



دانشگاه مازندران
دانشکده فنی و مهندسی

مطالعه تحلیلی و تجربی تاثیر فشار داخلی سیال در شکل دهی لوله های کنگره ای

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی مکانیک - گرایش ساخت تولید

استاد راهنما:

دکتر محمد بخشی

استاد مشاور:

دکتر سید جمال حسینی پور مهندس عبدالحمید گرجی

نگارش:

امین بقالیان

شهریور ماه ۱۳۸۹

تقدیم به پدر، مادر و خواهرم

بی همتا کسانی که به آنان عشق می‌ورزم.

تشکر و قدردانی

پرورش فکر و روح به منزله بال‌های قوی است که پرواز به سوی آسمان سعادت را میسر ساخته، توانایی و اقتدار انسان را در پیمودن مسیر رشد و نیل به اندیشه‌های پاک را افزون تر می‌سازد. هم اکنون که پس از دو سال تلاش مداوم موفق به اتمام پروژه کارشناسی ارشد خود شده‌ام بر خود واجب می‌دانم تا کمال تشکر و قدردانی را از جناب استاد دکتر محمد بخشی استاد راهنمای این پایان‌نامه که از هیچ کوششی در راستای انجام این پژوهش دریغ نفرموده‌اند و در طی سالهای حضور اینجانب در دانشگاه مازندران بسان پدری دلسوز در تمام مراحل زندگی مشاور و چراغ راه من بوده‌اند اعلام بدارم. همچنین بر خود لازم می‌دانم تا از استاد مشاور این پایان‌نامه دکتر سید جمال حسینی‌پور به دلیل حمایت‌های ایشان کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

اینجانب مایه افتخار خود می‌دانم که در دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد در محضر اساتید محترم گروه مکانیک- ساخت و تولید این دانشگاه حضور داشته و از محضر آنان بهره علمی برده‌ام.

در پایان از تمامی دوستان و عزیزانی که مرا در انجام این پژوهش یاری نمودند، به ویژه جناب آقای دکتر مجید الیاسی و مهندس عبدالحمید گرجی و استاد گران قدر دکتر محسن شاکری تشکر و قدردانی می‌نمایم.

امین بقالیان

شهریورماه ۱۳۸۹

چکیده

لوله‌های کنگره‌ای فلزی قطعاتی هستند که در سیستم‌های تاسیساتی برای جلوگیری از انبساط نامنظم لوله‌ها در اثر دما، جذب ارتعاشات محیط و حرکتهای مکانیکی، کنترل دمای سیستم‌های تبرید یا تهویه کننده‌ها بکار می‌روند. علاوه بر کاربرد آنها در صنایع تاسیسات، کاربردهای دیگری نیز در صنایع نظامی، صنایع شیمیایی، صنایع خودروسازی و دیگر صنایع دارند.

تولید لوله‌های کنگره‌ای به روش هیدروفرمینگ، در دو دهه اخیر افزایش بسیار زیادی یافته است. مراحل بشکهای شدن و جمع شدن صفحات قالب از مهم ترین مراحل تولید این قطعات می‌باشند زیرا کیفیت قطعه نهایی تولید شده، وابسته به تولید صحیح قطعه در هر یک از این مراحل می‌باشد. با این وجود، به دلیل پیچیدگی اثر پارامترهای موثر در فرآیند نظیر فشار، تغذیه محوری، نیروی اصطکاک و هندسه قطعه، تولید قطعات با این روش همواره با مشکلاتی همراه بوده است.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی تجربی و تحلیلی فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های کنگره‌ای در دو مرحله انبساط آزاد و جمع شدن صفحات قالب به منظور بررسی تاثیر فشار داخلی سیال در شکل‌دهی این لوله‌ها می‌باشد. در این پایان نامه مدل تحلیلی برای پیش‌بینی تحلیلی فشار شکل‌دهی در مرحله انبساط آزاد و همچنین پیش‌بینی تحلیلی نیروی بسته شدن قالب در مرحله جمع شدن صفحات قالب ارائه گردیده است. نتایج حاصل از مدل تحلیلی با آزمایشات تجربی مقایسه گردیده و مطلوبیت تحلیل انجام شده نشان داده شده است. در ادامه اثر پارامترهایی مانند توان کار سختی، شعاع اولیه، طول آزاد و ضخامت اولیه لوله در مرحله انبساط آزاد بر روی فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین به بررسی پایداری در تولید این لوله‌ها پرداخته شده است. بررسی پارامترهای موثر بر نیروی بسته شدن قالب از قبیل فشار بسته شدن، ضخامت و شعاع لوله نیز به صورت تحلیلی انجام گردیده است.

نشان داده شده است که توان کار سختی، طول آزاد، ضخامت و شعاع لوله اولیه از پارامترهای بسیار موثر بر فشار شکل‌دهی می‌باشند و همچنین در میان پارامترهای دیگر، فاصله بین صفحات قالب که تعیین کننده طول آزاد لوله می‌باشد به همراه شعاع لوله اولیه بر محل شروع ناپایداری در تولید تاثیر مستقیم دارند.

واژگان کلیدی:

هیدروفرمینگ، لوله‌های کنگره‌ای، ناپایداری، بررسی تحلیلی.

فهرست مطالب

i	فهرست شکل‌ها
ii	فهرست جداول
iv	فهرست علائم
۱	فصل اول : مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ فرآیندهای تولید محصولات فلزی
۳	۳-۱ انواع فرآیندهای شکل‌دهی فلزات
۳	۱-۳-۱ فرآیندهای تولید لوله برای هیدروفرمینگ
۴	۴-۱ دسته بندی فرایند هیدروفرمینگ
۴	۱-۴-۱ فرآیند هیدروفرمینگ لوله
۶	۲-۴-۱ فرآیند هیدروفرمینگ ورق
۶	۵-۱ هیدروفرمینگ لوله‌های کنگره‌ای
۷	۶-۱ عیوب در روش هیدروفرمینگ
۹	۷-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه هیدروفرمینگ و هیدروفرمینگ لوله‌های کنگره‌ای
۲۰	۸-۱ مروری بر پایان نامه
۲۱	فصل دوم: مراحل آزمایشگاهی
۲۳	۱-۲ مقدمه
۲۳	۲-۲ معرفی قالب باز و بسته در هیدروفرمینگ لوله
۲۴	۳-۲ معرفی تجهیزات در فرآیند هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای در قالب باز
۲۵	۴-۲ شرح قالب هیدروفرمینگ لوله تک کنگره‌ای
۲۶	۱-۴-۲ سنبه
۲۷	۲-۴-۲ آرینگ
۲۷	۳-۴-۲ شیر کنترل فشار و شیر یک طرفه
۲۷	۴-۴-۲ سیال هیدرولیکی
۲۸	۵-۴-۲ فاصله انداز
۲۸	۶-۴-۲ میله راهنما
۲۹	۵-۲ مشخصات ماده لوله
۳۰	۶-۲ روش تست بالچ لوله برای تعیین مشخصات ماده لوله
۳۲	فصل سوم: مدل تحلیلی
۳۲	۱-۳ مقدمه
۳۲	۲-۳ مدل تحلیلی
۳۲	۱-۲-۳ معرفی مدل
۳۲	۲-۲-۳ تعیین فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی لوله در مرحله انبساط آزاد
۳۸	۳-۲-۳ تشخیص ناپایداری در انبساط آزاد
۳۹	۴-۲-۳ پیش‌بینی هندسه لوله کنگره‌ای فلزی U شکل جدار نازک

۴۰.....	۵-۲-۳ پیش‌بینی نیروی لازم برای بسته شدن قالب‌ها در شکل‌دهی لوله کنگره‌ای
۴۱.....	۶-۲-۳ پیش‌بینی فشار لازم برای شروع شکل‌دهی لوله کنگره‌ای در مرحله انبساط آزاد
۴۲.....	فصل چهارم: نتایج و بحث
۴۳.....	۱-۴-۱ مقدمه
۴۳.....	۲-۴-۲ روش تست بالچ
۴۴.....	۱-۲-۴ معرفی فرآیند تست بالچ
۴۴.....	۲-۲-۴ مقایسه نتایج روش تست بالچ با آزمایش‌های تجربی
۴۵.....	۳-۲-۴ مقایسه نتایج روش تست کشش لوله با نتایج آزمایش‌های تجربی
۴۵.....	۳-۴-۳ محدوده شکل‌دهی
۴-۴	۴-۴ بررسی تحلیلی اثر پارامترهای مختلف فرآیند بر روی فشار شکل‌دهی در مرحله انبساط آزاد و نیروی بسته شدن قالب
۴۶.....	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۵۳.....	۱-۵-۱ نتیجه‌گیری
۵۴.....	۲-۵-۲ پیشنهادات
۵۵.....	منابع و مراجع
۵۸.....	

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ روش‌های مختلف تولید لوله برای هیدرو فرمینگ لوله ۲
- شکل ۲-۱ مراحل حل روش هیدرو فرمینگ لوله ۵
- شکل ۳-۱ (الف) قطعه خم شده، (ب) قطعه لهیده شده، (ج) قطعه انبساط یافته، (د) قطعه با پیش آمدگی، (ه) قطعه پیچیده هیدروفرم شده اتومبیل ۶
- شکل ۴-۱ مراحل روش هیدرو فرمینگ لوله کنگره‌ای، (الف) انبساط آزاد (ب) بسته شدن صفحات قالب ۷
- شکل ۵-۱ انواع متداول عیوب در هیدروفرمینگ لوله، (الف) پارگی (ب) کمانش (ج) چروکیدگی ۸
- شکل ۶-۱ شماتیک انواع لوله‌های کنگره‌ای تولید شده در روش هیدروفرمینگ یک مرحله‌ای (الف) مستطیلی (ب) دایروی (ج) مثلثی ۱۰
- شکل ۷-۱ انواع لوله‌های کنگره‌ای تولید شده در روش هیدروفرمینگ یک مرحله‌ای (الف) مستطیلی (ب) دایروی (ج) مثلثی ۱۰
- شکل ۸-۱ شکل قالب و لوله کنگره‌ای تولید شده ۱۰
- شکل ۹-۱ (الف) قالب (ب) لوله کنگره‌ای نهایی ۱۰
- شکل ۹-۱ مراحل که در بررسی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفتند (الف) اولیه (ب) انبساط آزاد (ج) جمع شدن صفحات قالب (د) برگشت فوری ۱۱
- شکل ۱۰-۱ مقایسه شکل یک کنگره از لوله در مراحل مختلف ۱۲
- شکل ۱۱-۱ مقایسه بین نتایج شبیه سازی و تجربی برای توزیع ۱۳
- شکل ۱۲-۱ مقایسه منحنی نیرو-فشار در حالت شروع تسلیم و تغییر شکل پلاستیک برای مشخصات ماده ورق و مشخصات ماده لوله ۱۳
- شکل ۱۳-۱ مقایسه منحنی نیرو-فشار برای مقادیر متفاوت ضریب اصطکاک برای یک لوله و قالب یکسان در مسیرهای نیرو-فشار متفاوت ۱۴
- شکل ۱۴-۱ شکل چروکهای مفید و چروکهای غیرقابل برگشت در مرحله میانی و شکل قطعه پایانی (الف) چروک مرده و قطعه تولید شده از آن (ب) چروک مفید و قطعه تولید شده از آن ۱۴
- شکل ۱۵-۱ پنجره شکل‌دهی پس از در نظر گرفتن چروکهای مفید ۱۵
- شکل ۱۶-۱ هیدروفرمینگ با فشار ثابت و نوسانی ۱۵
- شکل ۱۷-۱ (الف) فشار ثابت و پایین (ب) فشار ثابت و بالا (ج) فشار نوسانی ۱۵
- شکل ۱۷-۱ مسیرهای متفاوت فشار استفاده شده در شبیه‌سازی ۱۶
- شکل ۱۸-۱ رابطه بین فشار هیدرولیک و شعاع گوشه قالب با استفاده از دو کد المان محدود مختلف ۱۶
- شکل ۱۹-۱ مقایسه بین نتایج مدل تحلیلی و تحلیل المان محدود ۱۷
- شکل ۲۰-۱ مقایسه بین نتایج مدل ریاضی و تحلیل المان محدود ۱۷
- برای ضخامتهای مختلف در نمودار فشار-انبساط ۱۸
- شکل ۲۱-۱ مقایسه منحنی تنش سیلان حاصل از نتایج مدل تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی ۱۹
- برای ماده لوله SS 304 ۱۹
- شکل ۲۲-۱ مقایسه ضخامت ناحیه بالج حاصل از نتایج مدل تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی ۱۹
- برای ماده لوله A16260-T4 ۱۹

شکل ۱-۲۳	مقایسه نمودار تنش سیلان نتایج آزمایشگاهی با مدل تحلیلی برای مشخصات بدست آمده از تست بالچ با منحنی تجربی تنش سیلان با استفاده از مشخصات ورق.	۲۰
شکل ۲-۱	قالب بسته هیدروفرمینگ لوله	۲۴
شکل ۲-۲	قالب باز هیدروفرمینگ لوله	۲۴
شکل ۲-۳	دستگاه آزمایش اونیورسال (DMG) ۶۰۰ KN	۲۵
شکل ۲-۴	شماتیک قالب باز هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای	۲۵
شکل ۲-۵	مجموعه قالب هیدروفرمینگ برای بیلوز یک کنگره‌ای، نصب شده بر روی دستگاه آزمایش	۲۶
شکل ۲-۶	الف) سنبه بالایی ب) سنبه پایینی برای هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای در قالب باز	۲۷
شکل ۲-۷	قطعات هیدرولیکی مورد استفاده	۲۷
شکل ۲-۸	دو فاصله انداز که با ماشین CNC ماشینکاری شده‌اند	۲۸
شکل ۲-۹	قالب باز هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای آماده برای نصب بر روی دستگاه آزمایش	۲۸
شکل ۲-۱۰	نمودار تنش-کرنش واقعی حاصل از تست کشش لوله فولادی SS316l	۲۹
شکل ۳-۱	تصویر برش خورده لوله در مراحل مختلف	۳۳
شکل ۳-۲	تنش‌های وارد شده بر المانی در وسط لوله	۳۴
شکل ۳-۳	شماتیک یک چهارم بالایی لوله در حال انبساط	۳۵
شکل ۳-۴	شماتیک برش خورده لوله با دیواره عمودی و قالب در حین بسته شدن قالب‌ها	۴۱
شکل ۴-۱	تصویر لوله‌های منبسط شده در فشارهای ۱۸، ۲۰، ۲۲ و ۲۵ MPa	۴۴
شکل ۴-۲	مقایسه بین منحنی‌های فشار-انبساط تجربی و تحلیلی	۴۵
شکل ۴-۳	مقایسه بین منحنی‌های فشار-انبساط تجربی و تحلیلی	۴۵
شکل ۴-۴	نقطه ناپایداری در نمودار فشار-انبساط	۴۶
شکل ۴-۵	نمودار فشار-انبساط برای لوله‌های یکسان در شرایط یکسان قالب با n متفاوت در مرحله انبساط آزاد	۴۷
شکل ۴-۶	نمودار فشار-انبساط برای لوله‌های یکسان در قالب با l_0 متفاوت در مرحله انبساط آزاد	۴۷
شکل ۴-۷	نمودار فشار-انبساط برای لوله‌های یکسان با شعاع‌های داخلی متفاوت	۴۸
شکل ۴-۸	نمودار فشار-انبساط برای لوله‌های یکسان اما با ضخامت‌های متفاوت در مرحله انبساط آزاد	۴۸
شکل ۴-۹	نمودار نیرو-کورس تجربی و تحلیلی با استفاده از نتایج تست کشش و تست بالچ	۴۹
شکل ۴-۱۰	نمودار نیرو-کورس برای دو لوله با شرایط یکسان اما با فشارهای بسته شدن متفاوت ۱۷ و ۱۹ MPa	۵۰
شکل ۴-۱۱	نمودار نیرو-کورس برای لوله‌های با شرایط یکسان اما با ضخامت‌های متفاوت	۵۰
شکل ۴-۱۲	نمودار نیرو-کورس برای لوله‌های با شرایط یکسان اما با قطرهای متفاوت	۵۱
شکل ۴-۱۳	نمودار انبساط در فشار ماکزیمم در طولهای آزاد مختلف	۵۱
شکل ۴-۱۴	نمودار انبساط در فشار ماکزیمم برای ضخامت‌های مختلف	۵۲

فهرست جداول

جدول ۱-۲	مشخصات هندسی قالب مورد استفاده	۲۶
جدول ۲-۲	خواص روغن به کار رفته در آزمایشها	۲۸
جدول ۳-۲	مشخصات هندسی لوله فولادی SS316L اولیه	۲۹
جدول ۴-۲	مشخصات مکانیکی لوله فولادی SS316L حاصل از تست کشش	۲۹
جدول ۵-۲	اطلاعات فشار-میزان انبساط در دو فشار (MPa) ۲۵ و ۱۸ در مرحله انبساط آزاد برای لوله فولادی SS316L حاصل از تست انبساط آزاد (بالج)	۳۱

فهرست علائم

علائم

شعاع داخلی اولیه لوله	r_0
شعاع خارجی اولیه لوله	R_0
شعاع داخلی لوله برای المانی در وسط لوله در مرحله بسته شدن قالب‌ها	r_1
ضخامت اولیه لوله	t_0
شعاع گوشه داخلی قالب	r_d
شعاع گوشه خارجی قالب	r_f
طول قسمت افقی لوله کنگره ای	I
طول آزاد لوله در مرحله انبساط آزاد	l_k
طول کمان انبساط یافته لوله در حین انبساط آزاد	l_b
مقدار انبساط شعاعی	h
مقدار انبساط آزاد در فشار ماکزیمم	$h(p_{\max})$
فشار داخلی سیال در لوله	P

علائم یونانی

شعاع میانی لوله که برابر میانگین مجموع شعاع خارجی و شعاع داخلی لوله می‌باشد	ρ_1
شعاع میانی لوله اولیه که میانگین مجموع شعاع خارجی و شعاع داخلی لوله می‌باشد	ρ_0
شعاع نصف النهاری لوله	ρ_2
تنش اصلی در جهت محیطی، تنش اصلی در جهت نصف النهاری، تنش اصلی در جهت عمود بر ورق لوله یا شعاعی	$\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$
کرنش محیطی، کرنش طولی، کرنش ضخامتی	$\varepsilon_3, \varepsilon_2, \varepsilon_1$
نصف زاویه انبساط آزاد	γ
کرنش معادل	$\bar{\varepsilon}$
تنش معادل (تنش سیلان)	$\bar{\sigma}(\sigma_f)$
تنش تسلیم	σ_y

فصل اول



مقدمه

۱-۱ مقدمه

هدف اصلی فرآیندهای شکل‌دهی فلزات در حالت جامد ایجاد تغییر شکل مطلوب در ماده خام اولیه‌ای است که عموماً این ماده خام اولیه دارای شکل هندسی ساده‌ای می‌باشد. با پیشرفت روزافزون تکنولوژی و رقابت فزاینده، صنایع خودروسازی به سمت کاهش هزینه و زمان تولید، عرضه محصولاتی سبکتر، باکیفیت بالاتر و سیستم انعطاف پذیر در تولید روی آورده اند. از این رو، استفاده از مواد جدید و فرآیندهای تولید پیشرفته مد نظر قرار گرفته است [۱]

صنعت اتومبیل‌سازی در سالهای اخیر تمایل فزاینده‌ای به هیدروفرمینگ لوله داشته است. مزایای هیدروفرمینگ در کنار قابلیت استفاده از فولادهای با استحکام بالا که معمولاً قابلیت شکل دهی کمتری دارند، توانایی تولید اجزاء اساسی صنایع خودروسازی با وزن کمتر و کارایی بهتر را در اختیار قرار داده است [۲].

به طور خلاصه مزایای روش هیدروفرمینگ عبارت است از [۳]:

الف) کاهش در هزینه قطعه، ابزار و محصول نهایی

ب) افزایش استحکام در قطعات تولیدی

ج) توزیع یکنواخت تر ضخامت

د) احتیاج به عملیات بعدی کمتر

از محدودیت‌های تکنولوژی هیدروفرمینگ می‌توان به سیکل تولید کندتر و همچنین نبود منبع اطلاعاتی موثق و کارا برای طراحی و انجام فرآیند اشاره نمود [۳].

در این فصل ابتدا به معرفی فرآیند هیدروفرمینگ و هیدروفرمینگ لوله‌های کنگره‌ای پرداخته شده و در ادامه مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه هیدروفرمینگ لوله و لوله‌های کنگره‌ای صورت پذیرفته است.

۱-۲ فرآیندهای تولید محصولات فلزی

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

۱- فرآیندهای انجمادی یا ریخته‌گری

۲- فرآیندهای شکل‌دهی فلزات در حالت جامد

۳- ماشینکاری

۴- فرآیندهای اتصالی

۵- متالورژی پودر

فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، فرآیندهایی هستند که در آنها فلز اولیه در اثر اعمال تغییر شکل مومسان، توسط ابزار یا قالب شکل می‌گیرد. در این فرآیندها، فلز اولیه ممکن است بصورت یک ورق یا یک شمش باشد.

۱-۳ انواع فرآیندهای شکل‌دهی فلزات

بطور کلی فرآیندهای شکل‌دهی فلزات را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد [۱]:

الف- شکل‌دهی حجمی^۱

ب- شکل‌دهی ورق^۲

فرآیندهای حدیده‌کاری، آهن‌گری، نوردکاری و کشش، مثالهایی از فرآیندهای شکل‌دهی حجمی فلزات می‌باشند.

فرآیندهای کشش عمیق و خمکاری نمونه‌هایی از فرآیندهای شکل‌دهی ورق هستند. روش هیدروفورمینگ نیز یکی از روش‌های تولید قطعات فلزی است که بطور خاص جزء گروه فرآیندهای شکل‌دهی ورق دسته بندی می‌شود.

۱-۳-۱ فرآیندهای تولید لوله

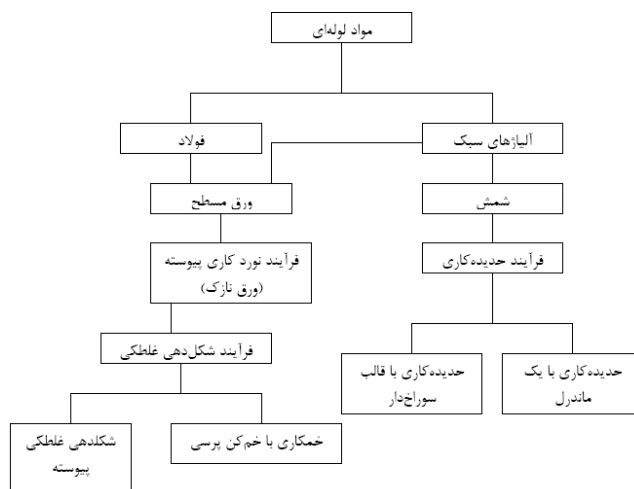
شکل (۱-۱) فرآیندهایی را نشان می‌دهد که برای تولید لوله‌ها استفاده می‌شوند. بیشتر لوله‌های فولادی با فرآیند شکل‌دهی غلطکی^۳ و سپس جوشکاری تولید می‌شوند. لوله‌های آلیاژی سبک معمولاً با فرآیند اکستروژن تولید می‌شوند.

¹ - Bulk forming

² - Sheet forming

³ Roll forming

بعضی از انواع لوله‌های آلیاژی سبک می‌توانند با استفاده از فرآیند شکل‌دهی غلطکی پیوسته تولید شوند، هر چند در این روش کیفیت جوشکاری بیشترین تاثیر را بر روی کیفیت لوله خواهد داشت و هزینه تولید لوله نسبتاً بالا می‌باشد.

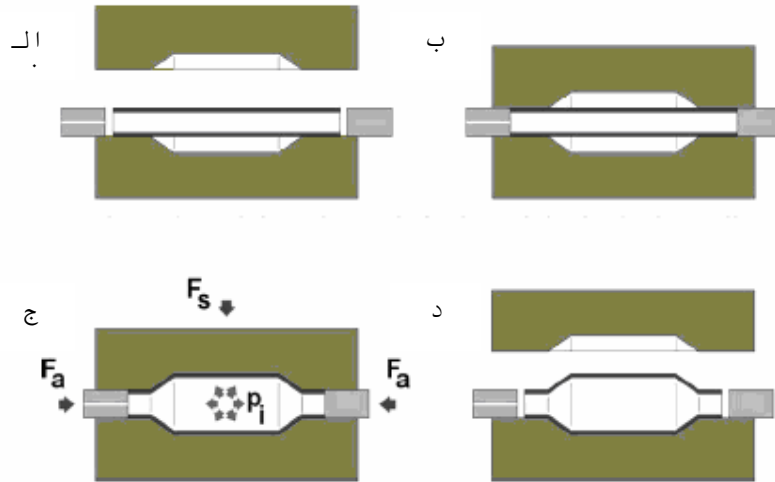


شکل ۱-۱ روش‌های مختلف تولید لوله برای هیدروفرمینگ لوله [۳].

۴-۱ دسته بندی فرآیند هیدروفرمینگ

۱-۴-۱ فرآیند هیدروفرمینگ لوله

مراحل تولید قطعات توخالی لوله‌ای شکل با روش هیدروفرمینگ در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، ابتدا لوله درون قالب قرار می‌گیرد (شکل ۱-۲-الف). بعد از بسته شدن قالب، دو سنبه دو انتهای لوله را مطابق شکل (۱-۲-ب) به گونه ای که کامل آب بندی شود، می‌پوشانند. سپس سیال توسط پمپ به درون لوله تزریق می‌شود. در این حین هوا از فاصله کوچک بین سنبه ها و لوله خارج می‌شود. پس از پر شدن لوله از سیال، سنبه ها آب بندی را کامل می‌کنند. سپس با اعمال فشار داخلی سیال و نیروی محوری توسط سنبه ها قطعه تا میزان زیادی شکل می‌گیرد. آنگاه، فشار داخلی افزایش یافته و به اصطلاح عمل کالیبراسیون انجام می‌شود. این عمل برای پر شدن گوشه های قالب مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱-۲-ج). بعد از اتمام عملیات شکل‌دهی، فشار داخلی تا حد صفر کاهش یافته، سنبه ها به موقعیت اولیه خود برگشته و قالب مطابق شکل (۱-۲-د) باز می‌شود [۴].



شکل ۱-۲ مراحل تولید هیدرو فرمینگ لوله [۳].

مطابق شکل (۱-۳)، لوله‌های هیدروفرم شده انواع مختلفی دارند و معمولاً یک یا ترکیبی از عملیات

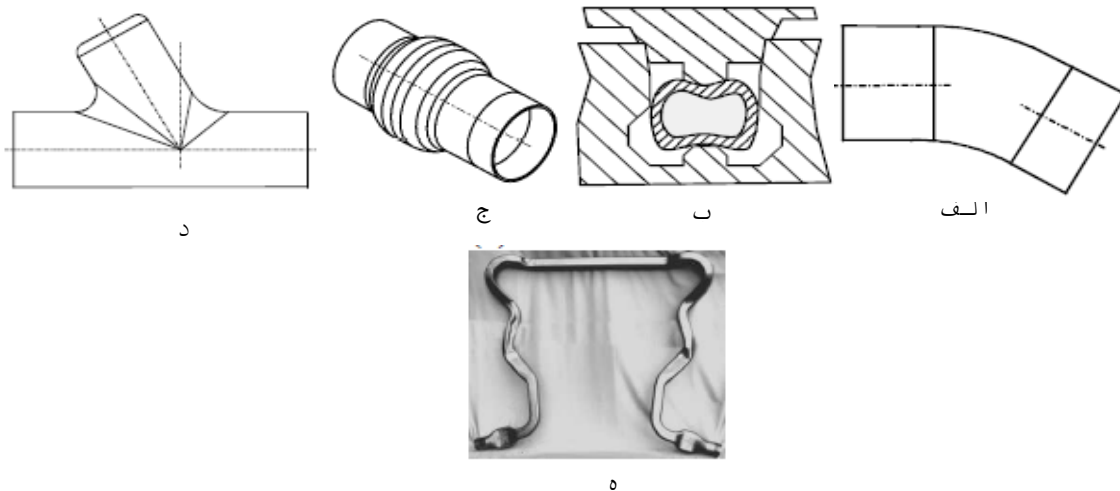
زیر به کمک فشار سیال بر روی آنها انجام می‌شود [۵]:

۱- خمکاری

۲- لهیدگی^۱

۳- انبساطدهی^۲

۴- پیش آمدگی^۳



1- Crushing
2- Bulging
3- Sticking out

شکل ۱-۳ الف) قطعه خم شده، ب) قطعه لهیده شده، ج) قطعه انبساط یافته، د) قطعه با پیش آمدگی، ه) قطعه پیچیده هیدروفرم شده اتومبیل [۵].

۱-۴-۲ فرآیند هیدروفرمینگ ورق

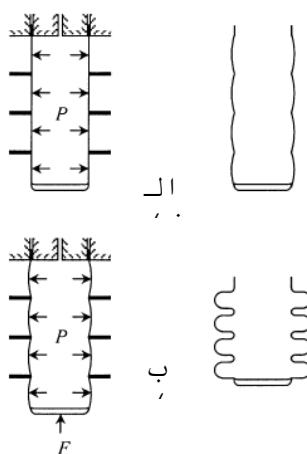
فرآیند هیدروفرمینگ ورق فرآیندی است که در آن از سیال برای بهینه سازی فرآیند کشش عمیق معمولی استفاده می‌شود. در واقع، می‌توان آنرا یکی از روش های کشش عمیق در نظر گرفت. به طور کلی پیشرفت و کاربرد صنعتی هیدروفرمینگ ورق نسبت به لوله کمتر بوده است. دلایل این امر عبارتند از: اولاً قطعات تولیدی هیدرو فرمینگ لوله را با استفاده از روش های سنتی به سختی می‌توان تولید نمود، در حالی که قطعات هیدروفرمینگ ورق را اغلب می‌توان به کمک کشش عمیق تولید کرد. ثانیاً مساحت تحت فشار در فرآیند هیدروفرمینگ ورق بسیار بیشتر از لوله است. این امر به تناژ پرس و نیروی قفل کننده‌گی بالایی در هیدرو فرمینگ ورق نسبت به لوله نیاز خواهد داشت. ثالثاً در هیدروفرمینگ لوله، به علت ماهیت هندسی قطعه لوله ای شکل، سیال درون یک حجم تقریباً بسته حبس می‌شود. به همین دلیل آب‌بندی آن ساده‌تر می‌باشد، در حالی که هیدرو فرمینگ ورق این‌گونه نیست [۶]. با این وجود، شرکت‌های بسیاری مخصوصاً خودرو سازان از این فرآیند در تولید قطعات از جنس‌های مختلف چون فولاد کم کربن، فولاد زنگ نزن، فولاد با استحکام بالا، آلیاژهای آلومینیم، منیزیم، تیتانیم، مس و فلزات و آلیاژهای مشابه استفاده می‌کنند. به طور خلاصه اکثر موادی را که در فرآیندهای معمولی استفاده می‌شوند، می‌توان به این روش شکل داد [۶].

در فرآیند هیدروفرمینگ ورق بسته به شرایط فرآیند به فشار بین ۳۰ تا ۱۵۰ MPa نیاز می‌باشد، اما فشار ۲۰۰ MPa نیز گزارش شده است. توانایی تجهیزات به کار رفته برای این تکنولوژی به طور معمول بین ۲۰۰۰ KN تا ۶۰۰۰ KN است ولی از پرسی با ظرفیت ۱۲۰۰۰ KN نیز استفاده شده است [۶]. در تکنولوژی هیدروفرمینگ ورق، شکل نهایی قطعه کار ممکن است در ماتریس یا بر روی سنبه ماشینکاری شود. در صورتی که شکل نهایی قطعه کار در ماتریس ماشینکاری شود، سیال وظیفه وارد کردن نیرو به ورق برای شکل دادن آن در درون حفره ماتریس را به عهده دارد. چنانچه شکل نهایی قطعه کار بر روی سنبه ماشینکاری شود، روغن وظیفه چسباندن ورق به سطح سنبه را بر عهده خواهد داشت [۶].

۱-۵ هیدروفرمینگ لوله‌های کنگره‌ای

مراحل اصلی تولید لوله‌های کنگره‌ای از دو بخش انبساط آزاد و بسته شدن صفحات قالب تشکیل می‌شود. در مرحله انبساط آزاد فشار داخلی لوله بالا برده می‌شود تا قطر لوله به حد انبساط مورد نظر برسد. این مرحله در شکل (۱-۴-الف) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱-۴-ب) در مرحله بسته شدن قالبها، فشار در داخل لوله در حد معینی ثابت نگاه داشته می‌شود و عمل بسته شدن قالب ها انجام می‌شود

[۷].

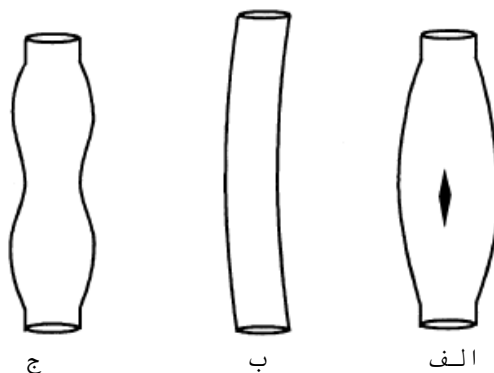


شکل ۱-۴ مراحل روش هیدروفرمینگ لوله کنگره‌ای، الف) انبساط آزاد ب) بسته شدن صفحات قالب [۷].

۱-۶ عیوب در روش هیدروفرمینگ

متداول ترین عیوبی که در روش هیدروفرمینگ لوله اتفاق می‌افتند عبارتند از کمانش، چروکیدگی و پارگی که در شکل (۱-۵) نشان داده شده‌اند.

پارگی به واسطه تنش محیطی کششی بیش از اندازه اتفاق می‌افتد که منجر به پارگی در راستای محور لوله می‌شود در حالی که تنش محوری فشاری بیش از اندازه منجر به چروکیدگی یا کمانش می‌شود. ریسک کمانش در ابتدای فرآیند بیشتر می‌باشد خصوصا اگر فرآیند همراه با تغذیه محوری باشد. اگر کمانش اتفاق بیافتد دیگر ادامه فرآیند به دلیل ناپایداری امکان پذیر نخواهد بود [۲].



شکل ۱-۵ عیوب متداول در هیدروفورمینگ لوله، الف) پارگی ب) کمناش ج) چروکیدگی [۸].
 به علت کمبود و نقص در روش‌های پیش‌بینی عیوب در هیدروفورمینگ لوله، برای پیش‌بینی عیوب در این فرآیند از روش‌های پیش‌بینی عیوب در شکل‌دهی ورق استفاده گسترده‌ای شده است. در این میان منحنی‌های حد شکل‌دهی (FLD) بر پایه فرضیه مسیره‌های متناسب نیرو به صورت تجربی تولید شده‌اند. لوی [۹] از منحنی‌های حد شکل‌دهی برای پیش‌بینی شکل‌پذیری در هیدروفورمینگ لوله بهره جست و اعلام نمود که منحنی‌های حد شکل‌دهی برای هیدروفورمینگ لوله باید بالاتر از منحنی‌های حد شکل‌دهی به دست آمده از ماده ورق صاف لوله باشد. روش دیگر در پیش‌بینی عیوب با استفاده از فرضیه شکست نرم می‌باشد. برخلاف منحنی‌های FLD این فرضیه مستقل از مسیر نیرو می‌باشد و پیش‌بینی می‌نماید که عیوب زمانی روی دهند که مقدار کلی نرمی از یک مقدار بحرانی بیشتر شود که این مقدار بحرانی از طریق تست کشش به دست می‌آید. فیلیس در سال ۲۰۰۱ [۱۰]، از شیوه شکست نرم کرکرفت^۱ و لاتمام^۲ برای شبیه‌سازی انبساط ساده به صورت موفقیت آمیزی استفاده نمود و به صورت تجربی این روش را مورد تایید قرار داد. همچنین فرضیه نازک شدگی بیشینه یکی دیگر از روش‌های پیش‌بینی زوال می‌باشد. هرچند این شیوه وقتی که حالت تنش دو محوره اعمال شود قابل استفاده نمی‌باشد.

تحلیل شروع و رشد چروک‌ها در مقالات به صورت گسترده‌ای در حوزه شکل‌دهی ورق یافت می‌شوند. این تحلیل‌ها عموماً بر پایه سه روش زیر می‌باشند:

۱- تئوری دو شاخه‌ای شدن پلاستیک

۲- روش انرژی

۳- روش هندسی

پدیده چروکیدگی در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار نگرفته است. مراجع [۱۱ و ۱۲] به نحوه

پیش‌گیری از چروکیدگی پرداخته‌اند.

^۱- Crokroft

^۲- Latham

۷-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه هیدروفرمینگ لوله و لوله‌های

کنگره‌ای

در زمینه تولید لوله های فلزی کنگره‌ای با استفاده از روش هیدروفرمینگ، مطالعات محدودی از سوی محققان انجام گردیده است.

مطابق شکل (۶-۱) کانگ و همکارانش [۱۳] به بررسی امکان تولید لوله‌های کنگره‌ای با اشکال مستطیلی، دایروی و مثلثی از طریق یک فرآیند هیدروفرمینگ یک مرحله‌ای با کنترل هم‌زمان فشار و نیروی محوری پرداختند. آنها همچنین قابلیت هیدروفرمینگ هر شکل را با توجه به پروسه شکل‌دهی مطالعه کردند و اثر اصطکاک را نیز مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که روغن‌کاری خوب یک پارامتر بسیار موثر در شکل‌پذیری لوله‌های کنگره‌ای فلزی می‌باشد و امکان تولید لوله‌های کنگره‌ای فلزی با اشکال مختلف توسط هیدروفرمینگ یک مرحله‌ای وجود دارد. همچنین یاد آور شدند که اعمال نیروی فشاری کنترل شده باعث تولید قطعات مستحکم‌تر و به تعویق افتادن پارگی می‌شود و در ضمن تفاوت ضخامت بین ناحیه انبساط یافته و انبساط نیافته با اعمال روغنکاری مناسب کاهش یافته و در نهایت شکل مثلثی دارای بیشترین تفاوت در ضخامت بین ناحیه انبساط یافته و انبساط نیافته و شکل مستطیلی دارای کمترین تفاوت در این زمینه می‌باشد. قطعات نهایی تولید شده با این روش در شکل (۷-۱) نشان داده شده اند.

