دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده مهندسی – گروه مکانیک

بررسی چروکیدگی و نازک شدگی در هیدروفرمینگ ورق

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک – ساخت و تولید

فرشاد گودرزی

استاد راهنما
دکتر مهران کدخدایان

۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحيم

تشکر و قدردانی

بعد از سپاس از خداوند بزرگ و بخشنده و مهربان که رحمتش از حد فزون است و شکرش از توان انسان خارج، از تمامی عزیزان و بزرگوارانی که در تهیه این پایان نامه، کمک و همراهی ارزشمند خود را سخاوتمندانه در اختیار گذاشتند، تشکر و قدردانی می نمایم.
همچنین از تمام کسانی که در راه آزادی و پیشرفت میهنم، و سربلندی و عزت مردم آزادی خواه کشورم، از تمام هستی خود، حتی جان ارزشمند خود دریغ نمی نمایند، به عنوان برادری کوچک، تشکر می کنم و میدانم که اجر آنها با خداوندی است که آزادی و اختیار را نعمتی بزرگ برای انسان قرار داد.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد
است.

بدین وسیله اعلام می شود مطالب ذکر شده در این گزارش حاصل تحقیقات انجام گرفته توسط شخص نگارنده بوده و کپی برداری از مطالب دیگران نمی باشد.در ضمن درصورت استفاده از مطالب دیگران مراجع مورد استفاده ذکر شده است. استفاده مطالب با ذکر مرجع آزاد است.

نگارنده	استاد راهنما
فرشاد گودرزی	مهران کد خدایان

پایان نامه حاضر تحت عنوان : بررسی چروکیدگی و نازک شدگی در هیدروفرمینگ ورق

که توسط فرشاد گودرزی تهیه و به هیات داوران ارائه گردیده است مورد تایید کمیته تحصیلات تکمیلی گروه می باشد.

تاریخ دفاع : ۱۳۸۸/۶/۳۱ نمره: درجه ارزشیابی:

اعضای هیات داوران

نام و نام خانوادگی	هیات داوران	مرتبه علمی	امضاء
۱- دکتر مهران کدخدایان	استاد راهنما	دانشیار	
۲- دکتر سعید حدیدی مود	عضو دفاع	استادیار	
۳- دکتر خلیل فرهنگ دوست	عضو دفاع	دانشیار	
۴- دکتر حمید اختراعی طوسی	نماینده تحصیلات تکمیلی	استادیار	

فرم چکیده پایان‌نامه تحصیلی دوره تحصیلات تکمیلی	دفترمدیریت تحصیلات تکمیلی
نام خانوادگی دانشجو: **گودرزی** نام: **فرشاد**	
استاد یا اساتید راهنما: **دکتر مهران کدخدایان**	
دانشکده: **مهندسی** رشته: **مکانیک** گرایش: **ساخت و تولید** مقطع: **کارشناسی ارشد**	
تاریخ دفاع:**۱۳۸۸/۶/۳۱** تعداد صفحات: **۱۴۰**	
عنوان پایان‌نامه: بررسی چروکیدگی و نازک شدگی در هیدروفرمینگ ورق	
کلید واژه‌ها: هیدروفرمینگ ورق - المان محدود - چروکیدگی - نازک شدگی	

چکیده

یکی از جدیدترین روش‌های شکل‌دهی ورق، فرم‌دهی به وسیله هیدروفرمینگ می‌باشد. در این شیوه فشار سیال بعنوان یک ابزار شکل دهی استفاده می شود بنابراین معمولاً نیمی از ابزار صلب صرف نظر می گردد. البته در اغلب حالات فشار سیال به عنوان مادگی قالب عمل می‌کند و از یک دیافراگم برای آب بندی و جداسازی ورق از سیال استفاده می‌گردد. این روش با توجه به مزایای فرآوانی از جمله افزایش نسبت کشش، تولید قطعات با هندسه پیچیده و کنترل چروکیدگی دارد مورد توجه بسیاری از صنایع قرار گرفته است. در پایان نامه حاضر ابتدا پس از مروری بر مقالات و بیان تئوری های ورق های فلزی، با استفاده از نرم افزار ABAQUS 6.6 مزیت های کشش عمیق هیدروفرمینگ بر کشش عمیق سنتی مشخص می شود. همچنین تاثیر پارامتر های موثر در جهت بهبود نسبت کشش ، حداقل ضخامت و مقدار تنش ون میزز حداکثر در قطعه بررسی می شود. در پایان تاثیر پارامتر های مختلف هیدوفرمینگ بر تمایل قطعه به چروکیدگی با استفاده از معیار حد چروکیدگی نیز بررسی شده است.

امضای استاد راهنما

فهرست عناوین:

صفحه

فصل ۱ : گذری بر شکل دهی ورق های فلزی ۱

۱-۱- فرآیندهای متداول شکل‌دهی ورقهای فلزی..... ۱
۱-۱-۱- سوراخکاری و برشکاری ۱
۱-۱-۲- خمکاری ۲
۱-۱-۳- خمکاری مقطعی ۴
۱-۱-۴- کشش ۵
۱-۱-۵- استامپینگ یا شکل‌دهی با قالب کششی ۵
۱-۱-۶- کشش عمیق ۶
۱-۱-۷- هیدروفرمینگ..... ۸
۱-۱-۷-۱- مزایای روش ۱۱
۱-۱-۷-۲- معایب روش..... ۱۲
۱-۱-۷-۳- هیدروفرمینگ ورق با استفاده از پد الاستیک ۱۳
۱-۱-۷-۴- هیدروفرمینگ کشش عمیق لبه‌ها..... ۱۴
۱-۱-۷-۵- هیدروفرمینگ ورق با سیال واسط ویسکوز ۱۴
۱-۱-۷-۶- هیدروفرمینگ ورقهای جفتی..... ۱۵
۱-۱-۷-۷- هیدرفورمینگ ترکیبی ۱۶
۱-۱-۷-۸- هیدروفرمینگ با قالب متحرک..... ۱۷
۱-۱-۷-۸-۱-مزایای استفاده از تکنولوژی قالب متحرک نسبت به فرآیندهای سنتی شکل‌دهی..... ۱۹
۱-۱-۷-۸-۲- معایب این روش ۱۹
۱-۱-۷-۹- مروری بر کارهای انجام شده ۲۲
۱-۲- عیوب در شکل‌دهی ورقهای فلزی ۳۳
۱-۲-۱- ناتوانائی ورق در انتقال نیروی مورد نیاز ۳۳
۱-۲-۲- گلوئی‌شدگی موضعی یا پارگی ۳۴
۱-۲-۳- شکست ۳۴
۱-۲-۴- چروکیدگی ۳۴
۱-۲-۵- بازگشت‌فنری ۳۴
۱-۳- انواع شکست در هیدروفرمینگ ۳۵
۱-۴- مواد قابل استفاده در هیدروفرمینگ ورق ۳۶
۱-۵- موارد کاربرد در هیدروفرمینگ ورق ۳۶
۱-۶- اهداف پژوهش ۳۶
۱-۷- ساختار پایان‌نامه..... ۳۸

فصل ۲ : معیار شکست در ورق های فلزی ۳۹

۲-۱- منحنی حد کشش بر پایه کرنش ۴۰
۲-۲- نمودار تجربی حد شکل دادن ۴۱

۲-۳ نمودار حد چروکیدگی در فرآیند کشش عمیق ۴۷
۲-۴- منحنی حد کشش بر پایه تنش ۴۹
۲-۵- معادلات حاکم در تحلیل مسائل ۴۹
۲-۵-۱- تئوری الاستیسیته ۴۹
۲-۵-۲- تئوری پلاستیسیته ۵۰
۲-۶- روابط تجربی برای منحنی تنش- کرنش ۵۱
۲-۷- سخت‌شوندگی یا کرنش‌سختی ۵۳
۲-۷-۱- سخت‌شوندگی ایزوتروپیک ۵۳
۲-۷-۲- سخت‌شوندگی سینماتیکی ۵۶
۲-۸- مواد همسانگرد و ناهمسانگرد ۵۹
۲-۸-۱- معیارهای تسلیم فلزات ناهمسانگرد ۶۰
۲-۸-۱-۱- معیار تسلیم هیل ۶۰
۲-۸-۱-۲- معیار هیل برایِ ورقهای نورد شده ناهمسانگرد ۶۲
۲-۸-۱-۳- معیار تسلیم بارلات سه پارامتری ۶۵

فصل ۳ : مسایل مربوط به حل عددی ۶۸

۳-۱- نرم‌افزار المان محدود ABAQUS 6.5 ..... ۶۸
۳-۲- تحلیل به روش ضمنی و صریح ۷۰
۳-۲-۱- مقایسه بین روش ضمنی و صریح ۷۰
۳-۲-۲- انتخاب بین تحلیل به روش صریح و ضمنی ۷۱
۳-۳- تماس و اصطکاک ۷۱
۳-۳-۱- تعریف تماس در ABAQUS\Explicit ۷۲
۳-۳-۲- مدلهای اصطکاک ۷۳
۳-۴- المان پوسته‌ای ۷۵
۳-۴-۱- ضخامت پوسته و نقاط مقطع ۷۶
۳-۴-۲- عمودهای پوسته و سطوح پوسته ۷۸
۳-۵- نکته های اساسی در ABAQUS ۷۹
۳-۵-۱- هزینه محاسباتی ۷۹
۳-۵-۳- روش های افزایش سرعت تحلیل ۸۱
۳-۵-۴- شبیه سازی مسائل شبه استاتیک ۸۳
۳-۵-۵- شبیه سازی مسائل دینامیکی ۸۴
۳-۵-۶- مسائل شکل‌دهی فلزات ۸۴
۳-۵-۷- توازن انرژی ۸۵
۳-۵-۸- پدیده ساعت شنی ۸۷

فصل ۴: شبیه سازی فرآیند شکل دهی ۸۹

۴-۱- مقدمه: ۸۹
۴-۲- تنظیمات و مفروضات ۹۰
۴-۳- درستی حل: ۹۶

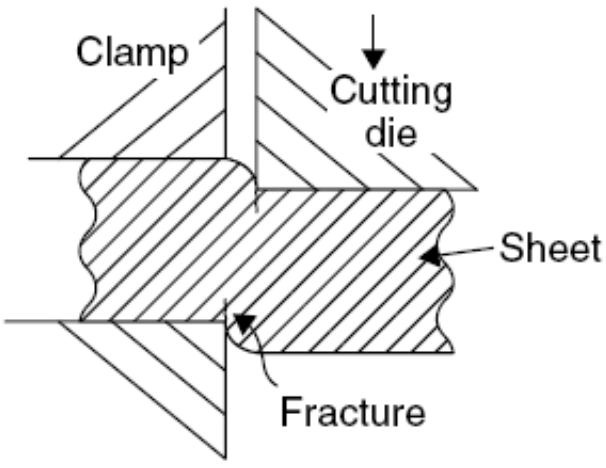
۴-۳-۱- کنترل درستی حل با موارد پیشنهادی ABAQUS ۹۶
۴-۳-۲- کنترل درستی حل با نتایج تجربی Shim ۹۹
۴-۴- نیروی ورق گیر و پانچ ۱۰۲
فصل ۵: بحث و بررسی ۱۰۳
۵-۱- مقایسه فرآیند کشش عمیق سنتی وکشش عمیق هیدروفرمینگ ۱۰۳
۵-۲- تاثیر شکل پانچ در میزان کشش ۱۰۶
۵-۳- معیار حد شکل دهی و حد چروکیدگی ۱۰۸
۵-۴- بررسی پارامتر های موثر در هیدروفرمینگ ۱۱۰
۵-۴-۱- تاثیر اصطکاک ورق گیر ۱۱۱
۵-۴-۲- تاثیر اصطکاک پانچ ۱۱۳
۵-۴-۳- تاثیر شعاع سر پانچ ۱۱۵
۵-۴-۴- تاثیر شعاع بدنه پانچ ۱۱۷
۵-۴-۵- تاثیر منحنی فشار ۱۱۹
۵-۴-۶- تاثیر شکل ورق ۱۲۴
۵-۴-۷- تاثیر شکل پانچ ۱۲۹
فصل ۶ : جمع بندی نتایج ۱۳۱
۶-۱- مقایسه کشش عمیق سنتی با هیدروفرمینگ ۱۳۳
۶-۲- تاثیر اصطکاک بین ورق و ورق گیر ۱۳۴
۶-۳- تاثیر اصطکاک ورق و پانچ ۱۳۴
۶-۴- تاثیر شعاع سر پانچ ۱۳۵
۶-۵- تاثیر شعاع بدنه پانچ ۱۳۵
۶-۶- تاثیر منحنی فشار ۱۳۶
۶-۷- تاثیر شکل ورق ۱۳۷
۶-۸- تاثیر شکل پانچ ۱۳۷
مراجع ۱۳۹

فصل ۱ : گذری بر شکل دهی ورق های فلزی

۱-۱- فرآیندهای متداول شکل‌دهی ورقهای فلزی

۱-۱-۱- سوراخکاری و برشکاری[1]

از آنجائی که ورقها بصورت کویل تحویل داده می‌شوند، اولین مرحله برش ورقها به کمک پرس می‌باشد؛ متعاقباً ممکن است مرحله‌ای برای برش تکه‌های اضافی و ایجاد سوراخها در نظر گرفته شود. فرآیند اصلی برش در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است. اگر بطور دقیق بررسی کنیم، ملاحظه می‌گردد که برشکاری که یک فرآیند پیچیده برش پلاستیک و شکست می‌باشد و اینکه ماده در لبه بطور موضعی تمایل به سخت شوندگی دارد. ممکن است این اثرات موجب بروز مشکلاتی در عملیات بعدی بشوند.

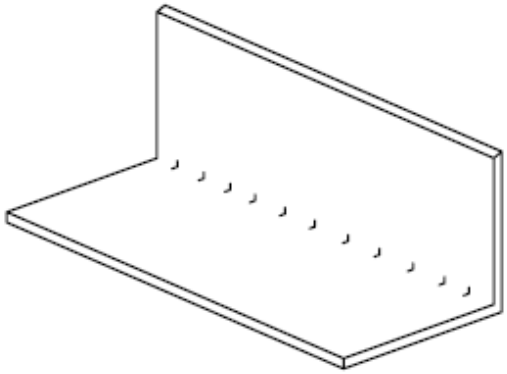


شکل ۱-۱: بزرگنمائی مقطع فرآیند برشکاری یک ورق که تغییرشکل پلاستیک و ترک خوردگی را نشان می‌دهد.

[1] Blanking and piercing

۱-۱-۲- خمکاری

ساده‌ترین فرآیند شکل‌دهی ایجاد خم با خط مستقیم می‌باشد، مطابق شکل (۱-۲). تغییر شکل پلاستیک فقط در ناحیه خم ایجاد می‌گردد و مواد دور از ناحیه خم دچار تغییر شکل نمی‌شوند. اگر ماده فاقد شکل‌پذیری[1] باشد امکان وقوع ترک‌خوردگی بر روی سطح خارجی خم وجود دارد، اما معمولاً بزرگترین مشکل دستیابی به زاویه خم دقیق و تکرارپذیر می‌باشد. در این فرآیند وقوع بازگشت‌فنری محسوس می‌باشد.

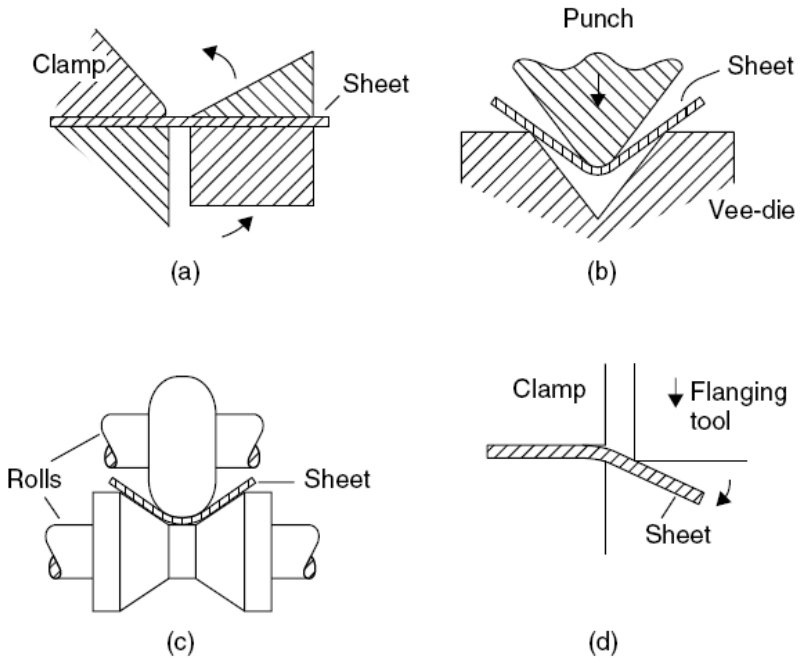


شکل ۱-۲: خمش در امتداد خط مستقیم ورق.

روشهای گوناگون خمکاری در راستای یک خط مستقیم در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. در روش تاکردن[2] (a)، قطعه در سمت چپ ثابت نگاه‌داشته می‌گردد و لبه بین ابزار فکهای دوار ابزار گرفته می‌شود. در شکل‌دهی با پرس ترمزی[3] (b)، سنبه به سمت پایین حرکت می‌کند و ورق را به داخل یک قالب V شکل هدایت می‌کند. خمها می‌توانند بصورت نوارهای طویل ادامه‌دار بروش شکل‌دهی غلتکی، فرم داده شوند، (c). در ماشینهای شکل‌دهی غلتکی، چند دسته غلتک موجود می‌باشند که ورق را بطور تدریجی خم می‌کنند و پانلهای پهن همچون کانالهای با مقاطع پیچیده را با این روش می‌توان ایجاد کرد. روشی برای خمکاری در لبه یک قطعه استامپ شده همانطور که در شکل (d ۱-۳) نشان داده شده

[1] Ductility
[2] Folding
[3] Press-brake

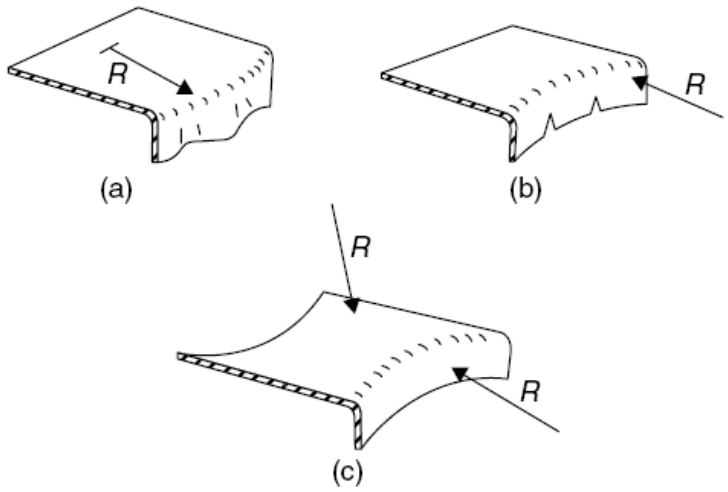
است، فلانجینگ[1] می‌باشد. قطعه در سمت چپ گرفته می‌شود و ابزار لبه‌ساز برای ایجاد خم به سمت پایین حرکت می‌کند.



شکل ۱-۳: (**a**) خمکاری یک ورق در یک ماشین تاکننده، (**b**) خمکاری با پرس ترمزی در قالب **V** شکل، (**c**) مقطع یک دسته نورد در یک دستگاه نورد کننده، (**d**) خم کردن یک لبه.

اگر خم در راستای یک خط مستقیم نباشد و یا اینکه ورق مسطح نباشد، تغییرشکل پلاستیک نه فقط در خم، بلکه همچنین در قسمتهای مجاور آن رخ می‌دهد. شکل (۱-۴) نمونه‌هائی را در این مورد نشان می‌دهد. در فلانجینگ همراه با چروک (a)، لبه کوتاه می‌گردد و امکان رخدادن کمانش در آن وجود دارد. در فلانجینگ همراه با کشش (b)، طول لبه باید افزوده گردد و شکافتگی[2] ممکن است موجب بروز مشکل شود. اگر قطعه در نزدیکی لبه انحناءدار شود و یا هم لبه و هم قطعه‌کار انحناءدار شوند، مطابق شکل (۱-۴)، ممکن است لبه کشیده و یا فشرده شود و مقداری تحلیل هندسی برای تشخیص این موضوع لازم است. همه این لبه‌ها توسط ابزار خاص که در شکل (۱-۳d)نشان داده شده است ایجاد می‌گردند.

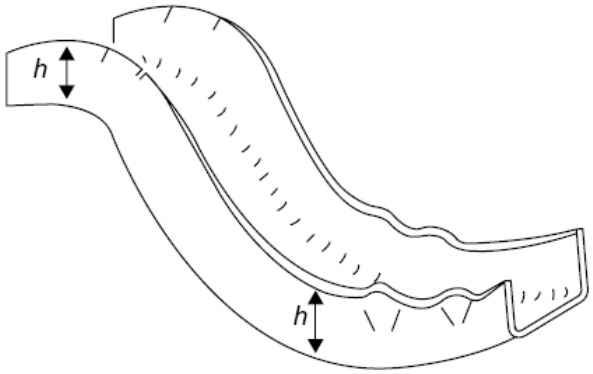
[1] Flanging or wiping
[2] Splitting



شکل ۱-۴: (**a**) فلانجی که در آن کمانش رخ داده است، (**b**) فلانج کشیده شده با لبه ترک خورده، (**c**) فلانجینگ ورق خمیده.

۱-۱-۳- خمکاری مقطعی

در شکل (۱-۵)، یک شکل پیچیده‌تر خمکاری شده است. در انتهای سمت چپ قطعه، لبه کانال کشیده شده است و ممکن است شکافتگی ایجاد گردد، و ارتفاع پا، h، کاهش یابد. وقتی که لبه در قسمت داخلی قرار دارد، مانند سمت راست قطعه، امکان وقوع چروکیدگی وجود دارد و ارتفاع لبه افزایش می‌یابد.



شکل ۱-۵: خمشهای داخلی و خارجی یک مقطع کانال‌شکل.

۱-۱-۴- کشش

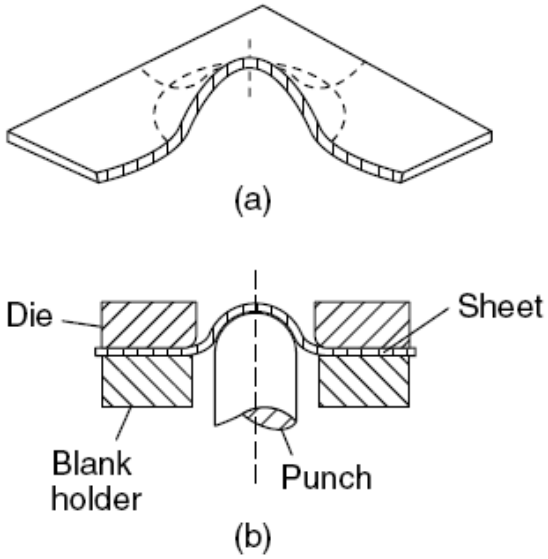
ساده‌ترین فرآیند کشش در شکل (۱-۶) نشان داده شده است. هنگامی که سنبه به سمت ورق حرکت داده می‌شود، نیروهای کششی در مرکز بوجود می‌آیند. اینها نیروهائی هستند که عامل تغییرشکل می‌باشند و تنش تماسی میان سنبه و ورق بسیار کمتر از تنش تسلیم ورق می‌باشد. ماده با نیروهای کششی در لبه ورق مقابله می‌کند و تنشهای هوپ[1] فشاری در این منطقه گسترش می‌یابند. از آنجائی که ناحیه خارجی تمایل به کمانش دارد، توسط ورق‌گیر گرفته می‌شود، شکل (۱b-۶). مطالب مطرح شده در فرآیندهای شکل‌دهی ورقها شایع است، برای مثال شکل‌دهی متأثر از تنشهای تماسی مستقیم نیست، اما تحت تأثیر نیروهای منتقل شده در ورق می‌باشد و توازنی بین نیروهای کششی روی سنبه و نیروهای فشاری در لبه خارجی ماده برقرار خواهد گردید.

۱-۱-۵- استامپینگ یا شکل‌دهی با قالب کششی

قطعه‌ای که در شکل (۱a-۷) نمایش داده شده است با کشیده شدن برروی سنبه با شکل خیلی پیچیده‌تر در یک قالب کششی، شکل داده می‌شود. این فرآیند متشکل از یک سنبه، رینگ کشنده و ورق‌گیر می‌باشد. اصول این فرآیند شبیه کشش سنبه که در بالا مطرح شد می‌باشد، اما لبه خارجی اجازه کشیده شدن به داخل به منظور تأمین ماده را دارد. این فرآیند بطور وسیع برای شکل‌دادن پانلهای بدنه اتومبیل و قطعات با کاربردهای گوناگون بکار می‌رود. قسمت عمده لبه خارجی پس از شکل‌دهی بریده می‌شود، لذا فرآیند اقتصادی نمی‌باشد با این حال با طراحی مناسب ابزار، تعداد عظیمی از قطعات را می‌توان به سرعت و با کنترل دقت مناسب شکل داد. طراحی قالب نیازمند ترکیبی از مهارت و

[1] Hoop stresses

سیستمهای مهندسی همراه با کمک کامپیوتر می‌باشد، اما به منظور طراحی مفهومی و حل مسئله، سیستم تغییرشکل پیچیده را می‌توان به اجزای اصلی تقسیم و سپس تحلیل کرد.

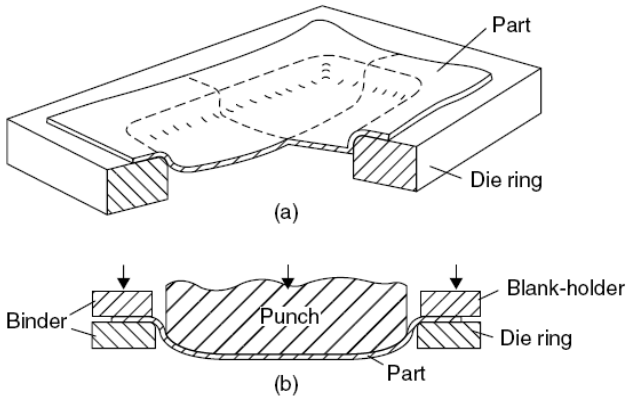


شکل ۱-۶: (**a**) فروبردن یک برآمدگی به داخل ورق، (**b**) یک سنبه دارای برآمدگی و قالب برای کشش ورق.

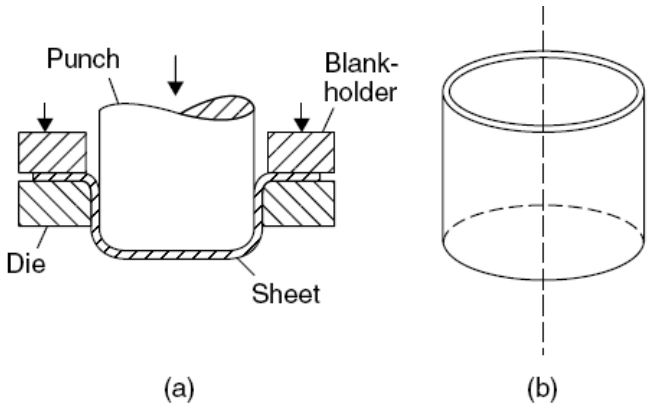
۱-۱-۶- کشش عمیق

در استامپینگ، اکثر قسمتهای نهائی با کشیده شدن برروی سنبه شکل داده می‌شوند. با توجه به اینکه حدی برای مقدار کشیدگی تا قبل از پاره شدن وجود دارد، قطعات استامپ شده کم‌عمق می‌باشند. برای شکل دادن قطعات عمیق‌تر، مقدار بیشتری از ماده باید به سمت داخل کشیده گردد و چنین فرآیندی را کشش عمیق می‌نامند. شکل‌دهی یک جام استوانه‌ای ساده در شکل(۱-۸) نشان داده شده است. بمنظور ممانعت از کمانش لبه، از ورق‌گیر استفاده می‌شود و نیروی گیرنده از مرتبه‌ای یکسان با نیروی سنبه می‌باشد. از آن جهت که ورق باید بین قالب و ورق‌گیر بلغزد، روانکاری از اهمیت خاصی برخوردار است.

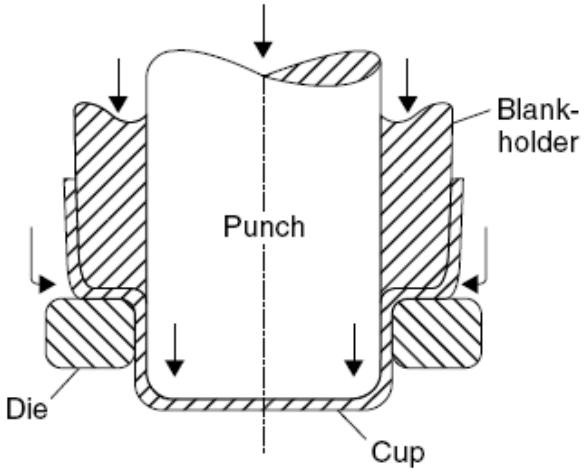
کشش برروی سنبه کوچک می‌باشد و قسمت عمده تغییر شکل در لبه رخ می‌دهد. در طی فرآیند ممکن است کرنشهای بزرگی رخ دهند و امکان کشش جامی که ارتفاعش مساوی یا مقداری بیشتر از قطر جام باشد، وجود دارد. جامهای عمیق‌تر را می‌توان از طریق بازکشش ایجاد کرد، شکل(۱-۹).



شکل ۱-۷: (**a**) قطعه متداول شکل داده شده در قالب کششی، (**b**) مقطع ابزار داخل قالب کشش.



شکل ۱-۸: (**a**) ابزار مورد استفاده برای کشش عمیق یک جام، (**b**) یک جام ساده ساخته شده به روش کشش عمیق در یک مرحله.



شکل ۱-۹: مقطع ابزار مورد استفاده در باز کشش به سمت جلوی جام.

۱-۱-۷- هیدروفرمینگ

هیدرو فرمینگ دارای دو نوع اصلی می باشد.

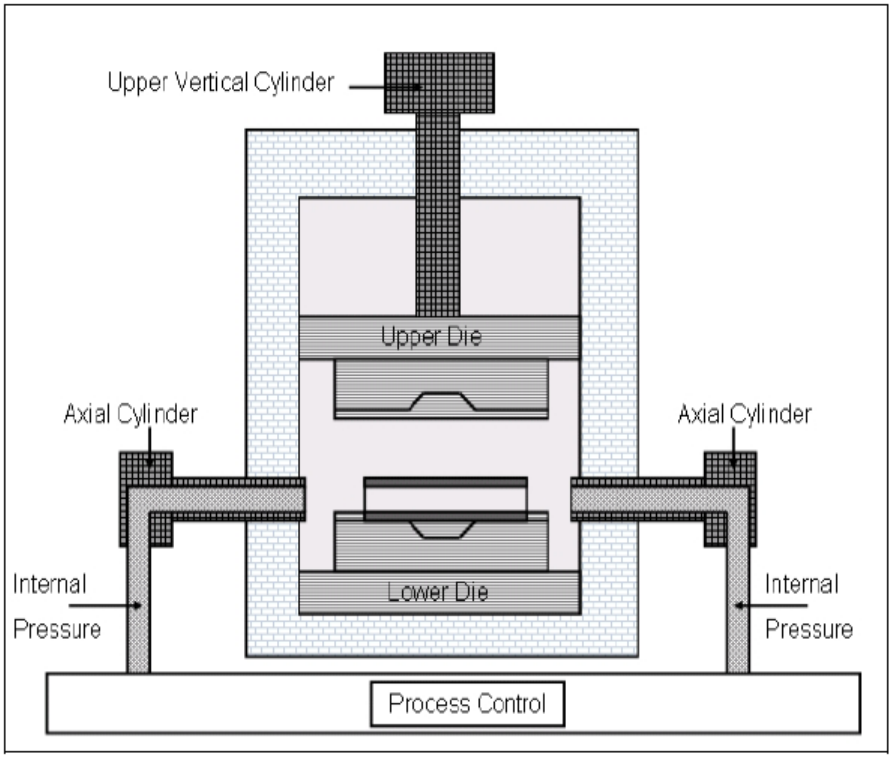
۱- هیدروفرمینگ لوله[1]

۲- هیدروفرمینگ سطوح[2]

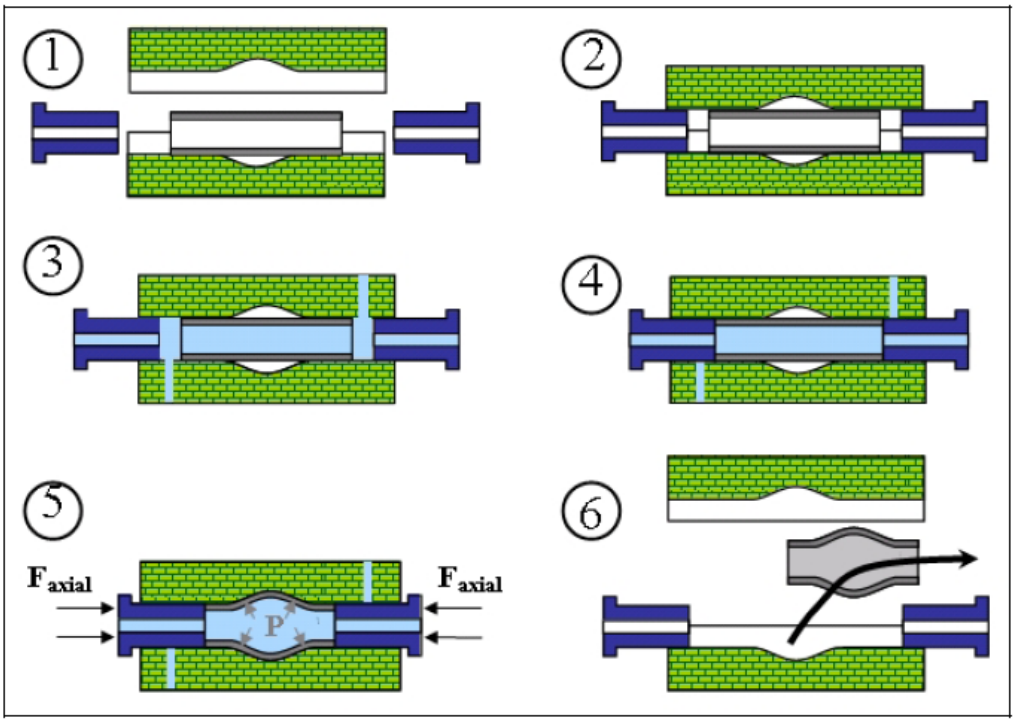
هدف از این پایان نامه بررسی هیدرو فرمینگ سطوح است ولی در ابتدا به هیدرو فرمینگ لوله اشاره ای می کنیم.

در سال ۱۹۴۰ Grey توانست با شکل دهی یک لوله بدون درز مسی به فرم یک سه راهی در آمریکا این اختراع را به نام خود ثبت نماید. در این روش با قرار دادن مقاطع مختلف لوله در قالب پایینی و قرار گرفتن قالب بالایی بر روی آن و سپس با بالا بردن فشار داخلی مقاطع مختلف یا سه راهی لوله را می توان تولید کرد[۱].

[1] Tube Hydro-forming
[2] Sheet Hydro-forming

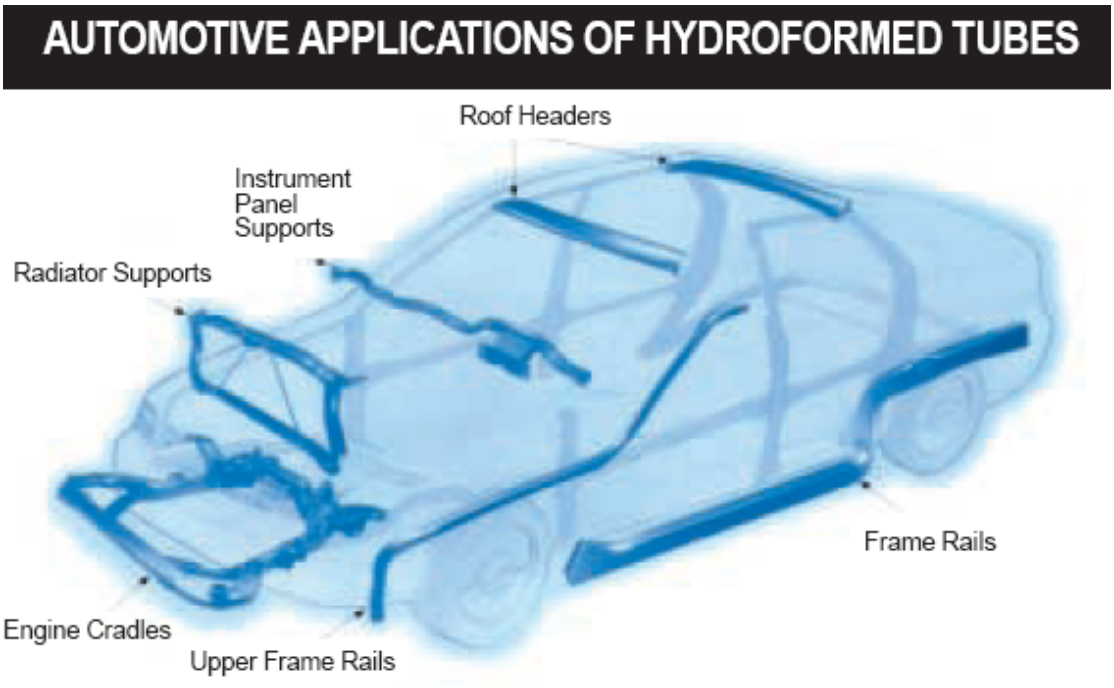


شکل **۱-۱۰**: اجزاءاصلی هیدروفرمینگ لوله[۱] .

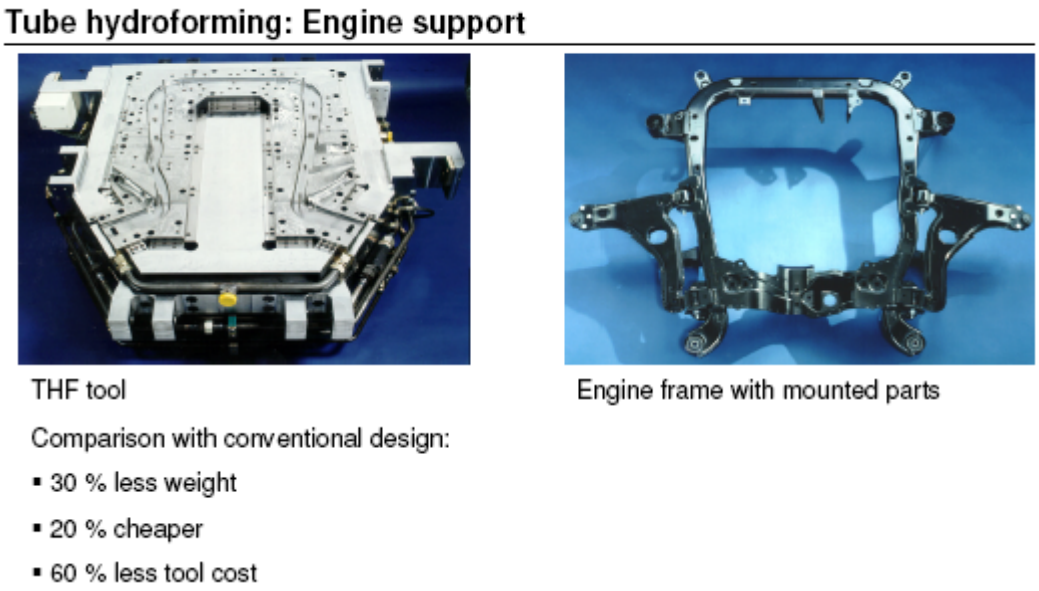


شکل **۱-۱۱**: مراحل شکل دهی در هیدروفرمینگ لوله[۱] .

اشکال ۱-۱۲ و ۱-۱۳ زیر بیانگر میزان کاربرد و اهمیت این روش است.



شکل **۱-۱۲**: قطعات کاربردی اتومبیل در هیدروفرمینگ لوله



شکل **۱-۱۳**: قطعات کاربردی نگهدارنده موتور اتومبیل در هیدروفرمینگ لوله

تارخچه هیدروفرمینگ ورق به قبل از جنگ جهانی در صنعت هواپیمایی آلمان می رسد اما از سال ۱۹۸۰ بسیار بیشتر از قبل و بطور کاملاً گسترده مورد توجه قرار گرفت وکاربرد آن به ویژه در صنعت اتومبیل‌سازی توسعه یافت[۳و۲].