Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۱۲-۱۸

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

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه اثر تنش‌های پسماند ایجاد شده توسّط فرآیند ماشین‌کاری بر روی اعوجاج قطعات جداره نازک به کمک روش المان محدود

علی اسکینی[۱] و احسان زمانی[۲*]

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

* شهرکرد، صندوق پستی ۱۱۵، zamani.ehsan@eng.sku.ac.ir

چکیده

اعوجاج و بی‌ثباتی ابعادی در فرآیند ماشین‌کاری نهایی قطعات جداره نازک ساخته‌شده از آلیاژهای آلومینیوم، منجر به افزایش هزینه‌های تولید می‌شود که همواره مورد توجه محققین صنایع هوافضا بوده است. به‌طورکلی، اعوجاج این قطعات تابعی از تنش پسماند است. در این مقاله، از یک مدل سه بعدی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس برای بررسی تأثیر تنش پسماند بر اعوجاج به وجود آمده در تراش‌کاری متعامد یک سیلندر دیواره نازک از جنس AL7075-T6 استفاده شده است. برای اطمینان از صحت و تطابق مناسب مدل شبیه‌سازی، نتایج حاصل با نتایج تجربی موجود مقایسه خواهد شد. بدین منظور با شبیه‌سازی آزمایش‌های گوناگون با استفاده از دو ابزار کاربید و الماس چند بلوری با شرایط ماشین‌کاری متفاوت بر روی آلیاژ موردنظر، درجه حرارت منطقه برش، اعوجاج و نیروهای ماشین‌کاری محاسبه می‌شود. سپس ارتباط بین تنش پسماند و اعوجاج یا اندازه‌گیری تنش در برخی از قطعه کارها مورد مطالعه قرارگرفته می‌گیرد. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم تنش بر روی اعوجاج قطعات مورد آزمایش دارد. برخلاف آزمایش‌ها تجربی، آزمایش‌ها اجزای محدود محدودیتی برای به دست آوردن مقدار تنش‌های پسماند در تمام جهات و کانتورهای مرتبط را ندارد. یافته‌های تحلیل علاوه بر رفع محدودیت‌های موجود، به دلیل انجام نشدن آزمایش‌ها در داخل کشور، موجب صرفه‌جویی ارزی ۶۰۰ یورویی برای هر آزمون می‌شود.

کلید واژگان: تنش پسماند، اعوجاج، قطعات جداره نازک، آلیاژ AL7075-T6، شبیه‌سازی اجزای محدود

Study of the effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts by FEM

Ali Eskini, Ehsan Zamani*

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
* P.O.B. 115, Shahrekord, Iran, zamani.ehsan@eng.sku.ac.ir

ABSTRACT

The main problems in the machining of thin walled parts made of aluminum alloys are the distortion and dimensional instability after machining which lead to an increase in the production costs. In general, distortion in machined parts made of aluminum alloy is a function of the residual stresses. In this study, a three-dimensional FEM model in Abaqus under orthogonal cutting conditions is used for investigating the correlation between machining induced residual stresses and the distortion in thin-walled cylinder made of AL7075-T6 alloy. To compare and validate the FEM model with experimental results of other papers, several simulation are carried out under different conditions using K10 and PCD tools. Machining force, temperature and distortion were measured. Correlation between residual stress and distortion was studied by measurement on some workpieces. The results represented the direct effect of stresses on level of distortion. Unlike experimental, there is no limitation in FEM model to compute amount of residual stresses in all directions. Results showed a good agreement with experiment. This indicates that the FEM model can be used to simulate machining process to predict its distortion with no limitation with saving of 600 euros for each test considering the equipments limitation in Iran.

Keywords: AL7075 Alloy, Distortion, FEM, Machining Thin-walled Parts, Residual Stress

۱- مقدمه

آلیاژهای مختلف آلومینیوم دارای خواص منحصربه‌فردی ازجمله دسترسی به یک نسبت استحکام به وزن مطلوب هستند. همین فاکتور به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و ضروری‌ترین معیارها، سبب کاربرد گسترده این آلیاژها در صنایع هوایی و خودروسازی شده است. کاهش وزن باعث افزایش بهره‌وری و مصرف سوخت کمتر در آلیاژهای تولیدشده آلومینیوم، خصوصاً در هواپیماهای مدرن شده است. یکی دیگر از خواص مشخصه آلیاژهای آلومینیوم مقاومت در مقابل خوردگی است. استفاده از قطعات یکپارچه ماشین‌کاری شده در صنایع هوایی و خودروسازی در اتصالات نسبت به روش‌های سنتی همچون جوش‌کاری، پرچ و ... ارجحیت دارد، زیرا استفاده از این فرآیندها سبب افزایش هزینه‌های اقتصادی و زمانی در تولید قطعات می‌شود. از دیگر مزایای ماشین‌کاری این آلیاژها می‌توان به کاهش حجم بالایی از قطعه در کمترین زمان، کیفیت سطح بالا، نیرو پایین برشکاری، ماشین‌کاری در فرکانس‌های تحریک خاص و بحرانی و انتقال حرارت به براده به‌جای ورود به قطعه کار اشاره کرد [۱].

یکی از مشکلات اصلی در ارتباط با ماشین‌کاری قطعات دیواره نازک ساخته‌شده از آلیاژهای آلومینیومی، اعوجاج[1] و ناپایداری ابعادی[2] محصول نهایی است که باعث هزینه‌های مالی بسیاری برای تولیدکنندگان می‌شود. بر اساس نتایج منتشره‌ی یک تحقیق در شرکت بوئینگ آمریکا، متوسط

1. distortion
2. dimensional instability

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Eskini, E. Zamani, Study of the effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts by FEM, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 12-18, 2015 (in Persian فارسی)

www.SID.ir

Archive of SID

هزینه‌های ساخت مجدد و اورهال قسمت‌هایی از چهار هواپیما که دچار اعوجاج شده‌اند بالغ بر ۲۵۰ میلیون اعلام‌شده است. علاوه بر این موضوع، تخمین زده‌شده است که اعوجاج ناشی از رفتار حرارتی ابزارآلات بر صنایع خودروسازی و حمل‌ونقل آلمان، باعث اتلاف سالانه ۸۵۰ میلیون یورو می‌شود [۲]. در شکل ۱، تأثیر اعوجاج بر یک حلقه گیردار شده بعد از فرآیند ماشین‌کاری نشان داده شده است که محصول نهایی در حدود ۴۰ میکرون از حالت مدور اولیه خود انحراف پیدا کرده است [۳].

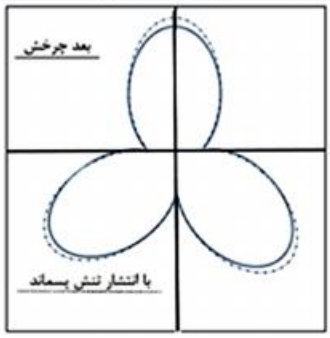
تنش‌های پسماند سیستم تنش‌هایی هستند که وقتی جسمی از نیروهای خارجی رهاست، در آن جسم وجود دارند. این تنش‌ها در اثر انجام عملیات خاصی در جسم باقی می‌مانند و درحالی‌که جسم تحت هیچ بارگذاری خارجی نیست، وجود خواهند داشت. عوامل ایجاد تنش‌های پسماند در قطعات جداره‌ی نازک آلومینیومی به دو نوع تقسیم می‌شود. دسته اول تنش‌هایی که در حین فرایندهای ساخت و تولید در قطعه خام اولیه عامل ایجاد تنش پسماند می‌باشند که به این دسته از تنش‌های پسماند تنش پسماند ذاتی یا اولیه قطعه گفته می‌شود و دسته دوم به‌دلیل ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک غیریکنواخت در حین فرآیند ماشین‌کاری ایجاد می‌شود که به آن‌ها تنش پسماند اجباری یا ثانویه می‌گویند [۴]. به‌منظور تجزیه و تحلیل اثر شرایط ماشین‌کاری بر اعوجاج، تنها بررسی تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری کافی نیست و اثر پارامترهای ماشین‌کاری نیز در عدم تعادل تنش‌های داخلی باید در نظر گرفته شود. در شکل ۲ می‌توان به طور اجمالی پارامترهای مؤثر بر اعوجاج را مشاهده نمود.

یافته‌های مدل‌سازی‌های المان محدود می‌تواند کمک شایانی در نتایج مختلف مانند انحراف، تغییر شکل، کاهش گرمای تولید شده، بهینه‌سازی نیروهای ماشین‌کاری، پیش‌بینی خطا و کنترل آن‌ها داشته باشد. تحقیقات منتشر شده مرتبط با این موضوع‌ها می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

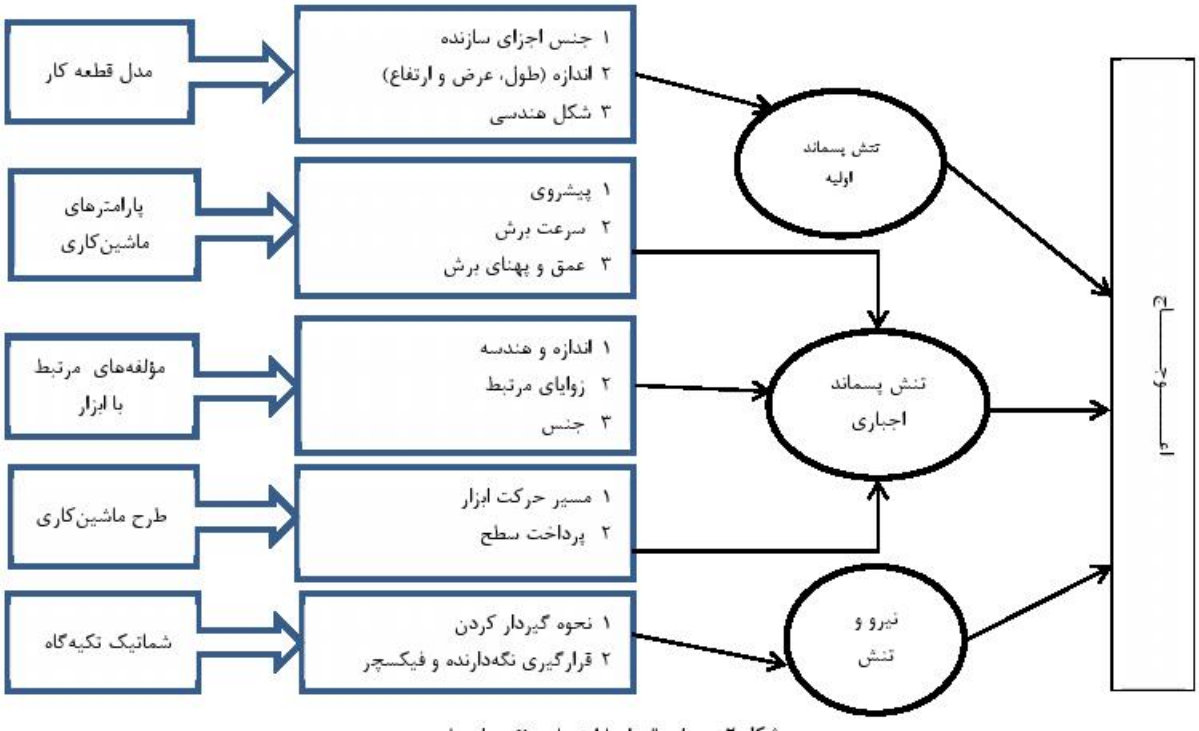
جیتندر و همکاران [۵]، اعوجاج سطوح یکپارچه‌ی آلیاژی ماشین‌کاری شده برای ساخت هواپیما را به کمک شبیه‌سازی المان محدود و نرم‌افزار MSC. مورد مطالعه قراردادند. نتایج آزمایش آن‌ها منجر به بهینه‌سازی پارامترهای برش، نحوه بجا گیردار کردن قطعه کار شد. یانگ و گروه تحقیقاتش [۶] تحقیق مشابه ای در مورد اعوجاج آلیاژهای مورد استفاده در صنایع هوافضا با نرم‌افزار مارک انجام داده‌اند.

جیو و همکاران [۷] با در نظر گرفتن توسعه فیزیک مبتنی بر مواد، فرآیند شبیه‌سازی المان محدود بررسی اعوجاج در طول فرآیند ماشین‌کاری از آلیاژ تیتانیوم را انجام دادند

رانچف و همکاران [۸] با شبیه‌سازی یک مدل المان محدود، انحراف قطعات جداره نازک با صلبیت کم و نیروهای ماشین‌کاری مؤثر در برش این فلزات را محاسبه کردند. درروشی مشابه، رانچف و لئو [۹] تغییر شکل صفحه‌ای آلیاژهای دیواره نازک را تحت نیروهای فرز را مورد مطالعه قراردادند.



شکل ۱ عدم پایداری در ضخامت و گردی سطح مقطع به‌دلیل تنش پسماند [۳]



شکل ۲ مرور اجمالی از پارامترهای مؤثر بر اعوجاج

www.SID.ir

Archive of SID

بی و گروه تحقیقاتش [۱۰] توسط روش المان محدود اعوجاج قطعات یکپارچه ماشین‌کاری شده مورد استفاده در صنایع هوافضا را مورد مطالعه قرار دادند. در این کار با شبیه‌سازی مسیرهای مختلف ماشین‌کاری، تغییر شکل‌های قطعه کار ماشین‌کاری مورد بررسی قرار گرفت.

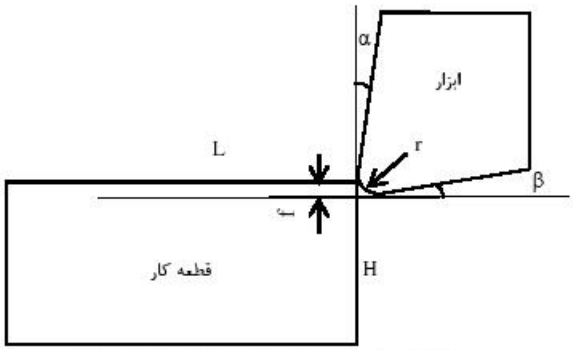
به‌طور خلاصه، عمده هدف پژوهش‌های مذکور شبیه‌سازی و پیش‌بینی اعوجاج در ماشین‌کاری براساس روش المان محدود است. با این‌حال، فقدان مطالعاتی در مورد علل عناصر اصلی ایجاد اعوجاج ماشین‌کاری به‌ویژه برای آلیاژهای آلومینیوم با دیواره نازک که باضخامت کم هستند، وجود دارد که در این مقاله به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود

۲-۱- روند شبیه‌سازی

شبیه‌سازی اجزاء محدود عملیات ماشین‌کاری با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ۶/۱۰ انجام شده است. در شبیه‌سازی‌ها از مدل سه‌بعدی استفاده شده است تا هندسه مسئله به واقعیت نزدیک باشد. به‌منظور کاهش تعداد المان‌ها و زمان تحلیل، هندسه نمونه به شکل بوش متعامد است که در آن تنها منطقه نزدیک به لبه برش که تراشه تشکیل خواهد شد، در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۳ هندسه مدل و پارامترهای ابعادی مؤثر در آن به نمایش درآمده‌اند.

از میان مدل‌های تعریف شده برای اصطکاک در فرآیند ماشین‌کاری، مدل اصطکاک چسبنده لغزنده واقع‌گرایانه‌تر بوده و با توزیع تجربی تنش‌های اصطکاکی در فصل مشترک ابزار براده مطابقت بیشتری دارد. این مدل، اصطکاک را در دو ناحیه مجزا که به آن‌ها ناحیه اصطکاک چسبنده و لغزنده تقسیم می‌کند که در شکل ۴ به نمایش درآمده‌اند [۱۱]. همچنین می‌توان از



شکل ۳ مدل هندسی شبیه‌سازی و پارامترها ابعادی مؤثر

روابط (۱) و (۲) برای نشان دادن این نواحی استفاده کرد.

$$\tau = k \qquad \mu\sigma < k \qquad (۱)$$

$$\tau = \mu\sigma_n(x) \qquad \mu\sigma \geq k \qquad (۲)$$

مقدار ضریب اصطکاک نیز از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۱].

$$\mu = \frac{F_y + F_x \tan(\alpha)}{F_y - F_x \tan(\alpha)} \qquad (۳)$$

به کمک نیروهای ماشین‌کاری در آزمون عملی، نرخ پیشروی و سرعت دورانی می‌توان ضریب اصطکاک فرآیند را به روش میانگین‌گیری محاسبه نمود.

در این تحقیق، آنالیز حرارتی مکانیکی هم‌زمان به شکل کوپل دما تغییر مکان به‌صورت صریح[1] استفاده شده است. شرایط مرزی هندسی و حرارتی مطابق شکل ۵ اعمال می‌شود. برای مش‌بندی قطعه‌کار و ابزار، المان‌های کوپل دما جابه‌جایی با آنالیز تنش و انتگرال کاهش یافته انتخاب شده است. این نوع مش‌بندی با فن مش‌بندی جاروب[2] به کار گرفته شده است. با توجه به اهمیت نتایج در قسمت بالایی قطعه و نوک ابزار، از المان با اندازه کوچک‌تر با توجه به همگرایی و سعی و خطای نتایج در آن نقاط استفاده شده است. برای گریز از اعوجاج المان‌ها در اثر تغییر شکل‌های بزرگ، تکنیک مش‌بندی تطبیقی[3] به کار گرفته شده است.

۲-۲- مدل ماده

جانسون و کوک مدل ماده‌ای برای بارگذاری‌های شدیداً دینامیکی ارائه کردند. در این مدل که در رابطه (۴) به نمایش درآمده است، سطح تسلیم فون میزز با در نظر گرفتن اثر مکانیسم‌های کرنش سختی، نرخ کرنش سختی و نرم شوندگی تعریف شده است [۱۲].

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\varepsilon}^n)\left[1 - C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)\right]^m \qquad (۴)$$

همچنین جانسون و کوک مدلی دیگری برای شکل‌گیری براده تعریف کردند که از معیار کرنش پلاستیک معادل بحرانی استفاده می‌کند. به‌نحوی‌که با بهره‌گیری از مدل شکست مواد نرم، المان شکسته می‌شود، درنتیجه براده شکل می‌گیرد. معیار گسیختگی (رابطه ۵)، زمانی به عدد یک برسد، شکست شروع می‌شود [۱۲].

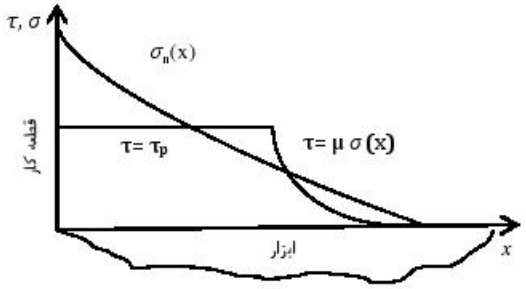
$$D = \frac{\Delta\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_f} \qquad (۵)$$

مقدار نموی کرنش پلاستیک معادل ($\Delta\varepsilon$) به کرنش پلاستیک معادل شروع شکست بستگی دارد که این پارامتر از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_f = \left[d_1 + d_2 exp\left(d_3\frac{p}{\bar{\sigma}}\right)\right]\left[1 + d_4 ln\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\varepsilon}_0}\right][1 + d_5\left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)]^m \qquad (۶)$$

۳- صحت سنجی نتایج

برای اعتبارسنجی روند شبیه‌سازی مقاله از نتایج آزمایش‌های تجربی توسط مسعودی و همکاران [۱۳] که در سال جاری انجام شده است، استفاده می‌شود. در این آزمایش‌ها ماشین‌کاری بر روی استوانه ساخته شده از آلیاژ AL7075-T6 با دو ابزار برش به‌کار برده شده است. ابزار اول کاربیدهای سمانته[4] (K10) و ابزار دیگر الماس چند بلوری[5] (PCD) است. برای این منظور ابعاد هندسی قطعه‌کار و ابزار در شبیه‌سازی تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.



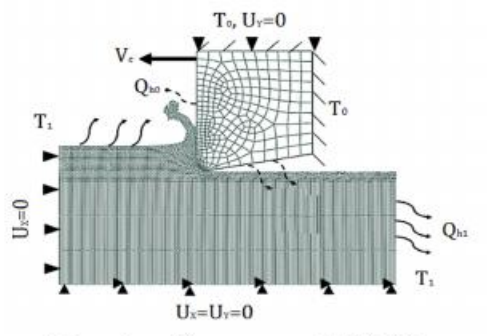
شکل ۴ توزیع نرمال و تنش اصطکاکی در پیشانی ابزار [۱۱]

1. explicit

2. sweep
3. ALE
4. cemented carbide
5. Polycrystalline Diamond

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵ شرایط مرزی هندسی، حرارتی و مش‌بندی نهایی

پارامترهای مورد استفاده در مدل جانسون و کوک برای سطح تسلیم فون میزز (رابطه ۴) مطابق جدول ۲ استفاده می‌شود [۱۲].

ثوابت حاصل از آزمون هاپکینسون در مدل معرفی شده برای شکل‌گیری براده از معیار کرنش پلاستیک معادل بحرانی (رابطه ۶) مطابق جدول ۳ است [۱۲].

دمای محیط و نقطه ذوب قطعه‌کار به ترتیب ۲۰ و ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. سایر خواص و ثوابت مکانیکی قطعه کار و ابزارها در جدول ۴ به نمایش درآمده است [۱۲].

برای محاسبه ضریب اصطکاک (رابطه ۳) مقدار زاویه براده ابزار یک درجه، نیروی محوری، نیروی مماسی وارد بر سطح براده ابزار به ترتیب ۵۵۰ و ۸۵۰ نیوتن است. این نیروها از آزمایش‌های عملی انجام شده بر قطعه کار به‌دست آمده‌اند [۱۱]؛ بنابراین ضریب اصطکاک برای شبیه‌سازی با ابزار PCD در حدود ۰/۲۷ و برای ابزار K10 در حدود ۰/۴۲ محاسبه می‌شود. با جای‌گذاری این مقدار در فرمول‌های ۱ و ۲، تنش برشی حداکثر در ناحیه چسبنده ۲۹۰ مگا پاسکال به دست می‌آید.

شرایط مرزی حرارتی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۵ آورده شده است [۱۲].

تمامی آزمایش‌های تجربی توسط یک ماشین CNC (مدل TC50 ساخته‌شده توسط شرکت تولیدی ماشین‌آلات تبریز) صورت گرفته است. در تمامی آزمایش‌ها عمق برش و ضخامت قطعه‌کار یک میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در جدول ۶ سطوح گوناگون برای هر پارامتر مورد بررسی در نظر گرفته است. بدین منظور ۲۴ آزمایش با چهار سرعت برش و سه سرعت پیشروی و دو ابزار قابل طراحی است.

جدول ۱ پارامتر ابعادی در هندسه قطعه کار و ابزار

L (mm)	H (mm)	r (mm)	α (درجه)	β (درجه)
۱۰	۴	۰/۰۲	۱	۱۱

جدول ۲ پارامترهای مورداستفاده از مدل جانسون و کوک در رابطه ۴

A (مگاپاسکال)	B (مگاپاسکال)	n	c	m
۵۴۶	۶۷۸	۰/۷۱	۰/۰۲۴	۱/۵۶

جدول ۳ پارامترهای مورداستفاده در معیار آسیب جانسون کوک

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
-۰/۰۶۸	۰/۵۴۱	-۰/۰۹۵۲	۰/۰۳۶	۰/۶۹۷

جدول ۴ خواص مکانیکی قطعه کار و ابزارهای برش

خواص	A7075-T6	PCD	K10
ضریب الاسیسیته (Gpa)	۷۱/۷	۸۹۰	۶۳۰
ضریب پواسون	۰/۳۳	۰/۰۷	۰/۲۶
ضریب انبساط $\left(\frac{10^{-6}}{^0C}\right)$	۲۳/۶	۲/۵	۵/۶
چگالی (Kgm^{-3})	۲۸۱۰	۳۵۱۰	۱۱۹۰۰

جدول ۵ شرایط مرزی و پارامترهای مرتبط حرارتی

T_0 (^0C)	T_1 (^0C)	h_0 ($W.m^{-2}K^{-1}$)	h_1 ($W.m^{-2}K^{-1}$)
۲۰	۰/۱۲۵	۲۰	۱۳۰

جدول ۶ سطوح مختلف هر پارامتر در آزمایش‌ها تجربی

پارامترهای برش‌کاری	سطح			
شماره سطح	۱	۲	۳	۴
سرعت برش (m/min)	۲۳۰	۳۵۰	۴۷۰	۵۹۰
سرعت پیش‌روی (mm/min)	۶۰	۱۲۰	۱۸۰	-

برای به‌دست آوردن اعوجاج قطعه‌کار بیش‌ترین جابجایی عمودی محل برش مدنظر قرار خواهد گرفت. در آزمایش‌های عملی برای محاسبه اعوجاج در قطعه‌کار، در سه ناحیه در محل ماشین‌کاری شده تلورانس ابعادی اندازه گرفته می‌شود و مجموع این اختلافات ابعادی به‌عنوان اعوجاج گزارش شده است.

برای بررسی میزان دقت نتایج، در شکل ۶ تنش پسماند در راستای محور برش قطعه‌کار در آزمایش‌های عملی و نرم‌افزار مقایسه شده است. مشاهده می‌شود در هر دو نمودار حداکثر مقدار تنش‌های پسماند بیشینه در فاصله ۲۵ تا ۵۰ میکرومتر از سطح ثبت شده‌اند که میزان پیش‌بینی شده در نرم‌افزار در نقطه تنش ماکزیمم در حدود ۱۲ مگاپاسکال بیشتر از آزمایش تجربی هست. همچنین سطح تنش‌های به‌دست آمده در تمامی نقاط اندازه‌گیری شده بالاتر از نتایج تجربی است. این اختلاف‌ها می‌تواند به علت تفاوت در مواد مدل شده در نرم‌افزار با مواد استفاده شده در آزمایش‌های تجربی و همچنین شبیه‌سازی انجام شده نرم‌افزار به‌صورت متعامد باشد. قابل‌ذکر است که نحوه اندازه‌گیری تنش در آزمایش‌ها می‌تواند علت دیگری برای این اختلافات باشد. با این وجود روند افزایش و کاهش تنش‌های اندازه‌گیری شده در فواصل مختلف از سطح در دو نمودار تقریباً یکسان بوده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود این مقاله همخوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد و پیش‌بینی مناسبی از توزیع تنش پسماند در راستای طول برش را ارائه می‌دهد. در ادامه تحقیق به بررسی دقیق‌تر نتایج تجربی و شبیه‌سازی و بررسی پارامترهای موردنظر تحقیق پرداخته می‌شود.

۴- نتایج و مباحث

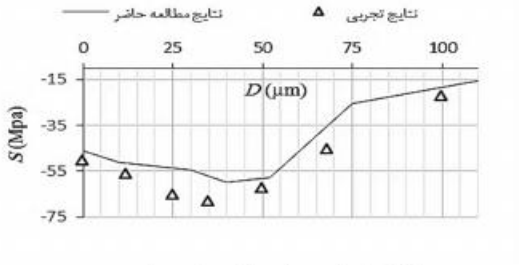
۴-۱- اثر دما و نیروی برش بر توزیع تنش پسماند

به‌منظور بررسی ارتباط بین اعوجاج و توزیع تنش پسماند، برخی از نمونه‌ها از ۲۴ آزمایش انجام شده انتخاب و تنش پسماند اندازه‌گیری می‌شود. در انتخاب این ۵ مورد به حداکثر و حداقل نیرو، دما و اعوجاج توجه شده است. وضعیت بخش‌های انتخاب شده برای اندازه‌گیری تنش در جدول ۷ قابل مشاهده است. همچنین مقدار و توزیع تنش پسماند نشان داده شده است در جهت

www.SID.ir

Archive of SID

مماسی (در امتداد محور سرعت برش) برای پنج قطعه‌کار اندازه‌گیری و در شکل ۷ نشان داده شده است.



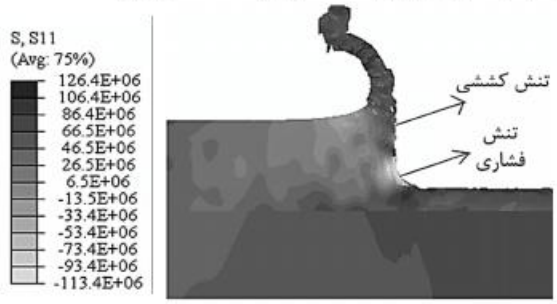
شکل ۶ مقایسه نتایج مطالعه حاضر و نتایج تجربی

جدول ۷ چند نمونه از نرخ اعوجاج قطعه کار تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری

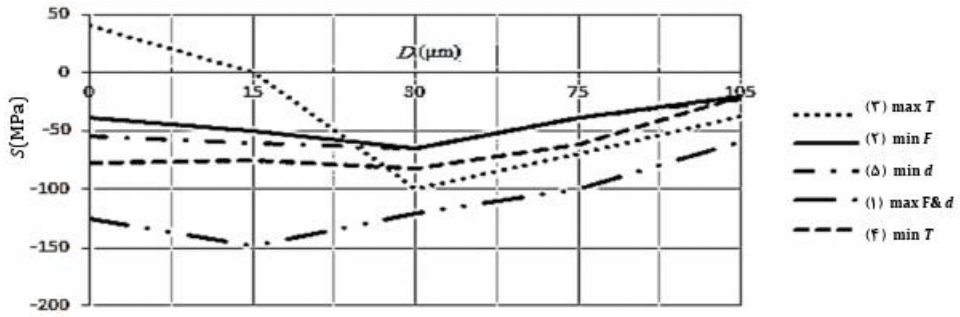
نمونه	ویژگی	V	f	ابزار	F	T	d
۱	بیشترین تیرو و اعوجاج	۲۳۰	۱۸۰	K10	۲۳۹	۱۴۱	۸۶
۲	کمترین تیرو	۵۹۰	۶۰	PCD	۲۶	۱۱۴	۲۵
۳	بیشترین دما	۵۹۰	۱۸۰	K10	۹۱	۱۹۱	۶۲
۴	کمترین دما	۲۳۰	۶۰	PCD	۶۷	۸۵	۲۶
۵	کمترین اعوجاج	۴۷۰	۶۰	PCD	۳۹	۱۰۶	۲۳

با توجه به جدول ۷، حداکثر اعوجاج متعلق به آزمایش با نیروی ماشین‌کاری حداکثر است. این نشان دهنده اثر مستقیم نیروی ماشین‌کاری بر اعوجاج است. در قطعه کار با حداقل اعوجاج (شماره ۵ در جدول ۷)، اگرچه حداقل نیروی اندازه‌گیری نشده است، ولی نیروی اندازه‌گیری شده بسیار کم است و آن نیرو در مقایسه با کمینه نیرو در تمام آزمایش‌ها (۲۶ نیوتن) نزدیک است. در مقایسه با توزیع تنش پسماند در قطعات در شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نیرو، تنش‌ها نیز افزایش پیدا کرده‌اند که در قطعات شماره ۱ و ۲ (حداقل و حداکثر نیروی برش)، تنش اندازه‌گیری شده دارای توزیع فشاری است. افزایش در نیروی و در نتیجه افزایش در فشار و تغییر شکل پلاستیک در لایه‌های سطحی، منجربه افزایش فشار به لایه‌های داخلی و افزایش عمق نفوذ تنش‌های پسماند ایجاد شده خواهد شد. به‌عنوان‌مثال در آزمایش شماره ۵ در جدول ۷ (مربوط به قطعه‌کار با حداقل اعوجاج) با توجه به نیروی کم و دمای کم‌تر در طول ماشین‌کاری، تنش‌ها در یک سطح پایین‌تر قرار گرفته‌اند. همچنین در مقایسه بین توزیع تنش در قطعات با حداقل و حداکثر دما، مشاهده می‌شود که با افزایش درجه حرارت، سطح تنش و توزیع آن افزایش داشته است. به‌عنوان مثال در شکل ۷، در قطعه شماره ۳ با حداکثر درجه حرارت با ۲۰۳ درجه سانتی‌گراد، توزیع تنش در مقایسه با چهار بخش دیگر متفاوت است. دمای بالای ایجاد شده و گرادیان مربوطه، تنش‌های پسماند کششی به وجود می‌آیند ولی در طی فرآیند ماشین‌کاری با افزایش عمق برش و متعاقباً افزایش نیروهای مکانیکی، این تنش‌ها به‌تدریج به تنش‌های فشاری تبدیل می‌شوند. همچنین در قطعه کار شماره ۴ با کمترین دمای اندازه‌گیری شده، تنش در مقایسه با نمونه قسمت ۳ (حداکثر درجه حرارت) کمتر است چرا که علاوه بر درجه حرارت پایین، نیروی کمتری بر سطح قطعه در طول فرآیند ماشین‌کاری ایجاد شده است. برای بررسی دقیق‌تر موضوع در شکل ۸، کانتور تنش پسماند برای نمونه شماره ۳ به تصویر کشیده شده است که همان‌گونه مشاهده می‌شود بیشترین تنش فشاری در محل تماس ابزار و قطعه کار ایجاد شده است. همچنین در محل ناحیه دوم برش به دلیل انتقال دما و گرادیان حرارتی و کم‌تر بودن میزان نیروی ابزار، این تنش‌ها کششی هستند.

هزینه صرف شده برای به‌دست آوردن هر یک از نمودارهای مربوط به شکل ۷ در آزمایش‌های تجربی حدود ۶۰۰ یورو بوده است، اما در آزمایش‌ها عددی با توجه به این‌که محدودیتی برای به‌دست آوردن تنش‌های پسماند و کانتورهای آن وجود ندارد، در شکل ۹ در تمام آزمایش‌های انجام شده میزان نیروی برش‌کاری را به‌ترتیب صعودی مرتب کرده و تنش پسماند بیشینه را برای هر نمونه به‌دست می‌آوریم. مشاهده می‌شود با افزایش نیروی ماشین‌کاری به همان میزان مقدار تنش پسماند فشاری افزایش پیدا کرده است. همچنین در مقایسه با ابزار کاربیدی، نیروی برش‌کاری و سطوح تنش با استفاده ابزار PCD به‌طور قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر است. این بدان علت است که در سطح ابزار PCD ضریب اصطکاک خیلی کمتر از ابزار کاربید است و نیروهای ماشین‌کاری در برش به‌صورت قابل توجهی کاهش پیدا کرده‌اند. به‌طورکلی برداشت می‌شود که اعوجاج، نیروی برش، تنش پسماند در ماشین‌کاری قطعه جدار نازک آلومینیومی با استفاده از ابزار PCD کاهش می‌یابد.



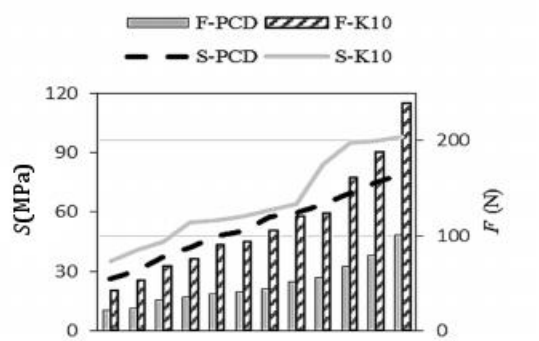
شکل ۸ کانتور تنش‌های پسماند جهت طولی در قطعه شماره سوم



شکل ۷ توزیع تنش پسماند در جهت طول برش‌کاری برای نمونه‌های انتخاب شده در جدول ۷

www.SID.ir

Archive of SID



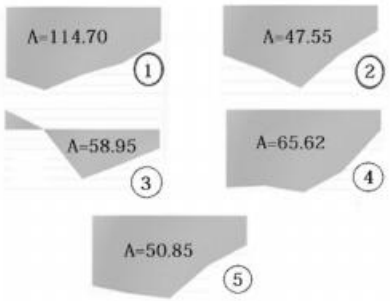
شکل ۹ تأثیر افزایش نیروی ماشین‌کاری بر تنش پسماند در شبیه‌سازی عددی

۴-۲- اثر توزیع تنش بر اعوجاج قطعه کار

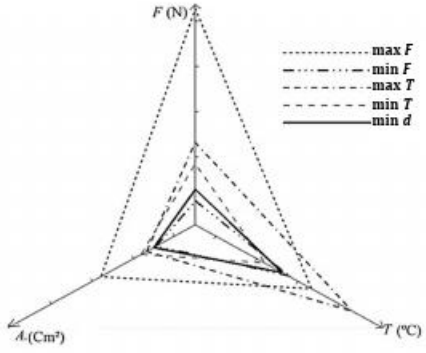
به‌منظور استفاده از یک شاخص کمی برای توزیع تنش پسماند و بررسی رابطه آن با اعوجاج، منطقه محصور در میان نمودار تنش پسماندر شکل ۷ با محور افقی محاسبه‌شده است. منطقه محصور بر روی هر دو محور افقی و عمودی با استفاده از یک مقیاس یکسان (سانتی‌متر) اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از این فن، سطح تنش در هر یک از قطعات را می‌توان با دیگری مقایسه کرد. واضح است که با افزایش عمق نفوذ، منطقه محصور نیز افزایش‌یافته است. منطقه محصور برای پنج نمودار تنش پسماند در شکل ۱۰ نشان داده شده است. حداکثر سطح ایجادشده متعلق به نمونه شماره ۱ با ۱۱۴/۷۰ سانتی‌متر مربع و حداقل مقدار متعلق به قطعه کار شماره ۲ با ۴۷/۵۵ است.

برای بررسی ارتباط بین منطقه محصور (سطح تنش پسماند) با نیرو و دما، نمودار رادار استفاده می‌شود (شکل ۱۱). در این نمودار برای پنج قطعه کار، نیروی برش، دمای محل ناحیه دوم برشکاری و منطقه محصور در سه محور جداگانه با مقیاس‌های مختلف نشان داده‌شده است. با اتصال نقاط هر سه محور به یکدیگر برای هر آزمایش، یک مثلث تشکیل‌شده است. در این نمودار، شیب منطقه محصور یا به‌عبارت‌دیگر، سطح تنش‌های پسماند، به‌طور قابل‌توجهی در آزمایش با نیروی و درجه حرارت بالاتر، افزایش‌یافته است. بااین‌حال، دیده می‌شود که تأثیر نیروی برش برافزایش منطقه محصور چشم‌گیر است؛ بنابراین یک رابطه مستقیم بین تنش‌های پسماند با نیرو درجه حرارت وجود دارد، همان‌طور که این دو پارامتر را افزایش می‌دهد، به‌ویژه نیروی، سطح تنش افزایش می‌یابد و منجر به افزایش بیش‌تری در سطح اعوجاج در قطعه کار می‌شود.

ارتباط بین منطقه محصور و اعوجاج در شکل ۱۲ نشان داده‌شده است. در این نمودار، سطح محصور پنج قطعه کار به ترتیب صعودی نشان داده



شکل ۱۰ پنج ناحیه محصور در دیاگرام تنش پسماند (ابعاد به سانتی‌متر مربع)



شکل ۱۱ بررسی ارتباط بین منطقه محصور با نیرو و دما

شده است. همچنین اعوجاج هر قطعه کار با استفاده از یک منحنی به تصویر کشیده شده است. دیده می‌شود که افزایش مقدار سطوح محصور منجر به روند رو به صعود اعوجاج می‌شود. بااین‌وجود، تغییرات شیب نمودار در آزمایش‌های تجربی روند ثابتی را دنبال نکرده است. به‌عنوان مثال، منطقه محصور در قطعه کار شماره ۲ در مقایسه با نمونه شماره ۱ تقریباً ثابت بوده است درحالی‌که که اعوجاج کاهش می‌یابد. به‌طور مشابه، در بخش‌های شماره ۳ باوجود تفاوت قابل‌ملاحظه اعوجاج، اما مقدار منطقه محصور تغییر آن‌چنانی نداشته است. علت این موضوع این‌گونه توجیه می‌شود که در مطالعات تجربی به دلیل محدودیت‌های موجود، تنش‌های پسماند فقط در جهت مماسی (هم‌جهت با سرعت برش) اندازه‌گیری و تنش‌ها در دو جهت دیگر مورد بررسی قرار نگرفته است. جهت مماسی در طول ماشین‌کاری با توجه به اعمال نیروهای بیش‌تری در این جهت در تولید اعوجاج مهم‌تر هستند و درنتیجه، سطح بالاتری از تنش در این مسیر تولید می‌شود. تفاوت درشیب نمودار اعوجاج در مقایسه با منطقه محصور ممکن است به شیوه‌ی توزیع تنش در دو محور دیگر باشد.

برای بررسی دقیق‌تر این موضوع کانتور و مقدار تنش‌های میزز در مقایسه با جهت برشی در شکل ۱۳ به نمایش درآمده است. در قسمت الف، تنش‌ها در جهت طولی عمدتاً در محل برش از نوع فشاری هستند درحالی‌که در قسمت ب که تنش‌های میزز و به‌نوعی برآیند تنش‌ها است، نوع تنش‌ها به‌صورت کششی می‌باشند.

۵- نتیجه‌گیری

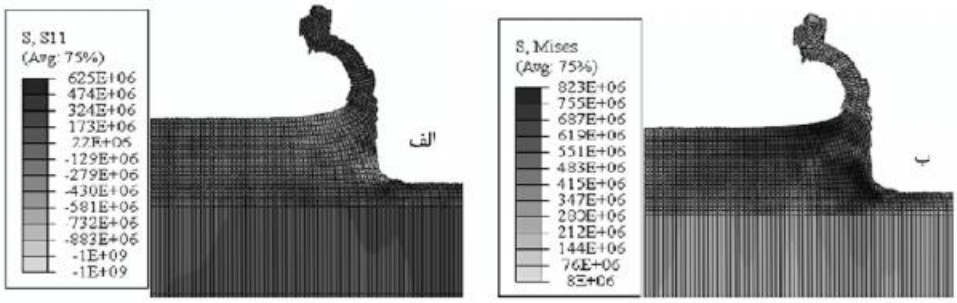
در این پژوهش، مکانیسم و عوامل مؤثر بر اعوجاج در ماشین‌کاری قطعه‌کار دیواره نازک مطالعه شده است. برای این منظور، چندین آزمایش بر روی ارتباط بین تنش پسماند قطعه‌کار با اعوجاج مطالعه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه به شرح زیر است.

۱ اعمال بارهای مکانیکی و حرارتی در قطعه‌کار در طول ماشین‌کاری، توزیع تنش پسماند را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش یا کاهش در نیرو و دما باعث گستردگی توزیع در تنش‌های پسماند می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش در نیروهای ماشین‌کاری منجر به تنش پسماند فشاری است درحالی‌که افزایش درجه حرارت منجر به تشکیل تنش پسماند کششی را افزایش می‌دهد.

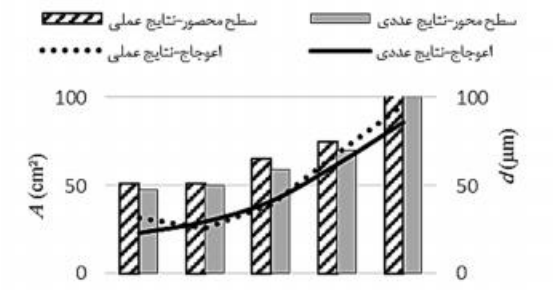
۲ در ماشین‌کاری توسط ابزار PCD با توجه به کم‌تر بودن ضریب اصطکاک، نیروی و درجه حرارت، تنش پسماند و در نتیجه اعوجاج کاهش می‌یابد. به‌عنوان یک نتیجه ماشین‌کاری قطعات جدار نازک با ابزار PCD به‌جای ابزارهای کاربیدی برای کاهش نیروی برشکاری و اعوجاج توصیه می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۳ کانتور و مقدار تنش در قسمتی از قطعه کار الف) تنش محوری ب) تنش میزز



شکل ۱۲ ارتباط ناحیه محصور با اعوجاج در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی

۳ با افزایش تنش‌های پسماند، اعوجاج و بی‌ثباتی در قطعه‌کار افزایش یافته است. در واقع، ماشین‌کاری ممکن است باعث عدم تعادل در تنش‌های پسماند لایه داخلی شود و قطعه‌کار را تا زمانی که تنش‌ها دوباره متعادل شوند منجر به تغییر شکل و اعوجاج کند؛ بنابراین، با استفاده از چند روش برای کاهش نیرو دما، تنش پسماند و اعوجاج را در قطعات با دیواره نازک می‌توان کاهش یابد.

۶- فهرست علائم

A	سطح محصور (cm^2)
d	اعوجاج (μm)
D	عمق برش (μm)
f	سرعت پیشروی (mm/min)
F	نیروی برش (N)
H	ارتفاع قطعه‌کار (mm)
h_0	ضریب همرفتی ابزار با محیط ($Wm^{-2}K^{-1}$)
h_1	ضریب همرفتی قطعه کار با محیط ($Wm^{-2}K^{-1}$)
K	تنش برشی حداکثر (MPa)
$K10$	کاربید سمانته
L	طول قطعه‌کار (mm)
PCD	الماس چندبلوری
r	شعاع نوک ابزار (mm)
S	تنش (MPa)
T_0	دمای محیط ($°C$)
T_1	دمای محیط اطراف ($°C$)
V	سرعت برشی ابزار (m/min)

علایم یونانی

β	زاویه آزاد
μ	ضریب اصطکاک
ρ	چگالی (kgm^{-3})
α	زاویه سطح براده

بالانویس‌ها

n	توان کرنش سختی

زیرنویس‌ها

melt	ذوب
room	اتاق

۷- مراجع

[1] Z. Zhang, L. Li, Y. Yang, W. Zhao, Machining distortion minimization for the manufacturing of aeronautical structure, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 9, pp. 1765-1773, 2014.

[2] L. Liu, P. Sun, Study on the machining distortion of aluminum alloy parts induced by forging residual stresses, *Engineering manufacture*, Vol. 28, No. 9, pp. 65-81, 2015.

[3] E. Brinksmeier, C. Heinzel, M. Garbrecht, R. Griet, Residual stresses in high speed turning of thin-walled cylindrical work pieces, *Automation Technology*, Vol.5, No.3, pp. 313-319, 2011.

[4] A. Singh, A. Agrawal, Investigation of surface residual stress distribution in deformation machining process for aluminum alloy, *Materials processing technology*, Vol. 225, No. 6, pp. 195-202, 2015.

[5] K. Jitender, P. Xirouchakis, Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components, *Machine tools and manufacture*, Vol.48, No.6, pp. 629-643, 2008.

[6] Y. Yang, Y. Wang, C. Li, Study on machining distortion of titanium alloy aircraft monolithic component by finite element method and experiment, *Advanced science letters*, Vol.4, No.8, pp. 3206-3210, 2011.

[7] H. Guo, D. W. Zuo, G. Q. Tong, Prediction on milling distortion for aero-multi-frame parts, *5th International conference on physical and numerical simulations of material processing*, Zhengzhou, China, 2007.

[8] S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, A. A. Becker, An advanced FEA based force induced error compensation strategy in milling, *Machine Tools and Manufacture*, Vol.46, No.5, pp. 542-551, 2006.

[9] S. Ratchev, S. Liu, A. A. Becker, Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts, *Materials processing technology*, Vol.162, No.1, pp. 673-681, 2005.

[10] Y. Bi, Q. Cheng, Y. Ke, Machining distortion prediction of aerospace monolithic components, *Zhejiang university SCIENCE A*, Vol.10, No.5, pp. 661-668, 2009.

[11] A. Davoudinejad, E. Chiappini, S. Tirelli, M. Annoni, Finite element simulation and validation of chip formation and cutting forces in dry and cryogenic cutting of Ti-6Al-4V, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 97, No. 4, pp. 50-62, 2015.

[12] U. Umer, M. Ashmaf, J. A. Quadriri, Finite element modeling of the orthogonal machining of particle reinforced aluminum based metal matrix composites, *MM Science*, Vol.3, No.4, pp. 510-515, 2014.

[13] S. Masoudi, S. Amini, E. Saeidi, H. Eslami-Chalander, Effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts, *Advanced manufacturing technology*, Vol.76, No.1-4, pp. 597-608, 2015.

www.SID.ir