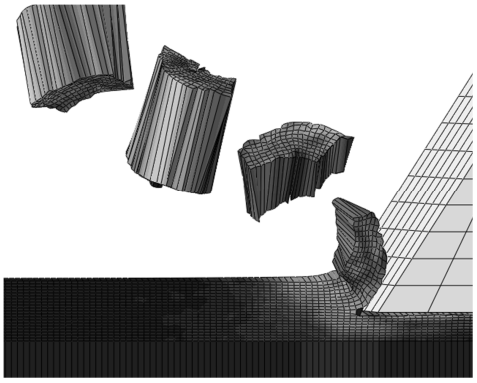
1. American Society for Metals (ASM)



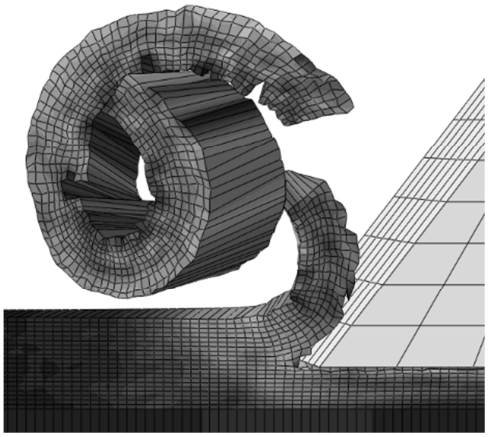
شکل ۳ نتیجه شبیه‌سازی ماشین‌کاری مایل با سرعت برشی ۲۰ متر بر ثانیه، عمق برش ۰/۵ میلی‌متر، زاویه براده ۳۷ درجه و زاویه تمایل ۱۰ درجه

گرفته شدند. تشکیل براده‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. در زاویه براده ۳۲ درجه، طول براده‌ها به طور متوسط ۱۸/۰۴ میلی‌متر بود.

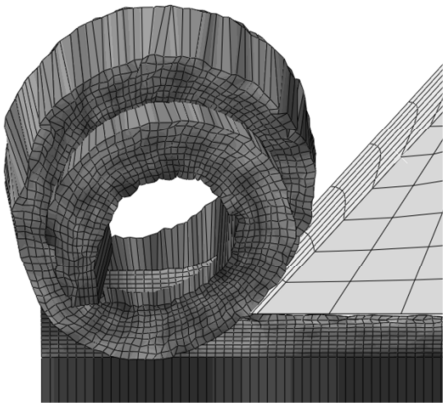
در زاویه براده‌ی ۳۷ درجه، متوسط طول براده‌ها ۵۵/۲۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در زاویه براده ۴۲ درجه نیز براده بدون شکست ایجاد شد. با توجه با نتایج به دست آمده می‌توان گفت که با کاهش زاویه براده در ابزار، طول براده‌ها نیز کاهش می‌یابد به عبارت دیگر براده‌ها منقطع‌تر می‌شوند. دلیل این امر می‌تواند افزایش فشار تماسی بین براده و ابزار باشد. مخروطی شدن براده‌ها در ماشین‌کاری مایل از ویژگی‌های اصلی این فرآیند است [۱۱]. در حالت ۴۲ درجه نیز، این مخروطی شدن به صورت ناچیز مشاهده می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴ تشکیل براده در زاویه براده الف) ۳۲ درجه ب) ۳۷ درجه ج) ۴۲ درجه

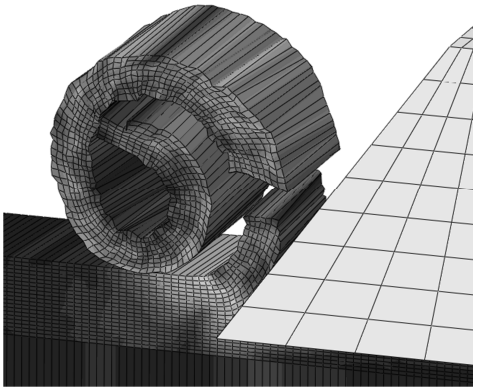
۳-۲- تاثیر زاویه تمایل

به منظور بررسی تاثیر زاویه تمایل ابزار بر تشکیل براده و با توجه به اطلاعات منتشر شده از ASM [۱۰]، زوایای ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه مورد بررسی قرار گرفتند. سرعت برش، عمق برش و زاویه براده به صورت ثابت و به ترتیب برابر ۲۰ متر بر ثانیه، ۰/۵ میلی‌متر و ۳۷ درجه در نظر گرفته شدند.

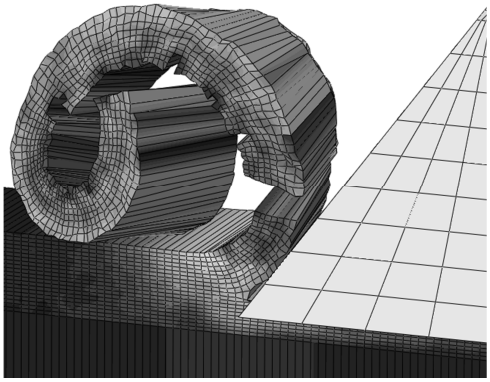
شکل ۵ تشکیل براده‌ها را در زوایای تمایل مختلف نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رفت و در شکل نیز مشخص است، با افزایش زاویه تمایل، براده‌ها به صورت مخروطی تشکیل می‌شوند. همچنین طول براده‌ها نیز با افزایش زاویه تمایل، افزایش یافت. چنان‌که در زاویه تمایل ۵ درجه، متوسط طول براده‌ها ۵۱/۶۹ میلی‌متر، در زاویه‌ی ۱۰ درجه ۵۵/۲۲ میلی‌متر و در زاویه‌ی ۱۵ درجه نیز براده بدون شکست و به صورت پیوسته ایجاد گردید. می‌توان گفت مخروطی‌تر شدن براده‌ها و در نتیجه برخورد نداشتن براده‌های تازه تشکیل یافته با براده‌های پیشین باعث افزایش طول آن‌ها شده است.

۳-۳- تاثیر عمق برش

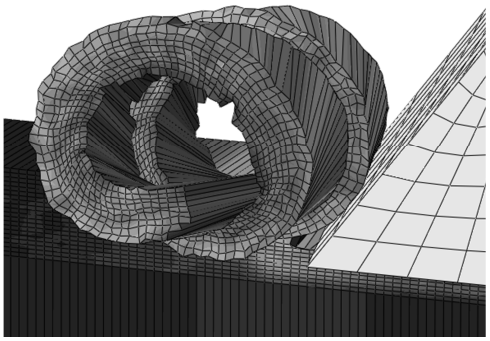
در این مرحله، شبیه‌سازی تشکیل براده برای عمق‌های برش ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ میلی‌متری صورت گرفت (شکل ۶)، قلم برشی با زاویه براده ۳۷ درجه، زاویه تمایل ۱۰ درجه و سرعت برشی نیز ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در عمق برش ۰/۲۵ میلی‌متر، براده به صورت پیوسته و بدون شکستگی در مسیر برش ایجاد شد. در عمق برش ۰/۵ میلی‌متر، متوسط طول براده ۵۵/۲۲ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید.



(الف)

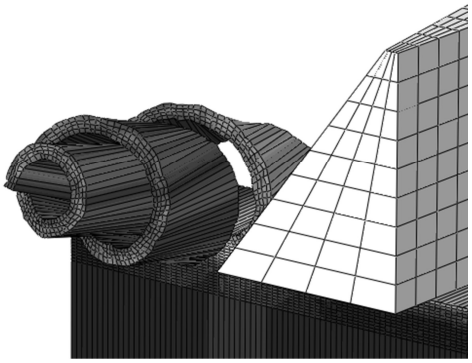


(ب)

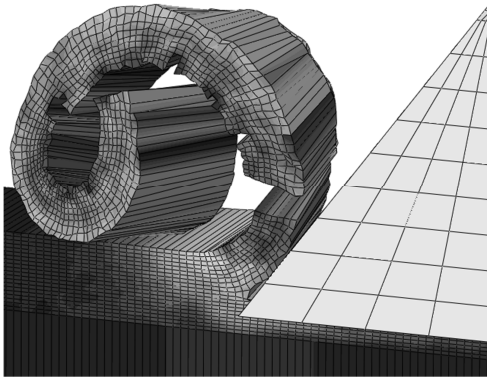


(ج)

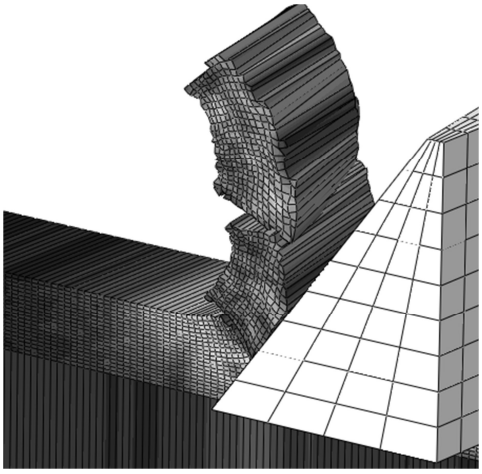
شکل ۵ تشکیل براده در زاویه تمایل ابزار الف) ۵ درجه ب) ۱۰ درجه ج) ۱۵ درجه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶ تشکیل براده در عمق برش الف) ۰/۲۵ میلی‌متر ب) ۰/۵ میلی‌متر ج) ۰/۷۵ میلی‌متر

عمق برش ۰/۷۵ میلی‌متر نیز سبب ایجاد براده‌هایی با طول متوسط ۲۹/۴۹ میلی‌متر شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده توسط اندازه‌گیری طول براده‌ها می‌توان ادعا نمود با افزایش عمق برش، براده‌ها رفته رفته منقطع‌تر می‌شوند. این موضوع با توجه به افزایش ضخامت براده و تنش، امری قابل پیش‌بینی به نظر می‌رسید. همچنین با توجه شکل ۶ (الف) می‌توان مشاهده کرد که در براده‌های پیوسته، حالت مخروطی‌شدن بسیار بیش‌تر از براده‌های تولید شده در زاویه براده ۴۲ درجه است.

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود، اثر زاویه براده، زاویه تمایل و عمق برش بر تشکیل براده مورد بررسی قرار گرفت. در پایان می‌توان نتایج به دست آمده را به صورت زیر ارائه کرد:

۱) شبیه‌سازی فرآیند تشکیل براده در ماشین‌کاری مایل با در نظر گرفتن ابزار و قطعه‌کار به‌صورت دو قطعه تغییر شکل‌پذیر با موفقیت انجام شد.

۲) مخروطی شدن براده‌ها از ویژگی‌های اصلی ماشین‌کاری مایل است که در این شبیه‌سازی نیز این ویژگی به خوبی مشاهده شد.

۳) کاهش مقدار زاویه براده باعث افزایش میزان منقطع شدن براده‌ها گردید، به‌عبارت دیگر اندازه طول براده‌ها کوچک‌تر شد. کوچک‌ترین طول متوسط براده در زاویه براده ۳۲ ایجاد شد و متوسط طول براده‌ها در این زاویه، ۱۸/۰۴ میلی‌متر بود.

۴) با افزایش زاویه تمایل ابزار مخروطی بودن براده‌ها شدیدتر شد. همچنین به‌دلیل برخورد نداشتن براده‌های تازه تشکیل یافته با براده‌های پیشین، طول براده‌ها نیز افزایش یافت. کوچک‌ترین طول متوسط براده در زاویه تمایل ۵ درجه و به میزان ۵۱/۶۹ میلی‌متر تشکیل شد.

۵) افزایش عمق برش نیز به دلیل افزایش ضخامت براده و میزان تنش، منقطع شدن براده‌ها را در پی داشت. در این حالت، کوچک‌ترین براده با طول متوسط ۲۹/۴۹ میلی‌متر در عمق برش ۰/۷۵ میلی‌متر تشکیل شد.

٥- مراجع

[1] R. Seshadri, I. Naveen, S. Srinivasan, M. Viswasubrahmanyam, K. VijaySekar, M. P. Kumar, Finite Element Simulation of the Orthogonal Machining Process with Al 2024 T351 Aerospace Alloy, *Procedia Engineering*, Vol. 64, pp. 1454-1463, 2013.

[2] S. J. Chen, Q. Pang, K. Cheng, Finite element simulation of the orthogonal metal cutting process, in *Proceeding of,* Trans Tech Publ, pp. 582-586 .

[3] Y. Zhang, T. Mabrouki, D. Nelias, Y. Gong, Chip formation in orthogonal cutting considering interface limiting shear stress and damage evolution based on fracture energy approach, *Finite Elements in Analysis and Design,* Vol. 47, No. 7, pp. 850-863, 2011.

[4] S. N. Melkote, R. Liu, P. Fernandez-Zelaia, T. Marusich, A physically based constitutive model for simulation of segmented chip formation in orthogonal cutting of commercially pure titanium, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2015.

[5] M. Cotterell, G. Byrne, Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti–6Al–4V, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 57, No. 1, pp. 93-96, 2008 .

[6] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre, E. Filippi, Numerical contribution to the comprehension of saw-toothed Ti6Al4V chip formation in orthogonal cutting, *International Journal of Mechanical Sciences* ,Vol. 81, pp. 77-87, 2014.

[7] J. Lorentzon, N. Järvstråt, B. Josefson, Modelling chip formation of alloy 718, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 209, No. 10, pp. 4645-4653, 2009.

[8] H. Wu, S. To, Serrated chip formation and their adiabatic analysis by using the constitutive model of titanium alloy in high speed cutting, *Journal of Alloys and Compounds,* Vol. 629, pp. 368-373, 2015 .

[9] P. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies, I. Jawahir, Recent advances in modelling of metal machining processes, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 62, No. 2, pp. 695-718, 2013 .

[10] J. R. Davis, J. R. Davis, *Aluminum and aluminum alloys*: ASM international, 1993.

[11] G. Boothroyd, *Fundamentals of metal machining and machine tools*: CRC Press ,1988.