سپاس خدایی را که نشانه‌های سلطنت، بزرگی و عظمت خویش را چنان آشکار ساخت که دیده‌ها را از شگفتی‌های قدرتش به حیرت آورد و اندیشه‌های بلندپرواز انسان‌ها را از شناخت حقیقت صفاتش بازداشت.

﴿نهج البلاغه، خطبه ۱۹۵﴾

دانشگاه مازندران
دانشکده فنی بابل

عنوان

مطالعه تجربی، تحلیلی و شبیه‌سازی اجزای محدود پر کردن گوشه قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای و کنگره‌ای

جهت اخذ درجه دکترای
مهندسی مکانیک ساخت و تولید

اساتید راهنما

دکتر محمد بخشی جویباری **دکتر سید جمال حسینی‌پور**

استاد مشاور

دکتر سلمان نوروزی

نگارنده:

مجید الیاسی

زمستان ۱۳۸۸

به نام پروردگار مهربان

حمد و ثنای پروردگار بی همتا را بجای می‌آورم که توفیق عنایت نمود تـا فرصـتهای عمـرم را صـرف تحصیل علم نمایم. برخود لازم می‌دانم که از زحمات خانواده دلسوز و فداکارم که در این سالها، مشوق و یاریگر من در این راه بوده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.
پایان نامه حاضر، چهار سال تلاش مداوم و پیوسته نگارنده بوده است که جز با راهنمـایی و مسـاعدت دیگران دستیابی به اهداف آن ممکن نبود. در این راستا اینجانب بر خود لازم می دانـم تـا از زحمـات جناب آقای دکتر بخشی، استاد راهنمای این پایان نامه، که از انجام هیچ کوششی در اجرای این پایان نامه دریغ نفرمودند تشکر نمایم. صبر، توجه، دقت، همیـاری و همفکـری ایـن بزگـوار پشـتوانه اصـلی اینجانب در انجام مراحل این پایان نامه بوده است.
همچنین از مساعدت ها و راهنمایی های مجدانه جناب آقای دکتر حسینی پور، استاد راهنمای دیگـر این پایان نامه نهایت تقدیر و تشکر بعمل می آید.
از زحمات و راهنماییهای جناب آقای دکتر نوروزی، استاد مشاور این پایان نامـه نیـز نهایـت تقـدیر و تشکر بعمل می آید.
کلیه کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این پایـان نامـه بـا کـار مـداوم و شـبانه روزی در آزمایشـگاه شکل‌دهی فلزات و کارگاههای ماشین ابزار و CNC دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل در مدت سه سال انجام شد که در همین جا مراتب سپاس و قدردانی خود را از مسولان آزمایشگاه و کارگاههـای مـذکور ابراز می دارم.
از جناب آقای مهندس گرجی که در انجام آزمایش‌هـا بسـیار یـاریگر اینجانـب بـوده‌انـد سپاسـگذاری می‌نمایم.
در تمامی مراحل ساخت مجموعه قالب‌ها، مسول محترم کارگـاه ماشـین ابـزار جنـاب آقـای مهنـدس علی‌نژاد و آقای جمشید صادقی تکنسین محترم این کارگاه، راهنمای اینجانـب بـوده انـد. بدینوسـیله نهایت از نامبردگان تقدیر بعمل می آید.
در خاتمه از مسولان و کارکنان محترم دانشگاه مازندران و دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل که محـیط مناسبی را برای تحصیل علم ودانش و انجام تحقیقات فراهم‌کرده اند، نهایت سپاس و تشکر را داشته و سلامت و سعادت همگان را از خداوند سبحان آرزو می نمایم.

مجید الیاسی
زمستان۸۸

تقدیم به

لطف بی همتای پدر و مهر بی نهایت مادرم ،

همراهی و صبوری همسرم

و برای دخترم ستاره ، با آرزوی شکوفایی و درخشش او درآسمان علم وادب و معرفت

چکیده

در سال‌های اخیر فرآیند هیدروفرمینگ لوله برای کم کردن وزن و افزایش استحکام قطعات، مورد توجه صنایع خودروسازی و دیگر صنایع قرار گرفته است. در این فرآیند، لوله تحت فشار داخلی سیال منبسط می‌شود و همزمان از یک یا دو سمت در معرض بار محوری قرار می‌گیرد تا ماده به ناحیه تغییر شکل لوله تغذیه شود. در صورت اعمال نامناسب فشار بر حسب تغذیه محوری، امکان بروز عیوبی مانند پارگی یا چروکیدگی در لوله وجود دارد. بطور کلی، پر کردن حفره قالب یکی از پیچیدگی‌های روش‌های شکل‌دهی فلزات و از آن جمله روش هیدروفرمینگ است و موضوعی است که حداکثر فشار داخلی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. اگر فشار داخلی قبل از پر شدن گوشه‌های قالب، به یک حد بحرانی برسد آنگاه برای پر شدن گوشه، به فشار بیشتری نیاز خواهد بود. این امر باعث پارگی در قطعات خواهد شد. از سوی دیگر، بسته به پارامترهای فرآیند، به مسیرهای فشار مختلفی نیاز است تا قطعات به طور مطلوب تولید شوند.

در این پایان نامه، فرآیندهای هیدروفرمینگ لوله‌های کنگره‌ای در قالب‌های بسته و باز، با روش‌های اجزای محدود و تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته و چگونگی پر شدن قالب بررسی شده است. سپس، نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و درستی نتایج حاصل از روش‌های اجزای محدود و تحلیلی نشان داده شده است. بعلاوه، اثر تعداد کنگره‌ها بر نیروی شکل‌دهی و اثر فاصله صفحات قالب بر شکل‌گیری لوله‌های کنگره‌ای در قالب باز بررسی شده است. همچنین، پنجره مناسب شکل‌دهی برای لوله‌های کنگره‌ای در قالب باز ارایه شده است.

در ادامه، با بهره‌گیری از نحوه پر شدن لوله‌های کنگره‌ای، قالب جدیدی برای بهبود پر شدگی لوله‌های پله‌ای ارایه شده و این سازوکار قالب جدید برای لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای و مخروطی با روش‌های اجزای محدود و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس، پر شدگی لوله‌های پله‌ای جعبه‌ای شکل در قالب جدید با روش آزمایشگاهی بررسی شده است. همچنین، علت بهبود پر شدگی قطعه در قالب جدید لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای نسبت به قالب‌های متداول بررسی شده و نشان داده شده است که به دلیل کاهش ناحیه های اصطکاکی، جریان ماده در قالب جدید نسبت به قالب‌های متداول بهتر شده و توزیع تنش در ناحیه گوشه قالب در قالب جدید نسبت به قالب‌های متداول کاهش یافته است. بنابراین، نتیجه گرفته شده است که در قالب جدید می‌توان حفره قالب را بطور کامل پر کرده و به محصولی با گوشه های کاملاً تیز رسید. پیچیده نبودن سازوکار قالب، مسیر ساده فشار، پایین بودن فشار شکل‌دهی و کمتر شدن کاهش ضخامت لوله از دیگر مزایای روش ارایه شده می‌باشد.

هم‌چنین، در این پایان نامه، مواردی مانند مقایسه توزیع ضخامت لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای در قالب‌های جدید و متداول، اثر مسیر فشار بر هندسه و توزیع ضخامت محصول در قالب جدید لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای، اثر قطر قالب و ضخامت لوله بر پر شدگی گوشه قالب جدید لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای، اثر مسیر فشار بر هندسه محصول در قالب جدید لوله‌های پله‌ای مخروطی، توزیع ضخامت لوله‌های پله‌ای مخروطی و اثر طول ناحیه انبساط لوله پله‌ای جعبه‌ای شکل بر میزان پر شدگی در قالب جدید بررسی شده است.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول .....

مقدمه .....

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- شکل دهی فلزات ۱

۱-۳- انواع فرآیندهای شکل دهی فلزات .....

۱-۴- هیدروفرمینگ چیست؟ .....

۱-۵- هیدروفرمینگ لوله .....

۱-۶- معرفی لوله‌های پله‌ای فلزی و تولید آنها با روش هیدروفرمینگ .....

۱-۷- پژوهش‌های انجام شده در زمینه هیدروفرمینگ لوله‌های کنگره‌ای .....

۱-۸- پژوهش‌های انجام شده در زمینه هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای .....

۱-۹- اهداف و ویژگی‌های کلی پایان نامه .....

فصل دوم .....

مراحل آزمایشگاهی .....

۲-۱- مقدمه .....

۲-۲- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده .....

۲-۳- خواص لوله‌های استفاده شده .....

۲-۴- جزییات قالب‌ها

۲-۴-۱- آزمایش هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای در قالب‌های بسته و باز .....

۲-۴-۲- آزمایش هیدروفرمینگ لوله پله‌ای استوانه‌ای .....

۲-۴-۳- آزمایش هیدروفرمینگ لوله پله‌ای مخروطی .....

۲-۴-۴- آزمایش هیدروفرمینگ لوله پله‌ای جعبه‌ای شکل .....

فصل سوم .....

شبیه سازی اجزای محدود .....

۳-۱- مقدمه .....

۳-۲- مدلسازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای در قالب بسته .....

۳-۲-۱- مدلسازی دو بعدی لوله و اجزای قالب در محیط ایجاد قطعه .....

۳-۲-۲- تعریف خصوصیات لوله در محیط خصوصیات مواد .....

۳-۲-۳- مونتاژ لوله و اجزای قالب در محیط سرهم سازی .....

۳-۲-۴- تعریف تعداد مراحل و نوع حل مساله در محیط گام .....
۳-۲-۵- تعریف نوع تماس سطوح اجزا با هم .....
۳-۲-۶- تعریف فشار داخل لوله و شرایط مرزی در محیط بارگذاری و اعمال شرایط مرزی .....
۳-۲-۷- شبکه بندی مدل .....
۳-۲-۸- حل مساله .....
۳-۳- مدلسازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای در قالب باز
۳-۳-۱- مدلسازی دو بعدی لوله و اجزای قالب در محیط ایجاد قطعه.....
۳-۳-۲- تعریف خصوصیات لوله در محیط خصوصیات مواد .....
۳-۳-۳- لوله و اجزای قالب در محیط سرهم سازی .....
۳-۳-۴- تعریف تعداد مراحل و نوع حل مساله در محیط گام .....
۳-۳-۵- تعریف نوع تماس سطوح اجزا با هم .....
۳-۳-۶- تعریف فشار داخل لوله و شرایط مرزی در محیط بارگذاری و اعمال شرایط مرزی .....
۳-۳-۷- شبکه بندی مدل در محیط شبکه بندی مدل .....
۳-۳-۸- حل مساله .....
۳-۴- مدلسازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله پله‌ای استوانه‌ای
۳-۴-۱- مدلسازی دو بعدی لوله و اجزای قالب در محیط ایجاد قطعه.....
۳-۴-۲- تعریف خصوصیات لوله در محیط خصوصیات مواد .....
۳-۴-۳- لوله و اجزای قالب در محیط سرهم سازی .....
۳-۴-۴- تعریف تعداد مراحل و نوع حل مساله در محیط گام .....
۳-۴-۵- تعریف نوع تماس سطوح اجزا با هم .....
۳-۴-۶- تعریف فشار داخل لوله و شرایط مرزی در محیط بارگذاری و اعمال شرایط مرزی .....
۳-۴-۷- شبکه بندی مدل در محیط شبکه بندی مدل .....
۳-۴-۸- حل مساله .....
۳-۵- مدلسازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله پله‌ای مخروطی
۳-۵-۱- مدلسازی دو بعدی لوله و اجزای قالب در محیط ایجاد قطعه.....
۳-۵-۲- تعریف خصوصیات لوله در محیط خصوصیات مواد .....
۳-۵-۳- لوله و اجزای قالب در محیط سرهم سازی .....
۳-۵-۴- تعریف تعداد مراحل و نوع حل مساله در محیط گام .....
۳-۵-۵- تعریف نوع تماس سطوح اجزا با هم .....
۳-۵-۶- تعریف فشار داخل لوله و شرایط مرزی در محیط بارگذاری و اعمال شرایط مرزی .....
۳-۵-۷- شبکه بندی مدل در محیط شبکه بندی مدل .....
۳-۵-۸- حل مساله .....

فصل چهارم .....
مدل تحلیلی لوله‌های کنگره‌ای .....
۴-۱- مقدمه .....
۴-۲- معرفی پارامترهای موثر فرآیند .....
۴-۳- تعیین فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی لوله در مرحله بالج .....
۴-۴- تعیین فشار شروع تغییر شکل پلاستیک در مرحله بالج .....
۴-۵- تعیین فشار در حین تغییر شکل پلاستیک .....
۴-۶- تعیین میزان بالج .....

فصل پنجم .....
نتایج و بحث .....
۵-۱- مقدمه .....
۵-۲- نتایج آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های کنگره‌ای .....
۵-۲-۱- پر شدن لوله کنگره‌ای در قالب بسته .....
۵-۲-۲- پر شدن لوله کنگره‌ای در قالب باز .....
۵-۲-۳- پنجره مناسب شکل دهی برای پر شدن لوله کنگره‌ای در قالب باز .....
۵-۲-۴- بررسی اثر تعداد کنگره‌ها بر نیروی شکل‌دهی لوله کنگره‌ای در قالب باز .....
۵-۲-۵- بررسی اثر فاصله صفحات قالب بر شکل‌گیری لوله‌های کنگره‌ای در قالب باز .....
۵-۲-۶- پیش بینی هندسه لوله‌های کنگره‌ای در قالب باز با روش‌های تجربی و عددی .....
۵-۳- نتایج آزمایشگاهی و عددی فرآیند هیدروفرمینگ لوله پله‌ای استوانه‌ای در قالب جدید .....
۵-۳-۱- بررسی عملکرد قالب جدید لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای نسبت به قالب‌های متداول .....
۵-۳-۲- بررسی توزیع ضخامت لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای در قالب‌های جدید و متداول .....
۵-۳-۳- بررسی نیروی شکل‌دهی لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای در قالب جدید .....
۵-۳-۴- بررسی اثر مسیر فشار بر هندسه محصول در قالب جدید لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای .....
۵-۳-۵- بررسی اثر مسیر فشار بر توزیع ضخامت در قالب جدید لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای .....
۵-۳-۶- بررسی اثر قطر قالب بر پر شدگی گوشه قالب جدید لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای .....
۵-۳-۷- بررسی اثر ضخامت لوله بر پر شدگی گوشه قالب جدید لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای .....
۵-۴- نتایج آزمایشگاهی و عددی فرآیند هیدروفرمینگ لوله پله‌ای مخروطی در قالب جدید .....
۵-۴-۱- بررسی اثر مسیر فشار بر هندسه محصول در قالب جدید لوله‌های پله‌ای مخروطی .....
۵-۴-۲- بررسی توزیع ضخامت لوله پله‌ای مخروطی در قالب جدید .....
۵-۵- نتایج آزمایشگاهی فرآیند هیدروفرمینگ لوله پله‌ای جعبه‌ای شکل در قالب جدید .....
۵-۵-۱- بررسی اثر طول ناحیه انبساط لوله پله‌ای جعبه‌ای شکل بر میزان پر شدگی در قالب جدید .....

فصل ششم .....
نتیجه‌گیری و پیشنهادات .....
۶-۱- مقدمه.....
۶-۲ - نتیجه گیری .....
۶-۳- پیشنهادات.....

فهرست مراجع و منابع علمی استفاده شده در پایان نامه .....

فهرست شکل ها

شکل صفحه

شکل ۱-۱- شماتیک مراحل فرآیند هیدروفرمینگ لوله [۵].....
شکل ۱-۲- شکل‌های هندسی کلی قابل تولید با فرآیند هیدروفرمینگ لوله [۶].....
شکل ۱-۳- نمونه‌های پیچیده‌ای از قطعات پله‌ای تولید شده با روش هیدروفرمینگ لوله، (الف) قاب شاسی، (ب) شاسی موتور مونتاژ شده، (ج) لوله‌های کنگره‌ای (چند پله‌ای)، (د) شیرآلات، (و) اگزوز، (هـ) اجزای سیستم‌های آبرسانی [۷].....
شکل ۱-۴- نمونه‌های ساده‌ای از قطعات پله‌ای شکل داده شده با روش هیدروفرمینگ لوله، الف- لوله پله‌ای استوانه‌ای، ب- لوله پله‌ای جعبه‌ای شکل، ج- لوله پله‌ای مخروطی [۸-۱۰].....
شکل ۱-۵- شماتیک قالب متداول هیدروفرمینگ لوله پله‌ای استوانه‌ای [۵] .....
شکل ۱-۶- نمونه‌هایی از لوله‌های کنگره‌ای تولید شده با فرآیند هیدروفرمینگ لوله [۱۶].....
شکل ۱-۷- الف- مرحله کشش عمیق، ب- مرحله اتوکاری تبدیل بلانک دایره‌ای به لوله اولیه برای به کارگیری در تولید لوله‌های فلزی کنگره‌ای [۱۵].....
شکل ۱-۸- الف - مرحله بالج، ب- مرحله جمع شدن صفحات قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های فلزی کنگره‌ای[۱۵].....
شکل ۱-۹- نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای سه مسیر فشار داخلی، الف- فشار ثابت متوسط، ب- فشار نوسانی، ج- فشار ثابت حداکثر [۳۷] .....
شکل ۱-۱۰- نتایج شبیه‌سازی به دست آمده برای مسیر فشار داخلی مختلف[۳۸] .....
شکل ۱-۱۱- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی به دست آمده برای مسیر فشار داخلی مختلف[۳۸] .....
شکل ۱-۱۲- نتایج شبیه‌سازی به دست آمده برای مسیر فشار داخلی مختلف [۳۹ و ۴۰] .....
شکل ۲-۱- دستگاه تست اونیورسال DMG با تجهیزات ثبت داده‌ها .....
شکل ۲-۲- دستگاه تولید کننده فشار هیدرولیکی .....
شکل ۲-۳- مدار هیدرولیکی استفاده شده در آزمایش‌ها.....
شکل ۲-۴- دستگاه اپتیکال پروفیل پرژکتور Baty .....
شکل ۲-۵- محیط نرم افزار Baty 3D Software دستگاه پروفیل پرژکتور .....
شکل ۲-۶- دستگاه ضخامت سنج اولتراسونیک.....
شکل ۲-۷- مشخصات ابعادی نمونه آزمون کشش لوله، ابعاد به میلیمتر [۴۱] .....
شکل ۲-۸- دستگاه آزمایش اونیورسال INSTRON برای انجام آزمایش کشش لوله.....
شکل ۲-۹- منحنی‌های تنش- کرنش حقیقی بدست آمده از آزمایش کشش لوله‌ها، الف- لوله مسی، ب- لوله فولادی .....
شکل ۲-۱۰- مجموعه قالب‌های هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای، الف- قالب بسته برای لوله یک کنگره‌ای، ب- قالب باز برای لوله هشت کنگره‌ای .....

شکل ۲-۱۱- مجموعه قالب‌های هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای نصب شده بر روی دستگاه آزمایش، الف- قالب بسته، ب- قالب باز با سه کنگره .....
شکل ۲-۱۲- مسیر فشار استفاده شده در آزمایش لوله کنگره‌ای در قالب بسته .....
شکل ۲-۱۳- مراحل شکل‌گیری لوله‌های کنگره‌ای در قالب باز، الف- مرحله بالج، ب- مرحله نهایی و بسته شدن صفحات قالب .....
شکل ۲-۱۴- یک نمونه از مسیر فشار مورد استفاده در آزمایش‌های لوله کنگره‌ای در قالب باز .....
شکل ۲-۱۵- تصویر شماتیک قالب جدید هیدروفرمینگ لوله پله‌ای استوانه‌ای .....
شکل ۲-۱۶- شماتیک مراحل شکل دهی لوله در قالب جدید، الف- مرحله قرارگیری اولیه- ب- مرحله بالج- ج- مرحله شکل گیری نهایی لوله .....
شکل ۲-۱۷- مجموعه قالب هیدروفرمینگ لوله پله‌ای استوانه‌ای، در حالت نصب شده بر روی دستگاه .....
شکل ۲-۱۸- شماتیک مجموعه قالب جدید لوله پله‌ای مخروطی .....
شکل ۲-۱۹- مجموعه قالب جدید هیدروفرمینگ لوله پله‌ای مخروطی در حالت نصب شده بر روی دستگاه .....
شکل ۲-۲۰- شماتیک مجموعه قالب جدید لوله پله‌ای جعبه‌ای شکل .....
شکل ۲-۲۱- مجموعه قالب جدید لوله پله‌ای جعبه‌ای شکل .....
شکل ۲-۲۲- مجموعه قالب هیدروفرمینگ لوله پله‌ای جعبه‌ای شکل در حالت نصب شده بر روی دستگاه .....
شکل ۳-۱- مدل دو بعدی از لوله در محیط ایجاد قطعه در نرم افزار .....
شکل ۳-۲- لوله و قالب بسته لوله یک کنگره‌ای در محیط سرهم‌سازی نرم افزار .....
شکل ۳-۳- شرایط مرزی تعریف شده برای مدلسازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای در قالب بسته.....
شکل ۳-۴- شبکه بندی فرآیند هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای در قالب بسته .....
شکل ۳-۵- مدل دو بعدی از صفحات قالب باز لوله کنگره‌ای با سه کنگره در محیط ایجاد قطعه در نرم افزار .....
شکل ۳-۶- لوله و صفحات قالب باز لوله کنگره‌ای با سه کنگره در محیط سرهم‌سازی در نرم افزار .....
شکل ۳-۷- شرایط مرزی تعریف شده برای مدلسازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای در قالب باز .....
شکل ۳-۸- شبکه بندی یکنواخت فرآیند لوله کنگره‌ای در قالب باز در نرم افزار .....
شکل ۳-۹- لوله و اجزای قالب لوله پله‌ای استوانه‌ای در محیط سرهم‌سازی نرم افزار.....
شکل ۳-۱۰- شرایط مرزی تعریف شده برای مدلسازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله پله‌ای استوانه‌ای .....
شکل ۳-۱۱- شبکه بندی فرآیند لوله پله‌ای استوانه‌ای در نرم افزار.....
شکل ۳-۱۲- لوله و اجزای قالب لوله پله‌ای مخروطی در محیط سرهم‌سازی در نرم افزار.....
شکل ۳-۱۳- شرایط مرزی تعریف شده برای مدلسازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله پله‌ای مخروطی .....
شکل ۳-۱۴- شبکه بندی فرآیند هیدروفرمینگ لوله پله‌ای مخروطی در نرم افزار .....
شکل ۴-۱- شماتیک قالب لوله کنگره‌ای با یک کنگره و پارامترهای هندسی آن .....
شکل ۴-۲- شماتیک لوله برش خورده و پارامترهای هندسی آن در مرحله: الف- اولیه، ب- بالج، ج- نهایی.....

شکل ۴-۳- شماتیک بزرگنمایی شده ناحیه بالج در راستای نصف النهاری برای لوله با یک کنگره .....
شکل ۴-۴- تنش های وارد شده بر یک جزء در ناحیه بالج [۲۵] .....
شکل ۴-۵- شماتیک یک چهارم ناحیه بالج .....

شکل ۵-۱- الف- لوله مسی اولیه، ب- لوله شکل یافته در قالب بسته یک کنگره‌ای .....
شکل ۵-۲- مقایسه پروفیل قطعه شکل داده شده با پروفیل بدست آمده از شبیه‌سازی در قالب بسته یک کنگره‌ای .....
شکل ۵-۳- لوله شکل یافته با شبیه‌سازی در قالب بسته دو کنگره‌ای .....
شکل ۵-۴- لوله شکل یافته در قالب بسته سه کنگره‌ای، اعمال فشار بیش از حد و نازک شدگی ناشی از آن، با شبیه‌سازی .....
شکل ۵-۵- بارگذاری محوری بیش از حد و چروکیدگی ناشی از آن، به دست آمده از شبیه‌سازی برای لوله شکل یافته در قالب بسته سه کنگره‌ای .....
شکل ۵-۶- الف- مرحله بالج لوله با سه کنگره- ب- قطعه شکل داده شده پس از جمع شدن قالب باز .....
شکل ۵-۷- به ترتیب از سمت راست، لوله های کنگره‌ای با سه، پنج و هشت کنگره شبیه‌سازی شده در قالب باز .....
شکل ۵-۸- به ترتیب به ترتیب از سمت راست، لوله های کنگره‌ای با سه، پنج و هشت کنگره شکل داده شده با روش آزمایشگاهی در قالب باز .....
شکل ۵-۹- لوله یک کنگره‌ای شکل داده شده با شبیه‌سازی در فشار ۱۶MPa، الف- مرحله بالج، ب- مرحله میانی در کورس ۸mm، ج- مرحله نهایی در کورس ۱۶mm .....
شکل۵-۱۰- لوله یک کنگره‌ای شکل داده شده با روش آزمایشگاهی در فشار بیشینه ۱۶MPa، الف- مرحله بالج، ب- مرحله میانی در کورس ۸mm .....
شکل ۵-۱۱- لوله یک کنگره‌ای شکل داده شده با شبیه‌سازی در فشار بیشینه ۱۷MPa، الف- مرحله بالج، ب- مرحله میانی در کورس ۸mm، ج- مرحله نهایی در کورس ۱۶mm .....
شکل ۵-۱۲- لوله یک کنگره‌ای شکل داده شده با روش آزمایشگاهی در فشار بیشینه ۱۷MPa، الف- مرحله بالج، ب- مرحله میانی در کورس ۸mm، ج- مرحله نهایی در کورس ۱۶mm .....
شکل ۵-۱۳- قطعات بالج شده در فشارهای مختلف .....
شکل ۵-۱۴- منحنی‌های تجربی و تحلیلی فشار لازم سیال برای مقادیر مختلف میزان بالج (h) .....
شکل ۵-۱۵- لوله یک کنگره‌ای شکل داده شده در مرحله بالج در فشار ۲۹MPa، الف- آزمایشگاهی، ب- شبیه‌سازی .....
شکل ۵-۱۶- پنجره شکل دهی در مرحله بالج برای تولید لوله یک کنگره‌ای .....
شکل ۵-۱۷- پنجره شکل دهی جامع مرحله‌های بالج و بسته شدن برای تولید لوله یک کنگره‌ای .....
شکل ۵-۱۸- لوله سه کنگره‌ای شکل داده شده در مرحله نهایی در فشار ۲۰MPa، الف- شبیه‌سازی، ب- آزمایشگاهی .....
شکل ۵-۱۹- مقایسه نیروی شکل دهی لوله‌های یک و سه کنگره‌ای شکل داده شده با روش آزمایشگاهی برای فشار بیشینه ۲۰MPa .....

شکل ۵-۲۰- اثر فاصله صفحات قالب بر شکل‌گیری لوله‌های کنگره‌ای در قالب باز با روش‌های تجربی و شبیه‌سازی در فشار بیشینه ۲۰MPa .....
شکل ۵-۲۱- مقایسه پروفیل بدست آمده از روش‌های تجربی و شبیه‌سازی در فشار بیشینه ۲۰MPa.....
شکل ۵-۲۲- مسیر فشار اعمال شده برای فرآیندهای شکل‌دهی لوله پله‌ای استوانه‌ای در قالب‌های جدید و متداول.....
شکل ۵-۲۳- لوله شکل داده شده با شبیه‌سازی در قالب متداول هیدروفرمینگ .....
شکل ۵-۲۴- اعمال فشار اضافی و نازک شدگی ناشی از آن برای قالب متداول هیدروفرمینگ .....
شکل ۵-۲۵- بارگذاری محوری اضافی و چروکیدگی ناشی از آن برای قالب متداول هیدروفرمینگ .....
شکل ۵-۲۶- لوله شکل داده شده با شبیه‌سازی در قالب جدید هیدروفرمینگ .....
شکل ۵-۲۷- مقایسه پر شدگی گوشه قالب در قالب‌های جدید و متداول، بدست آمده از شبیه‌سازی.....
شکل ۵-۲۸- لوله شکل داده شده با روش آزمایشگاهی در قالب جدید.....
شکل ۵-۲۹- شماتیک مراحل متوالی پر شدن گوشه قالب جدید (از بالا به پایین) بدست آمده از شبیه سازی، (الف) قالب متداول، (ب) قالب جدید .....
شکل ۵-۳۰- مقایسه نیروهای اصطکاکی در دو قالب، (الف) قالب متداول، (ب) قالب جدید .....
شکل ۵-۳۱- بردارهای جریان ماده در محدوده گوشه قالب در مراحل مختلف، بدست آمده از شبیه‌سازی،(الف) قالب متداول، (ب) قالب جدید .....
شکل ۵-۳۲- توزیع تنش در محدوده گوشه قالب، (الف) قالب متداول، (ب) قالب جدید.....
شکل ۵-۳۳- مقایسه توزیع ضخامت لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای شکل داده شده در قالب جدید و متداول با روش‌های تجربی و اجزای محدود.....
شکل ۵-۳۴- قطعه شکل داده شده در مرحله بالج با فشار ۱۸MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی .....
شکل ۵-۳۵- قطعه شکل داده شده در مرحله بالج با فشار ۲۰MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی .....
شکل ۵-۳۶- قطعه شکل داده شده در مرحله بالج با فشار ۲۱MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی.....
شکل ۵-۳۷- قطعه شکل داده شده در مرحله بالج با فشار ۲۲MPa، الف- شبیه‌سازی، ب- تجربی.....
شکل ۵-۳۸- منحنی تغییرات قـطر بیشینه ناحیه بالج بر حسب فشار داخلی سیال، به دست آمده از نتایج تجربی.....
شکل ۵-۳۹- قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۱۸MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی.....
شکل ۵-۴۰- قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۱۹MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی.....
شکل ۵-۴۱- قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۲۰MPa با گوشه گرد، الف- شبیه‌سازی، ب- تجربی.....
شکل ۵-۴۲- قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۲۱MPa با گوشه تیز، الف- شبیه‌سازی، ب- تجربی.....
شکل ۵-۴۳- توزیع ضخامت لوله پله‌ای استوانه‌ای شکل داده شده در مرحله بالج برای فشار ۲۱MPa.....
شکل ۵-۴۴- توزیع ضخامت لوله پله‌ای استوانه‌ای شکل داده شده در مرحله نهایی برای فشار ۲۱MPa.....

شکل ۵-۴۵- منحنی‌های توزیع ضخامت لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای در مرحله بالج برای فشارهای ۱۸ ، ۲۰، ۲۱ و ۲۲MPa، بدست آمده از شبیه‌سازی.....
شکل ۵-۴۶- منحنی‌های توزیع ضخامت لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای در مرحله نهایی برای فشارهای ۱۸ ، ۱۹، ۲۰ و ۲۱MPa، بدست آمده از شبیه‌سازی .....
شکل ۵-۴۷- مقایسه نیروی شکل دهی لوله پله‌ای استوانه‌ای در قالب جدید با روش‌های تجربی و شبیه‌سازی برای فشار بیشینه ۲۱MPa .....
شکل ۵-۴۸- منحنی توزیع ضخامت قطعه بر حسب افزایش قطر داخلی قالب در فشار ۲۱ MPa، بدست آمده از شبیه‌سازی.....
شکل ۵-۴۹- منحنی ضخامت لوله اولیه بر حسب افزایش فشار شکل‌دهی، بدست آمده از شبیه‌سازی.....
شکل ۵-۵۰- قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۱۸MPaو کورس ۱۵mm، الف- شبیه‌سازی، ب- تجربی .....
شکل ۵-۵۱- قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۱۹MPa و کورس ۱۵mm، الف- شبیه‌سازی، ب- تجربی.....
شکل ۵-۵۲- قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۲۰MPa و کورس ۱۵mm با گوشه گرد، الف- شبیه‌سازی، ب- تجربی .....
شکل ۵-۵۳- قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار ۲۱MPa و کورس ۱۵mm با گوشه تیز، الف- شبیه‌سازی، ب- تجربی .....
شکل ۵-۵۴- قطعه شکل داده شده در مرحله بالج با فشار ۲۲MPa، بدست آمده از آزمایشات تجربی.....
شکل ۵-۵۵- توزیع ضخامت قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی در فشار ۲۱MPa.....
شکل ۵-۵۶- قطعه شکل داده شده با اعمال مسیر فشار شکل (۲-۱۴) در فشاربیشینه ۲۰MPa .....
شکل ۵-۵۷- مسیر فشار استفاده شده در آزمایش‌های تجربی در تولید لوله پله‌ای جعبه‌ای شکل .....
شکل ۵-۵۸- قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی، طول ناحیه جعبه‌ای ۴۰ میلیمتر است.....
شکل ۵-۵۹- قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی، طول ناحیه جعبه‌ای ۸۰ میلیمتر است.....
شکل ۵-۶۰- منحنی طول ناحیه جعبه‌ای شکل بر حسب میزان پر شدگی حفره قالب جدید لوله پله‌ای جعبه‌ای شکل.....

فهرست جدول ها

جدول صفحه

جدول ۲-۱- مشخصات اجزای مدار هیدرولیکی استفاده شده در شکل (۲-۳) .....
جدول ۲-۲- مشخصات لوله‌های استفاده شده و سایرخواص آن.....
جدول ۲-۳- درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده لوله فولادی.....

فهرست علایم

h	میزان بالج	[mm]
$h_{\max}$	میزان بالج در فشار ماکزیمم	[mm]
I	طول قسمت افقی کنگره	[mm]
l_0	طول لوله اولیه	[mm]
l_b	طول ناحیه بالج شده	[mm]
l_i	فاصله بین دو نیمه قالب	[mm]
l_K	طول آزاد لوله در مرحله بالج	[mm]
P	فشار سیال درون لوله	[N/mm^2]
P_y	فشار شروع تغییر شکل پلاستیک لوله	[N/mm^2]
r_0^i	شعاع داخلی اولیه لوله	[mm]
r_0^o	شعاع خارجی اولیه لوله	[mm]
r_0^m	شعاع میانی لوله که برابر میانگین مجموع شعاع خارجی و شعاع داخلی لوله می‌باشد.	[mm]
r_b^i	شعاع داخلی ناحیه بالج	[mm]
r_b^o	شعاع خارجی ناحیه بالج	[mm]
r_d	شعاع گوشه خارجی قالب	[mm]
r_f	شعاع نهایی خارجی گوشه داخلی لوله کنگره ای = شعاع گوشه میانی قالب	[mm]
t	ضخامت لوله در مرحله بالج و بسته شدن قالب‌ها	[mm]
t_0	ضخامت اولیه لوله	[mm]
ρ_b^m	شعاع بالج در راستای نصف النهاری	[mm]
ρ_f	شعاع نهایی خارجی لوله کنگره ای	[mm]
σ_1	تنش اصلی در جهت محیطی	[N/mm^2]
σ_2	تنش اصلی در جهت طولی	[N/mm^2]
σ_3	تنش اصلی در جهت ضخامتی	[N/mm^2]
σ_y	تنش تسلیم ماده لوله	[N/mm^2]
$\overline{\sigma}$	تنش معادل، تنش سیلان	[N/mm^2]
γ	نصف زاویه بالج	[Degree]
ε_1	کرنش محیطی	
ε_2	کرنش طولی	
ε_3	کرنش ضخامتی	
$\overline{\varepsilon}$	کرنش معادل	

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

با پیشرفت روز افزون تکنولوژی و رقابت بازار تجارت، اکثر صنایع مانند صنایع نظامی، فضایی، خودروسازی، پتروشیمی و تاسیساتی به سمت کاهش هزینه و زمان تولید، عرضه محصولاتی سبک‌تر، کم مصرف‌تر، با کیفیت بالاتر و سیستم انعطاف‌پذیر تولید روی آورده‌اند. به همین دلیل استفاده از مواد جدید و فرآیندهای تولید پیشرفته مورد نظر قرار گرفت [۱].

یکی از این فرآیندها که امروزه توجه تولید کنندگان را بسیار به خود جلب کرده است، استفاده از محیط‌های انعطاف‌پذیر در تولید قطعات توخالی و پیچیده می باشد. هیدروفرمینگ یا شکل‌دهی همراه با استفاده از سیال تحت فشار به جای ابزار صلب، فرآیندی است که به دلیل نیاز به تکنولوژی نسبتاً بالا، کاربرد آن تا مدت‌ها به موارد خاص محدود بوده است. با پیشرفت تکنولوژی، ماشین‌آلات تولیدی، سیستم‌های آب‌بندی و فرآیندهای کنترل کامپیوتری در دهۀ اخیر، شکل‌دهی با فشار سیال، به صورت یک روش شکل‌دهی قابل استفاده در صنعت معرفی شده است [۱].

در این فصل، ابتدا فرآیندهای شکل دهی فلزات معرفی و دسته بندی شده و به جایگاه هیدروفرمینگ در بین آنها اشاره می‌شود. پس از معرفی فرآیند هیدروفرمینگ و انواع آن، پژوهش‌های انجام شده پیرامون فرآیند هیدروفرمینگ لوله ارایه خواهد شد. سپس اهداف و ویژگی‌های پایان نامه حاضر تشریح خواهد گردید.

۱-۲- شکل دهی فلزات

از دیدگاه کلی، فرآیندهای تولید محصولات فلزی را می‌توان به پنج دسته تقسیم کرد که عبارتند از [۱]:

۱- فرآیندهای انجمادی یا ریخته‌گری
۲- فرآیندهای شکل دهی فلزات
۳- فرآیندهای ماشینکاری
۴- فرآیندهای اتصال دهی فلزات
۵- فرآیند متالورژی پودر

در همه فرآیندهای بالا ممکن است از عملیات تکمیلی نظیر عملیات حرارتی و پوشش دهی سطح نیز استفاده گردد. فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، فرآیندهایی هستند که در آنها فلز اولیه که به صورت یک ورق گرد یا مستطیلی، یا به شکل یک شمش گرد یا چهارگوش است، توسط ابزار یا قالب با انجام تغییر شکل مومسان[۱]، به هندسه مورد نظر در می‌آید [۱].

۱-۳- انواع فرآیند های شکل دهی فلزات

به طور کلی فرآیندهای شکل دهی فلزات را می‌توان به دو گروه عمده دسته بندی کرد [۱]:

الف – شکل دهی حجمی[۲]

ب – شکل دهی ورق[۳]

شکل دهی حجمی دارای دو مشخصه متمایز زیر است [۱]:

۱- شکل یا سطح مقطع قطعه کار، تغییر شکل مومسان دایمی و زیاد پیدا می‌کند.

۲- مقدار تغییر شکل مومسان در این فرآیند نسبت به تغییر شکل کشسان[۴] معمولاً به قدری زیاد است که از برگشت فنری[۵] قطعه بعد از تغییر شکل صرف نظر می‌شود.

فرآیندهای حدیده کاری[۶]، آهنگری[۷]، نوردکاری[۸] و کشش[۹] ، مثالهایی از فرآیندهای شکل‌دهی حجمی فلزات می‌باشند.

مشخصه های فرآیندهای شکل‌دهی ورق چنین است [۱] :

۱- شکل اولیه قطعه کار به صورت ورق است.

1-Plastic deformation
2-Bulck forming
3-Sheet forming
٤- Elastic deformation
٥- Spring back
6- Extrusion
٧-Forging
8-Rolling
9-Drawing

۲- این فرآیند شکل‌دهی معمولاً تغییر قابل توجهی در هندسه قطعه به وجود می‌آورد، اما مساحت سطح مقطع جسم، زیاد تغییر نمی کند.

۳- گاهی تغییر شکل های مومسان و کشسان از یک مرتبه‌اند. بنابراین نمی‌توان از برگشت فنری چشم‌پوشی کرد.

فرآیندهای کشش عمیق[۱۰]، خمکاری[۱۱] و اسپینینگ[۱۲] نمونه هایی از فرآیندهای شکل‌دهی ورق هستند.

۱-۴- هیدروفرمینگ چیست؟

هیدروفرمینگ یکی از فرآیندهای شکل‌دهی ورقه‌های فلزی است که از سال ۱۹۸۰ میلادی توسعه صنعتی آن آغاز شد. در این روش قطعه خام اولیه، در اثر اعمال فشار سیال و تغذیه محوری به شکل حفره درون قالب در می‌آید [۲]. قطعه خام اولیه معمولاً به صورت ورق یا لوله است. اگر در این فرآیند از ورق استفاده شود، فرآیند هیدروفرمینگ ورق[۱۳] و در صورت استفاده از مقاطع لوله‌ای، فرآیند هیدروفرمینگ لوله[۱۴] نامیده می‌شود. در هر کدام از فرآیندهای هیدروفرمینگ، همواره به یک پرس، قالب و یک سیستم تقویت کننده فشار نیاز است [۲ و۳].

به طور کلی، در فرآیند هیدروفرمینگ، به علت توزیع فشار یکنواخت سیال بر سطح قطعه، محصولی با خواص مکانیکی مطلوب به دست می‌آید. از دیگر مزایای هیدروفرمینگ می‌توان به قابلیت تولید قطعات پیچیده، دقت ابعادی بهتر و بهبود شکل دهی موادی که قابلیت شکل دهی کمی دارند، اشاره کرد. در فرآیند هیدروفرمینگ، در مقایسه با فرآیند کشش عمیق، می‌توان به تغییر شکل‌های بیشتری دست یافت. از طرف دیگر، این فرآیند دارای معایبی است که می‌توان به چرخه آرام تولید و تجهیزات گران قیمت اشاره کرد [۲].

10-Deep drawing
11-Bending
12-Spinning
13-Sheet hydroforming
14-Tube hydroforming