دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ لوله تحت اثر ارتعاشات التراسونیک به روش اجزای محدود

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

مهدی زارعی

استاد راهنما

دکتر محمود فرزین

1390

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک _ طراحی کاربردی آقای مهدی زارعی

تحت عنوان

شبیه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ لوله تحت اثر ارتعاشات التراسونیک

به روش اجزای محدود

در تاریخ 22 / 08 /1390 توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

1- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمود فرزین
2- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر محمد مشایخی
3- استاد داور	دکتر محمدرضا فروزان
4- استاد داور	دکتر مهران مرادی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدرضا سلیم‌پور

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی

اصفهان است.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم، آنانکه مظهر عشق و محبت اند و با روخندان شمع وجودشان پرتو امشان بزم اندیشه اند

آنانکه موهایشان سپیدی گرفت تا روی من سپید بماند

آنانکه فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی سیمایشان سرمایه های زندگی ام بوده اند

آنانکه راستی قامتم در شکستگی قامتشان تجلی یافت.

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده 1

فصل اول: مقدمه

1-1- مقدمه 2

1-2- اهداف 3

فصل دوم: هیدروفرمینگ لوله کلاسیک والتراسونیک

2-1- مقدمه 4

2-2- سیستم هیدروفرمینگ لوله 5

2- 2-1- طبقه بندی قطعات هیدروفرمینگ لوله 6

2-2-2- پارامترهای هیدروفرمینگ لوله 8

2-2-2-الف- جنس لوله 8

2-2-2-ب- مسیر بارگذاری 8

2-2-2-ج- هندسه و ابعاد لوله 9

2-2-2-د- جنبه های روانکاری در هیدروفرمینگ لوله 10

2-2-2-ه- شکل‌پذیری درهیدروفرمینگ لوله 12

2-2-2-و- شکل‌پذیری درهیدروفرمینگ لوله با قالب های مسطح 17

2-2-3- راه های بهبود شکل‌پذیری در هیدروفرمینگ لوله 18

2-3- شکل دهی با التراسونیک 20

2-3-1- سیستم الترا سونیک 21

2-3-2- تأثیر ارتعاشات التراسونیک 22

2-4- پتانسیل بهبود شرایط روانکاری با اعمال ارتعاشات روی قالب در فرایند هیدرو فرمینگ لوله 23

2-5- استفاده از روش اجزاء محدود 23

2-6- تولید امواج التراسونیک 25

فصل سوم: شبیه‌سازی عددی

3-1- مقدمه 26

3-2- شبیه سازی اجزای محدود مدل متقارن محوری 27

3-2-1- مدل سازی اجزاء در محیط part.....27

3-2-2- تعیین خصوصیات لوله در محیط property.....28

3-2-3- مونتاژ اجزاء شبیه سازی در محیط Assembly.....28

3-2-4-تعیین نوع و شرایط حل مسئله در محیط step 29

3-2-5- تعریف نوع تماس سطوح اجزاء در تماس با هم در محیط interaction.....29

3-2-6- تعریف شرایط بارگذاری و شرایط مرزی در محیط load 30

3-2-7- شبکه بندی اجزاءدر محیط Mesh 30

3-2-8- حل مسئله محیط job.....30

3-3- شبیه سازی اجزای محدود مدل دوبعدی 30

3-3-1- مدل سازی اجزاء در محیط part 30

3-3-2- تعیین خصوصیات لوله در محیط property 31

3-3-3- مونتاژ اجزاء شبیه سازی در محیط Assembly 31

3-3-4- تعیین نوع و شرایط حل مسئله در محیط step 32

3-3-5- تعریف نوع تماس سطوح اجزاء در تماس با هم در محیط interaction 32

3-3-6- تعریف شرایط بارگذاری و شرایط مرزی در محیط load 32

3-3-7- شبکه بندی اجزاء در محیط Mesh 32

3-3-8- حل مسئله محیط job 32

فصل چهارم: نتایج مدلسازی و تحلیل نتایج

مدل متقارن محوری

4-1-1- مقدمه 33

4-1-2- بررسی نتایج به دست آمده از مقیاس دهی جرم 33

4-1-3-مسیر بارگذاری 35

4-1-4- بررسی اثر ارتعاشات التراسونیک بر نیروی شکل‌دهی در فرایند بالجینگ 35

4-1-5- اثردامنه ارتعاشات بر روی افزایش شکل‌دهی 39

4-1-6-اثر فرکانس بر روی شکلدهی و نیروی شکل‌دهی 40

4-1-7- بررسی اثر ضریب اصطکاک 42

مدل دو بعدی

4-2-1- مقدمه 44

4-2-2- بررسی نتایج به دست آمده از مقیاس دهی جرم 44

4-2-3-مسیر بارگذاری 45

4-2-4- تاثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی شعاع گوشه 46

4-2-5-تاثیر ضریب اصطکاک بر روی شعاع گوشه در فرایند هیدروفرمینگ لوله با ارتعاشات التراسونیک.....47

4-2-6- تاثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی اندازه لوله 48

4-2-7- تاثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی توزیع ضخامت 50

4-3- اعتبارسنجی نتایج 51

4-3- وابستگی مش 53

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

5-1- مقدمه 54

5-2- نتیجه گیری 54

5-3- پیشنهادات 55

مراجع 56

چکیده:

فرایند هیدروفرمینگ لوله یکی از روش های نوین شکل دهی فلزات است که به مرور به یکی از روش های شکل‌دهی در صنعت بدل شده است. علت این امر مزایای گسترده این فرایند در افزایش قابلیت های مطلوب قطعه از جمله افزایش استحکام،کاهش وزن،عملیات های ثانویه کمتر و دست یابی به تلرانس های ابعادی دقیق تراست. با گسترش روش اجزای محدود و توسعه مفاهیم مربوطه استفاده از نرم افزارهای آنالیز اجزای محدود به علت پیچیدگی های ذاتی در فرایندهای هیدروفرمینگ لوله به عنوان یک ضرورت مطرح گردیده و روز به روز بر تعداد مقالات مرتبط افزوده می شود.هدف از معرفی ارتعاشات التراسونیک در فرایند هیدروفرمینگ لوله افزایش شکل‌پذیری و ایجاد شرایط روانکاری بهتر درمرز لوله و قالب است. تاکنون در این زمینه هیچ گونه شبیه‌سازی صورت نگرفته است. روش اجزای محدود برای طراحی سیستم هیدروفرمینگ لوله با ارتعاشات التراسونیک جهت ایجاد شرایط مرزی مناسب که حداکثر اثرات مفید را از ارتعاشات التراسونیک بدهد مورد استفاده قرار گرفت.در این پژوهش لوله به صورت دو بعدی و قالب به صورت صلب در نظر گرفته شده است و تاثیر ارتعاشات التراسونیک بر روی شکل‌دهی لوله مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است .از نتایج به دست آمده از مدل متقارن محوری مشاهده شد که استفاده از ارتعاشات التراسونیک نیروی شکل‌دهی را کاهش داده و باعث افزایش قطر شکل دهی می شود .همچنین از نتایج به دست آمده از مدل دو بعدی مشاهده شد که ارتعاشات التراسونیک کاهش شعاع گوشه را به دنبال دارد.

کلمات کلیدی: هیدروفرمینگ لوله،اجزای محدود،ارتعاشات التراسونیک

فصل اول
مقدمه

1-1مقدمه

در اوایل دهه 90 میلادی هیدروفرمینگ یک فرایند شکل دهی مؤثر و عملی برای صنعت اتومبیل سازی معرفی شد. از آن موقع به بعد تمرکز به این فرایند به طور پایداری شروع به رشد کرد.هیدروفرمینگ لوله یکی از کاربردهای هیدروفرمینگ و یک روش عالی در ساخت قطعات پیچیده با قابلیت تکرار بالا و قیمت ابزار پایین می باشد. اساس فرایند هیدروفرمینگ استفاده از فشار داخلی و جا به جایی محوری برای تبدیل لوله ها به قطعات لوله ای شکل با سطح مقطع نسبتا پیچیده است. هیدروفرمینگ لوله،فرایند شکل دهی است، که با استفاده از فشار کنترلی و تغذیه محوری ، لوله به شکل مورد نظر تغییر پیدا می‌کند. هیدروفرمینگ لوله عمدتا در صنایع خودرو ،صنایع هواپیما و وسایل خانگی استفاده می شود. مزایای اصلی هیدروفرمینگ لوله در مقایسه با فرایندهای ساخت متداول عبارتند از : استحکام قطعه ، کاهش وزن ، عملیات ثانویه کمتر و استحکام و سختی بالاترمی باشد. با این حال ، این فرایند معایبی نیز دارد همچون کندی انجام فرایند ، تجهیزات گران قیمت و عدم دانش گسترده برای کنترل فرایند و طراحی ابزار. هیدروفرمینگ لوله فرایندی است‌که به بسیاری از متغیرها مانند مسیر بارگذاری ، شکل‌پذیری ماده و شرایط روانکاری وابسته است. شکل‌پذیری می تواند به عنوان مقدار کشش یا تغییر شکل بدون شکست در طول فرایند تعریف شود. بهبود شکل‌پذیری در هیدروفرمینگ لوله بسیار مهم است زیرا قابلیت کارآیی فرایند را تعیین می کند. این پژوهش به بررسی تکنولوژی التراسونیک به عنوان یک روش بهبود شرایط روانکاری و شکل‌پذیری در هیدروفرمینگ لوله می پردازد. ارتعاشات التراسونیک با دقت بالا ثابت کرده برای دیگر فرایندهای شکل دهی فلزات

، با توجه به کاهش بار محوری و تنش اصطکاکی مفید بوده و انتظار می رودکه استفاده از ارتعاشات التراسونیک برای هیدروفرمینگ لوله نیز مفید باشد.

2-1 اهداف پژوهش

پژوهش حاضر به مطالعه استفاده از ارتعاشات التراسونیک به عنوان روشی برای افزایش شکل‌پذیری وبهبود شرایط روانکاری می پردازد.

اهداف کلی عبارتند از :

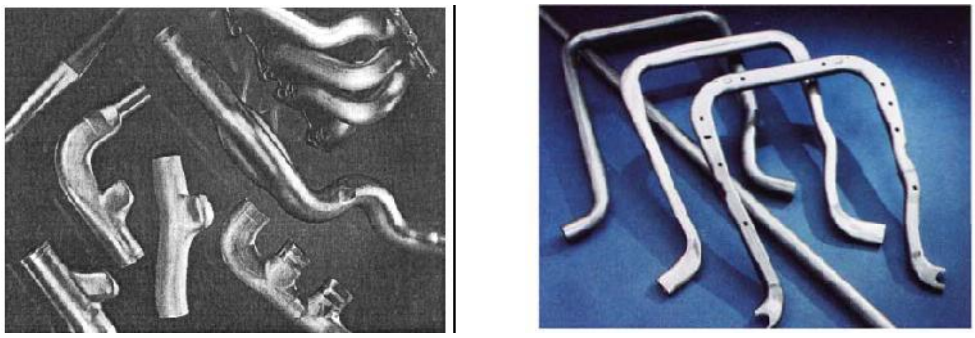
- درک مکانیک تغییر شکل درهیدروفرمینگ لوله، شکل‌پذیری و پارامترهای تأثیرگذار.
- ارائه مدل اجزاء محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله با ارتعاشات التراسونیک درنرم افزار ABAQUS 6.10 و مقایسه آن با هیدرو فرمینگ لوله کلاسیک.
- مطالعه اثر اندازه لوله در شکل‌پذیری و تأثیرارتعاشات التراسونیک در شکل‌پذیری برای اندازه های مختلف لوله.

فصل دوم:

مکانیک هیدروفرمینگ لوله کلاسیک والتراسونیک

2-1مقدمه

هیدروفرمینگ لوله فرایندی است که در آن با استفاده از فشار کنترلی وتغذیه محوری ، شکل لوله به شکل مورد نظر تغییر می‌یابد. فرایند هیدروفرمینگ لوله را می‌توان بر اساس استفاده از فشارهیدرولیکی(داخلی یا خارجی) تفکیک کرد. در یک فرایند معمولی هیدروفرمینگ ، فشار به صورت داخلی که از امولسیون آب روغن به صورت ابزار شکل‌دهی استفاده می‌شود [۱۶] و [۱۷]. ازکاربردهای هیدروفرمینگ لوله می‌توان در صنعت خودرو ، در صنایع هواپیمایی و در ساخت وسایل بهداشتی نام برد. و در صنعت خودرو می‌توان درسیستم اگزوز ، میل بادامک ، قاب رادیاتور ، و اکسل های جلو و عقب ،شاسی موتور ، میل لنگ ، شفت ، فریم صندلی ، قطعات بدنه[۱] و کاربردهای خانگی به لوله کشی اجزاء و اتصالات اشاره کرد [۸]. شکل 1-1 قطعاتی از هیدروفرمینگ لوله را نشان می دهد. برخی از مزایای استفاده از هیدروفرمینگ لوله در مقایسه با تکنولوژی قالب‌گیری معمولی عبارتند از : استحکام قطعات ، کاهش وزن ، کیفیت بالاتر ، عملیات ثانویه کمتر، کاهش تلرانس ابعادی ، کاهش ضایعات ، برگشت فنری کمتر ، وبهبود استحکام ساختاری و سختی. اما این فرایند ، معایبی هم مانند کندی فرایند، تجهیزات گران قیمت و عدم دانش کافی برای طراحی فرایند و ابزار دارد [۸].



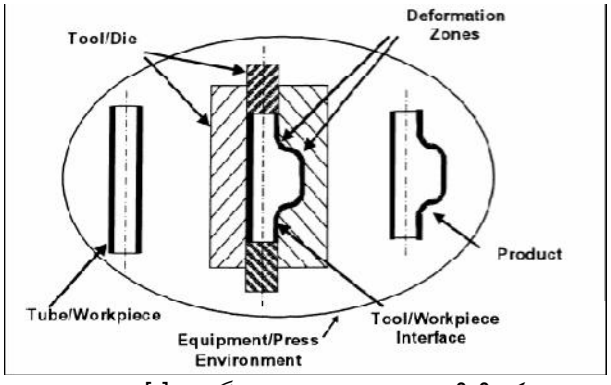
ب الف

شکل 2-1 : نمونه قطعات هیدروفرمینگ : (الف) مراحل هیدروفرمینگ سینی طبق زیر موتور
(ب) قطعاتی از سیستم یک اگزوز[۱۶]و[۱۷]

به منظور افزایش پیاده سازی این تکنولوژی در صنعت قالب ، بایستی برخی از مسائل مشخص شوند: جنس لوله ها (انتخاب جنس و کیفیت لوله های ورودی) ، قبل از طراحی پیش فرم و نحوه تولید ، استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری ، انتخاب روان کننده های موثر و افزایش عملکرد روانسازی ، و بهبود شکل‌پذیری لوله.

2-2 سیستم هیدروفرمینگ لوله

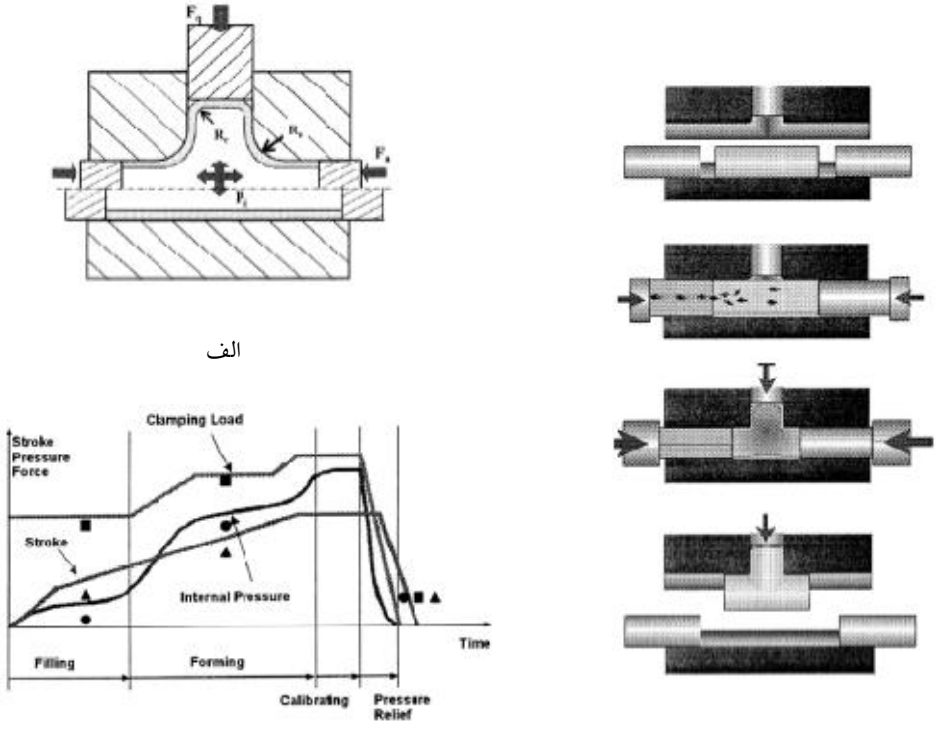
به منظور درک فرایند هیدروفرمینگ لوله، و برای پیدا کردن راه حل ها ،مسئله با تجزیه و تحلیل روی سیستم هیدروفرمینگ لوله انجام می شود. اجزاء این سیستم عبارتند از جنس ، فرایند ، ابزار و تجهیزات ، (شکل 2-2)که هر کدام از این اجزاء ازهندسه اولیه لوله و خواص ماده تا کیفیت قطعه نهایی تغییر می کنند



شکل 2-2 :اجزای سیستم هیدروفرمینگ لوله[۱]

ترتیب کلی فرایند هیدروفرمینگ لوله عبارت است از : پر شدن ، شکل گیری و کالیبراسیون.فرایند هیدروفرمینگ لوله برای به دست آوردن لوله T شکل، درشکل 2-3 و مسیر بارگذاری برای این فرایند در شکل2-3 (ب) نشان داده شده است . شکل 2-3 (ج) ترتیب عملیات را نشان می‌دهدلوله های ورودی بین قالب ها قرار گرفته وقالب ها بسته

می‌شوند و کل سیستم ایزوله می‌شود. لوله با مایع پر شده و فشار آن افزایش می‌یابد ، و لوله به ناحیه تغییر شکل فشار داده می‌شود. لوله همچنین از دو طرف قالب تغذیه می‌شود. با هدف بهبود قابلیت شکل دهی لوله به طور همزمان تغذیه محوری و فشار داخلی کنترل می‌شود . ممکن است برای شکل شعاع گوشه کوچک نیاز به فشار زیادی در انتهای فرایند تحت عنوان کالیبراسیون باشد. در طول مرحله کالیبراسیون با افزایش فشار داخلی به ماده گوشه و کنار کشیده می‌شود[۱].



الف ب ج

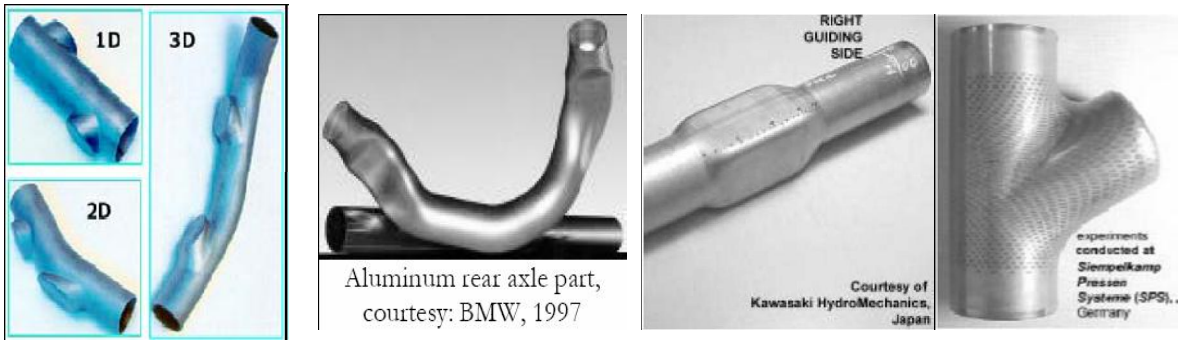
شکل 2-3 : فرایند هیدروفرمینگ برا ی لوله T شکل: (الف) نمایش شماتیک وضعیت اولیه و نهایی لوله ، (ب)مسیر بارگذاری و (ج) ترتیب فرایند[۱]

نمایش شماتیکی از سیستم فرایند هیدروفرمینگ لوله به شناسایی متغیرهای مؤثر برای یک فرایند هیدروفرمینگ لوله صحیح کمک می کند ، متغیرهای مؤثرعبارتند از :خواص جنس ، شکل‌پذیری ، کیفیت لوله های ورودی ، مسیرهای بارگذاری ،شرایط روانکاری درمرز لوله و قالب و هندسه نهایی مورد نظر (شکل وابعاد) [۱].

2-2-1طبقه بندی قطعات هیدروفرمینگ لوله

قطعات هیدروفرمینگ لوله را می توان با توجه به امتداد محور طولی ، ویژگی و موقعیت نسبت به محور طولی ، و سطح مقطع دسته بندی کرد [۲۱]. برخی از دسته بندی های مهم هندسی عبارتند از :

- بر آمدگی[1] : لوله متقارن نسبت به یک طرف شاخه انبساط می‌یابد ، مانندT شکل وY شکل (شکل 2-4 -الف).
- بالجینگ[2] : محیط مقطع لوله به صورت گرد ، مربع ، و یا شکل نامنظم افزایش می‌یابد (شکل 2-4-ب).
- خمیدگی[3] : محور مرکزی لوله خم می‌شود (شکل 2-4 (ج)).
- اسپلاین[4] : محور مرکزی لوله می‌تواند یک صفحه (یک بعدی) یا می‌تواند در دو یا سه صفحه باشد (دوبعدی ، سه بعدی) (شکل 2-4-د).



د ج ب الف

شکل 2-4 : طبقه بندی لوله ها : (الف)برآمدگی، (ب) بالجینگ، (ج) خم و (د)اسپلاین های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی[۲۱]

هیدروفرمینگ لوله همچنین می‌تواند بر اساس میزان تغذیه محوری لازم طبقه بندی شود. این طبقه بندی شامل فرایند هیدروفرمینگ لوله بدون تغذیه محوری (انبساط تنها تحت فشار داخلی) ، تغذیه کم ، تغذیه به طور متوسط و تغذیه زیاد. شرایط تنش و کرنش برای هر گروه متفاوت است. به طور کلی برای دو گروه اول از آنجایی که تغییر شکل شعاعی بیشتراست ، می‌توان از شرایط کرنش صفحه ای یا تنش صفحه ای استفاده کرد . بالجینگ آزاد یک استثنا است که در آن تغییر شکل تحت شرایط تنش صفحه ای است. برای دو گروه آخر حالت تنش سه بعدی است. ویژگی های مختلف هندسی قطعات به گروه خاصی تعلق دارد. به عنوان مثال برای قطعه T شکل با اسپلاین ، یک بعدی به منظور به دست آوردن ارتفاع مورد نیاز برآمدگی تغذیه محوری لازم است.

اما قطعه شاسی موتور خم های سه بعدی بسیاری دارد و به همین دلیل نمی‌توان از تغذیه محوری استفاده کرد. تغییر شکل با کمی تغذیه محوری درانتهاها صورت می‌گیرد.

[1] protrusion
[2] bulging
[3] bending
[4] spline

2-2-2 پارامترهای فرایند هیدروفرمینگ لوله

2-2-2-الف جنس لوله

متغیرهای معرفی شده توسط جنس لوله عبارتند از :

- خواص ماده : ترکیب شیمیایی ، تنش تسلیم ، استحکام کششی نهایی ،درصد ازدیاد طول و ویژگی های جریان.
- ابعاد :قطر لوله و ضخامت دیواره لوله.
- کیفیت لوله های ورودی و روش تهیه لوله ، که می‌تواند جوش شده یا بدون جوش باشد.

تمامی این متغیر ها برای انجام صحیح فرایند هیدروفرمینگ لوله ضروری هستند و باید بر اساس نیازهای قطعه نهایی و بازبینی دقیق در جریان فرایند تولید مشخص شوند [۵] . هنگام ساخت ، خمش و پیش فرم لوله قبل از آن که لوله وارد فرایند هیدروفرمینگ شود، خواص ماده و شکل‌پذیری تغییر خواهد کرد و برخی ازخواص شکل‌پذیری تغییر پیدا می‌کند. در صنعت چندین آزمایش برای تعیین خواص ماده وجود دارد. آزمایشی که به طور گسترده استفاده می‌شود آزمایش کشش بر روی نمونه های تخت گرفته شده از ورق حلقوی قبل ازتبدیل به لوله است. اما اطلاعات به دست آمده به دلیل افزایش تغییر شکل پلاستیک در لوله درخلال تولید لوله کاملاًدرست نیستند.

همچنین در طول فرایند هیدروفرمینگ لوله، لوله در معرض وضعیت تنش دومحوری قرار می‌گیرد که با وضعیت به نمایش گذاشته از تنش در آزمایش کشش متفاوت است (کشش یک طرفه). در مجموع ، تنش جریان نمونه لوله به احتمال زیاد با نمونه ورق که لوله از آن ساخته شده تفاوت دارد.خواص لوله بایددرست قبل از انجام هیدروفرمینگ تعیین شود.برای پرداختن به این موضوع برخی از محققان آزمایش های مختلفی برای تعیین خواص ماده پیشنهاد کردند. آزمایش هایی که معمولا استفاده می‌شوندعبارتند از: آزمایش مخروط و آزمایش بالجینگ.

در سال 2000 تأثیر پارامترهای مختلف بر شکل‌پذیری بررسی مطالعه شد. پارامترهایی که مطالعه شد شامل پارامتر ناهمسانگردی (r) ، ضریب کرنش سختی(n) ، ضخامت اولیه و طول لوله بود[۱۷].

درمطالعه دریافتند که nوr تاثیر زیادی در شکل انبساط آزاد لوله و توزیع کرنش دارد و برای مقادیر بزرگتر nوr منجر به توزیع یکنواخت کرنش خواهد شد و به تغییر شکل های بزرگترمی انجامد.

2-2-2-ب مسیر بارگذاری

شکل‌پذیری تنها متأثر از جنس لوله نیست بلکه تابع مسیر بارگذاری و اندازه لوله نیز می‌باشد. مسیر بارگذاری نامناسب منجر به شکست می‌شود. حالت های متداول شکست در هیدروفرمینگ لوله عبارتند از : ترکیدن به علت نازکی روی دیواره لوله که منجر به شکستگی می‌شود و چروک که به دلیل کمانش موضعی است.میزان تغذیه محوری باید با فشار داخلی شود متناسب باشد اگر فشار داخلی سریع اعمال شود و تغذیه محوری به آرامی ، ترک به

وجود می‌آید ولوله خواهد شکست چرا که ماده به اندازه کافی برای جریان به فضاهای خالی قالب وجود ندارد حال اگرفشار داخلی به آرامی اعمال می‌شود و تغذیه محوری به سرعت ، کمانش یا چروک به وجود می‌آید[۷] .

تعیین مسیر بهینه بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه محوری) بسیار دشوار و از طریق آزمایش گران قیمت است.بنابراین از تحلیل اجزای محدود به منظور بررسی و بهینه سازی و طراحی اولیه قبل از ساخت قالب استفاده می‌شود. مسیر بارگذاری برای لوله T شکل به وسیله شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفت[۲]. هدف از این شبیه‌سازی بررسی اثر تغذیه محوری بر تغییرات ضخامت و فشار داخلی بود.محققین نشان دادند که فرایند شکل دهی به تغذیه محوری بسیار حساس است. نتایج نشان داد نازکی دیواره لوله زمانی که تغذیه محوری افزایش یابد، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش در تغذیه محوری ، برای اینکه قطعه به شکل نهایی خود برسد فشار داخلی ماکزیمم نیز باید افزایش یابد و فشار بیشتری برای غلبه بر چروکیدگی به دلیل تغذیه محوری مورد نیاز است.مسیربارگذاری برای لوله T شکل نیز مورد مطالعه قرار گرفت.

در سال 2004 فرایند هیدروفرمینگ لوله اشکال Y را مورد مطالعه قرار داده شد. مطالعه با معادلات ساده شکل دهی فلزات برای برآورد اولیه پارامترهای فرایند شروع شد. سپس این پارامترها با استفاده از تحلیل اجزای محدود تصحیح شدند. در نهایت آزمایشاتی به منظور بررسی مسیر بار و بررسی اثر طول لوله درآزمایش برآمدگی انجام شد. با این حال ، نتایج حاصل از شبیه‌سازی تا حد زیادی به داده های ورودی مانند تنش جریان، جنس لوله و ضریب اصطکاک در سطح قالب بستگی داشت [۲۲].

2-2-2-ج هندسه و ابعاد لوله

فرایندهای هیدروفرمینگ لوله برای تولید قطعات با سطح مقطع مختلف:مستطیلی ، ذوزنقه یا چندضلعی به ویژه در شکل دهی گوشه های محدب مورد استفاده قرار می گیرند. اگر گوشه ها از طریق بالجینگ تحت فشار داخلی برای یک ضخامت مشخص لوله شکل دهی شوند ، فشار مورد نیاز تقریبا با شعاع گوشه به طور معکوس متناسب است. همچنین نازکی درناحیه انتقال بین گوشه و ناحیه صاف سطح از دیگر نواحی سطح بیشتر است. هنگامی که قطعه تحت بارگذاری قرار می‌گیرد تمرکز تنش در ناحیه ی با حداکثر نازکی رخ می دهد [۲], [۱۲].

تغییر شکل در گوشه با استفاده از روش اجزای محدود به منظور شبیه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ لوله برای شعاع های مختلف گوشه مورد مطالعه قرار گرفت[۱۲]. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اصطکاک بین لوله وقالب مانع از جریان فلز به گوشه ها می شود. بنابراین بهبود شرایط روانکاری منجر به تغییر شکل یکنواخت خواهد شد. همچنین متوجه شدند که در شعاع گوشه کوچکتر، نازکی در قطعه در ناحیه انتقال آسان تر رخ می دهد. تغییرات ضخامت و پر شدن گوشه‌ها در هیدروفرمینگ لوله نیز مورد بررسی قرار گرفت که در آن اثر خواص ماده و هندسه قالب در انتخاب

پارامترهای فرایند هیدروفرمینگ مورد مطالعه قرار گرفتند[۱۱] . همچنین اثر توان کرنش سختی و شعاع گوشه قالب توزیع ضخامت در روی قطعه هیدروفرم شده بررسی گردید.

در سال 2003شبیه‌سازی اجزاء محدود و آزمایشات لازم انجام گردید و همان‌طور که انتظار می رفت برای مقادیر کمتر توان کرنش سختی مقادیر بزرگتری در تغییر توزیع ضخامت به دست آمد. پارامتر دیگری که در فرایند هیدروفرمینگ لوله تاثیرگذاراست، اندازه لوله (قطر) است.در سال 2005 اثر قطر لوله روی شکل‌پذیری برای یک قطعه ریلی در وسیله نقلیه ، (مقطع مشابه با شکل 'H' کشیده) مورد بررسی قرار داده شد[۹]. در مطالعه چهار نوع مسیر بار مورد استفاده قرار گرفت. با کمی تغییر قطر تنها در حدود 10درصد (90 - 100 میلی متر) ، شبیه‌سازی کاهش حدود یک سوم در نرخ نازکی را نشان داد. و توزیع ضخامت یکنواخت تری به ازای هر کدام از مسیرها به دست آمد. به طور کلی نتایج حاصل از تمام مطالعات نشان می دهد که جنس متفاوت لوله ، ضخامت ، قطر و شعاع گوشه قالب نیاز به شرایط متفاوت بارگذاری دارد و اثر متفاوتی در ضخامت دیواره لوله تحت فرایندهای هیدروفرمینگ دارد.

2-2-2-د جنبه های روانکاری در هیدروفرمینگ لوله

اصطکاک تأثیر قابل توجهی در فرایندهای هیدروفرمینگ لوله دارد. تماس فشار بالا و سطوح در تماس بزرگ باعث ایجاد نیروهای اصطکاک بالا بین لوله و قالب خواهد شد. این نیروها نه تنها روی پارامترهای فرایند بلکه روی کیفیت اجزاء ، مانند توزیع ضخامت دیواره اثر می گذارند. بنابراین بررسی کاهش اصطکاک و تاثیر منفی آن در هیدروفرمینگ لوله ضروری به نظر می رسد. [۱۶] و [۲۸].در سال 2002 شرایط اصطکاکی مورد مطالعه قرار گرفت [۲۳]. نتیجه گیری حاصل این بود که به دلیل فرایند تغییر شکل پیچیده ،میکروساختار سطح به طور پیوسته تغییر خواهد کرد و در نتیجه شرایط اصطکاکی نیز تغییر خواهدکرد. پارامترهای اصلی موثر بر اصطکاک در هیدروفرمینگ لوله روان کننده ، جنس لوله (مقاومت تسلیم) ، بافت سطح و کیفیت سطح قالب، سختی روکش قالب و پوشش سطح قالب هستند. روان کننده بین سطح زبروخشن لوله وقالب به دام افتاده و امکان روغنکاری بهتری را فراهم می کندکه به فشار داخلی نیز بستگی دارد. به عبارت دیگرافزایش فشار منجر به افزایش در سطح تماس در مرز لوله و قالب می شودو ممکن است شرایط چسبیدگی رخ دهد.

شکل 2-5 هیدروفرمینگ لوله برای لوله T شکل نشان می‌دهد. از نقطه نظر اصطکاک سه ناحیه مختلف قابل تعریف اند: هدایت[1] ، انتقال[2] و ناحیه انبساط[3] با توجه به اختلاف در جریان ماده و وضعیت تنش هر کدام از سه ناحیه

[1] guided
[2] Transition
[3] expantion