

## انتخاب بهینه پارامترهای ماشینکاری برای کاهش تغییر شکل ناشی از تنش پسماند در فرزکاری یک قطعه آلومینیومی

حسین ترابیان

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران، ایران

محمد جلوخانی نیارکی

دکتری، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

چکیده:

تنش‌های پسماند در فرآیند ساخت قطعات مهندسی ایجاد می‌شوند که از عوامل موثر بر عملکرد قطعات مهندسی هستند. فرآیندهای تولید منجر به ایجاد تنش‌های پسماند متفاوت در قطعات می‌گردد که این تنش‌ها تاثیر چشمگیری روی رفتار و خواص مواد مهندسی و قطعات سازه ای، عمر خستگی، اعوجاج، پایداری ابعادی، مقاومت در برابر خوردگی و شکست ترد دارند که هزینه تعمیر و نگهداری را افزایش می‌دهد. بنابراین در طراحی قطعات سازه‌ای حساس آنالیز تنش پسماند الزامیست. در این مقاله سعی شده تا پارامترهای موثر بر ایجاد تنش‌های پسماند در نرم افزارهای تحلیلی و شرایط آزمایشگاهی مشخص شده و با برخی روشهای عملی و تحلیلی مثل روش تاگوچی و نرم افزار **Deform** بتوانیم این تنش‌ها را مهار کرده و در حد لازم از بین ببریم. نتایج نشان می‌دهد پارامترهای برش (سرعت برش، تغذیه، شعاع نوک ابزار، مقدار پیشروی و...) تاثیر بسیار زیادی در تنش‌های پسماند دارند. زیاد بودن قطر ابزار و افزایش تعداد دندانهای ابزار برش باعث کم شدن نیروهای مکانیکی و حرارتی می‌شود در نتیجه تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد. ابزارها را حتما قبل از کندشدن از سیستم خارج نموده و با ابزار تیز جایگزین نمایید زیرا ابزار کند باعث افزایش حرارت و نیروهای مکانیکی و در نتیجه افزایش تنش پسماند می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تنش‌های پسماند، آنالیز تنش‌های پسماند، پارامترهای موثر بر تنش‌های پسماند، پارامترهای برش



## ۱ مقدمه

تنش‌های پسماند به آن دسته از تنش‌ها اطلاق می‌شود که پس از انجام عملیات خاصی در جسم باقی مانده و ناشی از بارگذاری خارجی نباشند. تنش‌های پسماند در حالت خود تعادلی بوده و برآیند نیروها و کوپل‌های حاصل از این تنش‌ها صفر می‌باشد. (۱) هنگامی که یک جسم دارای تنش پسماند تحت بارگذاری خارجی قرار می‌گیرد، تنش‌های ناشی از بار خارجی به این تنش‌ها افزوده می‌شود. بطور کلی همه فرآیندهای ساخت و مونتاژ از جمله فرزکاری، ریخته‌گری، جوشکاری، ماشین کاری، عملیات حرارتی و غیره، از عوامل ایجاد تنش پسماند در قطعات تولید شده هستند (۲). در حالت کلی تنش‌های پسماند به دو گروه میکروسکوپی و ماکروسکوپی تقسیم شده و روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری تجربی تنش‌های پسماند وجود دارد که برخی از این روش‌ها مبتنی بر آزادسازی تنش و سپس اندازه‌گیری کرنش حاصل می‌باشند. هر یک از این روش‌ها با ویژگی خاص خود در شرایط مختلفی به کار می‌روند از جمله مخرب، غیر مخرب و غیره. تنش‌های پسماند یکی از عوامل تاثیرگذار بر عملکرد قطعات مهندسی هستند (۳). این نوع تنش‌ها در فرآیند ساخت قطعات صنعتی در آنها ایجاد می‌شوند. فرآیندهای تولید منجر به ایجاد تنش‌های پسماند متفاوت در قطعات می‌گردند. رفتار و خواص مواد مهندسی و قطعات سازه‌ای، به خصوص عمر خستگی، اعوجاج، پایداری ابعادی، مقاومت در برابر خوردگی و شکست ترد، می‌توانند به طور قابل ملاحظه‌ای توسط تنش‌های پسماند تاثیر پذیر باشند که می‌تواند هزینه تعمیرات و نگهداری قطعات را افزایش دهد (۴). بنابراین آنالیز تنش‌های پسماند یک مرحله الزامی در طراحی قطعات سازه‌ای حساس می‌باشد (۵) با توجه به افزایش روزافزون تولید قطعاتی از جنس آلومینیوم در صنایعی مثل هوافضا، حمل‌ونقل و بسته‌بندی، تولید این قطعات با دقت ابعادی و هندسی بالا از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است. از جمله فرآیندهای تولیدی قطعات آلومینیومی، فرآیند فرزکاری است، از جمله پارامترهای موثر بر دقت ابعادی قطعه پارامترهای برشی، نیروهای فیکسچر، نیروهای مکانیکی، نیروهای حرارتی هستند (۶). آقای هانگ در سال ۲۰۱۵ میلادی با بررسی تاثیر هندسه ابزار در توزیع تنش‌های پسماند در ماشینکاری آلیاژ آلومینیومی 7050-T751 به این نتیجه رسید که تنش‌های پسماند در زیر سطح تولید شده در انتهای فرآیند فرزکاری، فشاری است و شعاع نوک ابزار، زاویه آزاد سطح و قطر نمونه در انتهای فرزکاری تاثیر قابل توجه‌ای در تنش پسماند دارند. (۷) آقای کیونگ وی یو و داپن لی و ای- دو زانگ در سال ۲۰۱۶ میلادی روشی را بدست آوردند که با استفاده از یک روش به ظاهر شبیه سازی، تغییر شکل در یک مجموعه با آلیاژ آلومینیومی ۷۰۷۵ یک پارچه را بدست آورند. ماکزیمم تغییر شکل در حدود ۲۰ درصد است. خطای دستگاه کم و بیشترین آن در حدود ۱۰ درصد است که با سایر روشهای FEM و روشهای تجربی مقایسه شده است. (۸) آقای یائو در سال ۲۰۱۶ میلادی معتقد است که ماکزیمم تنش پسماند فشاری در عمق و لایه‌ها به میزان قابل توجه‌ای افزایش پیدا می‌کند و بعد از عملیات ساچمه زنی باعث می‌گردد توزیع تنش‌های پسماند سخت شود که نتیجتاً فرآیند خوبی است (۹). آقای جیانگ در سال ۲۰۱۷ میلادی اشاره دارد به کوچک شدن ضریب اصطحاک K توسط مقدار پایین برداشت فلز که به نسبت آن تنش‌های پسماند کاهش پیدا می‌کند (۱۰). آقای جوما در سال ۲۰۱۷ میلادی اثبات می‌کند تغذیه برحسب دندان، سرعت برش و اثر متقابل مابین ابزار برش، روش فرزکاری و محیط خشک در کیفیت سطح در قطعات فرزکاری شده تاثیر می‌گذارد (۱۱). آقای چون هو ای جی و همکارانش در سال ۲۰۱۸ میلادی بر روی دو نمونه چهارگوش و مثلث از جنس آلیاژ آلومینیومی ۲۲۱۹ تحقیقاتی انجام دادند که شش وضعیت با پارامترهای یکسان و دو پارامتر متفاوت که در همه پارامترها تنش‌های فشاری و کششی تولید می‌شود و خصوصیات توزیع تنش‌های پسماند در سطح به صورت چشمگیری تغییر می‌کند و با افزایش عمق محوری تنش‌های پسماند کششی تولید می‌شود. زمان برش طولانی بسیار خطرناک است و خصوصیات توزیع تنش‌های پسماند تغییر پیدا می‌کند (۱۲).

در این تحقیق با انجام مجموعه‌ای از فرآیندهای فرزکاری برای ایجاد شیار به عرض ۸/۴۸ میلی متر بر روی قطعه‌ای از جنس AA 2014 – T6 به بررسی پارامترهای ورودی از جمله سرعت برشی، سرعت پیشروی، عمق برش و هندسه شیار



بر پارامترهای خروجی از جمله میزان اعوجاج پرداخته می شود. سپس پارامترهای مذکور با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش ها و شبیه سازی، برای به دست آوردن کمترین میزان اعوجاج توسط الگوریتم های تاگوچی، سطح پاسخ و شبکه عصبی بهینه سازی می شوند. هدف از این تحقیق شناسایی عوامل ایجاد اعوجاج بر روی شیار قطعه های خاص و نیز بررسی پارامترها و عوامل موثر در کاهش اعوجاج موجود به کمترین میزان خود است.

## ۲- مواد و روش ها

در این آزمایش با استفاده از روش تاگوچی و نرم افزار **Deform** یکسری از پارامترهایی که در این نرم افزار در ایجاد تنش های پسماند موثر است مورد آزمایش قرار گرفته و یکسری از پارامترهایی که در این نرم افزار ارایه نگردیده و بسیار مهم می باشد در فرآیند ماشینکاری و در عمل مورد آزمایش قرار می گیرند.

### ۲-۱- خصوصیات آلیاژ آلومینیومی AA-2014:

در مورد خصوصیات آلومینیوم **AA-2014** می توان این را گفت که به علت داشتن درصد بالاتر مس نسبت به سایر ترکیبات در آن خود به تنهایی تنش را می باشد.

Chemical Composition Limits												
Weight%	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Mg	Ni	Zn	Ti+Zr	Ti	Other Each
2014a AECMA	Rem	0.50 - 0.90	0.50 max	3.9 - 5.0	0.4 - 1.2	0.10 max	0.2 - 0.8	0.1 max	0.25 max	0.20 max	0.15 max	0.05 max
2014 USA	Rem	0.50 - 1.20	0.7 max	3.9 - 5.0	0.4 - 1.2	0.10 max	0.2 - 0.8	-	0.25 max	-	0.15 max	0.05 max

جدول ۱: خصوصیات آلیاژ آلومینیومی AA-2014

تمامی مقادیر طبق روش تاگوچی مورد ارزیابی قرار گرفته و بهترین اندازه برای کاهش مقدار تنش پسماند و به دنبال آن کمتر شدن مقدار انحراف از اندازه در روش تجربی لحاظ گردیده است.

۱- خشن کاری با فرز ۶۰ و دور اسپیندل **n= 2000** دور بر دقیقه مقدار پیشروی ۰.۴ و مقدار تغذیه ۰.۴ عرض شیار را به ۶.۲ میلیمتر می رساند. به مدت ۱۰ روز نگه می داریم تا تنش های آن آزاد شود.

۲- در کوره در دمای ۱۹۰°C به مدت ۲ ساعت قرار می دهیم و ۲ ساعت نیز در هوا می گذاریم تا خنک شود. در شکل (۳-۳) نشان داده شده است و سپس به مدت ۲ روز می گذاریم تا تنش های آن آزاد شود.

۳- با فرز ۶۰ عرض شیار به اندازه ۷ میلیمتر در یک مرحله با تغذیه ۰.۴ با دور اسپیندل **n=2500** دور بر دقیقه می رسانی و به مدت ۲ روز می گذاریم تا تنش های آن آزاد شود

۴- با فرز ۶۰ عرض شیار به اندازه ۷.۶ میلیمتر در یک مرحله با تغذیه ۰.۴ با دور اسپیندل **n=2500** دور بر دقیقه می رسانی و به مدت ۲ روز می گذاریم تا تنش های آن آزاد شود.

۵- با فرز ۶۰ عرض شیار به اندازه ۸ mm در یک مرحله با تغذیه ۰.۳ با دور اسپیندل **n= 3500** دور بر دقیقه می رسانی.



شکل ۱: فرزکاری جهت اندازه نهایی

۶- کنترل ابعادی :

تنش های پسماند باعث می شود که ۳ اندازه تولید شود:

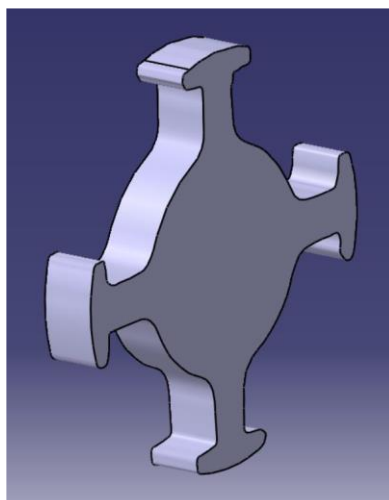
۱ - اندازه ۸.۲: با فرز به قطر ۶۰ به اندازه نهایی می رسانیم (۸.۴۸ میلیمتر)

۲-اندازه ۸.۳: با فرز به قطر ۶۰ به اندازه نهایی می رسانیم (۸.۴۸ میلیمتر)

۳-اندازه ۸.۴۳: با فرز به قطر ۴۰ به اندازه نهایی می رسانیم (۸.۴۸ میلیمتر)

۳-۵- مدل سازی، مدل اجزا محدود و خواص مواد :

ابتدا مدل مربوطه را در نرم افزار سالیدورک طراحی کرده و با فرمت **save, stl** کرده و در نرم افزار **deform** وارد می کنیم که در شکل ۲ نشان داده شده است.

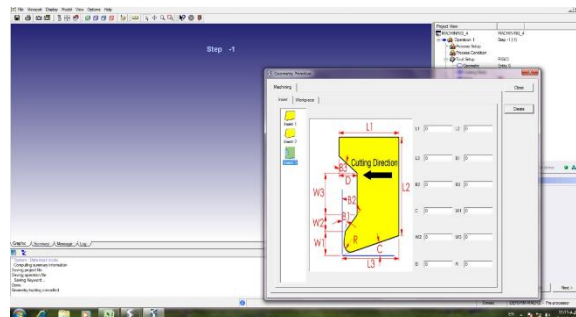


شکل ۲: مدل اولیه در نرم افزار سالیدورک

بر اساس جدول ارایه شده، سرعت سطح را برحسب متر بر دقیقه یا سرعت دوران را برحسب دور بر دقیقه تعیین می کنیم و نرخ تغذیه را تعیین می کنیم. دمای محیط کار را ثبت کرده و در قسمت وجه مشترک ابزار و قطعه کار ۲ گزینه را انتخاب می

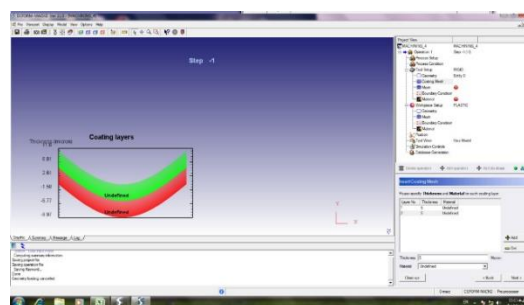


کنیم فاکتور اصطکاک و ضریب انتقال حرارت را تعیین و دمای ابزار را انتخاب می کنیم. برای تعیین هندسه ابزار گزینه **Import abjection** را انتخاب کرده هندسه ابزار را طبق شکل (۳) تعیین می کنیم.



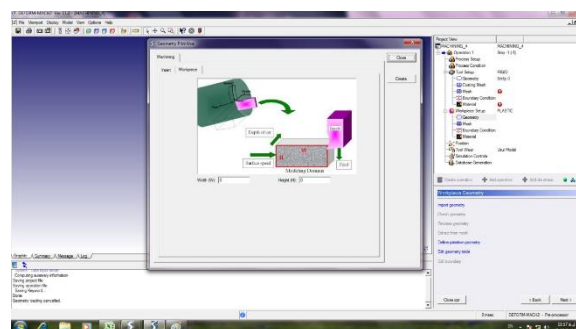
شکل ۳: تعیین هندسه ابزار

بعد از انتخاب هندسه ابزار و کلیک کردن گزینه **Next**، پوشش بر روی ابزار را مشخص کرده (مقدار و نوع پوشش را تعیین می کنیم) شکل ۴



شکل ۴: تعیین نوع و مقدار پوشش


جنس ابزار را از گزینه اول (**Import Material From Library**) انتخاب کرده، بعد از انتخاب جنس ابزار نوبت به انتخاب ابعاد قطعه نمونه می باشد. در قسمت **wokepiece Geometry** گزینه **Define Primitive Geometry** را انتخاب کرده و ابعاد مورد نظر را تعیین کرده و گزینه **Next** را کلیک می کنیم. شکل ۵

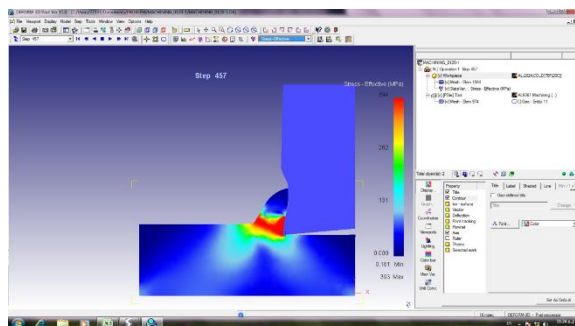


شکل ۵: تعیین ابعاد قطعه مورد نظر

پس از تعریف روابط بین قطعات با کلیک بر روی آیکون داده (**Database Generation**)، به ایجاد فایل (DB) نهایی می پردازیم. پس از باز شدن پنجره ایجاد فایل داده، با کلیک بر دکمه **Check** تعاریف ایجاد شده برای شبیه سازی توسط نرم افزار بررسی می شود در صورت وجود خطا یا مشکل در مسیر آنالیز آنها را می توان با رنگ قرمز یا زرد مشاهده نمود. در

صورت مشاهده این پیام ها آنها را قبل از ایجاد فایل داده باید تصحیح یا بر طرف نمود. اگر طی بررسی نرم افزار همه موارد دارای تیک سبز رنگ باشند متوجه می شویم که مراحل انجام شده درست و صحیح بوده است و پس از آن توسط کلید **Generate** می توان فایل **DB** را تولید نمود. در این پنجره می توان مسیر ذخیره فایل داده را تعیین نمود.

پس از آغاز شبیه سازی می توان با کلیک کردن بر روی آیکون **Simulation Graphics** یک مرحله ما قبل از **Step** در حال آنالیز را مشاهده نمود و تغییرات در دما، سرعت، تنش، کرنش، نرخ کرنش، جابجایی و عیوب را مشاهده کرد. همچنین در این محیط گرافیکی می توان با استفاده از آیکون  از نوار ابزار شکل (۶) قطعه ای را که بر روی آن آنالیز انجام می شود به صورت تنها و منفرد مورد ارزیابی قرار داد. بعد از **Run** شدن قطعه، وارد محیط **post-processor** یا پس پردازش می شویم. در این قسمت می توانیم به صورت گرافیکی عملیات را چک کرده و داده ها را نیز توسط این بخش استخراج نماییم. شکل (۶).



شکل ۶: محیط گرافیکی عملیات و چک کردن داده ها

### ۳-۴- شرح آزمایش:

فاکتورهای زیادی از قبیل بارهای مکانیکی، نیروهای حرارتی، پوشش، ساختارهای فلزی و نوع دانه بندی می تواند تاثیر نه چندان کمی بر تنش های پسماند داشته باشد اما یکسری از پارامترها مانند سرعت برش، نرخ تغذیه، هندسه ابزار و ... را می توان با نرم افزارهای متعددی از قبیل **Deform** طراحی و از آن خروجی گرفته و از طریق روش تاگوچی به بهترین حالت ممکن که کم شدن تنش های پسماند می باشد رسید. ابتدا به وسیله روش تاگوچی فاکتورهای قابل بررسی را وارد کرده که در جدول ۲ نشان داده شده است و با استفاده از نرم افزار **Deform** آن را تحلیل می کنیم و پارامترهایی را که می توانیم در عمل ایجاد کنیم را پیاده سازی می نماییم.

	speed	feed	temp insert	geometry	factor	length cutter
۱	۲۵۰	۰,۱۵	۲۰	۱	۰,۴۸	۱
۲	۳۰۰	۰,۱	۱۵	۲	۰,۵	۱,۵
۳	۳۵۰	۰,۱۲	۱۸	۳	۰,۵۲	۱,۷
۴	۴۰۰	۰,۱۳	۱۷	۴	۰,۵۳	۱,۸
۵	۴۵۰	۰,۱۴	۱۶	۵	۰,۵۴	۱,۹

جدول ۲: پارامترهای قابل بررسی به روش تاگوچی با روش نرم افزار Deform

Factor	Speed	Feed	Temp insert	Geometry	Factor	Length cutter
Rank	۱	۵	۴	۳	۳	۳

جدول ۳: پارامترهای نهایی توسط روش تاگوچی با روش نرم افزار Deform



بر اساس جدول ۳ سیگنال به نویز مربوطه و با توجه به معیار کوچکتر بهتر، نتایج زیر بدست می آید:

- سطح بهینه : **Speed** حالت اول
- سطح بهینه : **feed** حالت پنجم
- سطح بهینه : **temp insert** حالت چهارم
- سطح بهینه : **geometry** حالت سوم
- سطح بهینه : **factor** حالت سوم
- سطح بهینه : **length cutter** حالت سوم

با در نظر گرفتن این سطوح میزان استرس بهینه معادل ۲۸۱.۸ خواهد بود. در مرحله دوم پارامترهای برش که لازمه فرآیند فرزکاری می باشد (جدول ۴) در نرم افزار **Deform** تعبیه نگردیده است را توسط روش تاگوچی آنالیز کرده و با کمترین آزمایش به بهترین پارامتر می رسیم جدول (۵).

Factor	day	Feed	turning speed	diameter tools	advance magnitude
۱	۱۲	۰,۳	۳۵۰۰	۲	۴۰۰
۲	۱۰	۰,۴	۲۵۰۰	۴	۶۰۰
۳	۷	۰,۵	۲۰۰۰	۶	۸۰۰
۴	۲	۰,۶	۱۵۰۰	۸	۱۰۰۰

جدول ۴: پارامترهای مطرح در فرآیند فرزکاری جدول

day	Feed	turning speed	diameter tools	advance magnitude	measure deviation
۱	۱	۱	۱	۱	۰,۱۵
۱	۲	۲	۲	۲	۰,۲
۱	۳	۳	۳	۳	۰,۱۹
۱	۴	۴	۴	۴	۰,۱۲
۲	۱	۲	۳	۴	۰,۲۲
۲	۲	۱	۴	۳	۰,۲۱
۲	۳	۴	۱	۲	۰,۲۲
۲	۴	۳	۲	۱	۰,۲۱
۳	۱	۳	۴	۲	۰,۱۲
۳	۲	۴	۳	۱	۰,۰۸
۳	۳	۱	۲	۴	۰,۲
۳	۴	۲	۱	۳	۰,۲۲
۴	۱	۴	۲	۳	۰,۱۳
۴	۲	۳	۱	۴	۰,۱۵
۴	۳	۲	۴	۱	۰,۱۳
۴	۴	۱	۳	۲	۰,۱۷

جدول ۵ : جدول آزمایشات ارایه شده به روش تاگوچی با روش عملی

Factor	Day	Feed	Turning speed	Diameter tools	Advance magnitude
Rank	۱	۱	۲	۴	۳

جدول ۶: پارامترهای نهایی تاگوچی به روش عملی



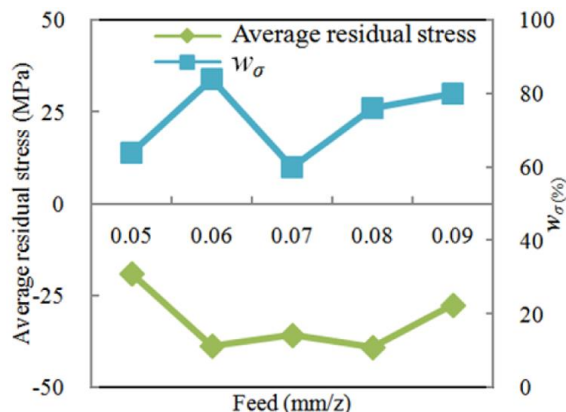
بر اساس جدول ۶ سیگنال به نویز مربوطه و با توجه به معیار کوچکتر بهتر، نتایج زیر بدست می آید:

- سطح بهینه : **Day** حالت اول (۱۲ روز)
- سطح بهینه : **Feed** حالت اول (۰.۳ میلی متر)
- سطح بهینه : **Turning Speed** حالت دوم (۲۵۰۰ دور بر دقیقه)
- سطح بهینه : **Diameter tools** حالت چهارم (۸ میلیمتر)
- سطح بهینه : **Advance magnitude** حالت سوم (800 میلیمتر در دقیقه)

### یافته ها

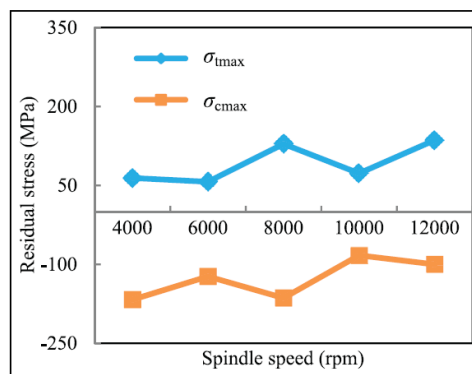
روشهای متنوع و گوناگونی برای حذف تنش‌های کششی پسماند و بستن ترکهای سطحی موجود ارائه شده اند از جمله فرآیندهای تنش زدایی، که پس از انجام فرآیند ساخت، در قطعه انجام میشود، میتوان به تنش زدایی به وسیله گذشت زمان اشاره کرد. این روش علاوه بر سادگی فرآیند و پایین بودن هزینه آن، باعث حذف تنشهای موجود در این ناحیه میشود و حتی در مواردی موجب تبدیل شدن تنشهای پسماند از حالت کششی به فشاری خواهد شد. این مسأله تأثیر بسزایی در افزایش عمر خستگی قطعه نهایی دارد. اساس عملکرد این روش، از این جهت است که قطعه با دمای کوره خنک می شود. در روش رها کردن قطعه در کوره، زمان فرایند بسیار طولانی خواهد بود و قطعه در معرض خطراتی از جمله خوردگی (ناشی از رطوبت محیط) و تغییر شکل (تاب دار شدن) قرار دارد. از طرفی این روش در نهایت منجر به کاهش تنش باقیمانده در قطعه خواهد شد. انجام عملیات حرارتی آنیل بر روی قطعه منجر به تغییر ریزساختار قطعه میشود. به عبارت دیگر این عملیات حرارتی باعث درشت شدن اندازه دانه ها و کاهش استحکام مکانیکی قطعه خواهد شد. به علاوه این روش برای سازه‌های بزرگ و ترکیب‌های خاص همراه با مشکلات تکنولوژیکی نظیر ابعاد کوره انجام عملیات و محدودیت دمای است. همانطور که در نتایج مشاهده شد در فاکتور اول که مقدار روز نگهداری می‌باشد (۱۲ روز) اعلام گردیده است، به علت آنکه هر چه قدر زمان بگذرد تنش‌های ایجاد شده برا اثر ماشینکاری آزاد می‌شوند. یکی از فاکتورهایی که در تعیین تنش‌های پسماند در ماشینکاری مهم و حیاتی است فاکتور نسبت تغذیه می باشد. با افزایش مقدار نسبت تغذیه تنش‌های پسماند کششی در سطح و زیر سطح افزایش پیدا یافته و طبق شکل (۷) تنش پسماند با نسبت تغذیه رابطه مستقیم دارد. زمانی که نسبت تغذیه از ۰.۰۵ تا ۲.۵ میلیمتر باشد ماکزیمم تنش پسماند کششی بسیار کوچک است و اندازه تنش‌های پسماند کششی در حدود کمتر از ۵۰ مگا پاسگال است. ماکزیمم اندازه تنش‌های پسماند فشاری تغییر کرده و بین ۱۰۰- تا ۱۶۴- مگا پاسگال می باشد. اندازه متوسط تنش‌های پسماند فشاری به صورت محدود بین ۱۵.۷- تا ۳۸.۷- می باشد که از ایجاد ترک و طولانی شدن عمر قطعه جلوگیری می کند. به طور کلی هر دوی این تنش ها به اندازه محدود ایجاد می شوند.





شکل ۷: رابطه نسبت تغذیه و تنش پسماند

با توجه به شکل (۷) ماکزیمم تنش پسماند کششی رفته رفته از ۶۴ به ۱۳۶ مگاپاسکال افزایش یافته و ماکزیمم تنش‌های پسماند فشاری از ۱۶۷ به ۱۰۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. زمانی که سرعت اسپیندل افزایش می‌یابد (از ۴۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه) به صورت برجسته یک تغییر شکل مکانیکی در همه پارامترهای برش ایجاد می‌شود که تمایل دارد تنش‌های پسماند فشاری تولید کند. اگر سرعت اسپیندل پایین باشد مقدار تغییر شکل مکانیکی کوچکتر از سرعت اسپیندل بالا است و مقدار تنش‌های پسماند فشاری بیشتر می‌شود. اگر چه زمانی که سرعت برش بیشتر از ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش پیدا کند حرارت ناشی از برش که تغییر شکل گرمایی را تحریک کرده را تولید می‌کند، که هر کدام تمایل دارند تنش پسماند کششی تولید کنند که مقدار تنش‌های پسماند فشاری کاهش پیدا می‌کند. به این معنا که سرعت تا ۱۰۰۰۰۰ دور بر دقیقه برای ماشینکاری مناسب می‌باشد و از آن به بعد تنش‌های پسماند کششی تولید و به نسبت آن تنش‌های پسماند فشاری کم می‌شود.



Maximum residual stress on pocket surface under five levels of spindle speeds.

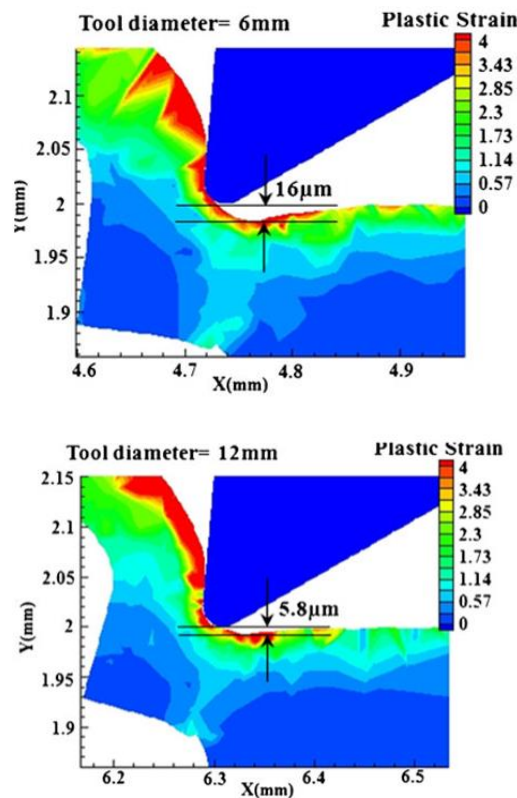
Activate Windows  
Go to PC settings to act

شکل ۸: رابطه سرعت اسپیندل و تنش پسماند

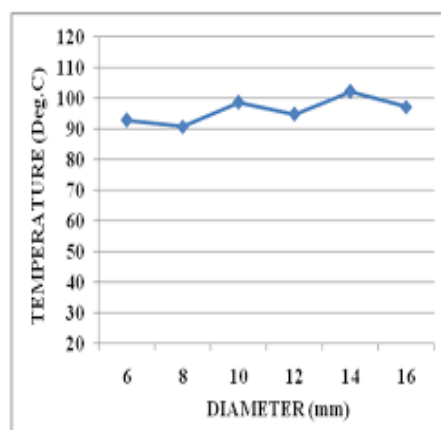
باتوجه به نتایج تعیین پارامتر انتخاب قطر ابزار و تاثیر قطر ابزار بر روی تنش پسماند یک رابطه ای بین تنش پسماند و ضخامت براده بریده نشده به نام (UCT) وجود دارد. در این شیوه پیشنهاد می‌شود قطر ابزار فرزکاری را طوری بهینه انتخاب کنیم که باعث کاهش UCT شود. با افزایش قطر ابزار، توزیع تنش‌های پسماند کششی که قابل توجه هم است، کاهش پیدا می‌کند (اندازه آنها از ۱۳.۹ به ۳۴.۷٪) و مقدار براده برداری بهینه می‌شود. با افزایش قطر ابزار UCT کاهش پیدا می‌کند.



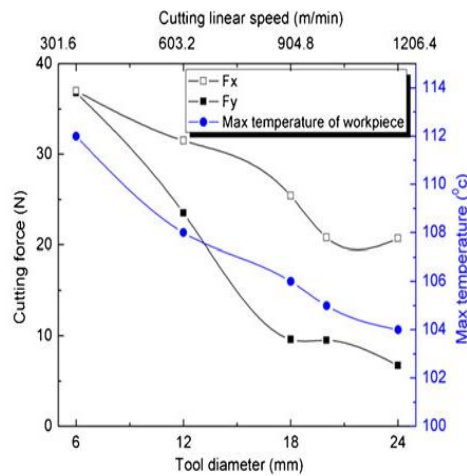
در ماشینکاری دو حالت صورت می گیرد: نیروهای برش و گرادیان حرارتی. که با افزایش قطر ابزار نیروهای برش کاهش پیدا می کند. از این گذشته تنش های پسماند مماسی به وسیله نیروهای برشی و گرادیان حرارتی ایجاد می شود. هنگامیکه تنش های پسماند شعاعی که اساسا به وسیله نیروهای برشی تولید می شوند سرعت برداشت فلز بهبود پیدا می کند. با افزایش قطر ابزار، ماکزیمم اعوجاج ابزار از ۴۴۶.۳ به ۱۷۱ میکرومتر کاهش پیدا کرده و تغییر شکل پلاستیک به خوبی انجام می شود.



شکل ۹: رابطه ما بین قطر ابزار و مقدار ارتعاش ناشی از ماشینکاری

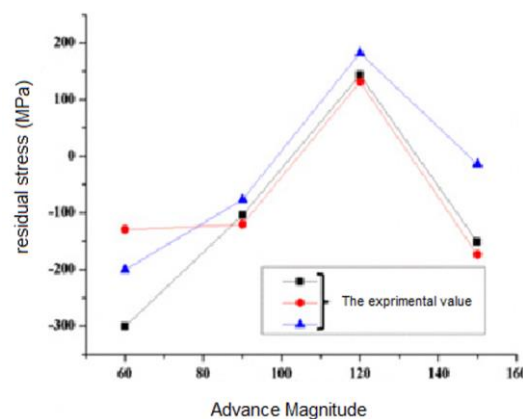


شکل ۱۰: رابطه ما بین قطر ابزار و حرارت



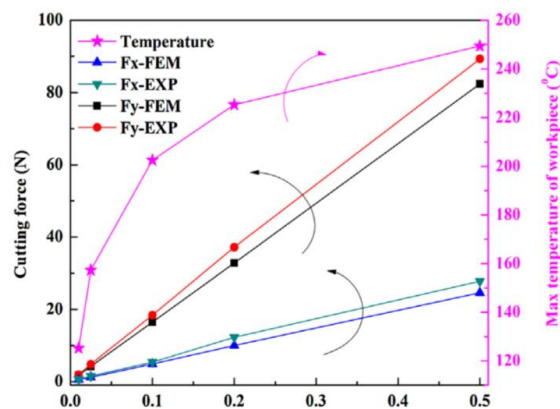
شکل ۱۱: رابطه مابین قطر ابزار و نیروی برشی

اصولا زمانی که مقدار پیشروی پایین است، تنش های پسماند محوری هم جهت تنش های پسماند فشاری و به تدریج با افزایش مقدار پیشروی به تنش های پسماند کششی تبدیل می شوند اما دوباره با افزایش مقدار پیشروی به تنش های پسماند فشاری تبدیل می شوند. به خوبی می توان فهمید که تنش های پسماند از ترکیب تنش های حرارتی، مکانیکی و فاکتورهای تغییر شکل ایجاد می شود. زمانی که مقدار پیشروی کم باشد تنش های مکانیکی برجسته شده و تولید تنش پسماند می کند که نتیجه آن تنش پسماند فشاری است. اما زمانی که مقدار پیشروی زیاد باشد تنش های حرارتی و فاکتورهای تغییر شکل زیاد می شوند. زمانی که مقدار پیشروی از ۰.۰۶ میلی متر بر دقیقه به ۰.۱۲ میلی متر بر دقیقه تبدیل می شود نیروهای محوری تمایل دارند که از تنش های فشاری به تنش های کششی تبدیل شوند و زمانیکه مقدار پیشروی رو به افزایش می شود تنش های پسماند کششی به تدریج کاهش پیدا کرده و تنش های پسماند فشاری به تدریج افزایش پیدا میکند.

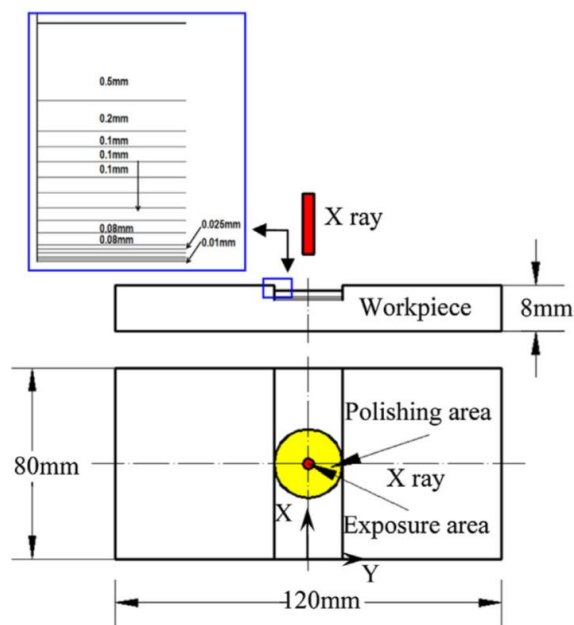


شکل ۱۲: رابطه مابین مقدار پیشروی و تنش های پسماند گوناگون

دو منبعی وجود دارد که تنش پسماند تولید می کند، معمولا نیروی برشی که به صورت تجربی و تحلیلی مقایسه شده است و حرارت ناشی از برش که به صورت تحلیلی نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که نتایج تجربی و شبیه سازی با هم تطابق دارند. اگر عمق برش افزایش پیدا کند، ماکزیمم نیرو در X و Y در یک جهت تمایل دارند که به صورت خطی رشد می کنند. علاوه بر آن ماکزیمم حرارت ناشی از برش در سطح ماشینکاری شده با افزایش عمق برش افزایش پیدا می کند. که تنش های پسماند ایجاد شده طبق نقشه اندازه گیری می شود.



(a)



(b)

شکل ۱۳: رابطه بین نیروی برشی و حرارت ناشی از ماشینکاری

طبق شکل تنش های پسماند کششی و فشاری در زیر سطح وجود دارد. (پایین تر از ۴۰۰ میکرومتر) قبل از عملیات حرارتی غیر یکنواخت است. اندازه سختی در اسپیندل، نگهدارنده ابزار، کولت و سختی ابزار برش، پارامترهایی هستند که به غیر از پارامترهای برش مطرح می شوند. مساوی نبودن نیروهای برش در هر گردش دندانه ها، ناشی از توزیع غیر یکنواخت اندازه زاویه در هر گردش دندانه ها می باشد. سطوح شبیه سازی شده و آزمایش شده نشان می دهد متغیر بودن شعاع ابزار برش می تواند در کاهش و افزایش تنش های پسماند و در نتیجه خطاهای ابعادی موثر باشد. طبق نتایج بدست آمده هرچه نرخ تغذیه بالاتر باشد تنش پسماند کمتر می شود. سرعت دوران به علت زمان کمتر برخورد تیغه به فلز و در نتیجه حرارت کمتر بین آن دو باعث کمتر شدن تنش پسماند می شود.



## نتیجه گیری

از نتایج بدست آمده نشان می دهد پارامترهای برش (سرعت برش، تغذیه، شعاع نوک ابزار، مقدار پیشروی و ...) تاثیر بسیار زیادی در تنش های پسماند دارند. هرچه قدر نرخ تغذیه بالاتر باشد تنش پسماند بیشتر و کیفیت سطح نیز کاهش می یابد و هرچه سرعت دوران بیشتر باشد تنش پسماند بیشتر می شود. زیاد بودن قطر ابزار و افزایش تعداد دندانه های ابزار برش باعث کم شدن نیروهای مکانیکی و حرارتی شده در نتیجه باعث کم شدن تنش های پسماند می گردد. یکسری از قطعات ذاتا دارای تنش های پسماند می باشند که قطعه مورد آزمایش از جنس AA-2014 که دارای بالاترین درصد مس 3.9-5.0 درصد می باشد. برای کاهش تنش پسماند ابتدا قطعه را با ابزار مورد نظر خشن کاری کرده و به مدت ۶ الی ۱۴ روز در محیط گذاشته تا تنش های پسماند آن کاهش یابد. برای نگهداری قطعه هر چقدر نیروی نگهداری کمتر باشد تغییرات کمتر می باشد. ابزارها حتما قبل از کند شدن از سیستم خارج گشته و ابزار تیز وارد سیستم کرده زیرا ابزار کند باعث افزایش حرارت و نیروهای مکانیکی و در نتیجه افزایش تنش پسماند می شود. در ماشینکاری جهت برش کاری همیشه به سمت پایین باشد (جهت تشکیل کریستال). اگر قطعات ابتدا فورج می شوند و بعد از آن ماشینکاری می شوند ۹۰ درصد مشکلات ناشی از ماشینکاری به علت فورج کاری بدون اصول می باشد که ضربه زدن در موقع فورج بر روی هم یکی از این نمونه ها می باشد.

## مراجع

- 1- Chatelain J, F Lalonde J, F Tahan A, Effect of residual stresses embedded within workpieces on the distortion after machining, INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICS, 2012, Issue 1, Volume 6, 43-51
- 2- Tang Z, T Yu T, Xu L, Q Liu Z, Q Machining deformation prediction for frame components considering multifactor coupling effects, Int J Adv Manuf Technol, 1-10
- 3- Madhava Reddy S, Chennakesava Reddy A, Studies on process parameter in end milling operation of aluminium alloy, International Journal of Engineering Research & Technology(IJERT), 2013, Issue 3, Vol 2, 1-5
- 4- Jiang X, Li B, Yang J, Yan Zuo X, Effect of tool diameters on the residual stress and distortion induced by of thin-walled part, Int J Adv Manuf Technol, 2013
- 5- Timothy W. Spence a, Makhlof M. Makhlof effect of machining-induced residual stresses on the creep characteristics of aluminum alloys materials Science & Engineering A630(2015)125–130
- 6- Wu Q, Li DP and Zhang YD. Detecting milling deformation in 7075 aluminum alloy aeronautical monolithic The components using the quasi-symmetric machining method. Metals 2016; 6: 80–94.
- 7- Huang X, Sun J and Li J. Experimental investigation of the effect of tool geometry on residual stresses in high Speed milling 7050-T7451 aluminum alloy. Int J Surf Sci Eng 2015; 9: 359–369.
- 8- Wu Q, Li DP and Zhang YD. Detecting milling deformation in 7075 aluminum alloy aeronautical monolithic components using the quasi-symmetric machining method. Metals 2016; 6: 80–94.
- 9- Yao C, Dou X, Wu D, et al. Surface integrity and fatigue analysis of shot-peening for 7055 aluminum alloy under different high-speed milling conditions. Adv Mech Eng 2016; 8: 1–10
- 10- Jiang X, Zhang Z, Ding Z, et al. Tool overlap effect on redistributed residual stress and shape distortion produced by the machining of thin-walled aluminum parts. Int J Adv Manuf Tech 2017; 93: 2227–2242.
- 11- Jomaa W, Levesque J, Bocher P, et al. Optimization study of dry peripheral milling process for improving aeronautical part integrity using Grey relational analysis. Int J Adv Manuf Tech 2017; 91: 931–942.
- 12- Chunhui Ji, Shuangqiu Sun, Bin Lin and Jixiong Fei. Effect of cutting parameters on the residual stress distribution generated by pocket milling of 2219 aluminum alloy. Advances in Mechanical Engineering 2018,



**Hossein Torabian**  
Assistant Professor, College of Engineering and  
Technology, Islamic Azad University, Tehran  
Center, Tehran, Iran

**Mohammad jelokhani Niaraki**  
Ph.D., College of Engineering and Technology,  
Islamic Azad University, Tehran West Branch,  
Tehran, Iran

### Abstract:

Residual stresses are created in the manufacturing process, which are affecting on performance of engineering parts. Production processes lead to the creation of different residual stresses in parts. These stresses have a significant effect on the behavior and properties of materials, fatigue life, distortion, dimensional stability, resistance to corrosion and brittle fracture, which increases the cost of maintenance. Therefore, it is necessary to analyze the residual stress in the design of sensitive parts. In this article, it has been tried to determine the effective parameters on the creation of residual stresses in analytical software and laboratory conditions, and with some practical and analytical methods such as Taguchi method and Deform software, then we can control these stresses. The results show that cutting parameters (cutting speed, feed, tool tip radius, advance amount, etc.) have a great effect on residual stresses. The large diameter of the tool and the increase in the number of teeth of the cutting tool reduce the mechanical and thermal force. As a result, residual stresses are reduced. You must replace slowing tools by sharp tools, because slow tools increase heat and mechanical forces, resulting in an increase in residual stress.

**Keywords:** Residual stresses, analysis of residual stresses, parameters affecting residual stresses, cutting parameters