

الحمد لله
الرحمن الرحيم

دانشکده فنی
گروه مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ قطعات استوانه‌ای با سر کروی

به روش تراز قاچی شکل

از
صادق معتمد

استاد راهنما
دکتر علی باستی
دکتر مجید علی طاوولی

استاد مشاور
دکتر محمد بخشی جویباری

اسفند ۱۳۹۰

تقدیر و تشکر

از اساتید راهنمای محترم دکتر علی باستی و دکتر مجید علی طاولی
و استاد مشاور محترم دکتر محمد بخشی جویباری
و جناب آقای دکتر عبدالحمید گرجی

که در مراحل انجام این پژوهش از راهنمایی‌های ایشان بهره برده‌ام

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ر.....	چکیده فارسی.....
ز.....	چکیده انگلیسی.....
۱.....	۱ مقدمه.....
۲.....	۱-۱ کلیات.....
۳.....	۲-۱ روش‌های اصلی هیدروفرمینگ ورق.....
۴.....	۱-۲-۱ هیدروفرمینگ استاندارد.....
۴.....	۲-۲-۱ کشش عمیق هیدرومکانیکی.....
۵.....	۳-۲-۱ روش کشش عمیق هیدرودینامیکی.....
۶.....	۴-۲-۱ کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی.....
۶.....	۵-۲-۱ کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار یکنواخت روی ورق.....
۷.....	۶-۲-۱ کشش عمیق با فشار هیدرولیکی دوطرفه.....
۸.....	۷-۲-۱ روش سنبه - سیال.....
۸.....	۸-۲-۱ روش ترکیبی.....
۹.....	۳-۱ مروری بر پژوهش‌های پیشین.....
۲۵.....	۲ تحلیل ناپایداری در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ قطعات استوانه‌ای.....
۲۷.....	۱-۲ محاسبه توزیع تنش با استفاده از روش تراز قاچی شکل.....
۳۰.....	۱-۱-۲ موازنه حجم ورق برای ناحیه یک.....
۳۱.....	۲-۱-۲ موازنه حجم ورق برای ناحیه دو.....
۳۲.....	۳-۱-۲ جایگذاری روابط کرنش با استفاده از روابط موازنه حجم.....
۳۲.....	۲-۲ محاسبه تنش در مقطع بحرانی با استفاده از تعادل ایستایی.....
۳۳.....	۳-۲ حد نهایی تنش در شرایط ناپایداری.....
۳۵.....	۴-۲ روابط حد نهایی فشار.....
۴۰.....	۳ تحلیل ناپایداری در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ قطعات استوانه‌ای سرکروی.....
۴۱.....	۱-۳ محاسبه توزیع تنش با استفاده از روش تراز قاچی شکل.....
۴۲.....	۱-۱-۳ موازنه حجم ورق برای ناحیه یک.....

- ۳-۱-۲ موازنه حجم ورق برای ناحیه دو..... ۴۵
- ۳-۱-۳ جایگذاری روابط کرنش با استفاده از روابط موازنه حجم..... ۴۸
- ۳-۲ محاسبه تنش در مقطع بحرانی با استفاده از تعادل ایستایی..... ۴۸
- ۳-۳ حد نهایی تنش در شرایط ناپایداری..... ۴۸
- ۳-۴ روابط حد نهایی فشار..... ۴۸
- ۴ تحلیل ناپایداری در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ قطعات مخروطی..... ۵۲
- ۴-۱ محاسبه توزیع تنش با استفاده از روش تراز قاچی شکل..... ۵۴
- ۴-۱-۱ موازنه حجم ورق برای ناحیه یک..... ۵۴
- ۴-۱-۲ موازنه حجم ورق برای ناحیه دو..... ۵۷
- ۴-۱-۳ جایگذاری روابط کرنش با استفاده از روابط موازنه حجم..... ۶۰
- ۴-۲ محاسبه تنش در مقطع بحرانی با استفاده از تعادل ایستایی..... ۶۰
- ۴-۳ حد نهایی تنش در شرایط ناپایداری..... ۶۲
- ۴-۴ روابط حد نهایی فشار..... ۶۲
- ۵ بهینه‌سازی چندهدفی فرآیند هیدروفرمینگ قطعه استوانه سرمخروطی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی RBFN..... ۶۶
- ۵-۱ مدل بهینه‌سازی..... ۶۸
- ۵-۱-۱ متغیرهای طراحی..... ۶۸
- ۵-۱-۲ توابع هدف..... ۶۹
- ۵-۲ شبیه‌سازی FEM..... ۷۰
- ۵-۲-۱ تعریف هندسه قطعات..... ۷۱
- ۵-۲-۲ تعریف مشخصات و مقطع قطعات..... ۷۱
- ۵-۲-۳ مش بندی، مونتاژ قطعات و تغییر مراحل حل..... ۷۲
- ۵-۲-۴ اعتبار بخشی شبیه‌سازی..... ۷۳
- ۵-۲-۵ نتایج شبیه‌سازی با مسیرهای فشار مختلف..... ۷۴
- ۵-۳ شبکه عصبی..... ۷۶
- ۵-۳-۱ مبنای ریاضی شبکه پایه شعاعی..... ۷۷
- ۵-۳-۲ عملکرد شبکه پایه شعاعی..... ۷۸
- ۵-۴ بهینه‌سازی چندهدفی به کمک الگوریتم ژنتیک..... ۷۸

۷۹.....	۱-۴-۵ مفاهیم بهینه‌سازی چندهدفی.....
۸۰.....	۲-۴-۵ الگوریتم ژنتیک.....
۸۳.....	۵-۵ پیاده سازی بهینه‌سازی چندهدفی در الگوریتم ژنتیک.....
۸۳.....	۱-۵-۵ NSGA II : مرتب‌سازی نقاط غیر برتر.....
۸۳.....	۲-۵-۵ Modified NSGA II در روند بهینه‌سازی.....
۸۵.....	۶-۵ نتایج و بحث.....
۸۶.....	۱-۶-۵ چگونگی بهینه‌سازی فرآیند.....
۹۰.....	۶ نتایج و پیشنهادها.....
۹۱.....	۱-۶ نتایج حل تحلیلی روابط حد نهایی فشار پارگی.....
۹۱.....	۲-۶ نتایج بهینه‌سازی هیدروفرمینگ استوانه سرمخروطی.....
۹۲.....	۳-۶ پیشنهادها.....

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۷۲.....	جدول ۱-۵ مقادیر کرنش در معیار آسیب FLD
۷۲.....	جدول ۲-۵ مشخصات فیزیکی و مکانیکی ورق در هیدروفرمینگ استوانه سرمخروطی
۷۵.....	جدول ۳-۵ نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای آموزش شبکه عصبی
۷۶.....	جدول ۴-۵ نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای آموزش شبکه عصبی (ادامه)
۸۸.....	جدول ۵-۵ نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود حاصل از بهینه‌سازی چند هدفی

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ یک نمونه از قطعات تولید شده در صنایع اتومبیل‌سازی به روش هیدروفرمینگ [۷].....	۲
شکل ۲-۱ شمای فرآیند هیدروفرمینگ استاندارد [۸].....	۴
شکل ۳-۱ شمای فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی [۱۳].....	۵
شکل ۴-۱ شمای فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی [۱۴].....	۵
شکل ۵-۱ شمایی از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۱۴].....	۶
شکل ۶-۱ شمایی از روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار یکنواخت روی ورق [۱۵].....	۷
شکل ۷-۱ شمایی از فرآیند کشش عمیق با فشار هیدرولیکی دوطرفه [۸].....	۷
شکل ۸-۱ شمای روش سنبه سیال برای شکل‌دهی همزمان یک جفت ورق [۱۶].....	۸
شکل ۹-۱ شمایی از مراحل هیدروفرمینگ ترکیبی.....	۸
شکل ۱۰-۱ تأثیر کرنش - سختی بر حد نسبت کشش در کشش عمیق سنتی و هیدروفرمینگ قطعه استوانه‌ای [۱۷].....	۹
شکل ۱۱-۱ مقایسه توزیع ضخامت قطعات کشیده شده با روش‌های سنتی و هیدروفرمینگ برای مس و آلومینیم [۱۷].....	۱۰
شکل ۱۲-۱ قطعات چروک خورده به دلیل فشار اولیه ناکافی [۱۷].....	۱۰
شکل ۱۳-۱ قطعات آلومینیومی پاره شده به دلیل فشار اولیه بالا [۱۷].....	۱۰
شکل ۱۴-۱ شکل‌دهی موفق قطعات مسی به روش هیدروفرمینگ [۱۷].....	۱۱
شکل ۱۵-۱ توزیع ضخامت در طول قطر قطعه ساخته شده [۱۸].....	۱۱
شکل ۱۶-۱ کاهش ضخامت در فرآیند هیدروفرمینگ مخزن سوخت خودرو [۱۸].....	۱۲
شکل ۱۷-۱ قطعات تغییر شکل یافته با هیدروفرمینگ تک‌مرحله‌ای [۱۹].....	۱۲

- شکل ۱-۱۸ حالات مختلف پارگی [۱۴] ۱۳
- شکل ۱-۱۹ تأثیر فشار سیال وارد بر لبه ورق. فشار فقط بر لبه ورق وارد می‌شود (A). سیال به شکاف میان ورق و ورق گیر نفوذ کرده و بر آن فشار وارد می‌کند (B) ۱۴
- شکل ۱-۲۰ قطعه تغییر شکل یافته با پیشروی ۳۰ میلی‌متری سنبه (A) و قطعه دچار پارگی (B) [۲۱] ۱۵
- شکل ۱-۲۱ نازک‌شدگی قطعات هیدروفرم شده از دو نمونه استاندارد و TWB [۲۲] ۱۶
- شکل ۱-۲۲ هندسه ورق برای سطح مقطع بیضوی و مربعی [۲۳] ۱۷
- شکل ۱-۲۳ تأثیر پخی فضای خالی قالب بر شکل‌پذیری قطعه کار مستطیلی تولید شده با HBU [۲۳] ۱۷
- شکل ۱-۲۴ مقایسه تغییرات ضخامت در ناحیه مشخصی از قطعه برای دو روش تولید [۲۴] ۱۸
- شکل ۱-۲۵ ناحیه‌های قطعه تغییر شکل یافته با سنبه استوانه‌ای [۲۵] ۱۹
- شکل ۱-۲۶ تأثیر ضخامت ورق بر مکان هندسی گسیختگی (الف). تأثیر نسبت کشش بر مکان هندسی گسیختگی (ب) [۲۵] ۱۹
- شکل ۱-۲۷ تأثیر ضریب آنیزوتروپی بر مکان هندسی گسیختگی (الف). تأثیر ضریب کرنش سختی بر مکان هندسی گسیختگی (ب) [۲۵] ۲۰
- شکل ۱-۲۸ شکستگی در مرحله اولیه هنگام استفاده از مسیر ۱ فشار هیدرولیکی شعاعی 20 MPA [۲۶] ۲۱
- شکل ۱-۲۹ نقاط اندازه‌گیری ضخامت (A) توزیع ضخامت دیواره در طول محور قطعه (B) ۲۲
- شکل ۱-۳۰ تأثیر پارامترهای ضریب اصطکاک (الف) و کار سختی (ب) بر فشار سیال [۲۷] ۲۲
- شکل ۱-۳۱ شمای کلی از فرآیند هیدروفرمینگ تک‌ورق و زوج‌ورق [۲۷] ۲۲
- شکل ۱-۳۲ مقایسه کاهش ضخامت در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی [۲۸] ۲۳
- شکل ۱-۳۳ رابطه نسبت کشش با بیشینه فشار [۲۸] ۲۴

- شکل ۱-۲ ناحیه‌های ورق در هیدروفرمینگ قطعه استوانه‌ای [۹] ۲۷
- شکل ۲-۲ المانی از ورق در دستگاه قطبی ۲۷
- شکل ۳-۲ هندسه ورق - موازنه حجم ناحیه یک قطعه استوانه‌ای ۳۰
- شکل ۴-۲ هندسه ورق - موازنه حجم ناحیه دو قطعه استوانه‌ای ۳۱
- شکل ۵-۲ نمایش تعادل ایستایی در ناحیه دو قطعه استوانه‌ای [۲۹] ۳۳
- شکل ۶-۲ تحلیل نیرویی ناحیه سه قطعه استوانه‌ای ۳۳
- شکل ۷-۲: نمایش رابطه تنش و کرنش بحرانی ۳۵
- شکل ۸-۲ مسیرهای فشار در آزمایش‌های تجربی حد فشار پارگی و ناحیه چروک قطعه استوانه‌ای
[۹] ۳۶
- شکل ۹-۲ اثر حد کشش بر مقدار حد فشار پارگی قطعه استوانه‌ای ۳۷
- شکل ۱۰-۲ اثر ضریب اصطکاک بر مقدار حد فشار پارگی قطعه استوانه‌ای ۳۷
- شکل ۱۱-۲ اثر نسبت ضخامت بر مقدار حد فشار پارگی قطعه استوانه‌ای ۳۸
- شکل ۱۲-۲ اثر نمای کرنش سختی (N) بر مقدار حد فشار پارگی قطعه استوانه‌ای ۳۹
- شکل ۱۳-۲ اثر ضریب آنیزوتروپی R، بر مقدار حد فشار پارگی قطعه استوانه‌ای ۳۹
- شکل ۱-۳ شمای ورق در شکل‌دهی قطعه استوانه‌ای سرکروی در حالت پیشروی کم سنبه [۱۰] ... ۴۱
- شکل ۲-۳ هندسه ورق در حالت پیشروی کم سنبه استوانه سرکروی (ناحیه یک) ۴۲
- شکل ۳-۳ هندسه ورق در حالت پیشروی زیاد سنبه استوانه سرکروی (ناحیه یک) ۴۴
- شکل ۴-۳ هندسه ورق در حالت پیشروی کم سنبه استوانه سرکروی (ناحیه دو) ۴۵
- شکل ۵-۳ هندسه ورق در حالت پیشروی زیاد سنبه استوانه سرکروی (ناحیه دو) ۴۶
- شکل ۶-۳ اثر نسبت کشش بر مقدار حد فشار پارگی استوانه سرکروی ۴۹
- شکل ۷-۳ اثر ضریب اصطکاک بر مقدار حد فشار پارگی استوانه سرکروی ۴۹

- شکل ۳-۸ اثر نسبت ضخامت بر مقدار حد فشار پارگی استوانه سرکروی ۵۰
- شکل ۳-۹ اثر ضریب کرنش سختی بر مقدار حد فشار پارگی استوانه سرکروی ۵۰
- شکل ۳-۱۰ اثر ضریب آنیزوتروپی بر مقدار حد فشار پارگی استوانه سرکروی ۵۱
- شکل ۳-۱۱ اثر فشار شعاعی لبه ورق بر مقدار حد فشار پارگی استوانه سرکروی ۵۱
- شکل ۴-۱ هندسه سنبه مخروطی ۵۲
- شکل ۴-۲ ناحیه‌های ورق در هیدروفرمینگ قطعه مخروطی ۵۲
- شکل ۴-۳ هندسه ورق در حالت پیشروی کم سنبه (قطعه مخروطی) ۵۵
- شکل ۴-۴ هندسه ورق در حالت پیشروی زیاد سنبه (قطعه مخروطی) ۵۵
- شکل ۴-۵ هندسه ورق در حالت پیشروی کم سنبه (قطعه مخروطی) ۵۷
- شکل ۴-۶ هندسه ورق در حالت پیشروی زیاد سنبه (قطعه مخروطی) ۵۸
- شکل ۴-۷ محاسبه مقدار α در پیشروی کم سنبه (قطعه مخروطی) ۵۹
- شکل ۴-۸ تعادل ایستایی در پیشروی کم سنبه (قطعه مخروطی) ۶۱
- شکل ۴-۹ تعادل ایستایی در پیشروی زیاد سنبه (قطعه مخروطی) ۶۱
- شکل ۴-۱۰ فشار بحرانی بر حسب پیشروی سنبه برای مقادیر مختلف b_0/a (قطعه مخروطی) ۶۲
- شکل ۴-۱۱ فشار بحرانی بر حسب پیشروی سنبه برای مقادیر مختلف t/a (قطعه مخروطی) ۶۳
- شکل ۴-۱۲ فشار بحرانی بر حسب پیشروی سنبه برای مقادیر مختلف μ (قطعه مخروطی) ۶۳
- شکل ۴-۱۳ فشار بحرانی بر حسب پیشروی سنبه برای مقادیر مختلف R (قطعه مخروطی) ۶۴
- شکل ۴-۱۴ فشار بحرانی بر حسب پیشروی سنبه برای مقادیر مختلف n (قطعه مخروطی) ۶۴
- شکل ۴-۱۵ اثر فشار شعاعی لبه ورق بر مقدار حد فشار پارگی قطعه مخروطی ۶۵
- شکل ۵-۱ مسیره‌های فشار در آزمایش‌های تجربی [۲۸] ۶۸

- شکل ۲-۵: نمونه‌ای از مسیر فشار اعمال شده ۶۹
- شکل ۳-۵ نمودار حد شکل‌دهی ۷۰
- شکل ۴-۵ ابعاد قطعات شبیه‌سازی شده در هیدروفرمینگ استوانه سرمخروطی ۷۱
- شکل ۵-۵ مدل قطعات طراحی شده در نرم‌افزار برای هیدروفرمینگ استوانه سر مخروطی ۷۳
- شکل ۶-۵ نتایج توزیع ضخامت استوانه سرمخروطی در آزمایش‌های تجربی [۲۸] ۷۳
- شکل ۷-۵ نتایج توزیع ضخامت استوانه سرمخروطی در شبیه‌سازی المان محدود ۷۴
- شکل ۸-۵ مقایسه کاهش ضخامت استوانه سرمخروطی در شبیه‌سازی المان محدود و نتایج
آزمایشگاهی [۲۸] ۷۴
- شکل ۹-۵ دو تابع هدف F1 و F2 برای بهینه‌سازی چند هدفی ۸۰
- شکل ۱۰-۵ روند اجرای الگوریتم ژنتیک ۸۲
- شکل ۱۱-۵ نمودار پرتوی دو تابع هدف معیار چروکیدگی و معیار پارگی ۸۶
- شکل ۱۲-۵ نمودار پرتوی دو تابع هدف معیار چروکیدگی و کمینه ضخامت ۸۷
- شکل ۱۳-۵ نمودار پرتوی دو تابع هدف معیار پارگی و کمینه ضخامت ۸۷
- شکل ۱۴-۵ نمودار پرتوی سه‌بعدی حاصل از بهینه‌سازی سه‌هدفه ۸۸
- شکل ۱۵-۵ مسیر فشار بهینه در هیدروفرمینگ استوانه سرمخروطی ۸۹

تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ قطعات استوانه‌ای با سر کروی به روش تراز قاچی شکل

صادق معتمد

یکی از پرکاربردترین روش‌های هیدروفرمینگ ورق، کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی است که به عنوان روش هیدروفرمینگ در این پژوهش در نظر گرفته شده است. پارامترهای مهم در این روش عبارتند از سرعت سنبه، پیش‌فشار اعمالی به ورق، مسیر فشار، فشار نهایی سیال، ابعاد قطعه و . . . در این پژوهش، هیدروفرمینگ قطعات استوانه‌ای، استوانه‌ای سرکروی و مخروطی با استفاده از روش تراز قاچی شکل تحلیل شد. حل تحلیلی تراز قاچی شکل که رهیافت تعادل پیکر آزاد نیز نام دارد، شامل نوشتن تراز نیرو، روی قاچی از فلز با ضخامت جزئی است. در نتیجه معادله دیفرانسیلی به دست می‌آید که در آن تغییرات تنها در یک امتداد در نظر گرفته شده است. با استفاده از شرایط مرزی مناسب و انتگرال‌گیری، جواب این معادله به دست آمد و مواردی مانند ناپایداری، نسبت کشش و توزیع تنش بررسی شد. در ادامه، بهینه‌سازی فرآیند یاد شده به منظور ارضای سه تابع هدف به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از شبکه عصبی برای شبیه‌سازی مدل و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی ورق، هیدروفرمینگ، تراز قاچی شکل، بهینه‌سازی، شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک

Abstract

Slab method analysis of hydroforming process for manufacturing of cylindrical cup with semispherical head

Sadeq Motamed

One of the most practical methods of hydroforming of sheet is hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure mentioned as hydroforming in this study. The main parameters in this method are the punch velocity, pre-bulging pressure to the sheet, the pressure path, total pressure of fluid, size, etc. In this study hydroforming of the cylindrical, semispherical-cylindrical, and conical parts was analyzed with slab method. Slab analyses are based on making a force balance on a differentially thick slab of material. Thus a differential equation in which all the differentiations are made in a same direction is obtained. This equation was solved using appropriate boundary conditions and integration and items like instability, drawing ratio, and Stress Distribution were studied. Then optimization of process was studied in order to satisfy the three objective functions simultaneously. In order to do, a neural network was used for simulating the model and genetic algorithm for optimization.

Key words: Metal forming, Hydroforming, Slab Method, Optimization, Neural Network, Genetic Algorithm

۱

مقدمه

۱-۱ کلیات

شکل‌دهی فلزات در صنعت، با روش‌های گوناگونی همچون کشش عمیق چندمرحله‌ای^۱ [۱]، اسپینینگ^۲ [۲]، شکل‌دهی انفجاری^۳ [۳] و ... انجام می‌شود. هیدروفرمینگ^۴ در سال‌های اخیر به عنوان یکی از روش‌های اساسی در شکل‌دهی فلزات مطرح شده است. روش‌های مختلف هیدروفرمینگ از زمان جنگ جهانی دوم تا کنون توسعه یافته و در زمینه‌های مختلف صنعت مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از هیدروفرمینگ در زمینه‌های خاصی از صنایع هواپیماسازی همچنان کاربرد دارد ولی از دهه ۱۹۹۰ در صنایع بسیاری مورد استفاده قرار گرفته که مهم‌ترین آنها صنایع اتومبیل‌سازی می‌باشد [۵]. صنایع اتومبیل‌سازی امروزه با نیاز فزاینده‌ای در تولید خودروهایی با مصرف سوخت کمتر و تأثیرات زیست محیطی بهتر روبروست. به منظور دستیابی به این نیاز در کنار حفظ امنیت در تصادفات سخت، طراحی وسایل نقلیه‌ای با وزن کمتر و سازه‌های محکم‌تر مورد نیاز است. برای مواجهه با این چالش می‌توان در ساخت قطعات مورد نیاز از فولادهایی با ضخامت کمتر و مقاومت بالاتر استفاده کرد و یا می‌توان از قطعاتی با طراحی پیچیده‌تر با استفاده از روش‌های نوین ساخت بهره برد. هیدروفرمینگ یکی از تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای است که قابلیت ساخت پروفیل‌های پیچیده را افزایش می‌دهد [۶]. در شکل ۱-۱ یک نمونه از قطعات تولید شده در صنایع اتومبیل‌سازی به روش هیدروفرمینگ مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۱ یک نمونه از قطعات تولید شده در صنایع اتومبیل‌سازی به روش هیدروفرمینگ [۷]

قطعاتی که با هیدروفرمینگ تولید می‌شوند در مقایسه با کشش عمیق سنتی، دارای مزایای قابل توجهی می‌باشند که از آن نمونه می‌توان به نسبت کشش^۵ بیشتر (نسبت قطر ورق اولیه به قطر سنبه در صورتی که قطعه بصورت کامل کشیده شود)، عملیات ثانویه کمتر، حذف جوشکاری، بهبود بخشیدن به استحکام و چقرمگی، کاهش هزینه قالب، کیفیت سطح بهتر، کاهش

¹ Multi-stage Deep Drawing

² Spinning

³ Explosive Forming

⁴ Hydroforming

⁵ Drawing Ratio

برگشت فنری^۱، دقت ابعادی بالاتر و قابلیت شکل‌دهی اشکال پیچیده اشاره کرد [۵]. همچنین از پارامترهای مؤثر در انواع فرآیندهای هیدروفرمینگ می‌توان به فشار اولیه سیال، مسیر فشار اعمال شده از طرف سیال به ورق، هندسه ورق، سنبه^۲، ورق‌گیر^۳ و قالب^۴، جنس قطعات، ضریب اصطکاک میان قطعات، سرعت سنبه، فاصله بین قالب و ورق‌گیر و ... اشاره کرد [۸].

در دسته‌بندی کلی هیدروفرمینگ به دو دسته هیدروفرمینگ ورق و هیدروفرمینگ لوله تقسیم می‌شود. هیدروفرمینگ ورق با روش‌های گوناگونی از جمله روش هیدروفرمینگ استاندارد، هیدرومکانیکی^۵، هیدرووریم^۶ و ... صورت می‌پذیرد [۵].

با توجه به اینکه پژوهش حاضر در زمینه یکی از روش‌های هیدروفرمینگ ورق صورت گرفته است، در ادامه به توضیح و بررسی روش‌های اصلی هیدروفرمینگ ورق می‌پردازیم. سپس برخی از پژوهش‌هایی که در زمینه هیدروفرمینگ صورت گرفته است و نتایج حاصل از آنها را مورد بررسی قرار خواهیم داد. سپس حل تحلیلی حد ناپایداری^۷ (حد فشار پارگی) در شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای^۸ در فصل دوم بررسی می‌شود. روابط آورده شده در این فصل توسط یوسیفون^۹ و همکارش [۹] به دست آمده‌اند. فرضیات انجام شده و نتایج به دست آمده توسط آنها در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل سوم، حل تحلیلی حد ناپایداری در شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای سرکروی^{۱۰} بررسی شده است. روابط آورده شده در این فصل توسط سو^{۱۱} و همکارش [۱۰] به دست آمده‌اند. در این فصل نیز حل کامل و جامعی از روابط و نتایج به دست آمده توسط آنها ارائه می‌گردد تا در نهایت با بسط و گسترش این روابط در فصل چهارم، حل تحلیلی مشابهی برای فرآیند هیدروفرمینگ قطعات مخروطی^{۱۲} به دست آید. روابط به دست آمده در فصل چهارم، در واقع تعمیمی از روابط فصل دوم هستند. در فصل پنجم، بهینه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ قطعه استوانه‌ای سرمخروطی^{۱۳} با توابع هدف مختلف انجام شد. در نهایت در فصل ششم، نتایج این پژوهش جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای ادامه کار ارائه شد.

۲-۱ روش‌های اصلی هیدروفرمینگ ورق

همان‌طور که پیشتر گفته شد، هیدروفرمینگ ورق با روش‌های گوناگونی صورت می‌پذیرد. در اکثر روش‌های هیدروفرمینگ ورق، سیال نقش قالب را بازی می‌کند. بدین صورت که در هنگام حرکت سنبه، فشار سیال، ورق را به شکل

¹ Spring Back

² Punch

³ Holder

⁴ Die

⁵ Hydromechanical

⁶ Hydrorim

⁷ Rupture Instability

⁸ Cylindrical Cups

⁹ Yossifon

¹⁰ Semispherical-Cylindrical

¹¹ Hsu

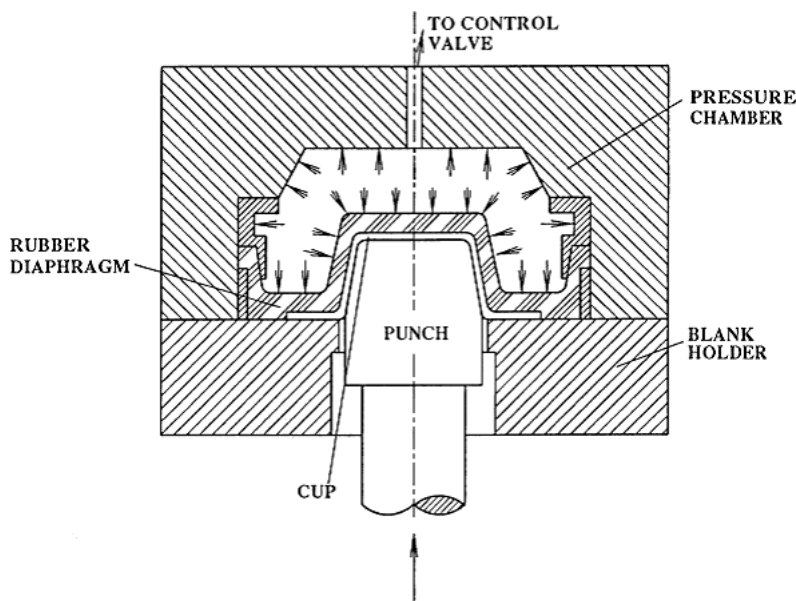
¹² Conical Parts

¹³ Conical-cylindrical Cups

سنجه در می‌آورد. همچنین در برخی از روش‌های دیگر، سیال نقش سنجه را دارد. در چنین روش‌هایی قالب ثابت است و فشار سیال، ورق را به شکل قالب در می‌آورد.

۱-۲-۱ هیدروفرمینگ استاندارد

هیدروفرمینگ استاندارد از اولین روش‌های مورد استفاده در هیدروفرمینگ ورق است. این نوع هیدروفرمینگ یکی از روش‌های اصلی ماتریس - سیال است که در آن سیال نقش قالب را بر عهده دارد. قطعات اصلی مورد استفاده در این روش سنجه، ورق‌گیر، محفظه فشار و دیافراگم لاستیکی می‌باشد. در این روش دیافراگم لاستیکی میان سیال درون محفظه فشار و ورق قرار می‌گیرد و فشار سیال از طریق دیافراگم به ورق اعمال می‌گردد [۸]. همچنین ورق‌گیر بر روی ورق قرار می‌گیرد و نیروی ورق‌گیر نیز از طریق فشار سیال که بر دیافراگم لاستیکی وارد می‌شود، به ورق اعمال می‌گردد [۱۱]. شکل ۲-۱ نمونه‌ای از فرآیند صورت گرفته در این روش را نشان می‌دهد [۸]. با استفاده از این روش قطعات پیچیده‌تر با کیفیت سطح بهتر و بدون چروکیدگی^۱ در ناحیه فلنج تولید شده است [۱۱]. استفاده از دیافراگم لاستیکی در این روش تبدیل به یکی از معایب این روش شد که استفاده از آن در صنعت را متوقف ساخت. چرا که تماس مستقیم ورق با دیافراگم موجب خرابی زودرس آن و اتلاف وقت و هزینه می‌گردید [۱۲].



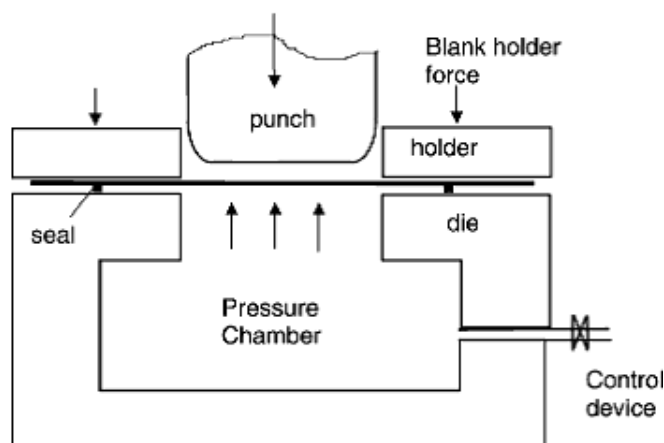
شکل ۲-۱ شمای فرآیند هیدروفرمینگ استاندارد [۸]

۲-۲-۱ کشش عمیق هیدرومکانیکی

این روش به عنوان روشی جایگزین برای روش هیدروفرمینگ استاندارد ارائه شد تا با حذف دیافراگم لاستیکی از بروز معایب یاد شده در روش هیدروفرمینگ استاندارد جلوگیری شود. در این روش به جای استفاده از دیافراگم لاستیکی از یک

^۱ Wrinkling

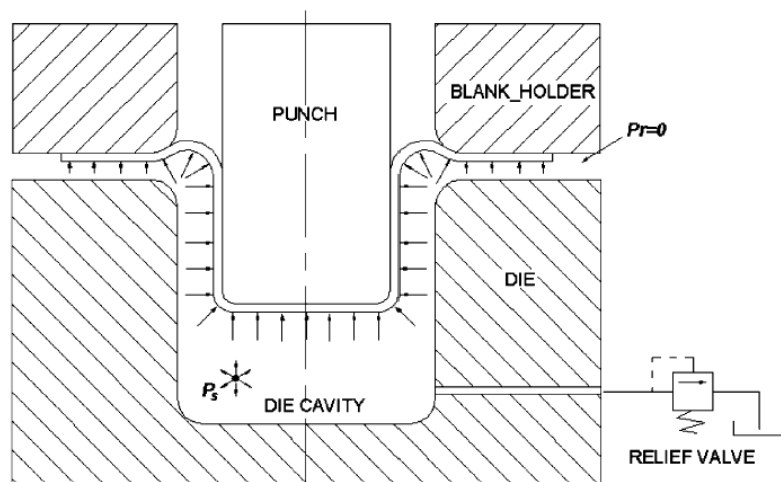
رینگ لاستیکی بین ورق گیر و قالب برای آببندی محفظه روغن استفاده می‌شود. شکل‌دهی در این روش نیازمند فشار بالای سیال است و نحوه عملکرد ورق گیر در آن مشابه حالت کشش عمیق سنتی می‌باشد. این امر موجب دشوار شدن تنظیم نیروی ورق گیر برای کشش قطعات مختلف می‌گردد. با استفاده از این روش نسبت کشش در مقایسه با کشش عمیق سنتی افزایش می‌یابد [۵]. شمای فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی در شکل ۳-۱ نمایش داده شده است [۱۳].



شکل ۳-۱ شمای فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی [۱۳]

۳-۲-۱ روش کشش عمیق هیدرودینامیکی^۱

در روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با حذف دیافراگم یا رینگ لاستیکی، از آببندی فرآیند در ناحیه بین قالب و ورق گیر صرف نظر می‌شود در نتیجه روغن از فضای بین قالب و ورق گیر خارج می‌شود و فشاری از سوی سیال بر لبه ورق وارد نخواهد شد. در این روش ورق بین قالب و ورق گیر آزاد است که این امر جریان آسان‌تر ورق و افزایش نسبت کشش را موجب می‌گردد. البته آزاد بودن ورق احتمال ایجاد چروک در ناحیه فلنج را افزایش می‌دهد [۱۱]. شکل ۴-۱ شمایی از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی را نمایش می‌دهد [۱۴].

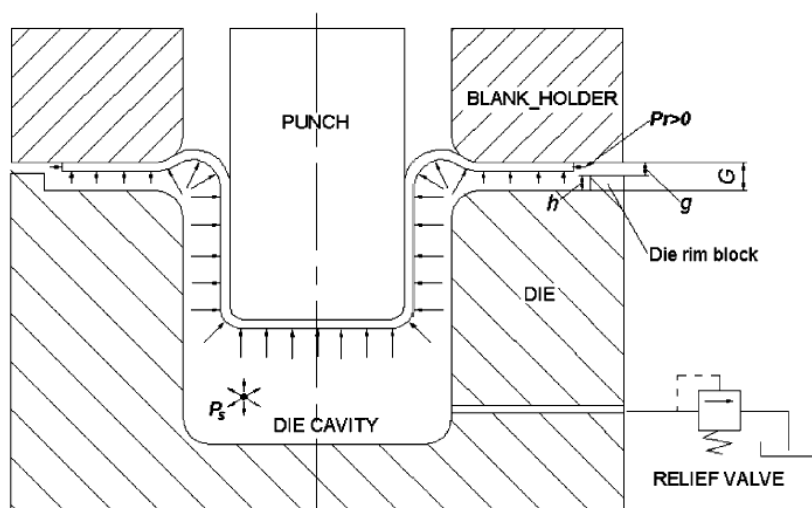


شکل ۴-۱ شمای فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی [۱۴]

^۱ Hydrodynamic Deep Drawing

۴-۲-۱ کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی^۱

روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی با تغییری کوچک در روش کشش عمیق هیدرودینامیکی توسعه یافته است. در این روش فاصله میان قالب و ورق گیر در ناحیه خروج سیال کاهش می‌یابد. این امر موجب می‌شود که سیال در هنگام خروج فشاری را به صورت شعاعی بر لبه ورق وارد سازد. این فشار شعاعی موجب جریان آسان‌تر ورق در قالب می‌گردد. همچنین نیروی کشش را کاهش و نسبت کشش را افزایش می‌دهد. با استفاده از این روش دست آوردهای بسیاری همچون کیفیت سطح بهتر، دقت ابعادی بالاتر و قابلیت شکل‌دهی قطعات پیچیده‌تر حاصل می‌گردد. همچنین ابزار مورد نیاز در این فرآیند ساده‌تر از دیگر روش‌های هیدروفرمینگ است. البته کنترل برخی از پارامترهای مؤثر در این فرآیند دشوار است که از مهم‌ترین آنها مقدار فشار شعاعی وارد بر لبه ورق است [۱۴]. شکل ۵-۱ شمایی از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی را نشان می‌دهد [۱۴].



شکل ۵-۱ شمایی از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۱۴]

۵-۲-۱ کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار یکنواخت روی ورق

این روش با اندکی تغییر در روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی حاصل می‌شود. بدین صورت که انتهای فاصله ورق‌گیر و قالب به صورتی آب‌بندی می‌شود که سیال به بیرون نشت نکند. اما بر خلاف روش کشش عمیق هیدرومکانیکی این آب‌بندی به نحوی است که فشار سیال بر روی لبه ورق وارد می‌گردد. بدین ترتیب بر لبه ورق، فشاری برابر با فشار سیال درون قالب وارد می‌گردد. این موضوع باعث افزایش قابل توجهی در نسبت کشش می‌شود. همچنین کنترل فشار در این روش به دلیل آب‌بندی محفظه قالب آسان‌تر از روش‌های کشش عمیق هیدرودینامیکی و کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی می‌باشد [۱۵]. شمایی از روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار یکنواخت روی ورق در شکل ۶-۱ دیده می‌شود.

^۱ Radial Pressure