

مدل سازی رفتار دینامیکی آلومینیوم آلیاژی 5083 در فرآیند ماشین کاری

بهنام داوودی^{1*}، محمد رضا اسلامی²

- 1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تبریز
 *تهران، صندوق پستی 16765-163، bdavoodi@iust.ac.ir

چکیده

کاربرد گسترده فرآیند ماشین کاری در تولید قطعات صنعتی، بهینه‌سازی این فرآیند را مورد توجه محققان قرار داده است. در این بین استفاده از شبیه‌سازی المان محدود بیشتر مورد توجه واقع شده است. اما میزان دقت و قابلیت اعتماد نتایج پیش‌بینی شده عمدها به انتخاب معادله بنیادی که تنش سیلان ماده را تحت شرایط برش (گرش، نرخ کرشش و دما) بیان می‌نماید، وابسته است. یکی از دقیق‌ترین و کاربردی‌ترین معادلات را این شده به منظور بررسی رفتار دینامیکی مواد مختلف، معادله بنیادی جانسون-کوک است. به منظور مدل‌سازی رفتار مواد با استفاده از معادلات بنیادی، نیاز به تعیین ضرایب معادله جانسون-کوک در بیان رفتار دینامیکی آلومینیوم آلیاژی 5083 از ترکیب اطلاعات تنش سیلان تست‌های فشردن در نرخ کرشش پایین و تست‌های ماشین کاری متعادل با نرخ کرشش بالا، استفاده شده است. پس از تعیین ضرایب معادله، به منظور تعیین صحت آن، فرآیند ماشین کاری با استفاده از کد تجاری آباکوس به روش اجزاء محدود شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان دهنده صحت ضرایب بدست آمده و معادله برقرار شده برای آلومینیوم آلیاژی فوق می‌باشد. بنابراین با استفاده از این معادله می‌توان رفتار آلیاژ انتخابی را در سایر فرآیندهای ماشین کاری و شکل‌دهی مدل و از نتایج آن استفاده کرد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل	1394
دریافت: 17 آبان 1394	پذیرش: 28 آبان 1394
ارائه در سایت: 03 اسفند 1394	
کلید واژگان:	
ماشین کاری	
شبیه‌سازی اجزاء محدود	
رفتار دینامیکی	
معادله جانسون-کوک	

Modeling of dynamic behavior of aluminum alloy 5083 in machining process

Behnam Davoodi^{1*}, Mohammad Reza Eslami²

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University of Tabriz, Iran

* P.O.B. 16765-163 Tehran, Iran, bdavoodi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 08 November 2015

Accepted 19 November 2015

Available Online 22 February 2016

Keywords:

Machining

Finite Element Method

Dynamic Behavior

Johnson & Cook Equation

ABSTRACT

Widespread applications of machining in various industrial sectors as well as acute needs for optimization are among attractive research topics for both academic and industrial institutions. Finite element analysis based techniques are available to simulate machining processes. Success and reliability of numerical models are very much dependent to work material flow stress models in strain, strain rate and temperature functions. One of the most accurate and useful material model is the Johnson-Cook model. The basic equation for modeling the behavior of each material is needed to determine the equation coefficients. In this study, the model parameters are determined by fitting the data from both quasi-static compression tests at low strain rates and machining tests at high strain rates. Therefore; the experimental results were then compared with those obtained through simulation works by Abaqus code. Experimental results confirmed the capability of material equation to determine the dynamic behavior of 5083 alloy.

است. از آنجا که انجام آزمایش‌های تجربی زمان و هزینه‌های زیادی بر پژوهشگران تحمیل می‌کند، مدل‌سازی فرآیندهای ماشین کاری به روش اجزاء محدود گاربرد فراوانی پیدا کرده است. اما صحت و دقت مدل‌سازی با استفاده از روش‌های اجزاء محدود عمدها به اطلاعات و داده‌های مروری مربوط به خواص مکانیکی قطعه کار (مانند مدول الاستیسیته و تنش سیلان)، خواص فیزیکی - حرارتی قطعه و ابزار (مانند چگالی و هدایت حرارتی)، شرایط تماسی ابزار و براده (مانند مکانیزم اصطکاک و ثابت‌های مربوط به آن) و شرایط تماس ابزار با سطح ماشین کاری شده قطعه بستگی دارد [3,2]. یکی از داده‌های مروری

ماشین کاری یا برش فلزات به فرآیندهای اطلاق می‌شود که در آن‌ها لایه یا تکه نازکی از ماده، که براده یا تراشه نام دارد، توسط ابزاری بالهی گوه مانند تیز از قطعه بزرگ‌تر جدا می‌شود. در مهندسی، عبارت ماشین کاری، تمامی فرآیندهای تولید براده را در بر می‌گیرد [1]. به دلیل کثرت پارامترهای دخیل در فرآیند ماشین کاری، هنوز امکان برآورد و پیش‌بینی کامل خروجی و تغییرات شرایط حاکم بر آن در طی فرآیند به صورت کامل فراهم نشده است. واضح است که پیش‌بینی و امکان بررسی شرایط حاکم بر فرآیند از دیدگاه اقتصادی از اهمیت بسزایی برای دست‌اندرکاران صنعت ماشین کاری برخوردار

1- Flow Stress

Please cite this article using:

B. Davoodi, M. R. Eslami, Modeling of dynamic behavior of aluminum alloy 5083 in machining process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 1-7, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ماده‌ی مورد نظر در شرایط فرآیندی خاص می‌باشد. برای تعیین این ضرایب می‌توان از دستگاه تست دو میله‌ای فشاری هاپکینسون⁴ و یا از تست‌های ماشین‌کاری متعامد استفاده کرد [5].

روش تست میله فشار هاپکینسون در اوایل قرن بیستم معرفی شده و برای مطالعه رفتار دینامیکی مواد در نرخ کرنش بالا و دماهای مختلف بسط و توسعه پیدا کرده است. شیراکاشی و ماکاوا [6] با اندکی تغییرات، از این تست برای استخراج رفتار دینامیکی مواد در ماشین‌کاری استفاده کردند. دستگاه تست هاپکینسون امکان ایجاد تغییر شکل‌های بیشتر همراه با نرخ کرنش بالا در دمای زیاد را با استفاده از یک تفنگ بادی فشار بالا و کوره القابی نصب شده بر روی دستگاه امکان پذیر می‌سازد. با توجه به افزایش سرعت و استفاده از کوره القابی، نرم شدن در اثر باز پخت و پیر سختی در قطعات رخ نمی‌دهد و می‌توان رفتار دینامیکی مواد تا نرخ کرنش⁻¹ s^{-1} ۱۰⁴ را بدست آورد.

ترکیب روش‌های سنتی تست مواد با نرخ کرنش پایین با تست‌های ماشین‌کاری به منظور مطالعه رفتار دینامیکی و بدست آوردن معادله تست سیلان توسط افراد مختلف به کار گرفته شده است. استیونسون [7] برای اینکه دمای برش حدوداً برابر دمای اتاق و محیط باشد، آلومینیوم را با سرعت‌های برشی پسیار پایین ماشین‌کاری کرده است. او نشان داد که تست سیلان برشی در این بازه از سرعت‌های برشی، تقریباً با تست فشردن برابر است. اولیان و تاکاشیما [8] تست سیلان را با استفاده از تست‌های کشش در دماهای بالا بدست آورده و تست‌های ماشین‌کاری را با برونو یابی این اطلاعات حدس زندن. گیو [9] از ترکیب تست‌های فشردن در دمای محیط و نرخ کرنش پسیار پایین و تست‌های ماشین‌کاری با سرعت برشی کم، رفتار تست سیلان آلیاژ آلومینیوم 6061T6 را محاسبه کرد. کلیت روش براساس انطباق اطلاعات تست سیلان بدست آمده از تست‌های با نرخ کرنش بالا و پایین روی یک معادله مفروض می‌باشد. بازترین مشخصه معادله بدست آمده از این روش امکان تعیین تست سیلان در بازه وسیعی از نرخ کرنش‌ها توسط معادله حاصله می‌باشد. بوکرمر [10] از تراش کاری متعامد و شبیه‌سازی اجزاء محدود برای تعیین ضرایب معادله جانسون-کوک برای فولاد 1045 با براده پیوسته و سوپر آلیاژ اینکوتل 718 با براده منقطع استفاده کرده است. فرآیند انتخابی، خانکشی بوده است. ازل و همکارانش [11] شرایط ماشین‌کاری را برای تعیین تست سیلان ماده و خواص اصطکاکی به منظور کاربرد در شبیه سازی اجزاء محدود جانسون-کوک با استفاده از تست‌های ماشین‌کاری متعامد و مدل‌سازی رفتار دینامیکی آلومینیوم آلیاژی 5083 در فرآیند ماشین‌کاری می‌باشد.

2- آزمایش‌های تجربی

2-1- تجهیزات انجام تست‌ها

برای اجرای تست‌های تراش کاری متعامد و بدست آوردن رفتار تست سیلان، قطعه کار استوانه‌ای به قطر ۶۰ میلی‌متر از جنس آلومینیوم 5083 تهیه و از دو طرف پیشانی تراشی، مته مرغکزنی و همچنین روتراشی شد تا در حین تراش کاری حالت تک محوری بودن آن کاملاً رعایت شود. جدول ۱ عناصر آلیاژی موجود در آلیاژ 5083 را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمایش‌ها، از ماشین تراش انیورسال استفاده شده است که حداکثر قطر کارگیر آن ۳۰۰ میلی‌متر و حداکثر کورس محور طولی (محور Z) آن ۱۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد. حداکثر دور محور اسپیندل ۲۰۰۰ دور بر

4- Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

مورد نیاز، تنش سیلان و یا تنش تسلیم آنی¹ است؛ تنشی که ماده با رسیدن به آن وارد منطقه تغییر شکل پلاستیک می‌شود. در فرآیندهای تغییر شکل با توجه به این که شرایط ماده مرتبا در حال تغییر است، نمی‌توان تنش سیلان ماده را برابر با تنش تسلیم در شرایط شبه استاتیکی (مشابه آزمایش کشش تک محوری) در نظر گرفت. موقوفیت و قابل اعتماد بودن نتایج شبه استاتیکی اجزاء محدود وابستگی شدید به اطلاعات تنش سیلان ماده به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما دارد [4]. توجه به این نکته که رفتار دینامیکی بسیاری از مواد نسبت به رفتار شبه استاتیکی آنها متفاوت است، در حل مسایل مختلف مهندسی از جمله ماشین‌کاری و شکل‌دهی فلزات حائز اهمیت و تاثیرگذار است. مواد مختلف، تحت تاثیر شبه استاتیکی آنها در حل حرارت‌های زیاد، رفتاری متفاوت نسبت به شرایط شبه استاتیکی از خود نشان می‌دهند. توجه دقیق به تاثیر نرخ کرنش و درجه حرارت بر رفتار فلزات، از نکات مهم در طراحی سازه‌ها و قطعات مهندسی و همچنین محاسبات فرآیندهای مختلف ساخت و تولید می‌باشد. از دیگر دلائل نادرستی استفاده از اطلاعات بدست آمده از تست‌های استاندارد نظری تست کشش و فشار برای برآورد تغییر شکل‌های بزرگ، تفاوت زیاد بازه تغییرات پارامترها در این نوع تغییر شکل‌ها نسبت به تست‌های استاندارد است. تغییر شکل در دماهای بالا با تغییر فازهای متالوژیکی که ریز ساختار را تحت تاثیر قرار می‌دهند نیز همراه است. تغییر شکل فلزات در فرآیند ماشین‌کاری که همراه با کرنش زیاد، نرخ کرنش بالا و دمای بالا می‌باشد، ارائه مدل دقیق برای تعیین رفتار سیلان فلز در ماشین‌کاری را پیچیده و دشوار ساخته است. برای مدل سازی ریاضی تست سیلان در فرآیندهایی با تغییر شکل‌های بزرگ و سریع که فرآیند ماشین‌کاری بارزترین نمونه آن است، مدل‌های متفاوتی توسط محققین ارائه شده است. این مدل‌ها و یا معادلات بنیادی برای مدل سازی تست سیلان بر پایه تئوری‌های فیزیکی و مشاهدات عملی ارائه شده و صحت آن‌ها در زمان ارائه به اثبات رسیده است اما در سایر تحقیقات مشابه که نیاز به استفاده از این معادلات بوده است، اکثر آن‌ها به علت پیچیدگی و دشواری تعیین ضرایب، کمتر مورد استفاده واقع شده‌اند. از جمله این معادلات می‌توان به معادلات ارائه شده توسط زریلی- آرمسترانگ، مک‌گریگور، ماریوسیج و معادله بنیادی جانسون- کوک که یکی از جامعترین و کاربردی‌ترین آن‌ها می‌باشد (معادله ۱) اشاره کرد.

$$\sigma = [A + B\bar{\varepsilon}^n][1 + C \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)][1 - T_h^m] \quad (1)$$

$$T_h = \frac{T - T_{Room}}{T_{Melt} - T_{Room}} \quad (2)$$

از میان معادلات ارائه شده، معادله جانسون- کوک و برخی فرم‌های ویرایش شده آن به صورت وسیع توسط پژوهشگران در شبیه‌سازی فرآیندهای ماشین‌کاری و شکل‌دهی مورد استفاده قرار گرفته است. صحت نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی در فرآیندهای مختلف و مواد متفاوت با استفاده از این مدل تا جایی ادامه یافته است که امروزه تقریباً بیشتر کدهای تجاری المان محدود از این معادله به صورت پیش فرض در کتابخانه اطلاعاتی² خود استفاده می‌کنند و نیازی به نوشتن زیر برنامه³ جهت معرفی این مدل به سمته‌های نرم‌افزاری نمی‌باشد. سایر مدل‌های ارائه شده کاربرد زیادی پیدا نکرده‌اند و یا پندرت در شرایط و مواد خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند.

معادلات بنیادی ارائه شده دارای ثابت‌هایی می‌باشند و منظور از تعیین رفتار دینامیکی مواد، یافتن مقادیر ثابت‌ها و تعیین ضرایب معادلات برای

1- Instantaneous Yield Stress

2- Database library

3- Subroutine program

تا کرنش 0.4 ثبت و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. منحنی‌های تنش - کرنش حقیقی بدست آمده در شکل 1 نشان داده شده است.

با توجه به منحنی‌های تنش - کرنش بدست آمده واضح است که در بازه انتخاب شده برای نرخ کرنش، تنش سیلان تغییرات قابل توجهی نشان نمی‌دهد و رفتار ماده در بازه انتخابی به نرخ کرنش حساس نمی‌باشد. کم بودن حالت بشکه‌ای پس از تست، نشان از کم بودن نقش اصطکاک در آزمایش‌ها دارد و صرف نظر کردن از آن امکان‌پذیر می‌باشد.

2-3- تست‌های ماشین‌کاری متعامد

برای انجام تست‌های ماشین‌کاری متعامد روی بلوك استوانه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم 5083، تعدادی شیار با عمق متوسط 9 میلی‌متر ایجاد شد تا در هنگام تست، با انجام ماشین‌کاری روی لبه‌های برجسته باقیمانده بین شیارها با ابزار شیارتاشی، حالت برش متعامد دو بعدی ایجاد گردد. منظور از برش دو بعدی آن است که نیروی محوری حذف و فقط نیروهای شعاعی و محیطی بر ابزار وارد شود. در این حال نیروی شعاعی همان نیروی پیشروی و نیروی محیطی همان نیروی برشی خواهد بود. پیکربندی ماشین‌تراش، ابزار و ابزارگیر، دینامومتر و قطعه در شکل 2 آورده شده است.

لازم به ذکر است که در تمامی حالات، زاویه آزاد اصلی برابر 12 درجه و زاویه براده صفر درجه در نظر گرفته شده است. در این حالت نیرو در راستای محور Z برابر نیروی برشی (F_C) و در راستای محور X، برابر نیروی پیشروی (F_T) خواهد بود. در انتخاب شرایط ماشین‌کاری و بوجود آوردن حالت کرنش

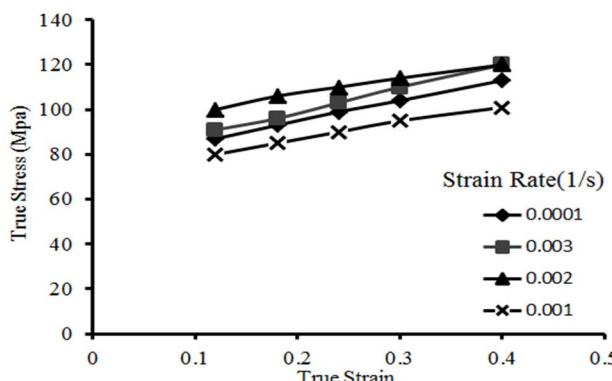
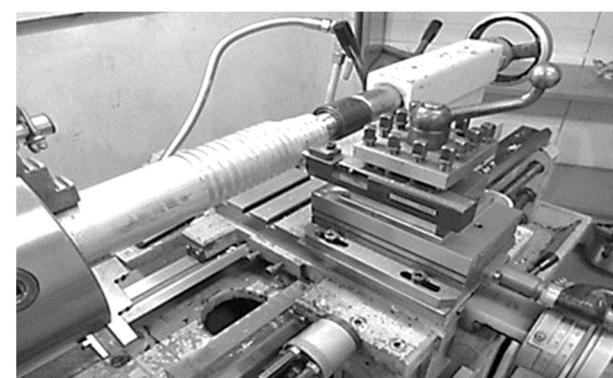


Fig. 1 True stress- True strain curves obtained from pressure tests

شکل 1 نمودار تنش - کرنش حقیقی بدست آمده از تست‌های فشردن



شکل 2 چیدمان دینامومتر، قطعه و ابزار در ماشین‌کاری متعامد

جدول 1 عناصر آلیاژی آلومینیوم 5083

Table 1 Chemical composition of AA5083

عنصر	درصد
سیلیسیم (Si)	0.4
اهن (Fe)	0.4
منس (Cu)	0.1
منگنز (Mn)	0.4 - 1
منیزیم (Mg)	4 - 4.9
روی (Zn)	0.25
تیتانیوم (Ti)	0.15
کرم (Cr)	0.05 - 0.25
آلومینیوم (Al)	تعادل

دقیقه بوده و سرعت پیشروی محورها از 0.052 میلی‌متر بر دور در 0.392 میلی‌متر بر دور در راستای محور طولی و از 0.014 تا 0.380 میلی‌متر بر دور در راستای محور عرضی دستگاه می‌باشد. قطعه کار توسط سه نظام مهار شده است. از ابزار شیارتاش کاربیدی استفاده شده است. اندازه‌گیری نیروها با استفاده از دینامومتر کیستلت¹ مدل 9257B انجام شده است. این دینامومتر دارای طرفیت اندازه‌گیری نیرو در سه راستای X، Y و Z از 5 تا 5+ کیلو نیوتن می‌باشد. کابل خروجی از دینامومتر به یک آمپلی فایر نوع 5019 وصل می‌شود که وظیفه آن افزایش دامنه اطلاعات رسیده از صفحه دینامومتر می‌باشد. اطلاعات تقویت شده در آمپلی فایر به برآخذ اطلاعات کامپیوتر وارد می‌شود که وظیفه اصلی آن جمع‌آوری اطلاعات و تبدیل آن به فرمت نرم‌افزار داینوور² است. برای انجام تست‌های فشردن، از پرس هیدرولیکی با حداکثر طرفیت 10 تن و با محدوده سرعت 0.1 تا 5 میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است.

2-2- تست‌های فشردن

هدف از انجام تست‌های فشردن بدست آوردن اطلاعات تنش سیلان در بازه‌ای از پارامترهای تغییر شکل است که در آن‌ها بتوان اثر نرخ کرنش در تنش سیلان را حذف و به بررسی تاثیرات کرنش سختی (همراه با دما نرمی یا بدون آن) بر رفتار تنش سیلان پرداخت. بدین منظور نمونه‌های استوانه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم 5083 با نسبت ارتفاع به قطر 2 (ارتفاع 26 میلی‌متر و قطر 13 میلی‌متر) طبق استاندارد ASTM (E9-89a) (ASTM E9-89a) با استفاده از تراش - کاری با سرعت پایین تهیه شدند. بهمنظور کاهش تاثیر اصطکاک، دو سطح بالایی و پایینی نمونه‌ها با دقت پولیش کاری و تخت شده و سطوح بالایی و پایینی دستگاه نیز تا حد امکان صاف و صیقلی انتخاب شده‌اند. تدبیر یاد شده بهمنظور کاهش اصطکاک بین سطوح نمونه‌ها و فک‌های دستگاه می‌باشد تا بتوان از تاثیر پدیده اصطکاک در نتایج صرف نظر کرد. لازم به ذکر است که بهمنظور کاهش اصطکاک از روان‌کار بین سطوح تماس فک‌ها و نمونه‌ها استفاده شده است. پیش از شروع تست، برای جلوگیری از ایجاد ضربه در لحظه تماس، فک متحرک بالایی دستگاه دقیقاً در حالت تماس با سطح بالایی نمونه قرار داده شد.

نرخ کرنش‌های S^{-1} : $10^{-4} S^{-1}$, $10^{-3} S^{-1}$, $2 \times 10^{-3} S^{-1}$, $10^{-2} S^{-1}$ و $3 \times 10^{-3} S^{-1}$ برای انجام تست‌ها در نظر گرفته شد [13,12]. کلیه تست‌های فشار در دمای ۰-۲۵°C انجام شده است. با افزایش کرنش و رسیدن آن به مقادیر بیش از ۰.۴ در نمونه‌های مورد آزمایش ترک بوجود آمده است. به همین دلیل اطلاعات

1- Kistler 9257B
2- DynoWare

مربوط به نرخ کرنش) روی منحنی تنش-کرنش بدست آمده از تست‌های فشردن با روش حداقل مربعات محاسبه می‌شوند. ضرایب بدست آمده برای آلیاژ آلومینیوم 5083 عبارتند از $n=0.202$, $B=121.2$, $m=1$.

خطی بودن تاثیر عبارت دما نرمی (یعنی $m=1$) در معادله جانسون - کوک توسط تعداد زیادی از محققان پیشنهاد شده است [13-16]. آن‌ها طی محاسبات تئوریک و همچنین مدل‌سازی تحلیلی خود نشان داده‌اند که انتخاب m برابر با یک، نتایج مطلوب و قابل قبولی در خصوص برآورد تنش سیلان حاصل می‌سازد. جانسون و کوک نرخ کرنش مرتع را نرخ کرنشی معرفی کرده‌اند که تست کشش شبه استاتیک ماده برای تعیین تنش تسليم آن، تحت این نرخ کرنش صورت گرفته باشد و از این جهت این پارامتر برابر 10^{-3} S^2 انتخاب شده است [17].

برای محاسبه ضریب نرخ کرنش یا پارامتر C , از ترکیب اطلاعات تنش سیلان تست‌های فشردن و ماشین کاری استفاده شده است. بدین ترتیب که در کرنشی مشخص از نتایج تست‌های ماشین کاری ($\dot{\epsilon}_M$), تنش سیلان در ماشین کاری (σ_M) و فشار (σ_C) محاسبه می‌شوند. بدینهای است که تنش سیلان در کرنش‌های بالا در فرآیند ماشین کاری در نمودار حاصل از فشردن موجود نمی‌باشد [18]. به همین دلیل برای محاسبه تنش سیلان در فشردن برای کرنش‌های بالا از برونو یا استفاده می‌شود. سپس معادله جانسون - کوک برای هر دو نوع آزمایش نوشته شده،

$$\sigma_C = [A + B\dot{\epsilon}_M^n][1 - T_{h_c}^m] \quad (3)$$

$$\sigma_M = [A + B\dot{\epsilon}_M^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}_M/\dot{\epsilon}_0)][1 - T_{h_M}^m] \quad (4)$$

و با ترکیب روابط (3) و (4) می‌توان نوشت:

$$C = \frac{[\sigma_M(1 - T_{h_M}^m)/\sigma_c(1 - T_{h_c}^m)] - 1}{\ln(\dot{\epsilon}_M/\dot{\epsilon}_0)} \quad (5)$$

با توجه به این که متغیرهای مستقل تست‌های ماشین کاری، سرعت برشی و ضخامت براده جدا نشده می‌باشند، می‌توان پارامتر C را به صورت تابعی از این دو متغیر نوشت. شکل 3 نمودار تغییرات پارامتر C نسبت به ضخامت براده جدا نشده و سرعت برشی که با استفاده از نرم‌افزار متلب^۱ ترسیم شده است را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 3، برای تعیین متغیر C به صورت تابعی از t_0 و V , از برآش اطلاعات نمودار ترسیمی استفاده شده است. معادله (6) بهترین نتیجه حاصل از بین معادلات درجه یک و دو، مار بر نقاط بدست آمده برای پارامتر C می‌باشد.

$$C = -0.2824 + 0.01579V + 1.017t_0 - 0.000189V^2 - 0.004794Vt_0 - 1.813t_0^2 \quad (6)$$

بنابراین معادله جانسون - کوک مربوط به تنش سیلان آلیاژ آلومینیوم

صفحه‌ای که پایه و اساس روابط تحلیلی ارائه شده توسط اکسلی می‌باشد، نسبت پهنهای براده جدا نشده به ضخامت براده جدا شده باید مساوی یا بیشتر از 10 باشد. پس از انجام هر تست ضخامت براده جدا شده باید آمده، با کولیس دیجیتال با قدرت تفکیک 0.01 میلی‌متر در پنج مقطع مقاومت اندازه‌گیری و میانگین اعداد به عنوان ضخامت براده جدا شده ثبت گردید. جدول 2 نتایج و مقادیر ثبت شده را در شرایط متفاوت ماشین کاری ارائه می‌کند.

3- تعیین معادله بنیادی تنش سیلان

مدل بنیادی جانسون - کوک به عنوان شناخته شده‌ترین مدل پدیداری جریان تنش وابسته به کرنش، نرخ کرنش و دما بوده و با موفقیت برای گستره وسیعی از مواد با نرخ کرنش‌های متفاوت در دمای‌های گوناگون مورد استفاده قرار گرفته است (معادله 1). مدل جانسون - کوک به دلیل سهولت و فراگیری پارامترها برای گستره وسیع مواد بسیار موفق بوده است. در این معادله σ پارامترها برای گستره وسیع مواد بسیار موفق بوده است. در این معادله T تنش جریان، $\dot{\epsilon}$ کرنش پلاستیک، $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش پلاستیک، T_{room} دمای محیط، T_{melt} ذوب ماده قطعه‌کار، A تنش تسليم در دمای مرتع، B ضریب کرنش سختی، n توان کرنش سختی، C ضریب نرخ کرنش و m توان نرم شوندگی فلز در اثر حرارت است. ثابت A برای آلیاژ آلومینیوم 5083 برابر 136 مگاپاسکال است که از آزمایش فشردن بدست آمده است. پارامترهای B و n که مربوط به تاثیر کرنش سختی بر تنش جریان هستند، از برآش معادله توانی (یا حذف کروشه

جدول 2 نتایج تست‌های ماشین کاری

Table 2 The experimental results of machining

شماره تست	سرعت برشی (mm/min)	نیروی پیشروعی (N)	نیروی برشی (N)	مقدار پیشروعی (N)
1	0.044	55	24	55
2	0.044	75	33	75
3	0.044	100	26	60
4	0.044	125	30	66
5	0.044	150	27	63
6	0.044	175	38	87
7	0.094	50	20	45
8	0.094	75	35	80
9	0.094	100	42	90
10	0.094	125	40	92
11	0.094	150	35	80
12	0.094	175	47	105
13	0.141	50	65	143
14	0.141	75	59	133
15	0.141	100	52	117
16	0.141	125	60	131
17	0.141	150	82	174
18	0.141	175	70	156
19	0.188	50	63	131
20	0.188	75	72	162
21	0.188	100	67	147
22	0.188	125	69	153
23	0.188	150	70	157
24	0.188	175	31	66
25	0.282	50	65	149
26	0.282	75	83	188
27	0.282	100	87	189
28	0.282	125	81	185
29	0.282	150	62	149
30	0.282	175	47	93
31	0.380	50	41	97
32	0.380	75	108	233
33	0.380	100	75	158
34	0.380	125	83	188
35	0.380	150	73	145
36	0.380	175	23	41

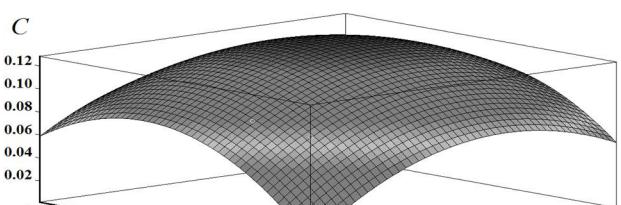


Fig. 3 Change of C parameter relative to the independent variable cutting speed and uncut chip thickness

شکل 3 پارامتر C نسبت به متغیرهای مستقل سرعت برش و ضخامت براده جدا نشده

5- صحت سنجی نتایج

برای بررسی صحت شبیه‌سازی اجزاء محدود و تایید معادله انتخابی و ضرایب محاسبه شده برای آن، نیروهای برشی و پیشروی بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تست‌های تحریقی تراش کاری متعامد مقایسه شده‌اند. نتایج و مقدار خطأ در جدول 4 نشان داده شده است. برای سهولت مقایسه، نتایج جدول 4 به صورت نمودار در اشکال 6 و 7 نشان داده شده‌اند.

نمودارهای فوق نشان می‌دهند که نیروهای بدست آمده از شبیه‌سازی با

5083 با استفاده از معادلات (7) الی (9) ارائه شده است:

$$\sigma = [136 + 121.2\dot{\varepsilon}^{0.202}][1 + C \ln(\dot{\varepsilon}/2 \times 10^{-3})][1 - T_h] \quad (7)$$

$$T_h = \frac{7 - 25}{600} \quad (8)$$

$$C = -0.2824 + 0.01579V + 1.017 t_0 - 0.000189 V^2 \quad (9)$$

$$-0.004794 Vt_0 - 1.813t_0^2$$

4- شبیه‌سازی اجزاء محدود

در دهه‌های اخیر تکنیک‌های عددی مختلفی برای درک تئوری تغییرشکل‌های پلاستیک حجمی و همچنین حل مسائل غیرخطی توسعه یافته‌اند که آنالیز اجزاء محدود، یکی از روش‌های قابل اعتماد برای حل چنین مسائلی با کاهش هزینه آزمایش‌های تحریقی و افزایش یکنواختی شرایط آزمایش می‌باشد. میزان دقت شبیه‌سازی وابسته به میزان دقت پارامترهای ورودی موثر از جمله خواص فیزیکی، مکانیکی و تنفس سیلان مواد است. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی فرآیند تراش کاری متعامد و بدست آوردن نیروهای ماشین کاری از کد تجاری آباکوس استفاده شده است. جدول 3 خصوصیات و ویژگی‌های ابزار و قطعه‌کار را نشان می‌دهد.

مطابق آزمایش‌های تحریقی صورت گرفته، برش به صورت متعامد دوبعدی می‌باشد. بنابراین مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی، با مشخص کردن مختصات گوشه‌های یک مستطیل به صورت دو بعدی ایجاد شده است. با توجه به اندازه ضخامت براده جدا نشده در آزمایش‌های تحریقی، ارتفاع مستطیل 2 میلی‌متر و طول آن 8 میلی‌متر در نظر گرفته شد (شکل 4). با محاسبه زاویه برش و آزاد ابزار، مدل هندسی آن ایجاد شد. شرایط مرزی برای قطعه‌کار دوبعدی با محدود کردن حرکت سطح پایینی و سمت چپ قطعه بر روی محورها و گردش حول محورها اعمال شده است. برای تأمین سرعت حرکت ابزار بر روی قطعه‌کار در راستای براده برداری، آزادی حرکت برای نقطه مرجع که بر روی ابزار صلب تعريف شده است، قرار داده شد.

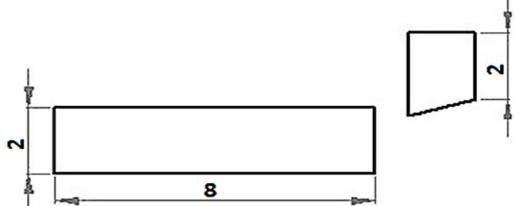
از آن‌جا که اندازه المان‌های اولیه باید از ضخامت براده جدا نشده کوچکتر باشد تا با شروع برخورد ابزار و قطعه‌کار، جدایش المان‌ها و ایجاد براده رخ دهد و با توجه به ابعاد انتخابی قطعه‌کار، طول آن به 50 قسمت و عرض آن به 25 قسمت تقسیم شده است. با این شرایط زمان تحلیل قابل قبول بوده و نتایج بدست آمده نیز خطای کمتری را نشان می‌دهند.

در شبیه‌سازی انجام شده از وزن ابزار و ابزار گیر صرف‌نظر شده است. ابزار به کار رفته نو، کاملاً تیز و بدون شعاع نوک در نظر گرفته شده است. ارتعاشات بوجود آمده در حین براده برداری در نظر گرفته نشده است. این فرضیات برای کاهش زمان تحلیل در نظر گرفته شده‌اند. شکل 5 شبیه‌سازی فرآیند برادری و نحوه جداسازی براده را نشان می‌دهد.

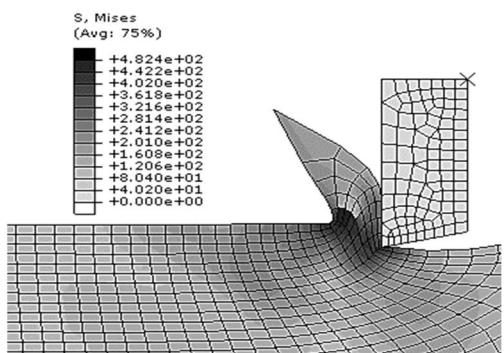
جدول 3 خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مواد قطعه‌کار و ابزار

Table 3 The mechanical and physical properties of the workpiece and tool material

ویژگی (5083 آلومینیوم)	ابزار	قطعه‌کار
چگالی (ton/mm^3)	2.66×10^{-9}	1.5×10^{-8}
مدول یانگ (GPa)	70-72	800
ضریب پواسون	0.33	0.2
گرمای ویژه	850	203
انبساط حرارتی	22.5×10^{-7}	4.7×10^{-7}
ضریب اصطکاک	0.2	0.2
دمای اتانق (K)	293	293
هدایت حرارتی (W/m K)	118-130	46



شکل 4 مدل دو بعدی اجزاء محدود فرآیند ماشین کاری



شکل 5 شبیه‌سازی اجزاء محدود تراش کاری متعامد آلمینیوم آلیاژ 5083

جدول 4 مقایسه نتایج تست‌های تحریقی و شبیه‌سازی اجزاء محدود

Table 4 Comparison of the results from experimental tests and FE simulation

خطا	نیروی برش (N)		سرعت برش (m/min)	ضخامت براده جدانشده (mm)	ردیف			
	شبیه سازی	تجربی						
31%	18	26	35%	39	60	25	0.044	1
37%	19	30	27%	48	66	50	0.044	2
24%	32	42	17%	75	90	26	0.094	3
12.5%	35	40	13%	80	92	52	0.094	4
8%	48	52	6%	110	117	24	0.141	5
8%	55	60	12%	115	131	48	0.141	6
6%	63	67	2%	150	147	24	0.188	7
6%	65	69	8.5%	140	153	47	0.188	8
14%	75	87	6%	200	189	25	0.282	9
5%	85	81	5%	195	185	49	0.282	10
20%	90	75	11%	175	158	22	0.380	11
14%	95	83	17%	220	188	45	0.380	12
میانگین خطأ		15.46%	میانگین خطأ	13.29%	میانگین خطأ			

6- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، مدل‌سازی و تعیین رفتار دینامیکی یا به عبارت دیگر تعیین تنش سیلان آلیاژ آلومینیوم 5083 تحت شرایط حاکم بر ماشین‌کاری بوده است. معادله تنش سیلان یکی از مهمترین ورودی‌های لازم برای شبیه‌سازی عددی فرآیندهای ماشین‌کاری و شکل‌دهی می‌باشد. به عبارت دیگر موفقیت و قابل اعتماد بودن نتایج شبیه‌سازی عددی وابستگی شدیدی به اطلاعات تنش سیلان ماده به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما دارد. از میان معادلات بنیادی و تئوری‌های ارائه شده در زمینه مدل‌سازی ریاضی تنش سیلان، معادله بنیادی پر کاربرد جانسون-کوک برای این آلیاژ به کار گرفته شده است. برای استخراج ضرایب معادله تنش سیلان این آلیاژ از ترکیب آزمایش‌هایی با نرخ کرنش پایین (آزمایش فشار) و آزمایش‌هایی با نرخ کرنش بالا (ماشین‌کاری) استفاده شده است. آزمایش‌های فشار در دمای اتاق و در نرخ کرنش‌های مختلف انجام گرفت. آزمایش‌های ماشین‌کاری نیز برای داشتن حالت برش متعامد به صورت دیسک‌تراشی با سرعت‌ها و پیشروی‌های مختلف انجام گرفت. سیس پارامترهای تغییر شکل (کرنش، نرخ کرنش، دما و تنش سیلان) در هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شده و با استفاده از برازش منحنی و همچنین ترکیب اطلاعات بدست آمده از تست‌های صورت گرفته، ثابت‌های معادله برای این آلیاژ محاسبه شدند. برای برآورد میانگین پارامترهای تغییر شکل در ناحیه اول تغییر شکل در ماشین‌کاری، از تئوری تحلیلی اکسلی که مبتنی بر حالت کرنش صفحه‌ای در ماشین‌کاری متعامد با براده‌ی پیوسته بدون لبه این باشته می‌باشد، استفاده شده است. برای محاسبه پارامترهای تغییر شکل در حین ماشین‌کاری از شبیه‌سازی المان محدود برای تعیین ثابت نرخ کرنش در روابط تحلیلی اکسلی بهره گرفته شده است.

شبیه‌سازی اجزاء محدود ماشین‌کاری متعامد با حالت کرنش صفحه‌ای با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام و از معادله تعیین ضرایب شده (7) برای مدل‌سازی ریاضی تنش سیلان آلیاژ آلومینیوم 5083 استفاده شد.

همان‌طور که عنوان شد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با ضرایب محاسبه شده و نتایج تست‌های تجربی با یکدیگر مقایسه و مقدار خطای متوسط در برآورد نیروهای برشی ۱۳.۲۹٪ و نیروهای پیشروی ۱۵.۴۶٪ می‌باشد. این مقدار خطای با توجه به عوامل موثر در ایجاد خط، قابل قبول می‌باشد. در نتیجه با توجه به عدم دسترسی به دستگاه تست دو میله‌ای هاپکینسون به منظور تعیین ضرایب معادلات بنیادی، می‌توان از روش ارائه شده در این مقاله با دقت قابل قبول استفاده کرد.

7- مراجع

- [1] E. M. Trent, P. K. Wrigth, *Metal Cutting*, 4th Edition, pp. 1-2, Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] M. C. Shaw, *Metal Cutting Principles*, Second Edition, pp. 35-62, Oxford: Science Publications, 2005.
- [3] T. H. C. Childs, K. Maekawa, T. Obinakawa, Y. Yamane, *Metal Machining, Theory and Applications*, 1st Edition, pp. 28-32, Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [4] T. H. C. Childs, Material Property Needs in Modelling Metal Machining, *Proceedings of CIRP Internation Workshop on Modelling of Machining Operations*, Atlanta, USA, pp. 303-316, 1999.
- [5] R. Naghdabadi, M. J. Ashrafi, S. Sohrabpour, Experimental and Numerical Study of Parameters Shaping the Incident Pulse in Split Hopkinson Pressure Bar Test, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 71-80, 2010. (in Persian)
- [6] T. Shirakashi, K. Maekawa, E. Usui, Flow stress of low carbon steel at high temperature and strain Rate (Part 1: Propriety of incremental strain method in impact compression test with rapid heating and cooling systems, *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 161-166, 1983.

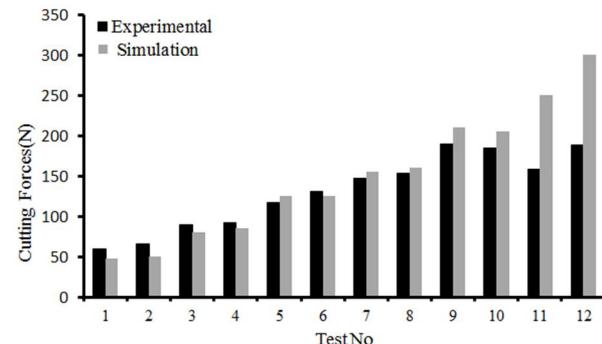


Fig. 6 Comparison between experimental and simulated cutting forces obtained from calculated equation

شکل 6 مقایسه نیروهای برشی تجربی و شبیه‌سازی شده با معادله بنیادی تعیین ضرایب شده

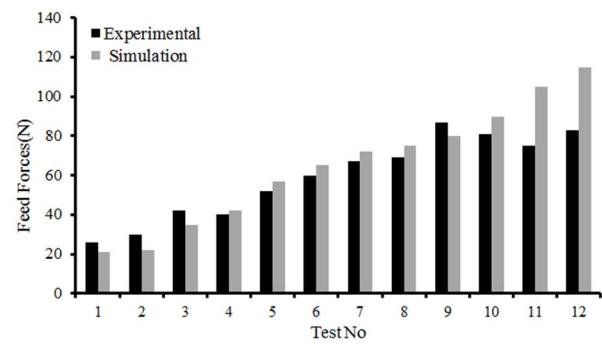


Fig. 7 Comparison between experimental and simulated feed forces obtained from calculated equation

شکل 7 مقایسه نیروهای پیشروی تجربی و شبیه‌سازی شده با معادله بنیادی تعیین ضرایب شده

ضرایب تعیین شده در مقایسه با تست‌های تجربی انجام گرفته، اختلاف اندکی دارد و می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی انجام شده قابلیت پیش‌بینی نیروها در شرایط متفاوت ماشین‌کاری را دارد. علل مختلفی برای خطاهای موجود قابل بیان است. از جمله این که علی‌رغم پیش‌بینی‌های لازم برای کاهش تأثیر پدیده اصطکاک در انجام تست‌های فشردن، باید توجه کرد که تأثیر اصطکاک را نمی‌توان به صفر کاهش داد. از طرف دیگر نوع تغییر شکل در ماشین‌کاری از نوع برشی می‌باشد در حالی که در تست‌های فشردن، از نوع فشاری می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری به روش المان محدود، طبق تئوری ماشین‌کاری متعامد بوده و در آزمایش‌های تجربی نیز سعی شده است که فرآیند بطرور متعامد انجام شود. اما با اختلاف دیسک‌تراشی برای رسیدن به این هدف، ماشین‌کاری متعامد به صورت کامل محقق نمی‌شود. یکی دیگر از عوامل ایجاد خطای دستگاه تراش مورد استفاده برای اجرای تست‌های تجربی می‌باشد که از نوع سیک تراش بوده و در هنگام براده برداری مخصوصاً در پیشروی‌های زیاد، دچار ارتعاش می‌شود. این موضوع نیز می‌تواند توجیه کننده اختلاف مقادیر بدست آمده از تست‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی در پیشروی‌های بالا باشد.

در تمامی موارد اشاره شده، ترکیب منابع خطای منجر به ایجاد اختلاف در نتایج می‌شوند که جدا نمودن سهم هر کدام ممکن نخواهد بود. به همین دلیل در آزمایش‌های انجام گرفته، می‌توان نتایجی را که خطای کمتری دارند با توجه به خطاهای ذکر شده قابل قبول دانست.

- [13] P. Surya, R. Prakash, S.S. Bhattacharya, Some study on superplasticity in a fine grained AA5083 alloy, *International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering (ISRS 2004)*, Madras, India, 2004.
- [14] W. S. Lee, C. F. Lin, Plastic deformation and fracture behaviour of Ti-6Al-4V alloy loaded with high strain rate under various temperatures, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 241, pp. 48-59, 1998.
- [15] Ashvin J. Makadia, J. I. Nanavati, Optimisation of machining parameters for turning operations based on response surface methodology, *Measurment*, Vol. 46, No. 1, pp. 1521-1529, 2013.
- [16] D. Umbrello, Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti- 6Al-4V alloy, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 96, No. 1, pp.79-87, 2008.
- [17] G. R. Johnson, W. H. Cook, Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48, 1985.
- [18] M. J. Nategh, A Machining Force Model Developed for Ultrasonic Vibration-Assisted Turning, through Statistical Analysis of Influential Parameters, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 83-91, 2009. (in Persian) [\(فارسی\)](#)
- [7] R. Stevenson, Study on the Correlation of Work-piece Mechanical Properties from Compression and Cutting Tests, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 67-79, 1997.
- [8] M. Oyane, F. Takashima, K. Osakada, H. Tanaka, The behaviour of some steels under dynamic compression, *Proceedings of the 10th Japan Congress on Testing Materials*, Kyoto: Society of Materials Science, pp. 72-76, 1967.
- [9] Y. B. Guo, An Integral Method to Determine the Mechanical Behavior of Materials in Metal Cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 1, pp. 72-81, 2003.
- [10] F. Klocke, D. Lung, S. Buchkremer, Inverse identification of the constitutive equation of Inconel 718 and AISI 1045 from FE machining simulations, *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, pp. 212-217, 2013.
- [11] T. Özel, E. Zeren, Determination of Work Matial Flow Stress and Friction for FEA of Machining Using Orthogonal Cutting Test, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 1019-1025, 2004.
- [12] H. Sheikh, S. Serajzadeh, Estimation of flow stress behavior of AA5083 using artificial neural networks with regard to dynamic strain ageing effect, *journal of materials processing technology*, Vol. 196 , No. 8, pp. 115–119, 2008.