



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

بررسی عددی و تجربی حد شکل دهی در فرایند هیدروفرمینگ برای

قطعات غیرگرد

فرزاد رحمنی

استاد راهنما:

دکتر حسن مسلمی نائینی

استاد مشاور:

دکتر حامد دیلمی عضدی

(عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران دانشکده فنی و مهندسی اراک)

شهریور 88

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
مَنْ مَرَّ بِهَذَا
مَسْجِدٍ مِنْ مَسَاجِدِ
الْحَقِيقَةِ
وَمَنْ مَرَّ بِهَذَا
مَسْجِدٍ مِنْ مَسَاجِدِ
الْحَقِيقَةِ
وَمَنْ مَرَّ بِهَذَا
مَسْجِدٍ مِنْ مَسَاجِدِ
الْحَقِيقَةِ

تقدیم:

بزرگواری که تا بود قدرش را ندانستم!

ولی تا هستم بگونه ای خواهم زیست که

نامش به چنان بلند نگردد دارم.

روح شاد

پدرم

مادرم

راهنمای هوشیار و آگاه راهم،

راهور همیشه بیدار راه پر نشیب و فراز زندگی

رنج بردن و آرام شب و روزم

.....

و هر آنچه گویم، قطره ای از دریای کلفتم

برادران و خواهرانم

که باعث افتخار و سربلندی من هستند و ایستادن بر قله شکوه و انسانیت و سعادت، زمینده آنهاست.

سپاس گزاری

با سپاس فراوان از راهنمایی‌ها و کمک‌های شایان جناب آقای دکتر حسن مسلمی نائینی و جناب آقای دکتر حامد دیلمی‌عضدی-عضو هیات علمی دانشگاه علم و صنعت ایران دانشکده فنی و مهندسی اراک- در انجام این پایان‌نامه و همچنین از همیاری و همفکری‌های جناب آقای دکتر محمد حبیبی پارسا- عضو هیات علمی دانشگاه تهران، مهندس سیدجلال هاشمی‌قیری، مهندس سیامک مزدک، مهندس روح‌اله عزیزی تفتی، مهندس محمد حسین‌پور، مهندس محمدرضا جنگجو و دانشجویمان خوابگاه حیدری کمال تشکر و قدرانی می‌گردد.

چکیده

روشهای هیدروفرمینگ ورقهای فلزی که در سالهای اخیر بطور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است، می‌تواند جایگزین بسیار خوبی برای بسیاری از روشهای شکل‌دهی سنتی باشد. در هیدروفرمینگ ورقهای فلزی محیط مایع به روشهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته و از اینرو فرایندهای متفاوتی تحت عنوان روشهای هیدروفرمینگ ورق مطرح گردیده است. در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی محفظه‌ای از مایع جایگزین ماتریس شده است و شکل نهایی قطعه بر اساس شکل یک سنبه‌ی صلب تعیین می‌گردد. این فرایند عموماً جهت تولید قطعات با شکل‌های پیچیده و یا با نسبتهای کشش بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی از عیوب عمده‌ی محدود کننده‌ی فرایند شکل‌دهی، پارگی است و پیش‌بینی شرایط بروز پارگی جهت طراحی مناسب عملیات برای تولید قطعه‌ی سالم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی جهت جلوگیری از بروز پارگی و چین‌خوردگی در قطعه لازم است فشار سیال در حین فرایند در محدوده‌ی کاری مجاز تغییر نماید.

در این پایان‌نامه اثر عواملی مانند فشار محفظه‌ای، فشار پیش‌بالج و ارتفاع پیش‌بالج بر روی توزیع ضخامت در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات مربعی بحث شده است. همچنین فرایند با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) تحلیل شده و تاثیر پارامترهای مختلف فرایند مانند فشار پیش‌بالج، فشار محفظه‌ای، ضخامت و ضریب اصطکاک بر روی ناحیه‌ی کاری بررسی گردیده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که برای هر فشار پیش‌بالج یک مقدار بهینه برای نسبت کشش وجود دارد. همچنین با افزایش فشار محفظه‌ای چروکیدگی در ناحیه فلانج کاهش می‌یابد. با افزایش اصطکاک بین ورق و قالب یا ورق و ورق‌گیر ناحیه کاری کوچکتر شده در حالی که با افزایش اصطکاک بین ورق و سنبه ناحیه کاری بزرگتر می‌شود. همچنین اگر شعاع سرسنبه افزایش یابد ناحیه کاری بزرگتر و نسبت کشش بیشتری قابل دستیابی می‌شود. برای ارزیابی نتایج عددی برای نسبت کشش‌های متفاوت آزمایش‌های تجربی انجام شد که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی مشاهده شد.

واژگان کلیدی: شکل‌دهی ورق فلزی، هیدروفرمینگ، کشش عمیق هیدرومکانیکی، ناحیه‌کاری

فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه
فهرست مطالب.....	أ
فهرست شکل ها.....	د
فهرست جدول ها.....	ز
نمادها.....	ح
فصل 1.....	1
1-1-1- مقدمه.....	2
2-1-2- مروری بر فرایندهای کشش عمیق.....	3
1-2-2-1- کشش عمیق سنتی.....	3
1-2-2-2- فرایندهای شکل دادن ورق بر پایه فشار سیال.....	4
1-2-2-2-1- هیدروفرمینگ لوله.....	4
2-2-2-2-1- هیدروفرمینگ ورق.....	8
3-2-2-2-1- فرایند کشش عمیق با نیروی ورق گیری سیال.....	8
4-2-2-2-1- فرایند شکل دهی ورق سوپر پلاستیک.....	9
5-2-2-2-1- فرایند شکل دهی با سیال ویسکوز.....	9
6-2-2-2-1- فرایند هیدروفورم.....	10
7-2-2-2-1- فرایند کشش عمیق به روش هیدرودینامیک.....	11
8-2-2-2-1- فرایند کشش عمیق با فشار شعاعی.....	12
9-2-2-2-1- کشش عمیق به روش هیدرومکانیک.....	13
3-1-3- تعریف شکل پذیری ماده.....	18
1-3-3-1- نمودار حد شکل دادن.....	19
4-1-4- مروری بر پژوهش های پیشین.....	24
1-4-4-1- بررسی های عددی و شبیه سازی نرم افزاری.....	25
2-4-4-1- بررسی های تجربی.....	28
5-1-5- اهداف و روند پیشبرد پایان نامه.....	29
6-1-6- ساختار نوشتار.....	30
فصل 2.....	32
1-2-1- مقدمه.....	33
2-2-2- شکل هندسی و هندسه فرایند.....	34
3-2-3- شبیه سازی.....	34
1-3-3-2- مراحل انجام تحلیل.....	34
2-3-3-2- نحوه مدلسازی فرآیند.....	36

38	3-3-2- محاسبه نسبت کشش
39	4-3-2- ابعاد لوح
41	5-3-2- سطوح اصطکاکی
43	6-3-2- تعیین شرایط و نیروهای اعمالی جهت شکل دهی
43	7-3-2- تعیین مراحل شکل دهی
44	8-3-2- شبکه بندی
46	9-3-2- تعریف منحنی تغییرات فشار
46	4-2- نحوه وارد کردن نمودار حد شکل دادن
47	2-4-2- منحنی حد شکل دادن ST12
49	فصل 3
50	1-3- مقدمه
50	2-3- تجهیزات آزمایش
51	1-2-3- قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی
53	2-2-3- مدار کنترل هیدرولیکی
55	3-3- نتایج تجربی بررسی پارامترهای فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات مربعی
56	1-3-3- اثر اعمال فشار سیال بر روی نسبت حد کشش
57	4-3- مشخصات مواد
63	فصل 4
64	1-4- توزیع ضخامت
64	1-1-4- تاثیر فشار محفظه ای
64	1-1-1-4- توزیع ضخامت در سه منطقه لوح در فشارهای محفظه ای متفاوت
67	2-1-4- تاثیر فشار پیش بالچ
67	3-1-4- تاثیر ارتفاع پیش بالچ
68	2-4- بررسی اثر فشار سیال بر روی نسبت کشش حدی در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی
74	1-2-4- اثر فشار پیش بالچ بر حد کشش
75	2-2-4- تاثیر ضخامت ورق بر روی نسبت حد کشش
76	3-2-4- تاثیر شعاع نوک سنبه
77	4-2-4- تاثیر اصطکاک بین اجزاء قالب و ورق
77	1-4-2-4- تاثیر ضریب اصطکاک بین ورق و ورق گیر
78	2-4-2-4- تاثیر ضریب اصطکاک بین ورق و ماتریس
79	3-4-2-4- تاثیر ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه
81	فصل 5
82	1-5- نتیجه گیری
84	2-5- پیشنهاد برای ادامه کار

85.....مراجع

أ.....پیوست

فهرست شکل‌ها

	عنوان.....	صفحه
4	شکل (1-1): فرایند کشش عمیق سنتی [1].....	4
7	شکل (2-1): هیدروفرمینگ لوله با اعمال فشار از داخل [3].....	7
7	شکل (3-1): هیدروفرمینگ لوله با فشار از خارج [4].....	7
7	شکل (4-1): اتصال قطعات به کمک هیدروفرمینگ [4].....	7
9	شکل (5-1): کشش عمیق با فشار نگهدارنده سیال [6].....	9
9	شکل (6-1): فرایند شکل دادن سوپر پلاستیک ورق [4].....	9
10	شکل (7-1): شکل دادن ورق با فشار سیال ویسکوز [6].....	10
11	شکل (8-1): فرایند هیدروفرم [4].....	11
11	شکل (9-1): فرایند کشش عمیق هیدرو دینامیکی [4].....	11
12	شکل (10-1): فرایند کشش عمیق با فشار شعاعی [4].....	12
13	شکل (11-1): سمت چپ شماتیک فرایند CDD و سمت راست شماتیک فرایند HDD [10].....	13
15	شکل (12-1): ناحیه بالچ شده در فضای بین ورقگیر و سنبه [7].....	15
16	شکل (13-1): تغییر شکل ورق در مرحله پیش‌بالچینگ [7].....	16
18	شکل (14-1): شماتیک محدوده کاری فشار سیال. برگرفته از [16].....	18
21	شکل (15-1): واپیچش دایره‌های چاپی در نزدیکی باریک‌شدگی موضعی و ثبت کرنش‌ها در دایره‌ها [47].....	21
22	شکل (16-1): نمودار حد شکل‌دادن فولاد کم کربن [47].....	22
22	شکل (17-1): مقایسه FLD تجربی شکل (11-2) با منحنی‌های نظری [47].....	22
23	شکل (18-1): نوارهایی با پهنای متغیر کشیده شده برای دستیابی به نسبت‌های مختلف e_2/e_1 [47].....	23
	شکل (19-1): شکست تحت کشش دو محوری ($e_2=e_1$) در نزدیکی راس گنبد در نمونه‌ای با پهنای کامل [47].....	24
34	شکل (1-2): ابعاد سنبه مورد استفاده.....	34
35	شکل (2-2): روند کلی یک تحلیل.....	35
36	شکل (3-2): لوح شبیه‌سازی شده.....	36
37	شکل (4-2): اجزا مختلف شبیه‌سازی شده الف) سنبه ب) ماتریس ج) ورق‌گیر د) لوح.....	37
38	شکل (5-2): نمایی از مدلسازی کامل فرآیند (قبل از تحلیل).....	38
40	شکل (6-2): ابعاد سنبه.....	40
40	شکل (7-2): هندسه لوح اولیه [35].....	40
45	شکل (8-2): نمونه‌ای از مدل شبکه‌بندی شده.....	45
46	شکل (9-2): تغییرات فشار محفظه‌ای در طول زمان فرایند.....	46
47	شکل (10-2): نحوه وارد کردن نمودار FLD به نرم‌افزار.....	47

- شکل (2-11) : نمودار حد شکل دادن ST12 [48]..... 48
- شکل (3-1) : قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی..... 52
- شکل (3-2) : مدار هیدرولیکی کنترل فشار محفظه ی سیال. 1: پمپ هیدرولیک 2: شیر کنترل فشار پیش‌بالجینگ 3: فشار سنج برای اندازه‌گیری فشار پیش‌بالجینگ 4: شیر یکطرفه 5: فشار سنج برای اندازه‌گیری فشار نهایی 6: شیر کنترل فشار نهایی محفظه..... 54
- شکل (3-3) : مسیر نوعی فشار داخل محفظه در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی..... 54
- شکل (3-4) : پارگی در منطقه شعاع سرسنبه..... 56
- شکل (3-5) : ناحیه کاری به‌دست آمده با آزمایش..... 57
- شکل (3-6) : نمونه ها..... 57
- شکل (3-7) : تجهیزات کشش عمیق هیدرومکانیکی..... 58
- شکل (3-8) : قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی..... 59
- شکل (3-9) : تجهیزات کشش عمیق سنتی..... 59
- شکل (3-10) : پمپ هیدرولیک دستی..... 60
- شکل (3-11) : شیر کنترل فشار..... 60
- شکل (3-12) : ارینگ مورد استفاده در ورق گیر جهت آب‌بندی..... 60
- شکل (3-13) : فشار سنج..... 61
- شکل (3-14) : لوح اولیه برای انجام آزمایش عملی در نسبت‌های کشش متفاوت..... 61
- شکل (3-15) : نمونه‌های تولید شده به روش کشش عمیق هیدرومکانیک با نسبت کشش‌های متفاوت..... 61
- شکل (3-16) : نمونه‌هایی از قطعات معیوب تولید به روش کشش عمیق هیدروفرمینگ..... 62
- شکل (4-1) : نازک شدگی در فشارهای محفظه ای مختلف (a) نسبت کشش $1/75$ (b) نسبت کشش $2/25$ 65
- شکل (4-2) : چروکیدگی در فشار محفظه ای 50 Bar..... 65
- شکل (4-3) : نازک شدگی در سه منطقه فلنج در فشار 150 Bar..... 66
- شکل (4-4) : نازک شدگی در فشارهای متفاوت در سه منطقه لوح برای نسبت کشش 2..... 66
- شکل (4-5) : نازک شدگی در فشارهای پیش‌بالج متفاوت..... 67
- شکل (4-6) : تاثیر ارتفاع‌های پیش‌بالج‌های متفاوت..... 68
- شکل (4-7) : تغییرات نازک‌شدگی در ارتفاع‌های پیش‌بالج متفاوت..... 68
- شکل (4-8) : تغییرات فشار سیال نسبت به کورس پرس در هنگام حرکت سنبه..... 69
- شکل (4-9) : ناحیه کاری کشش موفقیت آمیز برای فرایند HDD..... 70
- شکل (4-10) : قطعه پاره شده با نسبت کشش $2/4$ در فشار محفظه‌ای 175 Bar..... 71
- شکل (4-11) : نتایج کشش $LDR=2.35$ در فشارهای متفاوت (a) 200 Bar (b) 150 Bar (c) 50Bar..... 72
- شکل (4-12) : مقایسه نتایج عددی و تجربی..... 73
- شکل (4-13) : نمونه‌های از پارگی به وجود آمده در کشش عمیق هیدرومکانیکی..... 73
- شکل (4-14) : مقایسه ناحیه کاری تجربی و شبیه‌سازی..... 74
- شکل (4-15) : اثر فشار پیش‌بالج بر محدوده کاری..... 75

- شکل (4-16): اثر ضخامت اولیه ورق بر روی محدوده کاری 76
- شکل (4-17): شعاع متفاوت برای نوک سنبه 77
- شکل (4-18): تاثیر شعاع نوک سنبه بر محدوده کاری 77
- شکل (4-19): تاثیر اصطکاک بین ورق و ورق گیر بر روی نسبت حد کشش تحت اثر فشارهای مختلف 78
- شکل (4-20): اثر اصطکاک بین ورق و ماتریس بر روی نسبت حد کشش تحت فشارهای مختلف سیال 79
- شکل (4-21): تاثیر اصطکاک بین ورق و سنبه بر روی نسبت حد کشش تحت فشارهای متفاوت 80
- شکل (4-22): پارگی در منطقه سر سنبه در شرایط اصطکاکی صفر بین ورق و سنبه در نسبت کشش 2/25 80
- (a سنتی b) هیدرومکانیکی 80

فهرست جدول‌ها

عنوان.....	صفحه
جدول (1-2): ضریب Z و ارتفاع کشش برای نسبت‌های کشش متفاوت.....	41
جدول (2-2): ضرایب اصطکاک بین لوح و ابزار.....	43
جدول (1-3): مشخصات ابعادی قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی.....	53
جدول (2-3): مشخصات ورق‌های مورد استفاده در آزمایشها [7].....	58

نمادها

$\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*$	کرنش‌ها حقیقی
ε_t	مولفه‌ی کرنش ضخامتی
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	مولفه‌های اصلی کرنش
$\bar{\varepsilon}$	کرنش موثر
μ_h	ضریب اصطکاک در سطح تماس ورق و ورق گیر
μ_d	ضریب اصطکاک در سطح تماس ورق و ماتریس کشش
μ_p	ضریب اصطکاک در سطح تماس ورق و سنبه
σ_y	تنش تسلیم
A_0	مساحت لوح تغییر شکل نیافته
A_f	مساحت فلنج باقی مانده
A_m	مساحت متوسط سنبه و حفره ماتریس
B_{eq}	ضریب نسبت کشش
C_m	محیط متوسط سطح مقطع سنبه و حفره قالب
e_1	کرنش اصلی
e_2	کرنش فرعی
e_1^*, e_2^*	کرنش‌های مهندسی
FLD	نمودار حد شکل دادن
HDD	کشش عمیق هیدرومکانیکی
h	ارتفاع قطعه‌ی کشیده شده یا عمق کشش
K	ضریب استحکام
LDR	نسبت کشش
P	فشار محفظه‌ی سیال
P_i	فشار پیش‌بالج سیال
R_p	شعاع سنبه
t	ضخامت ورق

فصل 1

مقدمه

1-1- مقدمه

شکل‌دهی ورقهای فلزی، ایجاد تغییر شکل مومسان در ورق جهت تولید قطعه‌ای با شکل هندسی مورد نظر می‌باشد. این فناوری در تولید قطعات بسیاری در صنایع مختلف از جمله صنایع خودرو و هوافضا کاربرد دارد. فرایندهای مختلفی از قبیل کشش عمیق، اتساع، خمکاری، چرخکاری و... جهت شکل‌دهی ورقها وجود دارد که استفاده از آنها در تولید قطعه، بستگی به عواملی چون هندسه‌ی قطعه کار، جنس ورق، حجم تغییر شکل و غیره دارد. همواره محدودیتهایی در فرایندهای شکل‌دهی و تولید قطعات ورقی وجود دارد که تولید قطعه‌ی سالم و بدون عیب مستلزم رعایت این حدود می‌باشد. به علت اینکه این فرایندها دارای طبیعت کششی‌اند، بروز ناپایداری کششی و پارگی یک عامل محدود کننده‌ی مهم در فرایند شکل‌دهی می‌باشد. چین‌خوردگی ورق به سبب وجود تنشهای فشاری در بخشهایی از قطعه، برگشت فنری و توزیع نایکنواخت ضخامت از دیگر عیوبی است که عمدتاً در این فرایندها ایجاد می‌شود.

اصولاً کمتر شدن محدودیتهای موجود در فرایند، کاهش هزینه‌های لازم و افزایش انعطاف‌پذیری فرایند از مسائلی است که همواره در طراحی و انجام این فرایندها مطلوب نظر بوده است. این مسئله با کاربرد روزافزون آلیاژهای سبک و پر استحکام که انجام فرایند شکل‌دهی را با مشکلات و محدودیتهای بیشتری مواجه می‌کنند و نیاز به تولید قطعات متنوع و با اشکال گاه بسیار پیچیده، تشدید می‌شود.

هیدروفرمینگ ورقهای فلزی که در سالهای اخیر بطور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است، می‌تواند جایگزین بسیار خوبی برای برخی از روشهای شکل‌دهی باشد. توانایی شکل‌دهی قطعات پیچیده، افزایش حدود شکل‌دهی و امکان انجام تغییر شکل بیشتر در یک مرحله و در نتیجه کمتر شدن تعداد مراحل تولید، کیفیت مناسب‌تر قطعات تولیدی و ساده‌تر شدن و افزایش عمر مجموعه‌ی ابزار از جمله مزیت‌های قابل توجه این روش در مقایسه با فرایندهای شکل‌دهی سنتی است. این مزیتها عمدتاً ناشی از کاربرد فشار مایع به عنوان بخشی از ابزار تغییر شکل در فرایند می‌باشد. در این فناوری فشار مایع به روشهای گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد و از اینرو روشهای مختلفی تحت عنوان

فرایندهای هیدروفرمینگ ورق مطرح گردیده است که از آن جمله می‌توان به فرایندهای کشش عمیق هیدرومکانیکی، کشش عمیق هیدرودینامیکی، کشش عمیق با فشار شعاعی و ... اشاره نمود. پژوهش انجام گرفته در این پایانامه بر فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی تمرکز یافته است. در این فرایند محفظه‌ای از مایع جایگزین ماتریس شده، شکل نهایی قطعه بر اساس شکل یک سنبه‌ی صلب تعیین می‌شود. در بخشی از این فصل توضیحات مختصری در مورد فرایندهای هیدروفرمینگ آورده می‌شود و سپس به شکل کاملتری فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی و ویژگیهای آن تشریح می‌گردد. تعیین حد شکل‌دهی قطعه در این فرایند در ارتباط با پارگی، هدف اصلی این پژوهش بوده است که به کمک تحلیل عددی به روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار Abaqus و آزمایشهای تجربی بررسی و تحقیق شده است.

2-1- مروری بر فرایندهای کشش عمیق

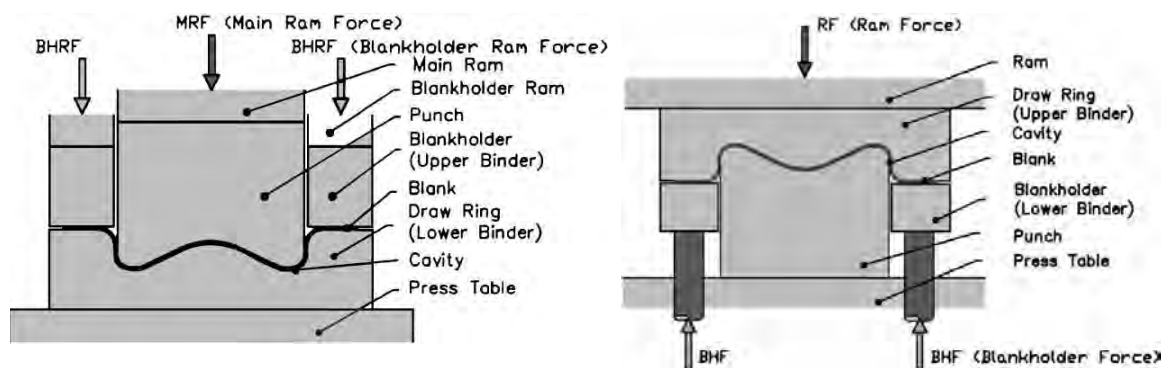
1-2-1- کشش عمیق سنتی¹

کشش عمیق سنتی نوعی فرایند ورق‌کاری است که در آن ورق سرد، یا قطعه با برش محصور داخل ماتریس قالب بدون ایجاد چروک یا پارگی شکل داده شود. کشش عمیق یکی از مهمترین فرایندهای شکل‌دهی فلزات است. این فرایند جهت تولید انبوه قطعات مختلف برای کاربردهای زیادی از قبیل قطعات بدنه اتومبیل‌ها، پوسته‌ها و... می‌باشد. به بیان دیگر کشش عمیق فرآیندی است که در آن یک گرده که معمولاً به وسیله صفحه فشاری (ورق‌گیر²) کنترل می‌شود تحت نیرو قرار گرفته، توسط سنبه در درون ماتریس کشیده می‌شود و ظرفی که ضخامت آن همان حدود ضخامت اولیه است را شکل می‌دهد. در کشش عمیق، عمق فنجان از نصف قطر فنجان بزرگتر است [1]. برای آنکه سیلان ماده راحت‌تر صورت پذیرد، باید از ورق‌گیر، لوح اولیه و شرایط اصطکاکی مناسب بهره برده شود. برای کاهش اصطکاک از روان‌کار استفاده می‌شود.

1 Conventional Deep Drawing

2 Blank Holder

ورق گیر جزء مهمی از فرایند کشش عمیق سنتی می باشد. اگر میزان نیروی ورق گیر زیاد باشد ممکن است که کشش زیاد ایجاد شده باعث پارگی شود و اگر میزان نیروی ورق گیر کم باشد کشش کم می شود و چروکیدگی اتفاق می افتد. می توان ورق گیر را به گونه ای طراحی کرد که بتوان مقدار متفاوت نیرو را در قسمت های مختلف ورق اعمال نمایند. این فرایند به شکل شماتیک در شکل (1-1) نشان داده شده است.



شکل (1-1): فرایند کشش عمیق سنتی [1]

1-2-2-2- فرایندهای شکل دادن ورق بر پایه فشار سیال

1-2-2-2-1- هیدروفرمینگ لوله¹

روش هیدروفرمینگ لوله به زمان قبل از جنگ جهانی دوم بر می گردد. در آن زمان تعدادی از قطعات هواپیما به این روش ساخته شدند. از آن زمان تاکنون این روش بسته به زمان و کشوری که این روش در آن استفاده شده نام های متفاوتی به خود گرفته است. شکل دهی بالجینگ لوله²، شکل دهی بالجینگ با مایع³، شکل دهی با فشار هیدرولیک یا هیدرواستاتیک⁴، شکل دهی با فشار داخلی بالا⁵ نام هایی بودند که در طول سال های گذشته به این روش اطلاق شده است. در سال های گذشته این روش تحت عنوان هیدروفرمینگ لوله معرفی شده است [1].

1 Tube hydroforming

2 Bulge Forming of Tube

3 Liquid Bulge Forming

4 Hydraulic pressure forming

5 Internal High Pressure Forming

اولین کار صنعتی ثبت شده بوسیله روش هیدروفرمینگ لوله مربوط به تولید لوله بدون درز T شکل مسی بوده، در سال 1940 میلادی انجام شده است. اولین تحقیقات علمی منتشر شده در این زمینه مربوط به دیویس¹ می باشد که نتایج آزمایش های خود را در سال 1945 میلادی منتشر کرد. دیویس لوله ای از جنس فولاد نرم تحت فشار داخلی و نیروی محوری را تحت آزمایش قرار داد. او در آزمایش های خود نسبت نیرو به فشار را ثابت در نظر گرفت و رفتار لوله را برای پارگی و تسلیم به دست آورد [2].

در حدود سال 1970 میلادی تحقیقات تئوری و آزمایشگاهی بر روی بالچ فرمینگ ادامه پیدا کرد. در این سال ها اشکال و مواد جدید، ابزارهای متفاوت و ماشین های جدید استفاده شدند. برای مثال از پلی اتان، لاستیک و الاستومر برای ایجاد فشار داخلی استفاده کردند. آنها توانستند به این وسیله انبساط محیطی بیشتری را برای لوله ایجاد کنند.

از دیگر افرادی که در سال های گذشته روی این فناوری کار کردند می توان از اشکومل² و همکارانش نام برد، آنها توانستند میل بادامک را با این روش تولید کنند. آنها همچنین برای تخمین های اولیه از تئوری های موجود استفاده کردند.

انگل³ و دیک⁴ از منطق فازی برای تقسیم بندی قطعات تولیدی به وسیله هیدروفرمینگ لوله استفاده کردند [1]. آنها قطعات تولیدی به وسیله هیدروفرمینگ لوله را به سه دسته کلی تقسیم بندی کردند: (a) تغییر در راستای محور لوله، (b) جابجایی نسبت به محور اولیه لوله، (c) تغییر سطح مقطع. این تقسیم بندی قطعات تولیدی به وسیله هیدروفرمینگ لوله محدود به تولید قطعاتی نظیر لوله آگزوز می گردد، در حالی که به وسیله این روش قطعاتی نظیر محورهای خودرو، پایه موتور، قاب های بدنه خودرو و نظایر آن را نیز تولید می کنند. بنابراین واقعیت کک⁵ و التان⁶ تقسیم بندی ای را در چهار

1 Davis

2 Eshkpmel

3 Engel

4 Dick

5 Koc

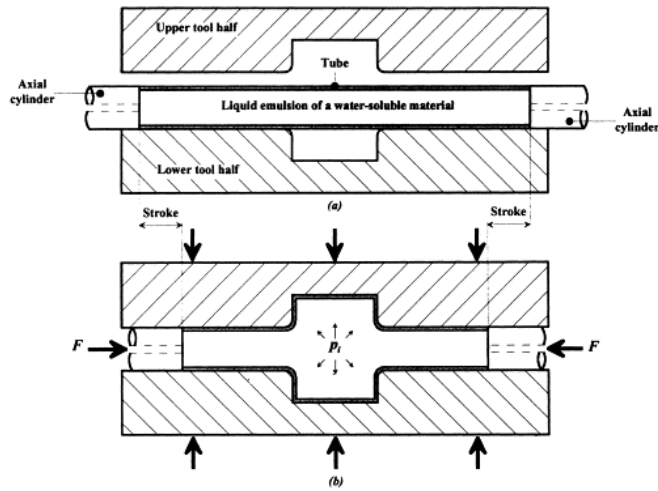
6 Altan

قسمت بدین صورت ارائه کردند: (a) هندسه قطعه، (b) لوله اولیه، (c) سطح مقطع لوله و (d) نسبت طول به قطر (L/D)

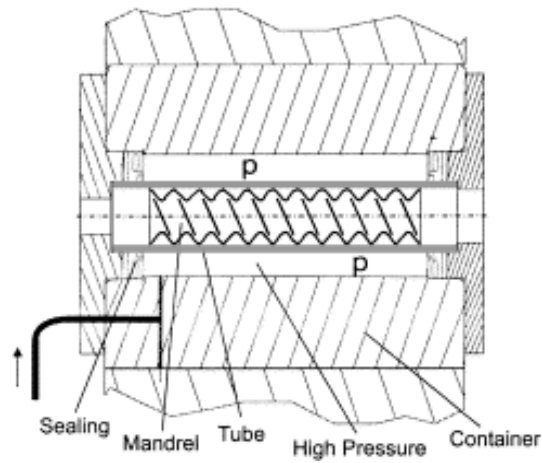
در حال حاضر تحقیقات بر روی فرایند هیدروفرمینگ لوله بیشتر بر روی موضوعات زیر انجام می‌شود:

- کاربردهای صنعتی فناوری هیدروفرمینگ لوله
- تولید اجزای قابها و سازه ها
- طراحی روبه تولید و توسعه آن
- ارزیابی قطعات تولیدی به روش هیدروفرمینگ لوله با روش‌های متعارف
- سوراخکاری همزمان در تولید قطعات به روش هیدروفرمینگ لوله (برای قطعاتی که نیاز به سوراخکاری دارند)
- مونتاژ و جوشکاری قطعات تولید به روش هیدروفرمینگ لوله
- کاهش وزن قطعات تولید به روش هیدروفرمینگ لوله

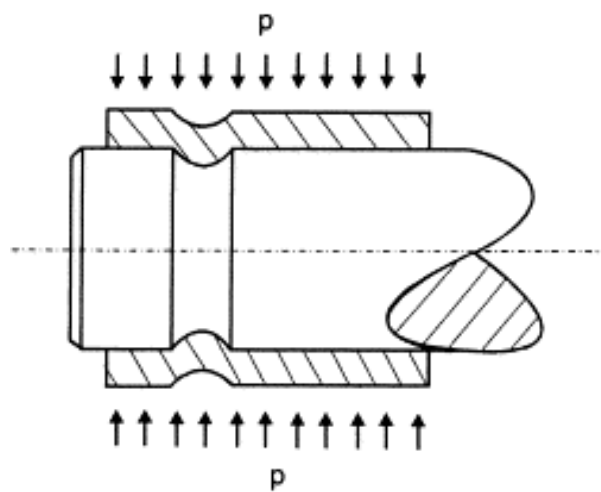
در شکل (2-1) شماتیکی از این فرایند نمایش داده شده است. بعد از بستن قالب به منظور هدایت مواد به مناطق تغییر شکل، فشار داخلی افزایش می‌یابد. ماده مورد استفاده برای اعمال فشار سیال می‌تواند، ویسکوز یا الاستومر باشد. اغلب بار خارجی فشاری اعمال می‌گردد. گونه‌ای دیگر از فرایند هیدروفرمینگ لوله با وارد کردن فشار مایع از سمت خارج لوله انجام می‌شود. در این روش لوله بر روی یک ماندل به کمک فشار مایع شکل می‌گیرد (شکل (3-1)). روش هیدروفرمینگ لوله برای اتصال قطعات نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فناوری در شکل (3-1) و شکل (4-1) به‌طور شماتیک نشان داده شده است [4].



شکل (2-1): هیدروفرمینگ لوله با اعمال فشار از داخل [3]



شکل (3-1): هیدروفرمینگ لوله با فشار از خارج [4].



شکل (4-1): اتصال قطعات به کمک هیدروفرمینگ [4].