





دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان:

بررسی پارامترهای موثر در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای شکل
به منظور دستیابی به نسبت انبساط بالا

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک-ساخت و تولید

استادان راهنما:

دکتر محمد بخشی

دکتر عبدالحمید گرجی

استاد مشاور:

دکتر مجید الیاسی

دانشجو:

فروزان محمدعلی زاده

بهمن ۱۳۹۲

تقدیم به

وجود صمیمی و همیشگی آن‌ها که
لحظه‌های ناب باور بودن،
لذت و غرور دانستن،
جسارت خواستن،
شکوه رسیدن و
تمام تجربه‌های یکتا و زیبای زندگی،
مدیون حضور سبز آن‌هاست.
تقدیم به خانواده عزیزم.

سپاس‌گزاری

سپاس و ستایش خدا را که جلوه قدرتش بر چهره روز روشن، فروزان است و نور حکمتش در دل شب تار، تابان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و فرصتی بخشید تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، والاتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌دریغ او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگارم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ برحسب وظیفه سزاست تا از استادان با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر محمد بخشی و جناب آقای دکتر عبدالحمید گرجی که با حسن خلق و فروتنی، در تمام مراحل با همراهی و همفکری‌هایشان از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند؛ از استاد صبور، جناب آقای دکتر مجید الیاسی، که زحمت مشاوره این پایان‌نامه را بر عهده داشتند و همواره روحیه دانش‌آموزی را در من تقویت نمودند؛ کمال تشکر و قدردانی را بجا آورم.

قدردان راهنمایی‌ها و کمک‌های سرپرست کارگاه ماشین ابزار، آقای مهندس علی‌نژاد و آقایان صادقی و میانسری و سرپرست آزمایشگاه عملیات حرارتی، آقای دکتر نوروزی و مهندس مجیدی می‌باشم.

همچنین سپاس‌گزارم، مادر و پدرم را که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و از غفلت‌هایم گذشته‌اند و برادرم را که در تمامی مراحل، یار و یاور همیشگی و بی‌چشم‌داشتی بوده است.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

چکیده

فرآیند هیدروفرمینگ جزو روش‌های نوین شکل‌دهی می‌باشد. استفاده از این فناوری در راستای کاهش مراحل تولید قطعات و به‌خصوص حذف مراحل جوشکاری در قطعات با اشکال پیچیده در دستور کار تولیدکنندگان صنایع قرار گرفته است. لوله‌های فلزی از جمله لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای با کاربردهای بسیار زیاد در صنایع دفاعی، تاسیساتی، خودروسازی و پتروشیمی استفاده می‌شوند. با توجه به مزایای فرآیند هیدروفرمینگ برای تولید لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای، در این پایان‌نامه، از این روش برای شکل‌دهی لوله استفاده شد.

یکی از پیچیدگی‌های روش هیدروفرمینگ، تولید لوله‌های سالم و بدون عیب با دقت ابعادی مطلوب و ویژگی‌های هندسی مورد انتظار است و موضوعی است که به پارامترهای موثر ورودی در این روش وابسته می‌باشد. از طرفی نسبت انبساط یکی از خروجی‌های بسیار مهم فرآیند شکل‌دهی لوله می‌باشد و افزایش و دستیابی به میزان بیشتری از آن به علت این‌که حد شکل‌دهی را تعیین می‌کند مورد توجه می‌باشد.

در این پایان‌نامه، تاثیر پارامترهای فرآیندی، اصطکاک و هندسی بر نسبت انبساط یک لوله فولادی، به روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. شکل هندسی و توزیع ضخامت لوله با هر دو روش مقایسه و درستی نتایج حاصل از شبیه‌سازی تایید شد. سپس با تکیه بر درستی نتایج شبیه‌سازی، تاثیر پارامترها در نسبت انبساط بررسی شد.

نتایج نشان داد، در بین پارامترهای بررسی شده، مسیر فشار و تغذیه محوری به عنوان پارامتر فرآیندی، بیشترین تاثیر را در نسبت انبساط دارد و ضریب اصطکاک، طول بوش، شعاع بوش و زاویه بوش تاثیر کمی بر نسبت انبساط دارند.

در این پژوهش نشان داده شد که با استفاده از مسیر فشار پله‌ای و اعمال تغذیه محوری همراه با افزایش فشار در مراحل اولیه به جای مسیر فشار و تغذیه ارایه شده توسط پژوهشگران پیشین، بهبود در توزیع ضخامت و نسبت انبساط ایجاد شده است. همچنین در این پژوهش با ارایه یک روش جدید، مسیر فشار و تغذیه‌ای جهت ایجاد چروک خواسته در قطعه و سپس رفع چروک استفاده شد که موجب دستیابی به نسبت انبساط $69/3\%$ گردید که در مقایسه با نسبت انبساط بدست آمده با مسیرهای استفاده شده توسط پژوهشگران پیشین که $61/5\%$ بوده افزایش قابل توجهی داشته است.

واژگان کلیدی: هیدروفرمینگ لوله، لوله پله‌ای استوانه‌ای، نسبت انبساط.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

۱	
۱-۱-۱	مقدمه
۲-۱-۱	معرفی لوله‌های پله‌ای فلزی
۳-۱-۱	روش‌های تولید لوله‌های پله‌ای
۱-۳-۱-۱	دسته‌بندی روش‌های سنتی تولید لوله‌های پله‌ای فلزی
۱-۳-۱-۱-۱	روش پرسکاری لوله
۲-۳-۱-۱	روش اسپینینگ
۳-۳-۱-۱	روش کشش لوله
۴-۳-۱-۱	روش فورج لوله
۵-۳-۱-۱	روش جوشکاری
۲-۳-۱-۱	دسته‌بندی روش‌های نوین تولید لوله‌های پله‌ای
۱-۲-۳-۱-۱	روش شکل‌دهی الکترومغناطیس
۲-۲-۳-۱-۱	روش شکل‌دهی انفجاری
۳-۲-۳-۱-۱	روش شکل‌دهی الکتروهیدرولیک
۴-۲-۳-۱-۱	روش شکل‌دهی با بالشتک لاستیکی
۴-۱-۱	روش هیدروفرمینگ
۱-۴-۱-۱	هیدروفرمینگ لوله
۲-۴-۱-۱	عیوب در روش هیدروفرمینگ لوله
۳-۴-۱-۱	پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله
۴-۴-۱-۱	مزایا و معایب روش هیدروفرمینگ لوله
۵-۱-۱	مروری بر اهداف، ویژگی‌ها و مراحل انجام پایان‌نامه

فصل دوم: مروری بر پژوهش‌های انجام شده

۲۱	
۱-۲-۱	مقدمه
۲-۲-۱	مروری بر پیشینه فرآیند هیدروفرمینگ لوله
۳-۲-۱	مروری بر پیشینه پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی پارامترهای موثر در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای

فصل سوم: مراحل آزمایشگاهی

۳۷	
۱-۳-۱	مقدمه
۳۸	

۳۸	۲-۳- معرفی تجهیزات، دستگاه‌ها و قالب‌های استفاده شده در آزمایش‌ها
۳۸	۱-۲-۳- دستگاه پرس به همراه تجهیزات جانبی
۳۹	۲-۲-۳- تجهیزات هیدرولیک
۳۹	۱-۲-۲-۳- سیستم تامین فشار هیدرولیکی
۴۰	۲-۲-۲-۳- سیستم کنترل فشار هیدرولیکی
۴۱	۳-۲-۲-۳- مدار هیدرولیک
۴۲	۴-۲-۲-۳- سیال
۴۲	۳-۲-۳- قالب‌های مورد استفاده و اجزای آن‌ها
۴۲	۱-۳-۲-۳- قالب هیدروفرمینگ لوله
۴۶	۲-۳-۲-۳- قالب جهت آزمایش بالچ
۴۸	۴-۲-۳- دستگاه‌های اندازه‌گیری
۴۹	۳-۳- خواص و هندسه لوله
۵۰	۱-۳-۳- تعیین خواص مکانیکی لوله
۵۱	۴-۳- مراحل انجام آزمایش‌ها

۵۴

فصل چهارم: شبیه سازی اجزای محدود

۵۵	۱-۴- مقدمه
۵۶	۲-۴- معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی ABAQUS
۵۷	۳-۴- مراحل شبیه‌سازی
۵۸	۱-۳-۴- ایجاد مدل هندسی
۵۹	۲-۳-۴- تعریف خصوصیات لوله
۶۰	۳-۳-۴- مونتاژ لوله و اجزای قالب
۶۰	۴-۳-۴- تعریف تعداد مراحل و نوع حل مساله
۶۱	۵-۳-۴- تعریف نوع تماس اجزا با هم
۶۲	۶-۳-۴- بارگذاری و اعمال شرایط مرزی روی اجزا
۶۳	۷-۳-۴- المان‌بندی مدل
۶۴	۸-۳-۴- حل مساله
۶۵	۹-۳-۴- مشاهده و استخراج نتایج شبیه‌سازی
۶۵	۴-۴- پارامترهای هندسی و اصطکاکی بررسی شده در شبیه‌سازی

۶۶ ۵-۴ - پیش‌بینی نازک‌شدگی لوله در حین شبیه‌سازی.....

۶۷ فصل پنجم: نتایج و بحث

۶۸ ۱-۵ - مقدمه

۶۸ ۱-۵ - معرفی عیوب فرآیند هیدروفورمینگ لوله‌های پله‌ای

۶۸ ۱-۱-۵ - کمانش ستونی لوله

۶۹ ۲-۱-۵ - پارگی

۶۹ ۳-۱-۵ - چروکیدگی

۷۱ ۲-۵ - بررسی تاثیر پارامترها در شکل‌دهی لوله به روش هیدروفورمینگ

۷۱ ۱-۲-۵ - بررسی تاثیر مسیر فشار و تغذیه محوری بر توزیع ضخامت و نسبت انبساط

۷۲ ۱-۱-۲-۵ - بررسی تاثیر سطح فشار بر شکل‌دهی و توزیع ضخامت لوله

۷۵ ۲-۱-۲-۵ - تاثیر اعمال تغذیه محوری همزمان با افزایش فشار بر روی توزیع ضخامت قطعه نهایی

۷۵ ۳-۱-۲-۵ - تاثیر افزایش فشار و تغییر جهت تغذیه محوری در انتهای فرآیند و معرفی روش جدیدی به‌منظور رفع چروک و بهره

۷۸ گیری از ضخامت در سطح فشار پایین

۸۴ ۴-۱-۲-۵ - بررسی تاثیر مسیر فشار و تغذیه محوری پله‌ای به‌منظور بهبود بخشیدن و یکنواخت‌تر کردن توزیع ضخامت قطعات

۸۴ سالم تولید شده با روش رفع چروک

۸۷ ۵-۱-۲-۵ - مسیر فشار و تغذیه محوری ترکیبی

۸۸ ۶-۱-۲-۵ - تاثیر مسیر فشار و تغذیه محوری بر نسبت انبساط

۹۰ ۲-۲-۵ - تاثیر ضریب اصطکاک بین لوله و اجزای قالب بر نسبت انبساط

۹۴ ۳-۲-۵ - تاثیر پارامترهای هندسی بوش بر نسبت انبساط

۹۴ ۱-۳-۲-۵ - تاثیر طول بوش بر نسبت انبساط

۱۰۰ ۲-۳-۲-۵ - تاثیر شعاع بوش بر نسبت انبساط

۱۰۵ ۳-۳-۲-۵ - تاثیر زاویه بوش بر نسبت انبساط

۱۱۰ فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۱۱ ۱-۶ - مقدمه

۱۱۱ ۲-۶ - نتیجه‌گیری

۱۱۳ ۳-۶ - پیشنهادها

۱۱۴ مراجع

۱۱۸ پیوست

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) نمونه‌ای از قطعات لوله‌ای پله‌ای ساده با مقاطع (الف) استوانه‌ای [۱] (ب) مخروطی [۲] (ج) چهارگوش [۳]..... ۳
- شکل (۲-۱) نمونه‌ای از قطعات لوله‌ای پله‌ای با مقاطع پیچیده (الف) قطعات اگزوز [۴] (ب) قاب شاسی [۵]..... ۳
- شکل (۳-۱) شماتیک روش پرسکاری لوله‌های پله‌ای، (الف) موقعیت قرارگیری قطعه در قالب، (ب) موقعیت فرم‌دهی قطعه [۶]..... ۴
- شکل (۴-۱) شکل‌دهی پله‌ای لوله با ابزار منبسط شونده [۷]..... ۵
- شکل (۵-۱) مراحل روش اسپینینگ برای تولید لوله (الف) تک‌پله‌ای و (ب) چندپله‌ای از ورق دایره‌ای [۸]..... ۶
- شکل (۶-۱) انواع روش کشش لوله [۹]..... ۸
- شکل (۷-۱) روش کشش لوله برای تولید پله‌های ضخامت [۹]..... ۸
- شکل (۸-۱) شماتیک روش فورج لوله پله‌ای [۱۰]..... ۹
- شکل (۹-۱) نمونه‌هایی از لوله‌های پله‌ای تولید شده به روش جوشکاری..... ۱۰
- شکل (۱۰-۱) تجهیزات مورد نیاز روش شکل‌دهی الکترومغناطیس لوله [۶]..... ۱۲
- شکل (۱۱-۱) اجزای قالب شکل‌دهی انفجاری [۶]..... ۱۲
- شکل (۱۲-۱) اجزای قالب شکل‌دهی الکتروهیدرولیک [۱۲]..... ۱۳
- شکل (۱۳-۱) روش شکل‌دهی با بالشتک لاستیکی (الف) طرح مونتاژی قالب و اجزای دیگر آن (ب) نمونه‌ای از لوله پله‌ای تولید شده با این روش [۱۳]..... ۱۴
- شکل (۱۴-۱) شماتیک مراحل متداول در فرآیند هیدروفرمینگ لوله (الف) قرار دادن لوله در قالب، (ب) بسته شدن قالب و آب‌بندی لوله به‌وسیله سنبه‌ها، (ج) اعمال نیروی پرس، تغذیه محوری و فشار داخلی و شکل‌دهی لوله به فرم سطح داخلی قالب، (د) باز شدن قالب و خارج سازی قطعه [۱۵]..... ۱۶
- شکل (۱۵-۱) نواحی مختلف شکل‌دهی در هیدروفرمینگ لوله [۱۶]..... ۱۶
- شکل (۱۶-۱) اشکال متفاوت لوله‌های هیدروفرم شده (الف) خمکاری، (ب) لهیدگی، (ج) انبساط‌دهی، (د) پیش‌آمدگی [۱۷]..... ۱۷
- شکل (۱۷-۱) عیوب موجود در روش هیدروفرمینگ لوله (الف) پارگی، (ب) کماتش، (ج) چروک [۱۸]..... ۱۷
- شکل (۱۸-۱) شماتیک قالب هیدروفرمینگ لوله پله‌ای ارائه شده توسط ییاسی و همکاران [۱]..... ۲۰
- شکل (۱۹-۲) نمونه‌هایی از نتایج حاصل از بررسی تحلیلی اصفافی [۱۹] برای فرآیند هیدروفرمینگ در مسیرهای کرنش متفاوت (الف) مسیر بارگذاری حد تسلیم و تغییر شکل پلاستیک، تغییرات (ب) نسبت انبساط و (ج) شعاع بالچ بر حسب فشار داخلی..... ۲۶
- شکل (۲۰-۲) رابطه بین فشار و میزان شعاع با تغییر پارامترهای (الف) ضریب ناهمسانگردی (ب) نمای کرنش سختی [۲۹]..... ۲۷
- شکل (۲۱-۲) نمودار فشار- ارتفاع بالچ برای تغییرات پارامترهای (الف) طول لوله (ب) ضخامت اولیه لوله (ج) نمای کرنش سختی (د) شعاع ورودی قالب (ه) ضریب اصطکاک [۳۰]..... ۲۸
- شکل (۲۲-۲) نقطه ناپایداری در نمودار فشار- انبساط [۳۱]..... ۲۹
- شکل (۲۳-۲) پارامترهای هندسی در (الف) لوله اولیه، (ب) لوله انبساط یافته و نمودارهای فشار- بالچ در انبساط آزاد بر حسب تغییرات (ج) نمای کرنش سختی، (د) طول ناحیه انبساط، (ه) شعاع اولیه لوله، (و) ضخامت اولیه لوله [۳۱]..... ۳۰
- شکل (۲۴-۲) مدل اجزا و اندازه‌های مهم استفاده شده در تحلیل هیدروفرمینگ لوله مربعی [۳۲]..... ۳۱
- شکل (۲۵-۲) تاثیر پارامترهای (الف) ضریب اصطکاک جنبشی، (ب) نسبت تنش، (ج) ضریب ناهمسانگردی و (د) نمای کرنش سختی بر رابطه حداکثر شعاع انبساط و جابجایی محوری [۳۲]..... ۳۲
- شکل (۲۶-۲) تاثیر پارامترهای هندسی بر نسبت انبساط (الف) فاصله لبه لوله تا مرکز انبساط، (ب) طول ناحیه انبساط، (ج) شعاع ناحیه ورودی قالب، (د) زاویه پخ [۱۷]..... ۳۳

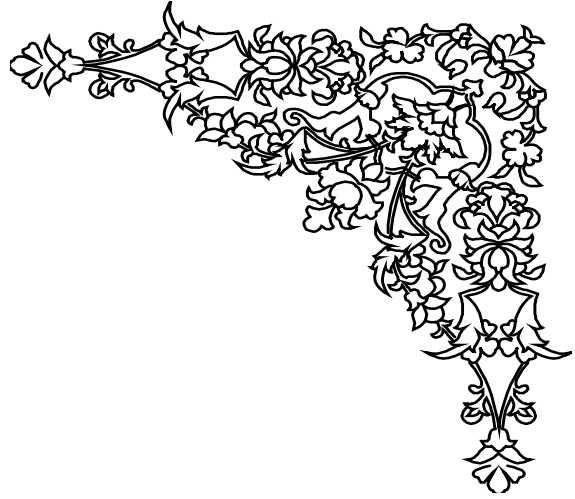
- شکل (۹-۲) تاثیر پروفیل فشار (الف) بر نسبت انبساط (ب) در فرآیند بالچ ساده [۱۷]..... ۳۳
- شکل (۱۰-۲) پنجره شکل دهی هیدروفرمینگ لوله [۳۶]..... ۳۵
- شکل (۱-۳) دستگاه تست انیورسال DMG و تجهیزات ثبت داده ها..... ۳۹
- شکل (۲-۳) دستگاه تولید کننده فشار هیدرولیکی..... ۴۰
- شکل (۳-۳) سیستم کنترل فشار هیدرولیکی..... ۴۰
- شکل (۴-۳) شماتیک مدار هیدرولیک استفاده شده..... ۴۱
- شکل (۵-۳) شماتیک قالب هیدروفرمینگ استفاده شده به منظور بررسی پارامترهای فرآیندی..... ۴۳
- شکل (۶-۳) اجزای قالب هیدروفرمینگ استفاده شده در آزمایش ها..... ۴۴
- شکل (۷-۳) شماتیک بوش استفاده شده در فرایند..... ۴۵
- شکل (۸-۳) شماتیک قالب آزمایش بالچ (نمای برش خورده)..... ۴۷
- شکل (۹-۳) اجزای قالب آزمایش بالچ..... ۴۷
- شکل (۱۰-۳) وسایل اندازه گیری استفاده شده (الف) کولیس دیجیتالی، (ب) LVDT، (ج) ضخامت سنج، (د) ضخامت سنج التراسونیک..... ۴۸
- شکل (۱۱-۳) تغییرات قطر بالچ بر حسب افزایش فشار داخلی سیال..... ۵۱
- شکل (۱۲-۳) شماتیک اندازه گذاری شده قالب هیدروفرمینگ استفاده شده با نسبت انبساط $53/8$ ۵۲
- شکل (۱۳-۳) قالب و اجزای بسته شده روی میز پرس برای انجام آزمایش..... ۵۳
- شکل (۱۴-۳) مسیر بارگذاری فشار ثابت (الف) مسیر فشار، (ب) مسیر تغذیه محوری بر حسب زمان فرآیند..... ۵۳
- شکل (۱-۴) مدل ترسیم شده اجزا در شبیه سازی..... ۵۹
- شکل (۲-۴) مونتاژ لوله و اجزای قالب در شبیه سازی..... ۶۰
- شکل (۳-۴) شرایط مرزی تعریف شده برای مدل سازی فرآیند در نرم افزار..... ۶۳
- شکل (۴-۴) المان بندی لوله در داخل قالب به وسیله المان پوسته ای در محیط نرم افزار..... ۶۴
- شکل (۱-۵) کمانش ستونی لوله..... ۶۹
- شکل (۲-۵) پارگی لوله (الف) در مرحله بالچ آزاد (ب) در مرحله کالیبراسیون..... ۶۹
- شکل (۳-۵) چروکیدگی و عیوب دیگر حاصل از ادامه فرآیند با چروک، (الف) قطعه با عیب چروک، (ب) کمانش، (ج) پارگی، (د) تاخوردگی..... ۷۰
- شکل (۴-۵) مسیرهای با سطوح فشار متفاوت (الف) مسیر فشار و (ب) تغذیه محوری، بر حسب زمان فرآیند..... ۷۳
- شکل (۵-۵) قطعه بدست آمده از (الف) آزمایش تجربی، (ب) شبیه سازی، حاصل از مسیر با فشار ثابت $18/5$ مگاپاسکال..... ۷۳
- شکل (۶-۵) قطعه بدست آمده از (الف) آزمایش تجربی، (ب) شبیه سازی، حاصل از مسیر با فشار ثابت $19/5$ مگاپاسکال..... ۷۴
- شکل (۷-۵) قطعه بدست آمده از (الف) آزمایش تجربی، (ب) شبیه سازی، حاصل از مسیر با فشار ثابت $20/5$ مگاپاسکال..... ۷۴
- شکل (۸-۵) توزیع ضخامت در راستای طول لوله حاصل از شبیه سازی متناظر با مسیرهای شکل (۴-۵)..... ۷۴
- شکل (۹-۵) مسیر اعمال تغذیه محوری همزمان با افزایش فشار، (الف) مسیر فشار و (ب) تغذیه محوری بر حسب زمان فرآیند..... ۷۶
- شکل (۱۰-۵) قطعه سالم شکل گرفته با مسیر بارگذاری شکل (۹-۵)..... ۷۶
- شکل (۱۱-۵) مقایسه توزیع ضخامت حاصل از آزمایش تجربی و شبیه سازی برای مسیر فشار و تغذیه محوری شکل (۹-۵)..... ۷۶
- شکل (۱۲-۵) مقایسه نتایج شبیه سازی برای توزیع ضخامت قطعات حاصل از مسیرهای شکل (۴-۵) و شکل (۹-۵)..... ۷۷
- شکل (۱۳-۵) مسیر اعمالی مطابق با افزایش فشار در مرحله نهایی، (الف) مسیر فشار و (ب) تغذیه محوری، بر حسب زمان فرآیند..... ۷۸
- شکل (۱۴-۵) نتایج بدست آمده از (الف) آزمایش تجربی و (ب) شبیه سازی، حاصل از مسیر بارگذاری شکل (۱۳-۵)..... ۷۹
- شکل (۱۵-۵) شماتیک مراحل روش رفع چروک..... ۸۰

- شکل (۱۶-۵) مسیر متناظر با روش جدید برای رفع چروک- تغذیه معکوس به همراه افزایش فشار در مرحله نهایی (الف) مسیر فشار و (ب) تغذیه محوری برحسب زمان فرآیند..... ۸۱
- شکل (۱۷-۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی متناظر با نقاط مشخص شده در شکل (۱۶-۵)..... ۸۲
- شکل (۱۸-۵) قطعه بدست آمده با روش جدید به‌منظور رفع چروک..... ۸۳
- شکل (۱۹-۵) مقایسه توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی متناظر با مسیر نشان داده شده در شکل (۱۶-۵)..... ۸۳
- شکل (۲۰-۵) مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای توزیع ضخامت قطعات حاصل از مسیرهای شکل (۴-۵) و شکل (۱۶-۵)..... ۸۴
- شکل (۲۱-۵) مقایسه تنش‌های نقاط فرورفتگی و برآمدگی چروک [۳۶]..... ۸۴
- شکل (۲۲-۵) مسیر پله‌ای (الف) مسیر فشار، (ب) تغذیه محوری برحسب زمان فرآیند..... ۸۵
- شکل (۲۳-۵) قطعه سالم شکل گرفته با مسیر بارگذاری شکل (۲۲-۵)..... ۸۶
- شکل (۲۴-۵) توزیع ضخامت در راستای طول لوله متناظر با مسیر مشخص شده در شکل (۲۲-۵)..... ۸۶
- شکل (۲۵-۵) مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای توزیع ضخامت قطعات حاصل از مسیرهای شکل (۱۶-۵) و شکل (۲۲-۵)..... ۸۶
- شکل (۲۶-۵) مسیر ترکیبی ارایه شده (الف) مسیر فشار، (ب) تغذیه محوری برحسب زمان فرآیند..... ۸۷
- شکل (۲۷-۵) مقایسه توزیع ضخامت بدست آمده از مسیرهای بررسی شده..... ۸۸
- شکل (۲۸-۵) کانتور توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی، در لحظه تماس لوله با بدنه قالب به قطر ۴۲ میلیمتر با مسیر بارگذاری فشار ثابت شکل (۶-۵) با فشار بیشینه ۱۹/۵ مگاپاسکال..... ۸۹
- شکل (۲۹-۵) کانتور توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی، در لحظه پر شدن قالب به قطر ۴۲ میلیمتر با مسیر بارگذاری فشار ثابت شکل (۶-۵) با فشار بیشینه ۱۹/۵ مگاپاسکال..... ۸۹
- شکل (۳۰-۵) کانتور توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی، در لحظه پر شدن قالب به قطر ۴۴ میلیمتر با مسیر فشار و تغذیه محوری شکل (۲۸-۵)..... ۸۹
- شکل (۳۱-۵) روند تغییر قطر لوله بر حسب تغییرات ضریب اصطکاک در فشار ۱۹/۵ مگاپاسکال پیش از شروع تغذیه محوری..... ۹۰
- شکل (۳۲-۵) روند تغییرات قطر لوله برحسب کورس سنبه برای ضرایب اصطکاک ۰، ۰/۰۵ و ۰/۱..... ۹۱
- شکل (۳۳-۵) روند تغییر قطر لوله بر حسب تغییر ضریب اصطکاک در کورس‌های متفاوت..... ۹۲
- شکل (۳۴-۵) روند تغییر مقدار کورس بر حسب ضرایب اصطکاک متفاوت تا لحظه رسیدن به ضخامت نازک‌شدگی..... ۹۳
- شکل (۳۵-۵) قطر لوله بر حسب تغییرات ضریب اصطکاک تا ضخامت بحرانی ۰/۳۸ میلیمتر..... ۹۳
- شکل (۳۶-۵) نمودار تاثیر ضریب اصطکاک بر نسبت انبساط..... ۹۴
- شکل (۳۷-۵) روند تغییر قطر لوله بر حسب طول بوش در فشار ۱۹/۵ مگاپاسکال پیش از شروع تغذیه محوری..... ۹۵
- شکل (۳۸-۵) روند تغییرات قطر لوله برحسب کورس سنبه برای طول‌های متفاوت بوش..... ۹۶
- شکل (۳۹-۵) مقایسه روند تغییرات ضخامت برای طول بوش ۲۰ و ۴۰ میلیمتر..... ۹۷
- شکل (۴۰-۵) روند تغییر مقدار کورس بر حسب طول بوش تا لحظه رسیدن به ضخامت نازک‌شدگی..... ۹۷
- شکل (۴۱-۵) روند تغییر قطر لوله بر حسب طول بوش در کورس‌های متفاوت..... ۹۸
- شکل (۴۲-۵) قطر لوله بر حسب طول بوش تا ضخامت بحرانی ۰/۳۸ میلیمتر..... ۹۹
- شکل (۴۳-۵) نمودار تاثیر طول بوش بر نسبت انبساط..... ۹۹
- شکل (۴۴-۵) روند تغییر قطر لوله بر حسب شعاع بوش در فشار ۱۹/۵ مگاپاسکال پیش از شروع تغذیه محوری..... ۱۰۰
- شکل (۴۵-۵) پارامترهای طول و شعاع بوش..... ۱۰۱
- شکل (۴۶-۵) روند تغییرات قطر لوله برحسب کورس سنبه برای شعاع‌های متفاوت بوش..... ۱۰۱
- شکل (۴۷-۵) روند تغییر قطر لوله بر حسب شعاع بوش در کورس‌های متفاوت..... ۱۰۲

- شکل (۴۸-۵) روند تغییر مقدار کورس بر حسب شعاع بوش تا لحظه رسیدن به ضخامت نازک‌شدگی ۱۰۳
- شکل (۴۹-۵) قطر لوله بر حسب شعاع بوش تا ضخامت بحرانی ۰/۳۸ میلی‌متر ۱۰۴
- شکل (۵۰-۵) نمودار تاثیر شعاع بوش بر نسبت انبساط ۱۰۴
- شکل (۵۱-۵) روند تغییر قطر لوله بر حسب زاویه بوش در فشار ۱۹/۵ مگاپاسکال پیش از شروع تغذیه محوری ۱۰۵
- شکل (۵۲-۵) روند تغییرات قطر لوله بر حسب کورس سنبه برای زوایای متفاوت بوش ۱۰۶
- شکل (۵۳-۵) روند تغییر قطر لوله بر حسب زاویه بوش در کورس‌های متفاوت ۱۰۷
- شکل (۵۴-۵) روند تغییر مقدار کورس بر حسب زاویه بوش تا لحظه رسیدن به ضخامت نازک‌شدگی ۱۰۷
- شکل (۵۵-۵) قطر لوله بر حسب زاویه بوش تا ضخامت بحرانی ۰/۳۸ میلی‌متر ۱۰۸
- شکل (۵۶-۵) نمودار تاثیر زاویه بوش بر نسبت انبساط ۱۰۹

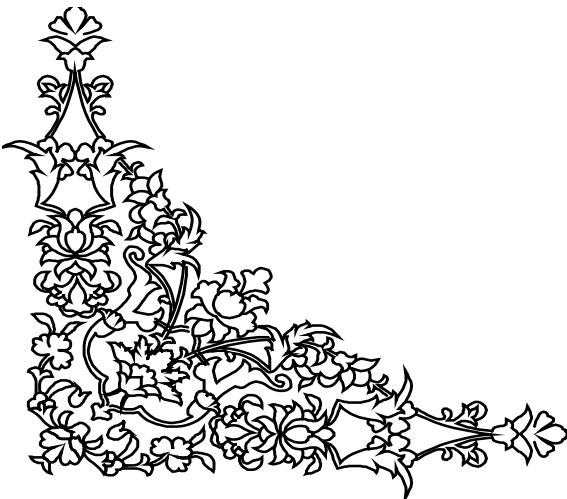
فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۳) ویژگی‌های روغن هیدرولیک پارس بابک گرید ۶۸ [۴۰].....	۴۲
جدول (۲-۳) ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ نزن SS316L [۱].....	۴۹
جدول (۳-۳) خواص فیزیکی و مکانیکی لوله استفاده شده در آزمایش.....	۴۹
جدول (۱-۴) پارامترهای متغیر و ثابت در بررسی ضریب اصطکاک، μ_k	۶۵
جدول (۲-۴) پارامترهای متغیر و ثابت در بررسی طول بوش، l	۶۵
جدول (۳-۴) پارامترهای متغیر و ثابت در بررسی شعاع بوش، r	۶۵
جدول (۴-۴) پارامترهای متغیر و ثابت در بررسی زاویه بوش، α	۶۵



فصل اول

کلیات



۱-۱- مقدمه

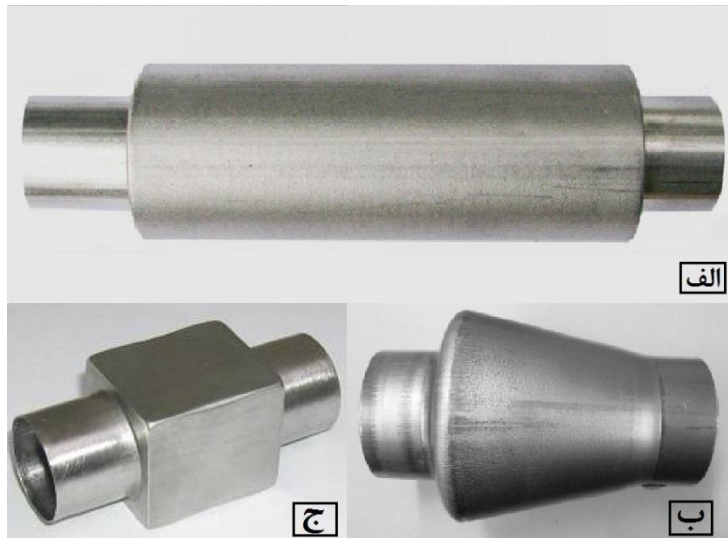
با پیشرفت روز افزون تکنولوژی و رقابت بازار تجاری، صنایع به سمت کاهش هزینه، زمان تولید، وزن محصول تمام شده و مراحل تولید قطعات و همچنین افزایش کیفیت و دقت محصولات روی آورده اند. دانش فنی برای تولید انواع قطعات با روش‌های گوناگون در حال گسترش است. از این رو روش‌های گوناگونی برای تولید قطعات به وجود آمده و یا توسعه پیدا می‌کنند.

فرآیند هیدروفرمینگ یا شکل‌دهی با فشار سیال از فرآیندهای نوین شکل‌دهی می‌باشد. استفاده از این فناوری در راستای کاهش مراحل تولید قطعات و به خصوص حذف مراحل جوشکاری در قطعات با اشکال پیچیده در دستور کار تولیدکنندگان صنایع بزرگ قرار گرفته است. از طرفی، پیشرفت تکنولوژی و ابزار و ماشین‌آلات تولیدی و سیستم‌های آب‌بندی و فرآیندهای کنترل رایانه‌ای سبب شده است تا صنایع خودروسازی، کشتی‌سازی و هوافضا استفاده شایانی را از هیدروفرمینگ به‌عنوان یک روش شکل‌دهی داشته باشند.

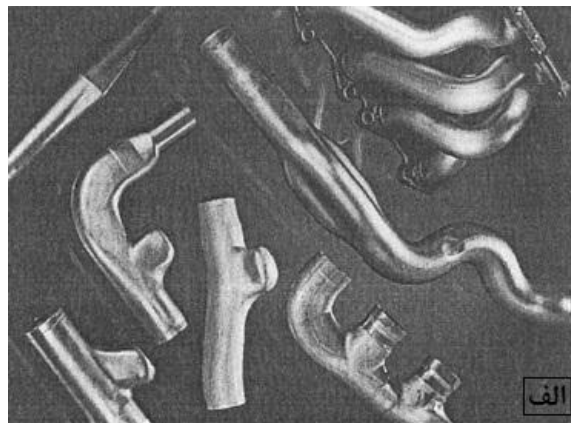
در این فصل، ابتدا تعریف مختصری از لوله‌های پله‌ای، انواع و کاربرد آن‌ها ارائه شده و سپس با اشاره به روش‌های تولید لوله‌های پله‌ای به جایگاه صنعت هیدروفرمینگ در بین آن‌ها اشاره می‌شود و در انتهای این فصل، مروری پیرامون اهداف، ویژگی‌ها و مراحل انجام پایان‌نامه ارائه خواهد شد.

۱-۲- معرفی لوله‌های پله‌ای فلزی

هر تغییر در شکل و مقطع اولیه لوله در طی فرآیند شکل‌دهی سبب ایجاد پله در طول آن می‌شود. از این رو، لوله‌ای که مقطع آن در امتداد طول لوله غیر یکنواخت باشد، لوله پله‌ای نامیده می‌شود. لوله‌های فلزی از جمله لوله‌های پله‌ای با شکل‌های مختلف، کاربردهای بسیار زیادی در صنایع دفاعی، تاسیساتی، خودروسازی و پتروشیمی دارند. این لوله‌ها می‌توانند ساده و دارای مقاطع استوانه‌ای، مخروطی، چهارگوش و غیره مانند شکل (۱-۱) و یا حالت‌های پیچیده‌تر مانند شکل (۲-۱) باشند.



شکل (۱-۱) نمونه‌ای از قطعات لوله‌ای پله‌ای ساده با مقاطع (الف) استوانه‌ای [۱] (ب) مخروطی [۲] (ج) چهارگوش [۳]



شکل (۲-۱) نمونه‌ای از قطعات لوله‌ای پله‌ای با مقاطع پیچیده (الف) قطعات اگزوز [۴] (ب) قاب شاسی [۵]

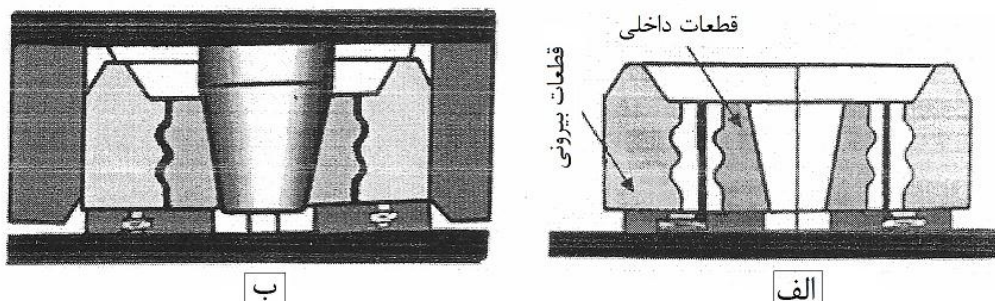
۳-۱- روش‌های تولید لوله‌های پله‌ای

روش‌های تولید لوله‌های پله‌ای به دو دسته روش‌های سنتی و روش‌های نوین تقسیم می‌شوند. در روش‌های سنتی تمام و یا قسمتی از لوله پله‌ای با روش‌هایی مانند پرس کاری، اسپینینگ و یا سایر روش‌های شکل‌دهی فرم داده شده و سپس با عملیات مونتاژی نظیر جوشکاری به هم متصل می‌شوند. در روش‌های نوین تولید لوله‌های پله‌ای، مراحل کاری به نسبت کاهش پیدا کرده و قابلیت تولید قطعات پیچیده‌تر با کیفیت بهتر وجود دارد.

۱-۳-۱- دسته‌بندی روش‌های سنتی تولید لوله‌های پله‌ای فلزی

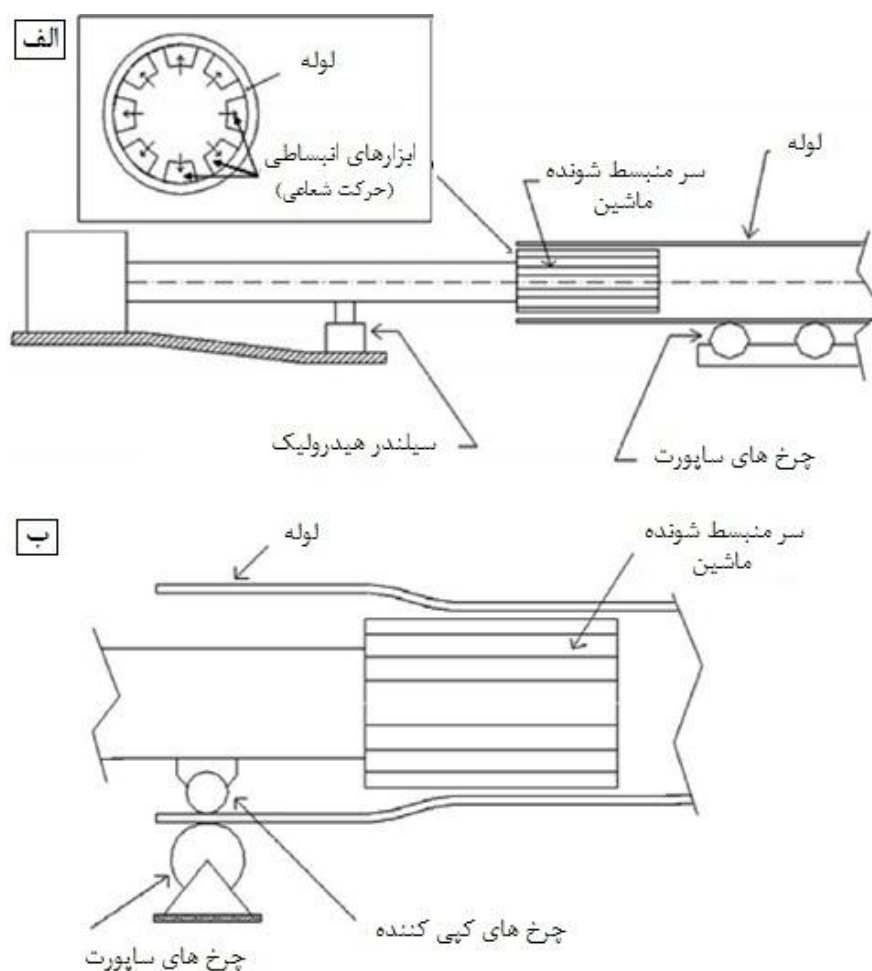
۱-۱-۳-۱- روش پرسکاری^۱ لوله

پرسکاری روش متداولی است که برای ایجاد شکل‌ها در دیواره لوله‌ها و پوسته‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش در طی عملیات با پایین آمدن کوبه پرس، اجزای شکل‌دهنده خارجی در راستای شعاعی منقبض می‌گردند و اجزای شکل‌دهنده داخلی توسط سنبه نوک تیز شیب دار به طرف بیرون حرکت و قطعه را در روی دیواره اجزای خارجی شکل می‌دهند. با بالا رفتن پرس این اجزا توسط فنرها به مکان اولیه خود برمی‌گردد. مهمترین عیب این روش آن است که فضای خالی بین اجزای شکل‌دهنده، نیاز به در آوردن، چرخاندن و دوباره پرس کردن قطعه کار جهت از بین بردن اثر فضای خالی در این روش دارد. شکل (۳-۱) شماتیک این روش شکل‌دهی را نشان می‌دهد [۶].



شکل (۳-۱) شماتیک روش پرسکاری لوله‌های پله‌ای، (الف) موقعیت فرارگیری قطعه در قالب، (ب) موقعیت فرم‌دهی قطعه [۶]

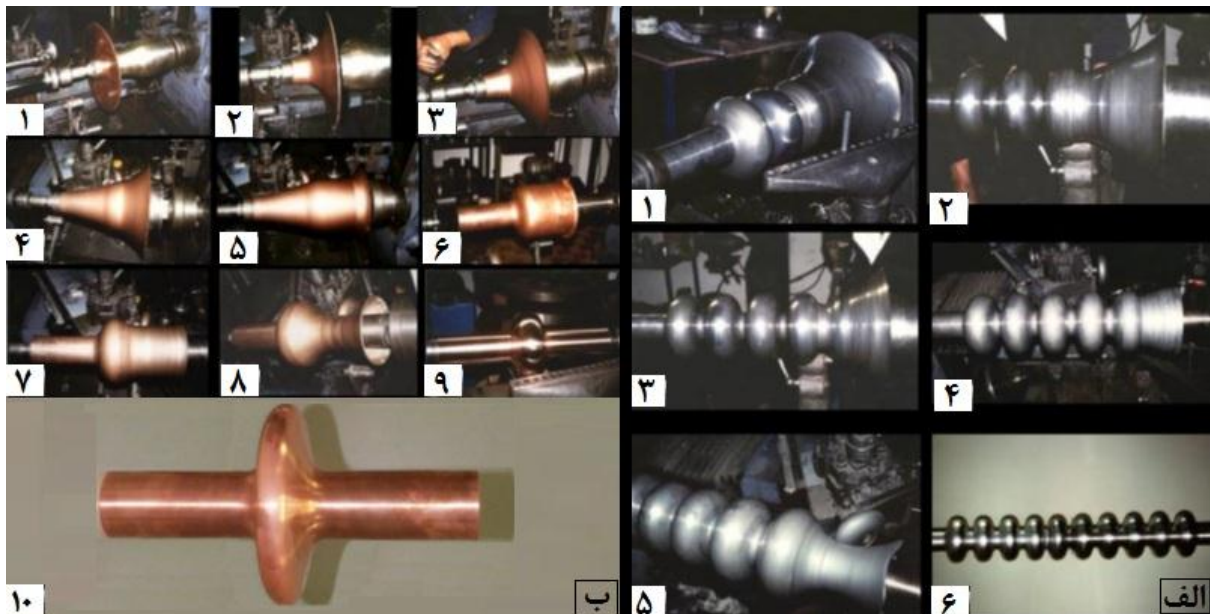
در روش مشابه دیگر، از یک ابزار منبسط شونده استفاده می‌شود. این ابزار در طول لوله حرکت کرده و طی عملیات کالیبراسیون در جهت شعاعی انبساط یافته و لوله را شکل‌دهی می‌کند. شکل (۴-۱) اجزای این روش و موقعیت قرارگیری آن‌ها را نشان می‌دهد. در این روش مهمترین عامل، در نظر گرفتن مقدار برگشت فنری است. این روش معمولاً برای به سائز رساندن لوله‌های تولید شده با جوشکاری از ورق اولیه به کار گرفته می‌شود [۷].



شکل (۴-۱) شکل‌دهی پله‌ای لوله با ابزار منبسط شونده [۷]

۱-۳-۱-۲- روش اسپینینگ^۱

اسپینینگ، روشی برای فرم‌دهی ورق یا لوله‌های فلزی به قطعات بدون درز و یکپارچه استوانه‌ای، مخروطی، نیم‌کره‌ای و یا شکل‌های دایره‌ای دیگر می‌باشد. شکل‌دهی در این روش با ترکیب دوران و اعمال فشار است. در اسپینینگ ورق می‌توان با استفاده از ابزاری مانند مندرل و الگوی حرکتی متناسب لوله پله‌ای تولید کرد. روش اسپینینگ لوله برای کاهش ضخامت دیواره لوله و شکل‌دهی آن به فرم‌های متقارن محوری است. کاربرد این روش بیشتر برای صنایع هوا فضا می‌باشد. اسپینینگ دارای مزایایی مانند امکان تولید قطعات با شکل‌های خاص، یکپارچگی قطعه کار و تغییر تدریجی و یکنواختی ضخامت قطعه کار می‌باشد. اما عیب اصلی آن، محدودیت در تولید لوله‌ها با مقطع غیر دوار نامتقارن محوری است [۶]. در شکل (۱-۵) نمونه‌هایی از لوله‌های پله‌ای بدست آمده با روش اسپینینگ نشان داده شده است.



شکل (۱-۵) مراحل روش اسپینینگ برای تولید لوله (الف) تک‌پله‌ای و (ب) چندپله‌ای از ورق دایره‌ای [۸]

