

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

# بررسی پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات دوار به وسیله فرآیند کشش عمیق داغ

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

نام دانشجو

ابوذر بریمانی ورنندی

استاد راهنما:

دکتر سید جمال حسینی پور

استاد مشاور:

مهندس سید محمد علینقی مداح

بهمن ماه ۱۳۹۲

تقدیم به:

وجود نازنین مادرم:

آن دریای بی‌کران مهربانی که اگر فداکاری و صبرش نبود مرا یارای تحصیل علم و دانش نبود و گرمای وجودش نیز شوق زندگی را در من زنده نگه نمی‌داشت.

و پدرم:

آن که استقامت را همواره به من آموخت.

## تشکر و قدردانی:

حمد و سپاس شایسته پروردگاریست که بشر را قدرت تفکر و تحصیل علم بخشید.

سپاس و تقدیر فراوان از استاد فرزانه جناب آقای دکتر سید جمال حسینی‌پور که با قبول زحمت در همه‌ی مراحل آفرینش این تحقیق با سعه‌ی صدر و حوصله‌ی روشنگری نمودند که آنچه از این خوشه‌چینی حاصل آمد نتیجه‌ی رهنمودهای خالصانه و کارگشای ایشان بود و هر آینه اگر هدایت و لطف ایشان نبود نیل به این مقصود برایم میسر نمی‌شد.

بر خود لازم می‌دانم از پرسنل محترم کارگاه ماشین‌ابزار صنایع دانشگاه، آقایان مهندس مهدی فلاحتی و مهندس هومن بهساز برای کمک‌های بی‌دریغشان در زمینه کارگاهی که همواره دلسوزانه مرا از راهنمایی‌ها و تجارب خود بی‌بهره نگداشته‌اند و همچنین دکتر گرجی تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از دوست عزیزم مهندس میلاد پرمه برای همیاری در آزمایشگاه شکل‌دهی گاز، مهندس احسان خسروجردی که در انجام شبیه‌سازی کمک بسیار شایانی به اینجانب نموده و مهندس مداح مشاور این پایان‌نامه کمال تشکر و قدردانی را دارم.



نام و نام خانوادگی: ابوذر بریمانی ورندي

رشته کارشناسی و دانشگاه: مهندسی مکانیک (ساخت و تولید) - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

رشته و گرایش کارشناسی ارشد: مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

تاریخ فراغت از تحصیل: ۹۲/۱۱/۸

میانگین کل کارشناسی ارشد: ۱۷/۱۸

استاد راهنمای پایان نامه: دکتر سید جمال حسینی پور

استاد مشاور پایان نامه: مهندس سید محمد علینقی مداح

موضوع پایان نامه: بررسی پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات دوار به وسیله فرآیند کشش عمیق داغ

## چکیده پایان نامه:

کشش عمیق از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی ورق به شمار می‌آید. ویژگی این فرآیند در تولید قطعاتی با هندسه پیچیده، استحکام بالا و وزن کم می‌باشد. به منظور افزایش شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیوم در فرآیند کشش عمیق و با توجه به مشکلات شکل‌پذیری این آلیاژها در دمای اتاق استفاده از فرآیندهای شکل‌دهی گرم ضروری است. اغلب پژوهش‌های انجام شده در خصوص آلیاژهای آلومینیوم در محدوده شکل‌دهی گرم تا حداکثر دمای  $350^{\circ}\text{C}$  می‌باشد که نتایج حاکی از برتری حالت گرادیانی نسبت به حالت همدما است. لذا در این پایان‌نامه فرآیند کشش عمیق گرم گرادیانی قطعات استوانه‌ای از ورق آلیاژی آلومینیوم ۵۰۸۳ با ضخامت ۲mm تا محدوده‌ی شکل‌دهی داغ و تا دمای  $550^{\circ}\text{C}$  به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. جهت اعمال گرادیان حرارتی، ناحیه فلنج بلنک توسط حرارت‌دهی قالب گرم شده و خنک‌سازی مرکز بلنک به‌منظور افزایش مقاومت آن توسط سنبه آبگرد انجام شد. آزمایش‌ها در دو حالت نیروی ورقگیر ثابت و متناوب صورت گرفته است. برای حالت نیروی ثابت تاثیر پارامترهای هندسه‌ی اجزای قالب، روانکار، دما و سرعت شکل‌دهی بصورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی شده

و تاثیر این پارامترها بر روی خروجی‌هایی مثل نیروی سنبه، نسبت کشش حدی، توزیع ضخامت و توزیع دما مورد بحث و تحلیل قرار گرفت. در حالت نیروی متناوب نیز تاثیر پارامتر دمای شکل‌دهی و نحوه‌ی اعمال نیروی اولیه ورقگیر بصورت تجربی و شبیه‌سازی بر روی نیروی سنبه، نسبت کشش حدی و توزیع ضخامت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش دما در ناحیه فلنچ بلنک و همچنین خنک‌سازی مرکز بلنک منجر به بهبود نسبت کشش حدی می‌شود. برای حالت نیروی ورقگیر ثابت، در دمای شکل‌دهی  $550^{\circ}\text{C}$  و سرعت رم  $378\text{ mm/min}$  با روانکاری پودر گرافیت نسبت کشش حدی  $2/83$  حاصل شد. در نهایت با ترکیبی از شبیه‌سازی اجزای محدود در اعمال نیروی ورقگیر متناوب و همچنین آزمایش‌های تجربی، پارامترهای مناسب برای حالت نیروی تناوبی نیز حاصل شد.

**کلمات کلیدی:** کشش عمیق گرم‌گرادیانی، آلیاژ آلومینیوم، نسبت کشش حدی.

## فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات
۱-۱-۱-۱	مقدمه
۲-۱-۱-۲	فرآیند کشت عمیق و کاربردهای آن
۳-۱-۱-۳	مکانیزم فرآیند کشت عمیق
۴-۱-۱-۴	عیوب در فرآیند کشت عمیق
۱-۴-۱-۱	چروکیدگی
۲-۴-۱-۲	گوشوارهای شدن
۳-۴-۱-۳	پارگی
۵-۱-۱-۵	ضرورت استفاده از فرآیند کشت عمیق گرم
۶-۱-۱-۶	فرآیندهای کشت عمیق گرم
۷-۱-۱-۷	روش های حرارت دهی ورق در فرآیند کشت عمیق گرم گرادینانی
۸-۱-۱-۸	مروری بر پایان نامه
۱۴	فصل ۲: مروری بر پژوهشهای پیشین
۱-۲-۱-۱۵	مروری بر پژوهشهای انجام شده در فرآیند کشت عمیق گرم گرادینانی
۲-۲-۱-۲۳	مروری بر پژوهشهای انجام شده در حالت گرم همدم
۳-۲-۱-۲۵	مروری بر پژوهشهای انجام شده برای مقایسه حالت گرم گرادینانی و حالت همدم
۴-۲-۱-۲۸	مروری بر پژوهشهای انجام شده برای روشهایی نوین اعمال نیروی ورقگیر
۵-۲-۱-۳۱	شرح مساله و هدف از انجام پژوهش
۳۳	فصل ۳: مراحل آزمایشگاهی
۱-۳-۱-۳۴	معرفی تجهیزات استفاده شده در آزمایشها
۳-۱-۱-۳۴	دستگاه پرس
۲-۳-۱-۳۶	ابزار بندی فرآیند کشت عمیق گرم گرادینانی
۱-۲-۳-۳۶	مجموعه قالب کشت عمیق
۲-۲-۳-۳۸	تجهیزات اعمال نیروی ورقگیر متناوب
۳-۲-۳-۴۷	واحد کنترل دما
۳-۳-۱-۴۸	مراحل انجام آزمایش
۲-۳-۳-۵۱	نیروی ورقگیر متناوب
۴-۳-۱-۵۵	وسایل اندازه گیری
۵-۳-۱-۵۶	روانکاری
۵۷	فصل ۴: شبیه سازی اجزای محدود
۱-۴-۱-۵۸	معرفی نرم افزار شبیه سازی
۱-۱-۴-۵۹	مراحل شبیه سازی

- ۶۰-۱-۴-۲- ایجاد مدل هندسی .....  
 ۶۱-۱-۴-۳- تعیین ویژگی‌های ماده .....  
 ۶۲-۱-۴-۴- مونتاژ قطعات .....  
 ۶۲-۱-۴-۵- تعیین مراحل شکلدهی .....  
 ۶۴-۱-۴-۶- تعیین تماس بین سطوح .....  
 ۶۵-۱-۴-۷- شرایط مرزی و بارگذاری .....  
 ۶۶-۱-۴-۸- المان بندی .....  
 ۶۷-۱-۴-۹- تحلیل فرآیند .....  
 ۶۸-۱-۴-۱۰- گرفتن خروجی از نرم افزار .....  
 ۶۸-۱-۴-۱۱- معیار پارگی در نرم افزار .....  
 ۶۸-۱-۴-۱۲- معرفی پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی

#### ۶۹ فصل ۵: نتایج و بحث

- ۷۰-۱-۵- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی .....  
 ۷۲-۲-۵- اثر هندسی اجزای قالب .....  
 ۷۷-۳-۵- اثر روانکار بر فرآیند کشش عمیق گرم‌گرادیانی .....  
 ۷۹-۴-۵- اثر دما بر نیروی اولیه ورقگیر .....  
 ۸۲-۵-۵- اثر دماهای شکل‌دهی بر نسبت کشش حدی .....  
 ۸۶-۵-۶- کیفیت سطح قطعات شکل‌گرفته .....  
 ۸۷-۵-۷- اثر دمای شکل‌دهی بر توزیع ضخامت .....  
 ۹۳-۵-۸- اثر دمای شکل‌دهی بر گرادیان دما .....  
 ۹۵-۵-۹- اثر سرعت شکل‌دهی بر نیروی سنبه در دماهای مختلف .....  
 ۱۰۲-۵-۱۰- اثر سرعت شکل‌دهی بر نسبت کشش حدی در دماهای مختلف .....  
 ۱۰۳-۵-۱۱- اثر سرعت شکل‌دهی بر توزیع ضخامت در دماهای مختلف .....  
 ۱۰۵-۵-۱۲- اثر سرعت شکل‌دهی بر گرادیان دما .....  
 ۱۰۸-۵-۱۳- مقایسه دو روش کشش عمیق نیروی ورقگیر متناوب و نیروی ورقگیر ثابت .....  
 ۱۰۸-۵-۱۳-۱- مقایسه نیروی سنبه .....  
 ۱۱۰-۵-۱۳-۲- مقایسه نسبت کشش حدی .....  
 ۱۱۳-۵-۱۳-۳- مقایسه توزیع ضخامت

#### ۱۱۶ فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۱۱۷-۱-۶- نتیجه‌گیری .....  
 ۱۱۸-۲-۶- پیشنهادها

#### ۱۲۰ مراجع

#### ۱۲۳ پیوست‌ها



## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) شماتیک فرآیند کشش عمیق..... ۳
- شکل (۲-۱) قطعات کشش عمیق یافته با نیروی ورقگیر نامناسب (الف) نیروی زیاد (ب) نیروی کم..... ۵
- شکل (۳-۱) چروکیدگی در فرآیند کشش عمیق..... ۶
- شکل (۴-۱) گوشواره‌ای شدن در فرآیند کشش عمیق..... ۶
- شکل (۵-۱) پارگی در فرآیند کشش عمیق..... ۷
- شکل (۶-۱) میانگین استفاده از آلومینیوم طی سال های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۹..... ۹
- شکل (۸-۱) مونتاژ نهایی تجهیزات آزمایشگاهی برای اعمال گرادیان حرارتی در فرآیند کشش عمیق گرم..... ۱۳
- شکل (۱-۲) تاثیر سرعت سنبه بر روی نسبت کشش حدی در دماهای مختلف شکل دهی..... ۱۶
- شکل (۲-۲) منحنی های تنش- کرنش مهندسی در دماهای مختلف شکل دهی..... ۱۶
- شکل (۳-۲) پروفیل ضخامتی مقطع عرضی فنجان..... ۱۷
- شکل (۴-۲) نام گذاری مناطق مختلف برای حالت گرادیانی..... ۱۸
- شکل (۵-۲) ضخامت قطعه در مناطق مختلف..... ۱۹
- شکل (۶-۲) عیوب در نتایج به ترتیب از بالا به پایین، آزمایشگاهی، شبیه سازی و ... ۱۹
- شکل (۷-۲) نتایج تست های کشش عمیق گرم گرادیانی با تعیین موفقیت و گسیختگی در شکل دهی..... ۲۱
- شکل (۸-۲) مقایسه تغییرات نیرو سنبه در نتایج شبیه سازی و تجربی جهت تعیین ضرایب اصطکاکی مناسب..... ۲۱
- شکل (۹-۲) مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی برای منحنی های نیرو- جابجایی در دماهای مختلف..... ۲۲
- شکل (۱۰-۲) تاثیر نرخ کرنش بر روی نمای n برای آلیاژ آلومینیومی ۵۰۸۳ حاصل از تست های کشش دو محوره..... ۲۳
- شکل (۱۱-۲) تاثیر نرخ کرنش بر روی نمای m برای آلیاژ آلومینیومی ۵۰۸۳ حاصل از تست های کشش دو محوره..... ۲۴
- شکل (۱۲-۲) قطعات کشش عمیق یافته با نسبت های کشش (الف) ۳ (ب) ۲/۵ (ج) ۲..... ۲۴
- شکل (۱۳-۲) دیاگرام حد شکل دهی در دماهای (الف) ۲۰۰°C (ب) ۱۰۰°C..... ۲۵
- شکل (۱۴-۲) مقایسه شرایط مختلف فرآیندی..... ۲۶
- شکل (۱۵-۲) تغییرات نسبت کشش حدی با دما..... ۲۶
- شکل (۱۶-۲) توزیع ضخامت در جهت نصف النهاری برای استراتژی های مختلف..... ۲۸
- شکل (۱۷-۲) قالب به همراه تجهیزات ABS..... ۲۹
- شکل (۱۸-۲) مقایسه منحنی نیرو- جابجایی در روش لقی ثابت و ABS..... ۲۹
- شکل (۱۹-۲) مقایسه ارتفاع قطعه در دو روش سنتی و ABS..... ۳۱
- شکل (۱-۳) پرس هیدرولیک ۵۰ تن..... ۳۵
- شکل (۲-۳) دستگاه آزمایش اونیورسال DMG..... ۳۵
- شکل (۳-۳) شماتیک مونتاژی مجموعه قالب کشش عمیق..... ۳۶
- شکل (۴-۳) اجزای مجموعه قالب کشش عمیق..... ۳۷
- شکل (۵-۳) تصویر سه بعدی مجموعه ی مونتاژی تجهیزات اعمال نیروی ورقگیر متناوب در نرم افزار Catia..... ۳۸
- شکل (۶-۳) نمای دوبعدی مجموعه ی مونتاژی تجهیزات اعمال نیروی ورقگیر متناوب در نرم افزار Catia ... ۳۹
- شکل (۷-۳) میل لنگ و یاتاقان های ایگرگ..... ۴۰
- شکل (۸-۳) میله ی نوسان کننده..... ۴۱
- شکل (۹-۳) محفظه بلبرینگ..... ۴۲
- شکل (۱۰-۳) تسمه شیاردار و پولی ها..... ۴۳

- شکل (۱۱-۳) الکتروموتور ۳ فاز HP ۱/۵..... ۴۴
- شکل (۱۲-۳) دستگاه تراش افقی اونیورسال..... ۴۴
- شکل (۱۳-۳) دستگاه فرز عمودی اونیورسال..... ۴۵
- شکل (۱۴-۳) دستگاه مته رادیال اونیورسال..... ۴۵
- شکل (۱۵-۳) مجموعه‌ی مونتاژی قالب‌های کشش عمیق به همراه تجهیزات اعمال نیروی ورقگیر متناوب..... ۴۶
- شکل (۱۶-۳) تجهیزات مونتاژی اعمال گرادیان حرارتی..... ۴۸
- شکل (۱۷-۳) فنرهای فولادی اعمال نیروی ورقگیر..... ۴۹
- شکل (۱۸-۳) دستگاه تست فشار SANTAM..... ۵۰
- شکل (۱۹-۳) دورسنج قابل حمل..... ۵۲
- شکل (۲۰-۳) تغییرات نیروی ورقگیر در مدت زمان یک نوسان برای حالات مختلف در دمای محیط..... ۵۴
- شکل (۲۱-۳) نمونه‌ی شکل یافته‌ی برش خورده در جهت نورد با نام‌گذاری نواحی مختلف..... ۵۶
- شکل (۲۲-۳) تجهیزات اندازه‌گیری استفاده شده..... ۵۶
- شکل (۱-۴) مونتاژ اجزای قالب و بلنک در شبیه‌سازی..... ۶۲
- شکل (۲-۴) مش‌بندی بلنک و اجزای قالب در حالت مونتاژ شده..... ۶۷
- شکل (۱-۵) توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه شکل یافته در دمای محیط (۲۵°C) ... ۷۰
- شکل (۲-۵) توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه شکل یافته در دمای ۱۵۰°C با نسبت کشش معین ... ۷۱
- شکل (۳-۵) تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای محیط (۲۵°C) و سرعت ۶۰ mm/min ... ۷۱
- شکل (۴-۵) تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای ۱۵۰°C و سرعت ۲۰۰ mm/min در قطر بلنک ۷۵mm..... ۷۲
- شکل (۵-۵) نمونه‌هایی شکل گرفته در دمای محیط با شعاع گوشه سنبه و ... ۷۳
- شکل (۶-۵) منطقه شکست در دمای محیط با شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه حفره‌ی قالب (mm) به ترتیب ۶ و ۶..... ۷۴
- شکل (۷-۵) نمونه‌هایی شکل گرفته در دمای محیط با شعاع گوشه سنبه و ... ۷۴
- شکل (۸-۵) نتایج شکل‌دهی یکسان در حالت تجربی و شبیه‌سازی برای شکل‌دهی در شعاع‌های مختلف ... ۷۵
- شکل (۹-۵) نتایج شبیه‌سازی برای شکل‌دهی در شعاع‌های مختلف در دمای ۱۵۰°C..... ۷۵
- شکل (۱۰-۵) نمونه شکل یافته در دمای ۱۵۰°C در شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه حفره‌ی قالب (mm) به ترتیب، ۸، ۸..... ۷۷
- شکل (۱۱-۵) نمونه‌های شکل یافته با روانکاری (قطر بلنک) ... ۷۸
- شکل (۱۲-۵) نسبت‌های کشش حدی حاصله برای روانکارهای مختلف در دمای ۱۵۰°C..... ۷۹
- شکل (۱۳-۵) نمونه شکل گرفته در دمای محیط..... ۸۰
- شکل (۱۴-۵) نمونه‌های شکل گرفته در نیروهای ورقگیر مشخص در دمای محیط ... ۸۰
- شکل (۱۵-۵) نتایج تجربی تاثیر دمای شکل‌دهی بر نیروی ورقگیر..... ۸۱
- شکل (۱۶-۵) مقایسه نسبت کشش حدی حاصله از نتایج تجربی با نتایج ناکا ... ۸۲
- شکل (۱۷-۵) تغییرات نسبت کشش حدی در دماهای مختلف شکل دهی در سرعت ۳۷۸mm/min..... ۸۳
- شکل (۱۸-۵) بزرگترین نمونه‌های شکل گرفته‌ی سالم در دماهای مختلف..... ۸۴
- شکل (۱۹-۵) توزیع کرنش ضخامتی برای نمونه‌های شکل گرفته در دمای محیط و ۱۵۰°C در سرعت ۳۷۸ mm/min..... ۸۵
- شکل (۲۰-۵) توزیع کرنش ضخامتی برای نمونه‌های شکل گرفته در دماهای ۲۵۰°C و ۵۵۰°C در سرعت ۳۷۸ mm/min..... ۸۵
- شکل (۲۱-۵) نمونه‌های شکل گرفته در دماهای به ترتیب از راست به چپ، محیط، ۱۵۰°C، ۴۵۰°C..... ۸۶
- شکل (۲۲-۵) توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه شکل یافته در دمای ۸۰°C..... ۸۷
- شکل (۲۳-۵) توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه شکل یافته در دمای ۱۸۰°C..... ۸۸
- شکل (۲۴-۵) توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه شکل یافته در دمای ۲۵۰°C..... ۸۸
- شکل (۲۵-۵) توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه شکل یافته در دمای ۳۵۰°C..... ۸۹

- شکل (۲۶-۵) توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه شکل یافته در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  ..... ۸۹
- شکل (۲۷-۵) توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه شکل یافته در دمای  $550^{\circ}\text{C}$  ..... ۹۰
- شکل (۲۸-۵) توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه‌های شکل یافته در دماهای محیط ... ..... ۹۲
- شکل (۲۹-۵) توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه‌های شکل یافته در محدوده‌ی شکل دهی داغ ..... ۹۲
- شکل (۳۰-۵) توزیع کرنش ضخامتی و توزیع دما (کلوین) در ناحیه وقوع پارگی در دماهای (الف)  $150^{\circ}\text{C}$  (ب)  $450^{\circ}\text{C}$  ..... ۹۳
- شکل (۳۱-۵) توزیع دمایی (کلوین) نمونه‌های شکل یافته در دماهای کمتر از  $200^{\circ}\text{C}$  ..... ۹۴
- شکل (۳۲-۵) توزیع دمایی (کلوین) نمونه‌های شکل یافته در دماهای بیشتر  $200^{\circ}\text{C}$  ..... ۹۵
- شکل (۳۳-۵) تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای محیط ( $25^{\circ}\text{C}$ ) و سرعت  $200\text{ mm/min}$  ..... ۹۶
- شکل (۳۴-۵) تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  و سرعت  $60\text{ mm/min}$  ..... ۹۶
- شکل (۳۵-۵) تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  و سرعت  $60\text{ mm/min}$  ..... ۹۷
- شکل (۳۶-۵) تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  و سرعت  $200\text{ mm/min}$  ..... ۹۷
- شکل (۳۷-۵) تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  و سرعت  $60\text{ mm/min}$  ..... ۹۸
- شکل (۳۸-۵) تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  و سرعت  $200\text{ mm/min}$  ..... ۹۸
- شکل (۳۹-۵) توزیع تنش نصف النهاری در ارتفاع‌های مختلف شکل گرفته در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  و سرعت  $200\text{ mm/min}$  ..... ۹۹
- شکل (۴۰-۵) نتایج تجربی تغییرات نیروی بیشینه سنبه در دماهای مختلف ..... ۱۰۰
- شکل (۴۱-۵) نتایج شبیه‌سازی تغییرات نسبت کشش حدی در دما و سرعت های مختلف شکلدهی ..... ۱۰۲
- شکل (۴۲-۵) نتایج شبیه‌سازی تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  ..... ۱۰۳
- شکل (۴۳-۵) نتایج شبیه‌سازی تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  ..... ۱۰۴
- شکل (۴۴-۵) نتایج شبیه‌سازی تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  ..... ۱۰۴
- شکل (۴۵-۵) نتایج شبیه‌سازی تغییرات گرادیان دمایی در مرکز بلنک در سرعت‌های مختلف در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  ..... ۱۰۶
- شکل (۴۶-۵) نتایج شبیه‌سازی تغییرات گرادیان دمایی در مرکز بلنک در سرعت‌های مختلف در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  ..... ۱۰۶
- شکل (۴۷-۵) توزیع دمایی نمونه‌ی شکل گرفته در سرعت‌های مختلف برای دمای اولیه  $150^{\circ}\text{C}$  (۴۲۳ کلوین) ..... ۱۰۷
- شکل (۴۸-۵) نتایج شبیه‌سازی تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای محیط ( $25^{\circ}\text{C}$ ) ... ..... ۱۰۹
- شکل (۴۹-۵) نتایج شبیه‌سازی تغییرات نسبت کشش حدی در دما و حالات مختلف نیروی ورقگیر ..... ۱۱۱
- شکل (۵۰-۵) نمونه‌های شکل گرفته در نیروی ورقگیر متناوب حالت اول ... ..... ۱۱۲
- شکل (۵۱-۵) نتایج شبیه‌سازی تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای محیط ( $25^{\circ}\text{C}$ ) ..... ۱۱۳
- شکل (۵۲-۵) نتایج شبیه‌سازی تغییرات نیروی سنبه بر حسب جابجایی در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  ..... ۱۱۴
- شکل (۵۳-۵) نتایج شبیه‌سازی برای تنش وارده به بلنک (تنش فون میزز) در دمای محیط ... ..... ۱۱۵
- شکل (۵۴-۵) نتایج شبیه‌سازی برای کرنش پلاستیک وارده به بلنک در دمای محیط ... ..... ۱۱۵

## فهرست جداول

- جدول (۱-۲) نسبت‌های کشش در استراتژی‌های مختلف کشش عمیق. .... ۲۷
- جدول (۱-۳) خواص شیمیایی آلومینیوم ۵۰۸۳. .... ۴۸
- جدول (۲-۳) حالات مختلف برای اعمال نیروی اولیه ورقگیر در روش نیروی ورقگیر متناوب. .... ۵۳
- جدول (۱-۴) خواص مکانیکی الاستیک و خواص حرارتی ماده. .... ۶۱
- جدول (۲-۴) ضرایب انتقال حرارت تماسی. .... ۶۴
- جدول (۱-۵) نتایج شبیه‌سازی برای نازک شدگی نقاط بحرانی در شعاع‌های مختلف گوشه سنبه (Rd) ... ۷۶
- جدول (۲-۵) نتایج شبیه‌سازی نسبت‌های کشش حدی در حالات مختلف نیروی ورقگیر. .... ۱۱۰
- جدول (۳-۵) نتایج تجربی مقایسه نسبت‌های کشش حدی در نیروی ورقگیر متناوب حالت اول با نیروی ورقگیر ثابت. .... ۱۱۲

فصل ۱:

کلیات

## ۱-۱- مقدمه

ابداع روش‌های نوین تولید و بهبود روش‌های موجود، همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌های ذهن خلاق و جستجوگر انسان بوده است. فرآیندهای شکل دهی فلزات در بین روش‌های تولید از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و طی سال‌های اخیر نیز پیشرفت‌های زیادی در همه زمینه‌های آن حاصل شده است.

فرآیندهای شکل دهی به دو بخش عمده دسته‌بندی می‌شوند: فرآیندهای شکل دهی حجمی و فرآیندهای شکل دهی ورق. اختلاف اساسی بین این دو فرآیند این است که در فرآیندهای شکل دهی حجمی، تمام حجم قطعه اولیه که حالتی سه بعدی دارد تغییر شکل می‌یابد اما در فرآیندهای شکل دهی ورق، تنها یک تغییر شکل مومسان موضعی حادث شده که منجر به تغییر در ضخامت ورق می‌گردد. فرآیندهای شکل دهی حجمی مانند آهن‌گری، حدیده‌کاری، کشش و نورد به طور عمده فشاری هستند، اما در فرآیندهای شکل دهی ورق، کشش غالب بوده که شامل فرآیندهایی مانند برشکاری، خمکاری، شکل دهی انبساطی و کشش عمیق می‌شود [۱].

## ۱-۲- فرآیند کشش عمیق و کاربرد های آن

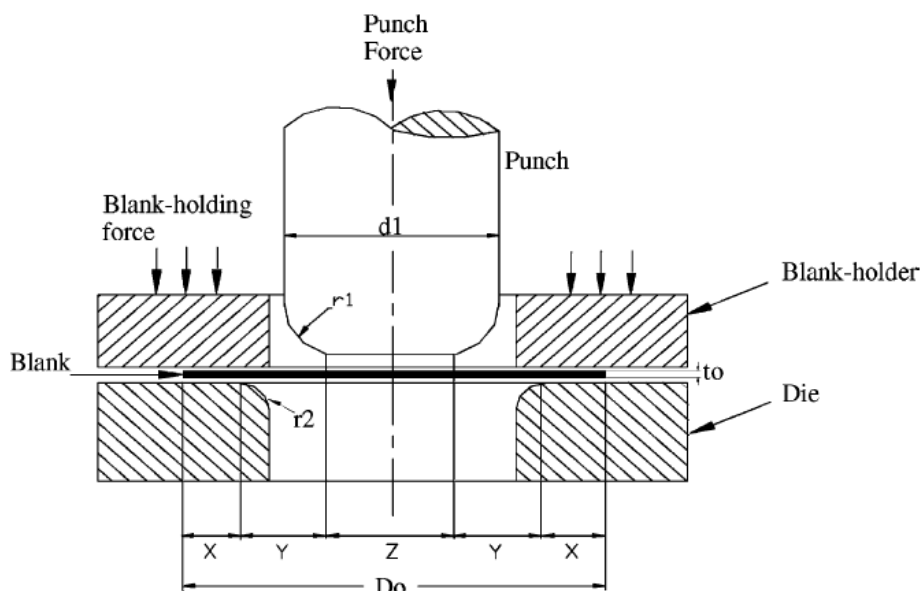
کشش عمیق از مهم‌ترین فرآیندهای شکل دهی ورق به شمار می‌آید. ویژگی این فرآیند در تولید قطعاتی با هندسه پیچیده، استحکام بالا و وزن کم می‌باشد که با سایر فرآیندهای شکل دهی قادر به تولید نیستند. این فرآیند کاربرد وسیعی در تولید قطعاتی با شکل‌های متنوع و ابعاد مختلف برای دیگر عرصه‌های تولیدی دارد. از تولیدات متداول کشش عمیق می‌توان به ظروفی با اشکال مختلف مورد استفاده در صنایع پزشکی، قطعات تولیدی در صنایع نظامی مانند پوکه فشنگ، قطعات تولیدی در صنایع خودروسازی مانند

## بررسی پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات دوار به وسیله فرآیند کشش عمیق داغ کلیات

باک بنزین و مخزن روغن خودرو، ظروف نگهداری مواد غذایی، ظرف شویی‌ها، قوطی‌های آشامیدنی، کپسول‌های گاز و CNG را نام برد [۲].

### ۱-۳- مکانیزم فرآیند کشش عمیق

ابزاربندی فرآیند کشش عمیق استوانه‌ای در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. فرم قطعه نهایی توسط فرم سنبه و قالب تعیین خواهد شد که به صورت یک فنجان کامل می‌باشد. سنبه و قالب باید شعاع مناسبی بر روی گوشه‌ها داشته تا از برش روی بلنک جلوگیری به عمل آید. وجود ورقگیر نیز جهت نگهداری بلنک در موقعیت خود با اعمال نیروی کافی، ضروری می‌باشد. در این فرآیند حدود شکل دهی توسط نسبت کشش حدی (LDR) بیان شده که بزرگترین نسبت قطر سنبه به بلنکی می‌باشد که در آن قطعه‌ای سالم با موفقیت شکل دهی شود [۳].



شکل (۱-۱) شماتیک فرآیند کشش عمیق [۴].

## بررسی پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات دوار به وسیله فرآیند کشش عمیق داغ کلیات

---

بطور خلاصه ۵ پروسه حین فرآیند کشش عمیق استوانه ای طبق شکل (۱-۱) انجام می گیرد [۴]:

۱- کشش شعاعی خالص بین قالب و ورقگیر در منطقه ی X که منجر به ضخیم شدگی ورق توسط تنش محیطی می شود.

۲- خمش و سرخوردن روی شعاع پروفیل قالب ( $r_2$ )، که مقداری نازک شدگی فلز را در پی خواهد داشت.

۳- کشش در منطقه Y که باعث نازک شدگی ماده در محل اتصال کف فنجان به دیواره ی کناری می گردد. اگر فنجانی در شکل دهی معیوب شود عموماً ناشی از شکست کششی در منطقه ی Y می باشد.

۴- خمش و سرخوردن روی شعاع پروفیل سنبه ( $r_1$ )، که منجر به وقوع مقداری نازک شدگی می گردد.

۵- انبساط و سرخوردن روی دماغه سنبه در منطقه Z که مجدداً مقداری نازک شدگی را در پی خواهد داشت.

نیروی ورقگیر یکی دیگر از فاکتورهای مهم تاثیر گذار بر شکل پذیری ورق فلزی می باشد. وقتی که این نیرو خیلی کم یا خیلی زیاد باشد به ترتیب چروکیدگی و گسیختگی را در پی خواهد داشت (شکل ۱-۲). قابل ذکر است که چروکیدگی فاکتور عمده محدود کننده ی شکل دهی بیشتر در اعمال نیروی ورقگیر بسیار کم بوده و از طرفی گسیختگی نیز فاکتور عمده در اعمال نیروی ورقگیر بسیار زیاد می باشد [۵].



## بررسی پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات دوار به وسیله فرآیند کشش عمیق داغ کلیات



شکل (۱-۲) قطعات کشش عمیق یافته با نیروی ورقگیر نامناسب (الف) نیروی زیاد (ب) نیروی کم [۵].

### ۱-۴- عیوب در فرآیند کشش عمیق

سه نوع عیب عمده در فرآیندهای کشش عمیق مستعد حادث شدن می‌باشند که عبارتند از:

(۱) چروکیدگی

(۲) گوشواره‌ای شدن

(۳) پارگی

#### ۱-۴-۱- چروکیدگی

چروکیدگی در ناحیه فلنچ اغلب بخاطر ناکافی بودن نیروی ورقگیر رخ می‌دهد (شکل ۱-۳). تنش‌های

فشاری در جهت محیطی به یک میزان بحرانی ناپایداری رسیده که در نواحی مهار نشده‌ی ورق منجر به

چروکیدگی می‌گردد [۲].

## بررسی پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات دوار به وسیله فرآیند کشش عمیق داغ کلیات



شکل (۱-۳) چروکیدگی در فرآیند کشش عمیق [۵].

### ۱-۴-۲- گوشواره‌ای شدن

فنجان تغییر شکل یافته در قسمت بالایی خود اغلب صاف و مسطح نیست و معمولاً حالتی کنگره‌ای و موجی دارد که در شکل (۱-۴) مشاهده می‌گردد، این پدیده معروف به گوشواره‌ای شدن است که در اثر ناهمسانگردی صفحه‌ای حاصله از فرآیند نورد ورق ایجاد می‌شود. این پدیده نامطلوب است زیرا در هنگام لبه‌بری باید فلز بیشتری را برید و در نتیجه ضایعات بیشتری نیز تولید خواهد شد. قابل ذکر است که با افزایش ناهمسانگردی صفحه‌ای ارتفاع گوش‌ها نیز بیشتر می‌گردد [۶].



شکل (۱-۴) گوشواره‌ای شدن در فرآیند کشش عمیق [۷].

## بررسی پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات دوار به وسیله فرآیند کشش عمیق داغ کلیات

### ۱-۴-۳- پارگی

هرگاه ورق در کرنش‌های بیشتر از حد تحملش قرار گیرد مستعد پارگی خواهد شد. ورق در ابتدا به طور یکنواخت در نواحی مستعد پارگی مانند نواحی در تماس با شعاع گوشه حفره‌ی قالب و شعاع گوشه سنبه کاهش ضخامت می‌دهد، در صورت ادامه بارگذاری و حرکت سنبه ورق به نقطه‌ای می‌رسد که تغییر شکل به صورت موضعی شکل می‌گیرد و باعث به وجود آمدن یک بانندی از منطقه کاهش ضخامت یافته به طور موضعی به نام گلوبی می‌شود و در نهایت پارگی رخ می‌دهد که در شکل (۱-۵) فنجان شکل‌دهی شده با پارگی در قسمت شعاع نوک سنبه نشان داده شده است [۲].



شکل (۱-۵) پارگی در فرآیند کشش عمیق [۷].

### ۱-۵- ضرورت استفاده از فرآیند کشش عمیق گرم

در صنعت، فولادهای کم کربن بخاطر شکل‌پذیری خوب در دمای اتاق، مقاومت و سطح پرداخت خوب و همچنین هزینه پایین عملیاتی برای مدت زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بهره‌گیری از آلیاژهای

## بررسی پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات دوار به وسیله فرآیند کشش عمیق داغ کلیات

آلومینیوم و منیزیم در این زمینه بخاطر مسایل هزینه‌ای و همچنین شکل‌پذیری پایین در دمای اتاق، بسیار پایین تر از فولاد رتبه بندی شده است [۸].

آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم نسبت به فولادها دارای ناهمسانگردی مومسانی کمتری هستند. ناهمسانگردی مومسانی که با R نشان داده می‌شود برای فولادها مقداری بیشتر از ۱ را دارد لذا این امر باعث کرنش‌های صفحه‌ای می‌شود که تغییر کمتری در ضخامت را سبب شده، در نتیجه قابلیت شکل‌پذیری بیشتری را در پی دارد. آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم R های کمتر از ۱ را دارند که این امر کرنش‌های در جهت ضخامت را افزایش داده لذا مقاومت به کاهش ضخامت کاهش یافته، در نتیجه شکل‌پذیری کمی را در دمای محیط منجر می‌شود [۱].

بسیاری از مطالعات اولیه یک افزایش چشمگیری در شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیومی سری ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ و آلیاژهای منیزیمی AZ31 و AZ61 را نشان می‌دهد. آلیاژهای آلومینیومی سری ۵۰۰۰ قابلیت کرنش سختی داشته و مشخصه‌هایی مانند استحکام نسبتا بالا، مقاومت خوردگی عالی حتی در آب شور، قابلیت جوشکاری خوب، چگالی کم و سفتی خیلی زیاد حتی در دمای تبریدی را دارا می‌باشند. این آلیاژها در صنایع خودروسازی، کشتی‌سازی و هوافضا به عنوان جایگزینی برای ورق‌های فولادی و پنل‌های پلاستیکی تقویت شده با فیبر، مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرند و کاربرد وسیعی در ساختمان‌ها، پل‌ها، صنایع دریایی، مخازن ذخیره‌سازی و سیستم‌ها و مجاری فشاری مورد استفاده در دماهای پایین دارند [۹].

میزان استفاده از آلومینیوم در سال ۱۹۶۰ طبق شکل (۱-۶) اساسا کم بوده است که دلیل اصلی آن مشکلات شکل‌دهی و همچنین میزان کم آلیاژهای در دسترس در آن زمان می‌باشد. در گذشته محصولات اصلی تولیدی توسط آلومینیوم مانند موتورها، تایرها و اگزوزها، ریخته‌گری می‌شدند. شکل (۱-۶) میانگین استفاده از آلومینیوم طی سال‌های گذشته را نشان می‌دهد [۸].