مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۵-۱۱

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

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر بارهای مکانیکی و حرارتی بر اعوجاج ایجاد شده توسّط فرآیند ماشین‌کاری قطعات جداره نازک به کمک روش المان محدود

علی اسکینی[۱]، 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

یکپارچگی سطح قطعه‌ی ماشین‌کاری ساخته شده از آلیاژهای آلومینیوم جداره نازک به‌عنوان یکی از فرایندهای کلیدی در صنایعی همچون هوافضا مورد توجه است. در ماشین‌کاری نهایی قطعه‌کار، نیروهای برش‌کاری و درجه حرارت در طول فرآیند باعث تولید انحراف و اعوجاج می‌شوند. هدف از این مقاله بررسی اثر رفتار حرارتی و مکانیکی ایجاد شده توسّط فرآیند ماشین‌کاری بر روی اعوجاج قطعه ساخته‌شده از آلیاژ آلومینیوم (Al 7075-T0) با استفاده از ابزارهای کاربید سمانته و الماس چند بلوری است. این مطالعه با استفاده از یک مدل سه‌بعدی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس در شرایط برش متعامد انجام‌شده است. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم نیرو و درجه حرارت بر روی اعوجاج قطعات مورد آزمایش دارد، به‌خصوص نیروی ماشین‌کاری اثر بیشتری در اعوجاج قطعه کار جدار نازک در مقایسه با درجه حرارت دارد. همچنین در ابزار الماس چند بلوری نیروهای ماشین‌کاری و درجه حرارت در منطقه برش به‌طور قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر از ابزار کاربیدی است و استفاده از این ابزار در ماشین‌کاری آلیاژهای آلومینیوم به‌عنوان یک جایگزین مناسب پیشنهاد می‌شود. برای صحت سنجی مدل شبیه‌سازی شده، نتایج با اندازه‌گیری‌های تجربی موجود مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی نشان می‌دهد.

کلید واژگان: اعوجاج، قطعات جداره نازک، آلیاژ AL7075-T6، نیروهای برش‌کاری و درجه حرارت، شبیه‌سازی اجزای محدود ماشین‌کاری

Effect of mechanical and thermal loads on the distortion of machining thin-walled parts using the FEM model

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

Machining of thin-walled monolithic parts made of aluminum alloys is a key process in industries such as aerospace. In the final machining process, the cutting forces and machining temperature produce deflection for workpiece which results in the dimensional inaccuracies and distortion on the finished component. The purpose of this paper is to study the thermal and mechanical behavior in machining of aluminum alloys (Al 7075-T0) using PCD (polycrystalline diamond) and K10 (cemented carbide) tools to investigate the correlation between both parameter on distortion. The study was made using a three-dimensional finite element method model in Abaqus software under orthogonal cutting conditions. The results represented the direct effect of the force and temperature on level of distortion in thin-walled workpieces. However, the mechanical loads have more influence on work piece distortion in comparison to the thermal loads. It was concluded that the polycrystalline tool has a superior performance in terms of cutting forces and temperature when compared to the cemented carbide tool. To validate the FEM model, the results were compared with experiments of the other papers. Results showed a good agreement with experiments.

Keywords: AL7075 Alloy, Cutting Forces and Temperatures, Distortion, FEM Analysis Machining, Thin-walled Parts.

۱- مقدمه

به علت کاهش حجم بالای ٪۹۵ قطعه خام اولیه آلومینیومی در ماشین‌کاری، قطعات با ضخامت های بسیار کم (دیواره نازک) ایجاد می‌شوند که در فرآیند تولید آن‌ها نیروی برش‌کاری و تغییر شکل‌های حرارتی بسیار بزرگی ایجاد می‌شود. این تغییرات می‌تواند روی دقت ابعادی و مونتاژ سازه‌های نهایی تأثیر منفی بگذارد. فرآیندهای ماشین‌کاری باعث افزایش کیفیت سطح، عملکرد بهتر قطعه ولی درعین‌حال امکان به وجود آمدن انحراف[۱] در محصول تولیدی می‌شود. انحراف و اعوجاج[۲] هنگامی رخ می‌دهد که لایه‌های نزدیک به سطح قطعه کار به دلیل تغییرشکل‌های پلاستیک غیریکنواخت، تنش پسماندهایی در سرتاسر قطعه گسترش می‌دهند [۱]. مطالعه و کنترل تنش‌های پسماند و اعوجاج قطعات ماشین‌کاری شده از جنس آلیاژهای آلومینیوم یک موضوع مهم در صنایع هوافضا و خودروسازی است. به‌عنوان مثال شکل ۱ ورق ماشین‌کاری شده برای قطعات هواپیما را نشان می‌دهد که در حدود ۳۵ میلی‌متر به ازای ۱۰۰۰ میلی‌متر طول اولیه انحراف پیدا کرده است [۲].

1. deviation

2. distortion

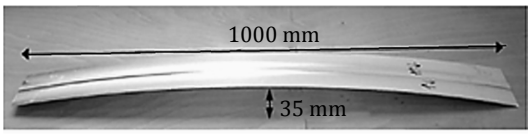
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Eskini, E. Zamani, Effect of mechanical and thermal loads on the distortion of machining thin-walled parts using the FEM model, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 5-11, 2015 (in Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.25.5]



شکل ۱ انحراف نسبت به طول اولیه در صفحه ماشین‌کاری شده [۲]

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 [۳]، اعوجاج سطوح یکپارچه‌ی آلیاژی ماشین‌کاری شده برای ساخت هواپیما را به کمک شبیه‌سازی المان محدود و نرم‌افزار مارک، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش آن‌ها منجر به بهینه‌سازی پارامترهای برش، نحوه بجا گیردار کردن قطعه کار شد. یانگ و گروه تحقیقاتش [۴] تحقیق مشابه‌ای در مورد اعوجاج آلیاژهای مورد استفاده در صنایع هوافضا با نرم‌افزار مارک انجام داده‌اند.

لیو [۵] با طراحی یک مدل المان محدود به کمک یک سیستم نرم‌افزاری برای قسمت‌های مختلف قطعات چند مقطعی ساخته‌شده از آلیاژ آلومینیوم، پیش‌بینی اعوجاج ماشین‌کاری برای اجزاء. یکپارچه چند فریم را تشریح کرد

راتچف و همکاران [۶] با شبیه‌سازی یک مدل المان محدود، انحراف قطعات جداره نازک با صلبیت کم و نیروهای ماشین‌کاری مؤثر دربرش این فلزات را محاسبه کردند. درروشی مشابه، راتچف و لئو [۷] تغییر شکل صفحه‌ای آلیاژهای دیواره نازک را تحت نیروهای فرز را موردمطالعه قراردادند.

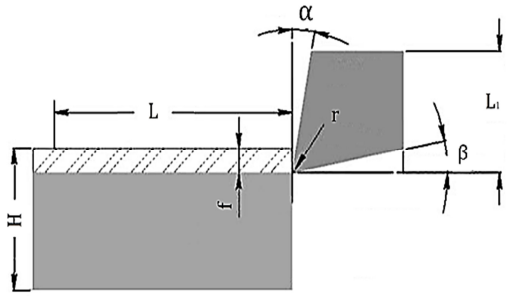
بی و گروه تحقیقاتش [۸] توسط روش المان محدود اعوجاج قطعات یکپارچه ماشین‌کاری شده مورد استفاده در صنایع هوافضا را مورد مطالعه قرار دادند. در این کار با شبیه‌سازی مسیرهای مختلف ماشین‌کاری، تغییر شکل‌های قطعه کار ماشین‌کاری مورد بررسی قرار گرفت.

باوجود تمام تلاش‌های انجام گرفته، مکانیسم اعوجاج و بی‌ثباتی ابعادی قطعه کار به‌خصوص در قطعه جداره نازک آلومینیومی به‌طور کامل شناسایی نشده است. تاکنون تنها شناسایی و پیش‌بینی اعوجاج آن‌هم در یک سطح کیفی امکان‌پذیر است، درحالی‌که بسیاری از ابهامات در مورد دلایل و مکانیسم اعوجاج باقی‌مانده است. با توجه به روش‌های ایجاد تنش پسماند در ماشین‌کاری، با ارائه بهترین و یا مؤثرترین شرایط تراش‌کاری جهت کمینه‌سازی گرمای تولید شده و نیروهای برش در طی فرایند، می‌توان به‌طور چشمگیری سطوح تنش پسماند و اعوجاج تولیدی در قطعات را کاهش داد. با این وجود، قابلیت یک مدل اجزای محدود ارزش فراوانی دارد، زیرا هزینه فرآیند و تکرار کار را کاهش می‌دهد. در این پژوهش به کمک یک آنالیز اجزای محدود، ارتباط بین اعوجاج قطعه جداره نازک آلومینیومی از جنس Al 7075-T6 و نیروهای ماشین‌کاری، درجه حرارت منطقه برش و توزیع تنش‌های پسماند ماشین‌کاری بررسی شده است.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود

در تحقیق حاضر، فرایند تراش‌کاری به‌صورت سه‌بعدی متعامد شبیه‌سازی است. در شکل ۲ پارامترهای ابعادی ورودی به نرم‌افزار و هندسه مسئله به تصویر کشیده شده است.

نوع تحلیل استفاده شده در این شبیه‌سازی آنالیز حرارتی- مکانیکی هم‌زمان



شکل ۲ مدل‌سازی هندسی و پارامترهای ابعادی مؤثر در طراحی

به شکل کوپل دما- تغییر مکان به‌صورت صریح[1] با توجه به دینامیکی بودن و داشتن شرایط انتقال حرارت، انتخاب شده است.

در مدل اجزای محدود، قطعه کار باید پاسخگوی حالت الاستیک- پلاستیک و رفتار ترمو- مکانیکی را در طول فرآیند داشته باشد؛ بنابراین با استفاده از مدل جانسون- کوک، جنس قطعه تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که این مدل پدیده‌هایی با تغییر شکل زیاد و کرنش‌های بالا است. همچنین این مدل خواص فیزیکی مواد قطعه کار را که به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود، در طول ماشین‌کاری نشان می‌دهد [۹].

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\varepsilon}^{n})\left[1 - Cln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}\right)\right]^{m} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، A، B، C، m و n پارامترهای مادی هستند که برای آلیاژ Al 7075-T6 مقادیر آن‌ها در جدول ۱ موجود است [۹].

جانسون و کوک مدلی را تعریف کردند که کرنش شکست (ε_f) مطابق رابطه (۲) تابعی از متغیرهای مختلف بود. این رابطه کاربرد معیارهای ترک نرم به‌عنوان شرط جدایی براده بررسی می‌کند. این معیار، گسیختگی را ناشی از انباشتگی آسیب با توجه به تاریخچه تنش‌ها، کرنش‌ها، نرخ کرنش‌ها و دماهای تجربه شده می‌داند [۱۰].

$$\varepsilon_f = \left[d_1 + d_2 exp\left(d_3\frac{P}{\bar{\sigma}}\right)\right]\left[1 + d_4 ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right][1 + d_5\left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{melt} - T_{room}}\right)]^{m} \qquad (۲)$$

در رابطه‌ی (۲)، d_1 تا d_5 ثابت‌های مادی آسیب هستند که مقادیر آن‌ها برای آلیاژ موردنظر تحقیق در جدول ۲ مشاهده می‌شود [۱۰].

المان مکعبی از نوع C3D8T برای مش‌بندی مدل هندسی استفاده شده است. این نوع المان دارای ۸ گره با انتگرال‌گیری کاهش یافته است. در انتگرال‌گیری کاهش یافته با توجه به این‌که از یک نقطه انتگرال‌گیری گوس استفاده می‌شود زمان انجام محاسبات کاهش می‌یابد. همچنین به‌منظور انجام یک شبیه‌سازی دقیق، از مش‌بندی تطبیقی[2] استفاده شده است. این روش ابزاری قوی برای بهبود مش در مسائل با تغییر شکل بزرگ است [۱۱].

ضریب اصطکاک در مدل‌سازی باید به‌گونه‌ای انتخاب گردد که نیروی برشی

جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده مدل جانسون-کوک در رابطه (۱)

m	c	n	B (مگا پاسکال)	A (مگا پاسکال)
۱/۵۶	۰/۰۲۴	۰/۰۷۱	۶۷۸	۵۴۶

جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده در معیار آسیب جانسون-کوک

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

1. Explicit
2. ALE

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.25.5]

پیش‌بینی شده نزدیک‌ترین مقدار ممکن را به مقدار متناظر از آزمایش داشته باشد. شرایط برش انتخابی باید اثر تغییر در سرعت برش، عمق برش و زاویه برش را لحاظ کند. برای این منظور از مدل اصطکاک چسبنده - لغزنده برای تعریف اصطکاک در فصل مشترک ابزار- براده استفاده شده است که در آن ضریب اصطکاک از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۲].

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

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

میزان حرارت ایجاد شده در ناحیه تغییر شکل ثانویه وابسته به کسری از انرژی اصطکاکی تبدیل شده به حرارت است که در اکثر آنالیزهای انجام شده به کمک نرم‌افزار، این عدد ٪۹۰= η در نظر گرفته می‌شود. این انرژی که به سبب جاری شدن براده بر روی ابزار به وجودمی‌آید، دمای بین سطوح اصطکاکی برخوردی را افزایش می‌دهد. میزان شارش گرما در اثر اصطکاک لغزشی روی سطح ابزار و براده وابسته به سطوح تماس دوگانه بوده و از معادله (۴) و (۵) حاصل می‌شود [۱۳].

$$q_c = f_w \cdot \eta \cdot p_{fr} \quad (۴)$$

$$q_t = (1 - f_w) \cdot \eta \cdot p_{fr} \quad (۵)$$

در این رابطه f_w، فاکتور وزن برای توزیع گرما مابین سطوح برخورد بوده، q_c و q_t شار گرمایی وارد شده به سطوح براده و ابزار است که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود. P_{fr} انرژی حاصل از اصطکاک لغزشی است که آن نیز با وارد کردن ضریب اصطکاک توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود. کسر انرژی گرمایی هدایت شده به براده نیز از رابطه (۶) حاصل می‌شود. همچنین E_c و E_t به ترتیب انرژی گرمایی هدایت شده به براده و ابزار است که از روابط (۷) و (۸) حاصل می‌شوند [۱۳].

$$F_w = \frac{E_c}{E_c + E_t} \quad (۶)$$

$$E_t = \sqrt{k_t \cdot \rho_t \cdot C_{pt}} \quad (۷)$$

$$E_c = \sqrt{k_c \cdot \rho_c \cdot C_{Pc}} \quad (۸)$$

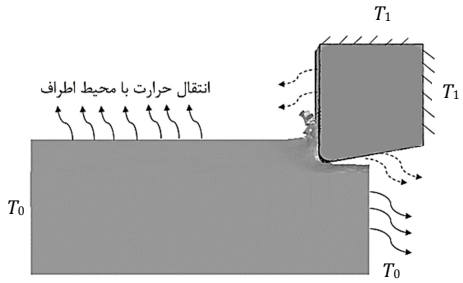
تمام سطوح قطعه کار به‌جز سطح در تماس با ابزار به‌صورت آدیاباتیک در نظر گرفته‌شده است. در فصل مشترک ابزار با براده تماس حرارتی با اعمال ضریب هدایت حرارتی تماس شبیه‌سازی شده است. برای سطوح آزاد قطعه کار که با هوا در تماس هستند، شرایط همرفتی با ضریب همرفتی مشخص با دمای محیط (T_0) در نظر گرفته شده است. برای سطوح آزاد ابزار نیز شرایط مشابهی در نظر گرفته شده است. سطوح در تماس ابزار با محیط اطراف به‌صورت دما ثابت و با دمای (T_1) انتخاب شده است. این انتخاب برای نزدیک‌تر شدن شرایط توزیع دما در نوک ابزار و فصل مشترک به شرایط واقعی انجام گرفته است. شرایط مرزی و پارامترهای مرتبط حرارتی در شکل ۳ به نمایش درآمده‌اند و مقادیر آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است [۱۳].

جدول ۳ مقادیر پارامترهای حرارتی در شکل ۳

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

۳- صحت‌سنجی نتایج

مهم‌ترین مسئله در مدل‌سازی تحقیق، دقت نتایج مدل اجزای محدود و



شکل ۳ شرایط مرزی حرارتی و پارامترهای مرتبط

قابلیت شبیه‌سازی خروجی‌های حائز اهمیتی همچون نیروی برش‌کاری، درجه حرارت و تنش‌های پسماند سطح هست. بدین منظور با شبیه‌سازی مدل تجربی ارائه شده توسط مسعودی و همکاران [۱۴] به صحت سنجی دقت روش پیشنهادی پرداخته شده است. مسعودی و همکاران با طراحی ۲۴ آزمایش گوناگون با شرایط ماشین‌کاری متفاوت بر روی آلیاژ Al7075-T6، درجه حرارت منطقه برش، اعوجاج و نیروهای ماشین‌کاری در تمام آزمایش‌ها را محاسبه کردند. این آزمایش‌ها به کمک دو ابزار کاربیدهای سمانته بانام اختصاری K10 و الماس چند بلوری با نام اختصاری PCD، چهار سرعت برش و سه نرخ پیشروی انجام شده است. عمق برش و ضخامت قطعه کار در تمام آزمایش‌ها یک میلی‌متر است.

در شبیه‌سازی حاضر مطابق مدل ارائه شده در شکل ۲، قطعه کار به‌صورت مستطیلی به طول ۱۰ و عرض ۶ میلی‌متر مدل می‌شود. زاویه براده ابزار ۱ درجه، زاویه آزاد ابزار ۱۱ درجه و شعاع برش لبه‌ی ابزار ۰/۰۲ میلی‌متر فرض می‌شود. مقدار پیشروی و سرعت برش در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

دمای محیط و نقطه ذوب قطعه کار به ترتیب ۲۰ و ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. سایر خواص و ثوابت مکانیکی قطعه کار و ابزارها در جدول ۵ به نمایش درآمده است [۱۰].

با توجه به این‌که فرآیند ماشین‌کاری به‌صورت متعامد است، برای استخراج ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی المان محدود می‌بایست نیروهای ماشین‌کاری اندازه‌گیری شوند. برای محاسبه ضریب اصطکاک از رابطه‌ی (۳) استفاده می‌شود که در آن 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 انجام‌شده بر قطعه کار به‌دست آمده‌اند [۱۱]، بنابراین ضریب اصطکاک برای شبیه‌سازی با ابزار PCD در حدود ۰/۲۷ و برای K10،

جدول ۴ سطوح مختلف هر پارامتر در آزمایش‌ها تجربی

پارامترهای برشکاری	سطح			
مرحله	۱	۲	۳	۴
V(m/min)	۲۳۰	۳۵۰	۴۷۰	۵۹۰
f(mm/min)	۶۰	۱۲۰	۱۸۰	-

جدول ۵ 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 $\left(\frac{10^{-6}}{0_c}\right)$	۲۳/۶	۲/۵	۵/۶
ضریب هدایت گرمایی (W.m^{-1}k^{-1})	۱۸۰	۱۷۳	۳۰
چگالی (Kgm^{-3})	۲۸۱۰	۳۵۱۰	۱۱۹۰۰

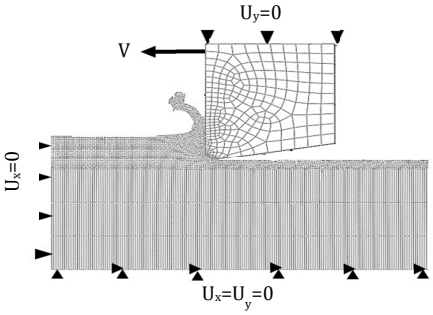
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.25.5]

۰/۴۲ محاسبه می‌شود. تنش برشی حداکثر در ناحیه چسبنده قطعه کار ۲۹۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. پس از بررسی همگرایی ابعادی المان‌ها، درنهایت از تعداد ۲۳۰۹۰ المان مکعبی برای مش‌بندی مدل هندسی استفاده شده است. سایر شرایط مرزی جابجایی و مش‌بندی نهایی در شکل ۴ به نمایش درآمده است [۱۲].

پارامترهای مورد محاسبه تحلیل عبارت‌اند از نیروی ماشین‌کاری بر روی محور طولی، دمای محل برخورد ابزار و قطعه کار و مقدار اعوجاج. بدین منظور در شبیه‌سازی نرم‌افزار برای به دست آوردن نیروی ماشین‌کاری با تعریف یک مسیر در محل برش‌کاری قطعه کار، این نیرو محاسبه خواهد شد. برای به دست آوردن اعوجاج قطعه کار بیش‌ترین جابجایی عمودی محل برش مدنظر قرار خواهد گرفت. در آزمایش‌های عملی نیروهای ماشین‌کار به‌وسیله دینامومتر سه جهتی (مدل B9257 ساخته شده توسط شرکت کیستلر)، درجه حرارت با دوربین مادون‌قرمز حرارتی (مدل DL700 ساخته شده توسط شرکت هایتک)، محاسبه شده است. همچنین برای محاسبه اعوجاج در قطعه کار، در سه ناحیه در محل ماشین‌کاری شده تلورانس ابعادی اندازه گرفته می‌شود و مجموع این اختلافات ابعادی به‌عنوان اعوجاج گزارش شده است.

به‌منظور صحت‌سنجی مدل، سه آزمایش بر روی قطعه کار باضخامت‌های مختلف به طول‌های ۲/۵، ۲ و ۱/۵ میلی‌متر با سرعت برش ۴۷۰ متر/دقیقه، میزان پیشروی ۶۰ میلی‌متر/دقیقه با ابزار PCD انجام گرفت. اعوجاج مربوط نیز در طول برش برای هر سه ضخامت محاسبه شده است. همچنین به‌منظور استفاده از یک شاخص کمی برای توزیع تنش پسماند و بررسی رابطه آن با اعوجاج، منطقه محصور در میان نمودار تنش پسماند با محور افقی محاسبه‌شده است. منطقه محصور بر روی هر دو محور افقی و عمودی با استفاده از یک مقیاس یکسان (سانتی‌متر) اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۵



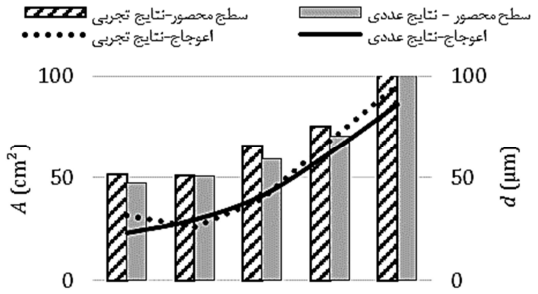
شکل ۴ شرایط مرزی جابجایی و مش‌بندی نهایی

نتایج آزمایش‌های عملی و نرم‌افزار مقایسه شده است. مشاهده می‌شود هم در آزمایش‌های تجربی و هم مدل حاضر باوجود نزدیکی منطقه محصور سه قطعه کار، مدل شبیه‌سازی شده مسئله روند تغییرات اعوجاج با کاهش در ضخامت را هم‌جهت با داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده است. همچنین از نظر کمی نیز داده‌ها در نزدیکی نسبتاً مناسبی با داده‌های حاصل از نتایج عملی هستند و پیش‌بینی مناسبی از توزیع تنش پسماند و مقدار اعوجاج ارائه می‌دهند. در ادامه تحقیق به بررسی دقیق‌تر نتایج تجربی و شبیه‌سازی و مطالعه پارامترهای موردنظر تحقیق پرداخته می‌شود.

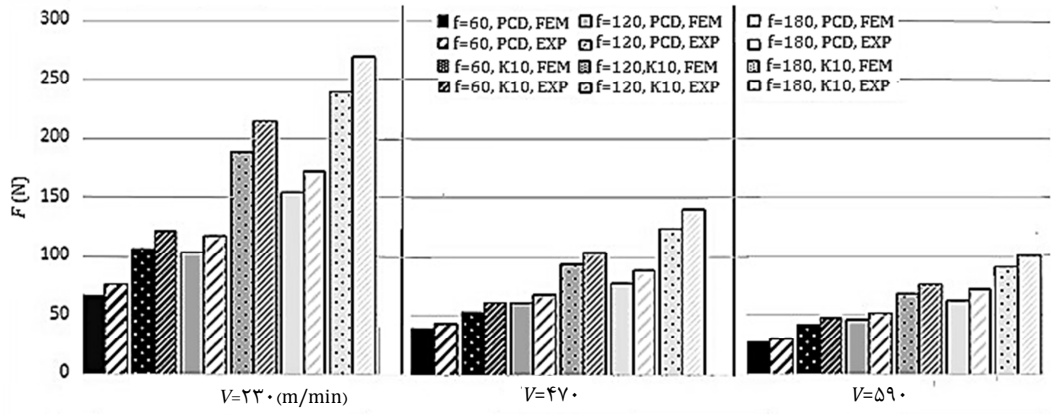
٤- نتایج و مباحث

۴-۱- بررسی اثرات پارامترهای برش بر نیروی ماشین‌کاری و درجه حرارت

اثرات سرعت برش و میزان پیشروی بر نیروی برش برای هر دو ابزار PCD و K10 در آزمایش‌های عملی و شبیه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است. ستون‌های هاشور خورده بیانگر نتایج به‌دست آمده در آزمایش‌های تجربی هستند و ستون‌های توپر کنار آن بیانگر نتایج نرم‌افزار است. یافته‌های تحقیق و آزمایش‌های عملی بیانگر این موضوع هستند که در مقایسه با ابزار کاربیدی، نیروی برش‌کاری با استفاده ابزار PCD به‌طور قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر است. در هر دو ابزار، با افزایش سرعت برش از ۲۳۰ تا ۵۹۰ متر/دقیقه، نیروهای اضافی بر ابزارها در هر سه نرخ پیشروی (به ترتیب رنگ‌های تیره‌تر به روشن برای هر سرعت برش در شکل ۶) کاهش یافته است. داده‌های شبیه‌سازی نیز به‌خوبی مسیر کیفی افزایش نیروی برش‌کاری در طول مسیر برش را نشان داده‌اند. همچنین از نظر کمی داده‌ها در نزدیکی نسبتاً مناسبی با داده‌های حاصل از نتایج عملی هستند. به‌عنوان مثال در



شکل ۵ مقایسه نتایج مطالعه حاضر و نتایج تجربی



شکل ۶ توزیع نیروی برش با تغییر سرعت برش و پیشروی برای K10 و PCD در نتایج عملی و شبیه‌سازی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.25.5]

آزمایش سوم در سرعت برشی ۲۳۰ متر بر دقیقه و نرخ پیش‌روی ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه، اختلاف نتایج عملی و شبیه‌سازی در حدود ۱۱ درصد است. با این‌وجود، شیب کاهش نیروی برش‌کاری در سرعت‌پایین، بالاتر است. همچنین با توجه به شکل، نیروی برش با افزایش نرخ پیشروی در تمام سرعت‌های برش‌کاری افزایش داشته است. این روند برای هر دو ابزار PCD و K10 یکسان است. با این‌حال، اعمال نیروها بر روی ابزار PCD در هر دو آزمایش تجربی و المان محدود حدوداً ۶۰٪ پایین‌تر از ابزار K10 است. در شبیه‌سازی اجزای محدود به کمک نرم‌افزار، حداکثر نیروی برش ۲۳۹ نیوتن در سرعت برش ۲۳۰ متر/دقیقه و نرخ پیشروی ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه با ابزار کاربیدی اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌های عملی نیز صحت نتایج عددی را با همین سرعت برش و نرخ پیشروی تائید می‌کند و اختلاف مقدار گزارش‌شده در حدود ۱۳٪، ۲۶۹ نیوتن است. حداقل نیروی برشکاری برابر ۲۶ نیوتن در سرعت ۵۹۰ متر/ دقیقه و نرخ پیشروی ۶۰ میلی‌متر / دقیقه با استفاده از ابزار PCD اندازه‌گیری شده است. دینامومتر این عدد را در آزمایش‌های تجربی ۳۰ نیوتن نشان داده. نتایج مدل المان محدود نیز همین سرعت برش و نرخ پیشروی تائید می‌کند و اختلاف مقادیر در حدود ۱۴٪ محاسبه شده است.

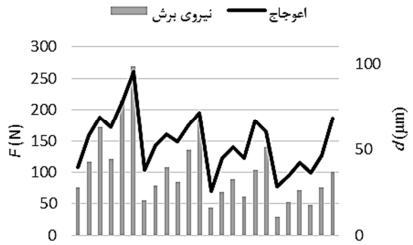
به‌طور مشابه، در شکل ۷ دمای اندازه‌گیری شده در منطقه برش در سرعت‌های برش‌های و نرخ پیشروی مختلف برای هر دو ابزار نشان داده‌شده است با توجه به نتایج به‌دست آمده، در هر دو ابزار، درجه حرارت با سرعت برش و افزایش نرخ پیشروی افزایش یافته است و گرادیان درجه حرارت با سرعت برش بالاتر افزایش بیش‌تری داشته است. دمای تراشه ایجادشده به‌طور قابل ملاحظه‌ای در ابزار PCD از ابزار کاربید پایین‌تر است. برای مثال، در سرعت برش ۵۹۰ متر / دقیقه و با نرخ پیش روی ۱۸۰ میلی‌متر/ دقیقه، درجه حرارت اندازه‌گیری در شبیه‌سازی اجزای محدود ۱۴۱ درجه سانتی‌گراد برای ابزار PCD است (در آزمایش‌های تجربی ۱۴۹ درجه سانتی‌گراد)، درحالی‌که تحت شرایط مشابه، این درجه حرارت اندازه‌گیری شده با ابزار کاربید ۱۹۱ درجه سانتی‌گراد است (در آزمایش‌های عملی این عدد ۲۰۳ گزارش شده است). نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بین درجه حرارت در ناحیه دوم برش‌کاری با تغییر سرعت و پیشروی شبیه‌سازی شده و هم‌چنین سرعت واقعی و پیشروی در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. علت این امر استفاده از شرایط مرزی حرارتی و دمایی دقیق در شبیه‌سازی‌های انجام شده و خنک‌کاری مناسب ابزار است. حداکثر و حداقل درجه حرارت اندازه‌گیری در نرم‌افزار ۱۹۱ و ۸۵ درجه سانتی‌گراد بوده، این در حالی است که نتایج اعلام شده شرکت هایتک، ۲۰۳ و ۸۹ بوده است.

به‌طورکلی، در سطح ابزار PCD ضریب اصطکاک خیلی کمتر از ابزار کاربید است. در نتیجه در این ابزار، درجه حرارت القا شده توسط اصطکاک بر روی سطح تماس با ابزار در طول ماشین‌کاری کاهش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به کم‌تر بودن ضریب اصطکاک ابزار PCD و پارامترهای مناسب‌تر ماشین‌کاری، نیروهای و درجه حرارت دربرش به‌صورت قابل توجهی کاهش پیدا کرده‌اند، به‌طوری‌که درجه حرارت و نیروی ماشین‌کاری اندازه‌گیری شده در ابزار PCD در مجموع ۷۱ و ۶۲ درصد کمتر از ابزار کاربید بوده‌اند. در نتیجه، استفاده از ابزار PCD در ماشین‌کاری با آلیاژهای آلومینیوم ممکن است به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای ابزار کاربیدی در نظر گرفته شود.

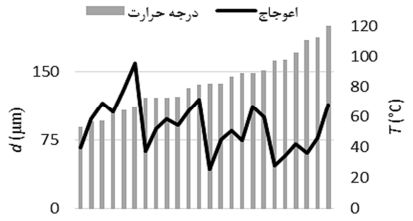
۴-۲- اثر نیروی برش‌کاری و درجه حرارت بر اعوجاج

به‌منظور مطالعه ارتباط بین ماشین‌کاری و درجه حرارت با اعوجاج، نمودار نیروی- اعوجاج و نمودار دمای- اعوجاج در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است مقدار نیروهای ماشین‌کاری و دماهای به‌دست آمده در ۲۴ آزمایش انجام شده به ترتیب صعودی به کمک یک نمودار ستونی به تصویر کشیده شده‌اند.

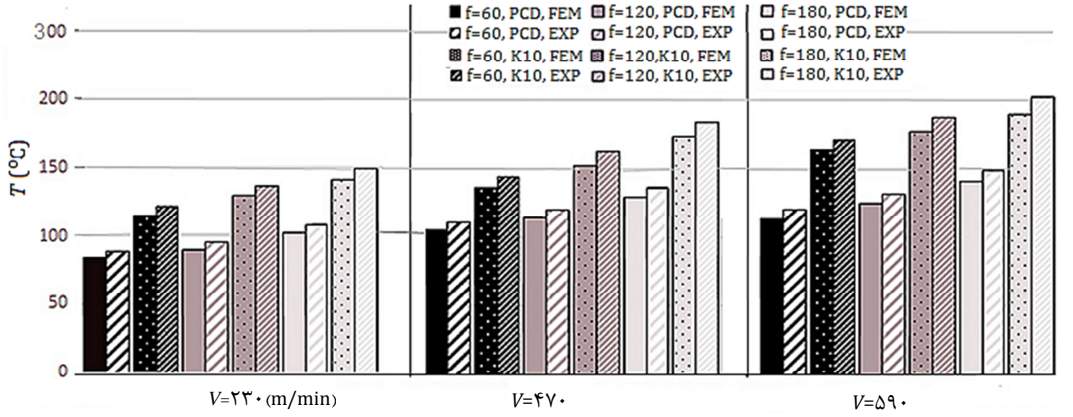
همچنین به‌منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر دما و نیروهای ماشین‌کاری در چند



شکل ۸ تغییرات اعوجاج با افزایش در نیروی ماشین‌کاری



شکل ۹ تغییرات اعوجاج با افزایش درجه حرارت



شکل ۷ توزیع درجه حرارت با تغییر سرعت برش و پیشروی برای K10 و PCD در نتایج عملی و شبیه‌سازی المان محدود

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.25.5]

نمونه قطعه‌کار در شرایط ماشین‌کاری مختلف خاص، مقدار اعوجاج شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار در جدول ۶ به نمایش درآمده است. به‌طورکلی از نمودارهای شکل ۸ و ۹ برداشت می‌شود که نوسانات اعوجاج قطعه‌کار که با افزایش دما بیشتر شده‌اند، می‌تواند به علت تغییر در نیروهای اندازه‌گیری شده در هر آزمون مرتبط باشد. به‌عنوان مثال، در قطعات شماره ۳ و ۴ در جدول ۳ (ستون ۶ و ۷ در شکل ۹) درجه حرارت یکسان ۱۰۸ درجه سانتی‌گراد است، یک اختلاف زیاد در اعوجاج دارند. این تفاوت به علت تفاوت بالا در نیروی اندازه‌گیری شده از این دو قطعه است. قطعه کاری که نیروی بیشتری تحمل کرده است (شماره ۳ در جدول ۶) دارای اعوجاج بیشتری است. با توجه به قطعات شماره ۱ و ۲ در جدول ۶ که یک نیروی یکسان (۷۶ نیوتن) را دارند، مقدار اعوجاج اندازه‌گیری شده متفاوت است. هر چه درجه حرارت بالاتر رفته است، اعوجاج نیز بیشتر شده است.

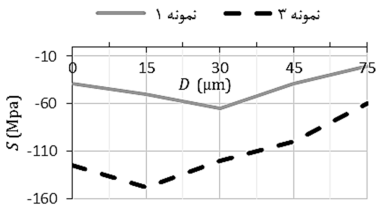
نتایج این قسمت نشان‌دهنده تأثیر مستقیم نیرو و درجه حرارت بر روی اعوجاج قطعات مورد آزمایش دارد، به‌خصوص نیروی ماشین‌کاری اثر بیشتری در اعوجاج قطعه کار جدار نازک در مقایسه با درجه حرارت دارد. تغییر در نیروها در این آزمایش‌ها با درجه حرارت یکسان، باعث مقدار اعوجاج متفاوت شد و منجر به نوسانات شدیدتری در نمودار نیرو- اعوجاج نسبت به دما- اعوجاج شد. حتی می‌توان ادعا کرد که با توجه به این‌که نمودار دما- اعوجاج روند خاصی را دنبال نمی‌کند، این امر به دلیل نبود روند مشخص در تغییر نیروهای ماشین‌کاری بوده است.

۴-۳- اثر نیروی برش‌کاری و درجه حرارت بر توزیع و مقدار تنش پسماند

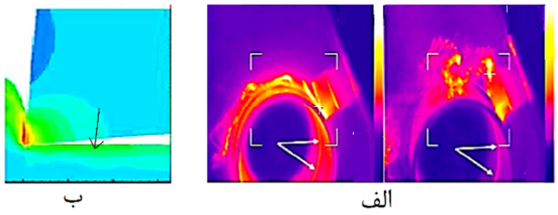
برای نشان دادن تأثیر نیروی ماشین‌کاری بر تنش، برای نمونه‌های ۱ و ۳ در جدول ۶ (کمترین و بیشترین نیرو) مقدار و توزیع تنش پسماند در جهت

جدول ۶ چند نمونه از نرخ اعوجاج قطعه کار تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری

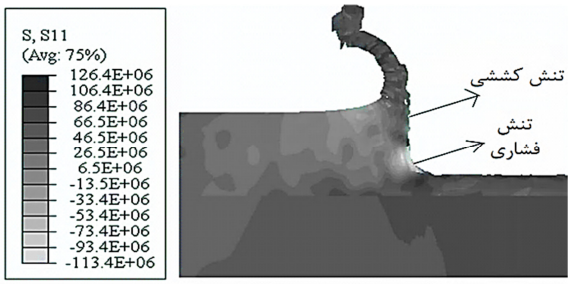
نمونه	V	f	tool	F	T	d
۱	۵۹۰	۱۲۰	K10	۷۶	۲۰۳	۶۵
۲	۲۳۰	۶۰	PCD	۷۶	۹۵	۵۸
۳	۲۳۰	۱۸۰	PCD	۱۷۲	۱۰۸	۶۹
۴	۳۵۰	۱۲۰	PCD	۱۳۶	۱۰۸	۵۲



شکل ۱۰ توزیع و مقدار تنش پسماند در جهت طول برش‌کاری برای نمونه ۱ و ۳ در جدول ۶



شکل ۱۱ انتقال قسمتی از گرمای تولید شده به منطقه برش‌کاری الف) آزمایش‌های تجربی ب) کانتور دما در شبیه‌سازی اجزای محدود



شکل ۱۲ کانتور تنش‌های پسماند در قطعه شماره یک در جدول ۶

مماسی (در امتداد محور سرعت برش) در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

با افزایش درجه حرارت، قسمتی دمای تولید شده به سطح قطعه کار منتقل می‌شود که منجر به تغییر در ساختار فلزی، انبساط محلی و اعمال تنش پسماند کششی می‌شود. این پدیده را می‌توان با استفاده از تصاویر گرفته شده توسط دوربین مادون قرمز مشاهده کرد. در قسمت الف، شکل ۱۱ تصاویری از قطعه‌کار و منطقه برش در طول آزمایش‌های تجربی در شکل نشان داده‌شده است. این تصاویر مربوط به یک آزمایش با سرعت برش ۵۹۰ متر/دقیقه و نرخ پیشروی ۱۸۰ میلی‌متر / دقیقه است که توسط ابزار PCD انجام شده است. درجه حرارت در این آزمایش ۲۰۳ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. در بخش‌هایی که توسط پیکان مشخص‌شده‌اند، یعنی در سطح داخلی قطعه کار، درجه حرارت در نوار باریک قابل‌توجهی بالاتر از مناطق دیگراست. این نشان می‌دهد که قسمتی از گرما تولید شده به‌صورت گرادیان حرارتی به قطعه‌کار منتقل‌شده است. همچنین در قسمت ب به‌خوبی شبیه‌سازی المان محدود نفوذ گرما به سطح قطعه کار را نشان داده است.

برای بررسی دقیق‌تر موضوع کانتور تنش پسماند در شکل ۱۲ برای نمونه شماره ۱ در جدول ۶ به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه مشاهده می‌شود بیشترین تنش فشاری در محل تماس ابزار و قطعه کار ایجادشده است. همچنین در محل ناحیه دوم برش به دلیل انتقال دما و گرادیان حرارتی و کم‌تر بودن میزان نیروی ابزار، این تنش‌ها کششی هستند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، عوامل مؤثر بر اعوجاج در ماشین‌کاری قطعه کار دیواره نازک ساخته‌شده از آلیاژ ساخته‌شده تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری مطالعه شده است. ارتباط بین نیروی ماشین‌کاری و درجه حرارت با اعوجاج بررسی‌شده است. نتایج به‌دست آمده را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- با توجه به ضریب اصطکاک پایین در سطح ابزار PCD و درنتیجه بهبود در شرایط برش‌کاری، نیروهای ماشین‌کاری و درجه حرارت در منطقه برش در این ابزار به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای پایین‌تر از ابزار K10 است. در ابزار PCD، گرادیان درجه حرارت و نیروی ماشین‌کاری حدوداً ۷۰٪ و ۶۲٪ پایین‌تر از ابزار K10 بود؛ بنابراین استفاده از ابزار PCD در ماشین‌کاری با آلیاژهای آلومینیوم ممکن است به‌عنوان یک جایگزین مناسب باشد.

۲- نتایج نشان‌دهنده اثر مستقیم نیروی برش و درجه حرارت بر سطح اعوجاج در قطعات کار دیواره نازک است. افزایش در نیروی و درجه حرارت منجر به افزایش در اعوجاج می‌شود. بااین‌حال، در مقایسه بارهای حرارتی، بارهای مکانیکی تأثیر بیشتری در اعوجاج قطعه‌کاردارند. همچنین در ماشین‌کاری توسط ابزار PCD با توجه به نیروی و درجه حرارت کم‌تر، اعوجاج کاهش می‌یابد.

۳- اعمال نیروی مکانیکی و گرادیان حرارتی در قطعه‌کار در طول

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.25.5]

ماشین‌کاری، توزیع تنش پسماند را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش تنش‌های پسماند، اعوجاج و بی‌ثباتی در قطعه کار افزایش می‌یابد. 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 افزایش احتمال تشکیل تنش پسماند کششی را افزایش می‌دهد.

٦- فهرست علائم

A_1 تنش سیلان اولیه (MPa)

A سطح محصور(cm^2)

B تنش سیلان ثانویه (MPa)

C_p ظرفیت گرمایی ویژه ابزار (j/ kgºC)

D عمق برش(μm)

f سرعت پیشروی (mm/min)

F نیروی برش (N)

H ارتفاع قطعه کار (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 ضریب هدایتی براده ($Wm^{-1}K^{-1}$)

$K10$ کاربید سمانته

L طول برش (mm)

L_1 طول ابزار (mm)

m ضریب حساسیت نرخ کرنش

n توان کرنش سختی

PCD الماس چندبلوری

P_{fr} انرژی حاصل از اصطکاک لغزشی (j)

q شار گرمایی واردشده (j)

r شعاع نوک ابزار (mm)

S تنش (MPa)

T دما (ºC)

T_0 دمای محیط (ºC)

T_1 دمای ابزار در تماس با محیط (ºC)

U جابجایی قطعه کار (mm)

V سرعت برش (ms^{-1})

علائم یونانی

α زاویه سطح براده

β زاویه آزاد

ε کرنش الاستیک

$\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش پلاستیک

$\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش پلاستیک مرجع

ε_f کرنش شکست

μ ضریب اصطکاک

ρ چگالی (kgm^{-3})

η کسری انرژی اصطکاکی تبدیل‌شده به حرارت

زیرنویس

c براده

melt ذوب

room اتاق

t ابزار

x محور برش

y عمود بر محور برش در صفحه برش‌کاری

۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از استاد محترم جناب آقای دکتر سعید امینی که در امر معرفی این طرح و اهمیت آن، نقش به سزائی داشتند، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌نمایند.

۸- مراجع

[1] M. Popma, *Computer aided process planning for high-speed milling of thin-walled parts Strategy-based support*, PhD Thesis, Department of Engineering Technology, Twente University, Amsterdam, 2010.

[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] 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.

[4] 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.

[5] H. Lio, 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.

[6] 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 .

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] N. T. Nguyen, O. S. Seo, C. A. Lee, M. G. Lee, J. H. Kim, H. Y. Kim, Mechanical behavior of AZ31B Mg alloy sheets under monotonic and cyclic loadings at room and moderately elevated temperatures, *Materials*, Vol.7, No.2, pp. 1271-1295, 2014.

[11] M. R. Movahhedy, *ALE simulation of chip formation in orthogonal metal cutting process*, PhD Thesis, Department of Engineering Technology, British Columbia University, Canada, 2010.

[12] 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.

[13] B. Gholamzadeh, M. J. Nategh, H. Soleimanimehr, M. Shankayi, An Investigation on the Effect of Vibrational Parameters on Tool Temperature in Ultrasonic Assisted Turning, *Aerospace Mechanics*, Vol.9, No.3, pp. 9–17, 2013. (In Persian)

[14] 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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.25.5]