

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

عنوان:

شبیه سازی اجزای محدود و مطالعه تجربی تاثیر شعاع های ناحیه مخروطی، بر نسبت کشش و توزیع ضخامت هیدروفرمینگ قطعات مخروطی

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

استاد راهنما:

دکتر محمد بخشی جویباری

اساتید مشاور:

دکتر عبدالحمید گرجی

مهندس قربان محمد علی نژاد

نگارش:

مهدی مشهدی

بهمن ۹۰

تقدیر و تشکر

خداوند مهربان را شاکرم که مرا نیرو بخشید تا نگارش پایان نامه پیش رو را به اتمام برسانم. قبل از هر چیز بر خود لازم می دانم از تمامی سرورانی که در طول انجام پایان نامه حاضر به نحوی مرا یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم. این امر بر آنان حق و بر من وظیفه بوده است. اینجانب بر خود می بالم که در محضر اساتید محترم گروه ساخت و تولید دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل حضور داشته و از آنان بهره علمی برده‌ام.

از استاد بردبارم، جناب آقای دکتر محمد بخشی، که تمام روزهایی که تحت نظارت ایشان مشغول به کار بودم سرشار از آموختن توامان علم و اخلاق بود، نهایت تشکر را دارم. در پرتو روحیه پر از امید ایشان بود که تمام دلسردی‌ها رنگ می باخت و در سایه وجود خستگی ناپذیرشان، پرسش‌های گاه و بی‌گاهم پاسخ می‌یافت.

از آقایان دکتر عبدالحمید گرجی و مهندس قربان محمد علی نژاد، اساتید مشاور اینجانب، که در تمامی مراحل پژوهش حاضر یاریگرم بودند و از تجارب ارزنده شان مرا بهره مند ساختند، بسیار سپاسگزارم.

از مسئولین محترم کارگاه ماشین افزار دانشگاه مهندس جمشید صادقی و مهندس میانسری که علاوه بر کمک‌های بی دریغشان در زمینه کارگاهی، همواره دلسوزانه مرا از راهنمایی‌ها و تجارب خود بهره مند ساختند کمال تشکر و قدردانی را دارم. از تمامی دوستانی که در دوران تحصیل مرا یار و همراه و مشوق بوده اند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از خانواده عزیزم خصوصاً مادر مهربان و فداکارم، که از کودکی، شور دانستن و لذت کشف و جستجو را در من بیدار کردند، استقامت در تلاش را به من آموختند و در تمام این سال‌ها با فراهم کردن آرامش فکری و آسایش روحی، دشواری‌ها را بر من آسان نمودند، با تمام وجود قدردانم. در پایان برای پدر مرحومم، علو درجات را از درگاه خداوند منان خواهانم.

مهدی مشهدی

بهمن ۱۳۹۰

تقدیم به مادرہ و روح پدر بزرگوارہ،

بی ہمتا کسانے کہ بہ آنان عشق میورزہ

چکیده

کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، توانایی بالایی در تولید قطعات با هندسه‌های پله دار و با نسبت کشش حدی بالا، در یک مرحله، از خود نشان داده است. به دلیل اینکه در این فرایند، عامل شکل دهی، سیال پرفشار، مانند آب یا روغن می‌باشد، مزایایی حاصل می‌شود، مانند: توانایی ایجاد شکل‌های پیچیده روی ورق اولیه بر طبق شکل سنبه، افزایش نیروی اصطکاک بین سنبه و ورق و بنابراین امکان انتقال نیروهای بزرگتر در منطقه شکل‌دهی، توانایی اعمال فشار شعاعی در اطراف لبه خارجی ورق و روانکاری ناحیه تماس ورق و قالب در ناحیه فلنج و بنابراین حذف تماس فلز با فلز که منجر به کاهش اصطکاک و تنش‌های شعاعی شده که نهایتاً از پارگی زود هنگام ورق، جلوگیری می‌کند. این فرایند منجر به: نسبت کشش بالا، کیفیت سطح بالا، دقت ابعادی بالا و توانایی تولید قطعات با شکل‌های پیچیده، می‌شود. این فرایند از پارامترهای زیادی تاثیر می‌پذیرد. مهم‌ترین این پارامترها، فشار سیال داخل محفظه قالب یا مسیر فشار و پارامترهای سنبه هستند که باید به دقت، کنترل شوند.

در این تحقیق، تاثیر شعاع‌های ناحیه مخروطی، روی نسبت کشش و توزیع ضخامت قطعات مخروطی در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، با دو رویکرد کار آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم افزار ABAQUS 6.9، مورد بررسی، قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که شعاع راس سنبه بسیار موثرتر از شعاع گذر می‌باشد. به طوری که با افزایش شعاع راس سنبه، کمینه ضخامت، افزایش می‌یابد و توزیع ضخامت، یکنواخت‌تر می‌شود. به علاوه با افزایش شعاع راس سنبه، نسبت کشش می‌تواند به مقدار قابل توجهی افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: کشش عمیق هیدرودینامیکی، نسبت کشش حدی، قطعات مخروطی، شبیه‌سازی اجزای

محدود

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ فرایندهای تولید و انواع آن	۲
۳-۱ فرایندهای شکل دهی فلزات	۳
۴-۱ معرفی و دسته بندی فرایند هیدروفرمینگ	۴
۱-۴-۱ هیدروفرمینگ لوله	۶
۲-۴-۱ هیدروفرمینگ ورق	۹
۵-۱ معرفی روش های مرسوم هیدروفرمینگ ورق	۱۱
۱-۵-۱ هیدروفرمینگ استاندارد	۱۱
۲-۵-۱ کشش عمیق هیدرومکانیکی	۱۲
۳-۵-۱ کشش عمیق هیدرودینامیکی (آکوادرا)	۱۳
۴-۵-۱ هیدروریم	۱۴
۵-۵-۱ کشش عمیق هیدرودینامیکی به کمک فشار شعاعی	۱۵
۶-۱ مروری بر پژوهش های انجام شده در زمینه تولید قطعات ورقی مخروطی	۱۶
۷-۱ اهداف پژوهش	۳۲
فصل دوم: مراحل آزمایشگاهی	۳۳
۱-۲ مقدمه	۳۴
۲-۲ آنالیز ترکیب شیمیایی و آزمایش کشش	۳۴
۳-۲ معرفی قطعات مخروطی مورد تحقیق	۳۶
۴-۲ معرفی دستگاه و تجهیزات	۳۷
۱-۴-۲ دستگاه آزمایش	۳۷
۲-۴-۲ سیستم تولید فشار	۳۸
۳-۴-۲ سیال هیدرولیکی	۳۸
۵-۲ نوع فرآیند هیدروفرمینگ	۳۹
۶-۲ وسایل اندازه گیری	۴۱
۷-۲ مراحل انجام آزمایش در قالب هیدرودینامیکی با فشار شعاعی	۴۳
۸-۲ روش اندازه گیری نسبت کشش قطعات مخروطی	۴۴

۴۵	..... فصل سوم: شبیه سازی اجزای محدود
۴۶	..... ۱-۳ مقدمه
۴۸	..... ۲-۳ معرفی نرم افزار شبیه سازی
۴۸	..... ABAQUS/Standard ۱-۲-۳
۴۹	..... ABAQUS/Explicit ۲-۲-۳
۴۹	..... ABAQUS/CAE ۳-۲-۳
۵۰	..... ۳-۳ مراحل شبیه سازی
۵۰	..... ۱-۳-۳ ایجاد مدل هندسی
۵۱	..... ۲-۳-۳ خصوصیات ماده (ورق)
۵۳	..... ۳-۳-۳ مونتاژ قطعات
۵۴	..... ۴-۳-۳ مراحل شکل دهی
۵۴	..... ۵-۳-۳ تعیین تماس بین سطوح
۵۵	..... ۶-۳-۳ شرایط مرزی و بارگذاری
۵۶	..... ۷-۳-۳ المان بندی
۵۷	..... ۸-۳-۳ تحلیل فرآیند
۵۹	..... فصل چهارم: نتایج و بحث
۶۰	..... ۱-۴ مقدمه
۶۰	..... ۲-۴ بررسی تاثیر تغییرات شعاع های ناحیه مخروطی بر توزیع ضخامت
۷۱	..... ۳-۴ بررسی تاثیر تغییرات شعاع های ناحیه مخروطی بر نسبت کشش
۷۹	..... فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۰	..... ۱-۵ نتیجه گیری
۸۱	..... ۲-۵ پیشنهادات
۸۲	..... مراجع
۸۷	..... پیوست

فهرست اشکال

عنوان

صفحه

- شکل (۱-۱) تقسیم‌بندی کلی روش‌های شکل‌دهی با استفاده از ابزار نرم [۴] ۵
- شکل (۲-۱) شماتیک هیدروفرمینگ لوله [۶] ۷
- شکل (۳-۱) نمونه‌هایی از قطعات تولید شده با استفاده از هیدروفرمینگ لوله [۶، ۸، ۹] ۸
- شکل (۴-۱) حالت‌های مختلف استفاده از سیال در فرآیند هیدروفرمینگ ورق (الف) به عنوان سنبه (ب) درون محفظه فشار ۹
- شکل (۵-۱) نمونه‌ای از قطعات تولید شده با استفاده از روش هیدروفرمینگ ورق [۱۱] ۱۰
- شکل (۶-۱) شماتیک مراحل مختلف هیدروفرمینگ استاندارد [۱۲] ۱۱
- شکل (۷-۱) شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی (۱) سیال تحت فشار (۲) محفظه فشار (۳) خروجی به شیر اطمینان (۴) ورودی سیال (۵) قالب ماده (۶) ورق پیش‌بالج شده بر اثر فشار اولیه (۷) آب‌بند (۸) ورق‌گیر (۹) سنبه [۱۵] ۱۲
- شکل (۸-۱) شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی (آکوادرا) [۱۳] ۱۳
- شکل (۹-۱) شماتیک فرآیند هیدرووریم [۱۶] ۱۴
- شکل (۱۰-۱) شماتیک کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۱۷] ۱۶
- شکل (۱۱-۱) شماتیک شکل‌دهی قطعه مخروطی در قالب کشش عمیق سنتی [۱۸] ۱۷
- شکل (۱۲-۱) شماتیک روش ورق‌گیر اصطکاکی برای کشش فنجان‌های مخروطی با استفاده از یک لایه اورتان حلقوی [۲۲] ۱۸
- شکل (۱۳-۱) مراحل کشش فنجان مخروطی با استفاده از یک لایه اورتان حلقوی [۲۲] ۱۸
- شکل (۱۴-۱) فنجان مخروطی شکل داده شده در قالب با لایه اورتان حلقوی [۲۲] ۱۹
- شکل (۱۵-۱) کرنش محیطی فنجان مسی، مربوط به لایه اورتان با سختی متفاوت [۲۲] ۱۹
- شکل (۱۶-۱) کرنش ضخامتی فنجان مسی، مربوط به لایه اورتان با سختی متفاوت [۲۲] ۲۰
- شکل (۱۷-۱) هندسه دو سنبه مورد استفاده [۲۳] ۲۱
- شکل (۱۸-۱) چروک‌های قطعه مخروطی در فرآیند کشش عمیق معمولی [۲۳] ۲۱
- شکل (۱۹-۱) المان‌بندی اولیه ورق و شکل نهایی فنجان‌های مخروطی حاصل از نتایج شبیه‌سازی-توسط نرم‌افزار ABAQUS و ITAS3D مربوط به ورق فولادی، قطر اولیه ورق ۱۷۰ mm و - کورس سنبه ۵۴/۱ mm [۲۳] ۲۲
- شکل (۲۰-۱) قطعه شکل داده شده توسط کالیبراسیون با ابزاربندی یکسان [۲۴] ۲۳
- شکل (۲۱-۱) قطعه مورد بررسی در کالیبراسیون با تغییر ابزاربندی، (الف) قطعه مجازی، (ب) هندسه [۲۴] ۲۳
- شکل (۲۲-۱) ابعاد هندسی سنبه شکل‌دهی [۲۵] ۲۴

- شکل (۱-۲۳) یک نمونه از شبیه‌سازی قطعه با هندسه مخروطی - استوانه‌ای [۲۵]..... ۲۵
- شکل (۱-۲۴) تغییرات ضخامت فنجان حاصل از نتایج شبیه‌سازی و تجربی فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی [۲۵]..... ۲۵
- شکل (۱-۲۵) قطعه شکل داده شده برای مسیر فشار نهایی ۳۰ MPa، الف- تجربی، ب- شبیه‌سازی [۲۶]..... ۲۶
- شکل (۱-۲۶) منحنی توزیع ضخامت قطعه مخروطی برای مسیر فشار نهایی ۳۰ MPa [۲۶]..... ۲۷
- شکل (۱-۲۷) ابعاد پارامتریک قطعات شکل داده شده [۲۷]..... ۲۷
- شکل (۱-۲۸) سه نمونه از هندسه های مورد بررسی [۲۸]..... ۲۹
- شکل (۱-۲۹) ابعاد و هندسه سنبه مخروطی [۲۹]..... ۳۱
- شکل (۱-۳۰) منحنی مبنا و مقدار کشش به داخل فلنج برای دو قطعه مخروطی با زوایای مخروطی متفاوت [۲۹]..... ۳۲
- شکل (۲-۱) نقشه مهندسی نمونه آزمون کشش ۳۵
- شکل (۲-۲) نمونه‌های استاندارد کشیده شده در سه راستای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد..... ۳۵
- شکل (۲-۳) منحنی تنش - کرنش حقیقی ورق مورد استفاده در راستای نورد (°)..... ۳۶
- شکل (۲-۴) نقشه قطعات مورد بررسی، ابعاد به میلی‌متر ۳۷
- شکل (۲-۵) دستگاه آزمایش اونیورسال (DMG) ۳۷
- شکل (۲-۶) واحد هیدرولیکی تأمین فشار پیش‌بالم ۳۸
- شکل (۲-۷) شماتیک قالب کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۲۷]..... ۳۹
- شکل (۲-۸) (الف) اجزای قالب، (ب) مجموعه قالب در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش ۴۰
- شکل (۲-۹) اجزای سیستم تأمین فشار هیدرولیکی ۴۱
- شکل (۲-۱۰) دستگاه ضخامت سنج *Krœplin* ۴۲
- شکل (۲-۱۱) شماتیک اجزای قالب مورد استفاده در این پژوهش، ابعاد به میلی‌متر ۴۲
- شکل (۲-۱۲) منحنی نوعی مسیر فشار به کار رفته در این پژوهش ۴۳
- شکل (۳-۱) هندسه اجزای قالب و گرده در شبیه‌سازی ۵۱
- شکل (۳-۲) مونتاژ اجزای قالب و ورق در شبیه‌سازی ۵۳
- شکل (۳-۳) شرایط مرزی فشار، P_S فشار محفظه، P_R فشار در ناحیه فلنج ورق [۳۹]..... ۵۵
- شکل (۳-۴) شرط مرزی فشار و قید اعمالی بر ورق، الف- مدل ورق در شبیه‌سازی، ب- شماتیک ورق - در مجموعه قالب ۵۶
- شکل (۳-۵) المان بندی ورق اولیه و اجزای قالب ۵۷
- شکل (۴-۱) مسیر فشار استفاده شده در شبیه‌سازی ۶۱
- شکل (۴-۲) مقطع برش خورده قطعه مخروطی جهت اندازه‌گیری ضخامت ۶۱
- شکل (۴-۳) ناحیه‌های مختلف مورد مطالعه در قطعه مخروطی ۶۲

- شکل (۴-۴) قطعه با $\alpha=22/5^\circ$ ، $R_1 = 8 \text{ mm}$ و $R_2 = 1$ (الف) نمونه آزمایشگاهی (تجربی) ،
- ۶۳..... (ب) نمونه شبیه‌سازی
- شکل (۵-۴) توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی، $\alpha=22/5^\circ$ ، $R_1 = 8 \text{ mm}$ و $R_2 = 1$ ۶۳
- شکل (۶-۴) منحنی توزیع ضخامت قطعه، حاصل از شبیه‌سازی بر حسب R_1 به میلی‌متر،
 $\alpha=22/5^\circ$ و $R_2 = 1 \text{ mm}$ ۶۴
- شکل (۷-۴) یک نمونه شبیه‌سازی برای $\alpha=22/5^\circ$ و $R_1 = 3/7 \text{ mm}$ ۶۴
- شکل (۸-۴) منحنی توزیع ضخامت قطعه، حاصل از شبیه‌سازی بر حسب R_2 به میلی‌متر،
 $\alpha=22/5^\circ$ و $R_1 = 4 \text{ mm}$ ۶۵
- شکل (۹-۴) قطعه با $\alpha=30^\circ$ ، $R_1 = 4 \text{ mm}$ و $R_2 = 20$ (الف) نمونه آزمایشگاهی (تجربی) ،
- ۶۶..... (ب) نمونه شبیه‌سازی
- شکل (۱۰-۴) توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی، $\alpha=30^\circ$ ، $R_1 = 4 \text{ mm}$ و $R_2 = 20$ ۶۶
- شکل (۱۱-۴) منحنی توزیع ضخامت قطعه، حاصل از شبیه‌سازی بر حسب R_1 به میلی‌متر،
 $\alpha=30^\circ$ و $R_2 = 4 \text{ mm}$ ۶۷
- شکل (۱۲-۴) منحنی توزیع ضخامت قطعه، حاصل از شبیه‌سازی بر حسب R_2 به میلی‌متر،
 $\alpha=30^\circ$ و $R_1 = 4 \text{ mm}$ ۶۷
- شکل (۱۳-۴) قطعه با $\alpha=37/5^\circ$ ، $R_1 = 6 \text{ mm}$ و $R_2 = 3$ (الف) نمونه آزمایشگاهی (تجربی) ،
- ۶۸..... (ب) نمونه شبیه‌سازی
- شکل (۱۴-۴) توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی، $\alpha=37/5^\circ$ ، $R_1 = 6 \text{ mm}$ و $R_2 = 3$ ۶۸
- شکل (۱۵-۴) منحنی توزیع ضخامت قطعه، حاصل از شبیه‌سازی بر حسب R_1 به میلی‌متر،
 $\alpha=37/5^\circ$ و $R_2 = 3 \text{ mm}$ ۶۹
- شکل (۱۶-۴) منحنی توزیع ضخامت قطعه، حاصل از شبیه‌سازی بر حسب R_2 به میلی‌متر،
 $\alpha=37/5^\circ$ و $R_1 = 4 \text{ mm}$ ۶۹
- شکل (۱۷-۴) رابطه بین زاویه مخروط و کوچک‌ترین مقدار ممکن R_1 برای مسیر فشار
- شکل (۱-۴) و نسبت کشش $3/93$ ۷۱
- شکل (۱۸-۴) رابطه بین نسبت کشش حداکثر و R_1 ، برای $\alpha=22/5^\circ$ ۷۲
- شکل (۱۹-۴) رابطه بین نسبت کشش حداکثر و R_1 ، برای $\alpha=30^\circ$ ۷۲
- شکل (۲۰-۴) رابطه بین نسبت کشش حداکثر و R_1 ، برای $\alpha=37/5^\circ$ ۷۳
- شکل (۲۱-۴) پدیده گلوبی شدن در دیواره استوانه‌ای برای نسبت کشش $5/15$ و $\alpha=22/5^\circ$ ۷۴
- شکل (۲۲-۴) تغییرات کمینه BC در مسیر فشار بر حسب شعاع راس سنبه ، $\alpha=22/5^\circ$ ۷۵
- شکل (۲۳-۴) تغییرات کمینه BC در مسیر فشار بر حسب شعاع راس سنبه ، $\alpha=30^\circ$ ۷۵

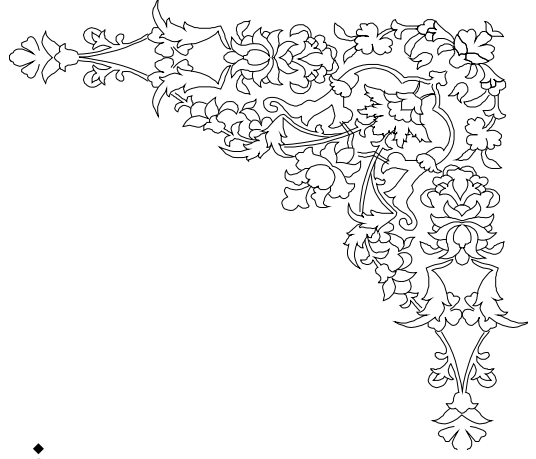
- شکل (۴-۲۴) تغییرات کمینه BC در مسیر فشار بر حسب شعاع راس سنبه ، $\alpha=37/5^\circ$ ۷۶
- شکل (۴-۲۵) پدیده چروکیدگی ، $\alpha=30^\circ$ ، $R_1=3/85 \text{ mm}$ و برای بیشینه فشار شکل دهی (BC) ۷۷
- برابر ۱۴ MPa ۷۷
- شکل (۴-۲۶) رابطه بین زاویه مخروط و کوچکترین شعاع راس سنبه برای بیشینه فشار شکل- ۷۸
- دهی (BC) ، ۵۰ MPa ۷۸
- شکل (۴-۲۷) رابطه بین زاویه مخروط و کوچکترین شعاع راس سنبه برای بیشینه فشار شکل- ۷۸
- دهی (BC) ، ۱۵ MPa ۷۸

فهرست جداول

عنوان

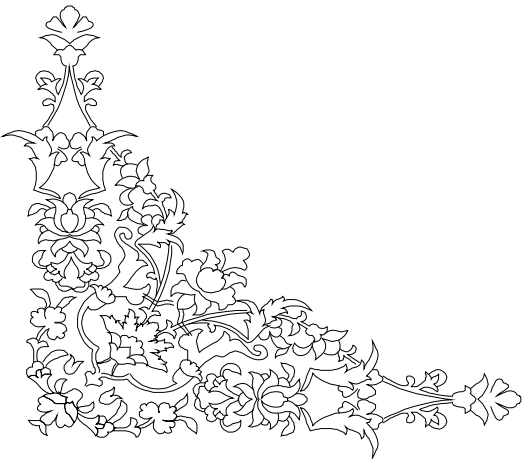
صفحه

جدول (۱-۱) اندازه‌های مربوط به ابعاد پارامتریک قطعات شکل (۱-۲۷)، ابعاد به میلی‌متر.....	۲۸
جدول (۱-۲) ترکیب شیمیایی ورق فولادی St۱۴	۳۴
جدول (۲-۲) مشخصات فیزیکی و مکانیکی ورق فولادی St۱۴.....	۳۶
جدول (۳-۲) مشخصات روغن SAE 20 W50	۳۸



فصل اول

کلیات



۱-۱ مقدمه

علم شکل‌دهی، علمی است که اصول و روش‌های تغییرشکل جامد شکل‌پذیر، در نتیجه اعمال نیرو به آن را بررسی می‌کند. امروزه در زمینه تکنولوژی تولید و شکل‌دهی، مانند سایر زمینه‌ها با استفاده از جمع‌آوری تحقیقات علمی و تجربه‌های عملی به دست آمده در مراکز پژوهشی و همچنین مراکز صنعتی، به ویژه در کشورهای صنعتی، پیشرفت‌هایی حاصل شده که همگی موجبات افزایش کیفیت و کمیت محصولات را فراهم آورده است [۱].

۱-۲ فرآیندهای تولید و انواع آن

فرآیندهای تولید قطعات فلزی را می‌توان به پنج دسته کلی زیر تقسیم‌بندی نمود [۲]:

۱- ریخته‌گری: مانند ریخته‌گری در قالب دائم، ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای و ریخته‌گری تحت فشار

۲- شکل‌دهی فلزات: مانند نوردکاری، آهن‌گری، حدیده‌کاری، کشش، خم‌کاری و متالورژی پودر

۳- ماشین‌کاری: مانند تراش‌کاری، سوراخ‌کاری، فرز‌کاری، صفحه‌تراشی و سنگ‌زنی

۴- فرآیندهای اتصالی: مانند جوش‌کاری، لحیم‌کاری و اتصال دادن مکانیکی

۵- عملیات نهایی: مانند پرداخت‌کاری نهایی، پوشش‌دهی و عملیات حرارتی

عواملی که در انتخاب نوع فرآیند تولید یک قطعه تاثیر می‌گذارند، عبارتند از:

الف) شکل قطعه

ب) نوع ماده و خصوصیات مکانیکی آن

ج) دقت ابعادی و صافی سطح مورد نظر

د) ملاحظات اقتصادی

۳-۱ فرآیندهای شکل‌دهی فلزات

در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، در اثر ایجاد تغییرشکل مومسان، توسط ابزار یا قالب در یک قطعه خام که معمولاً دارای شکل ساده‌ای است، یک قطعه با هندسه معمولاً پیچیده تولید می‌شود. در این فرآیندها در جرم یا ترکیبات فلز، تغییر قابل ملاحظه‌ای ایجاد نمی‌شود [۳].

فرآیندهای شکل‌دهی فلزات دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند. برخی از مزایای این فرآیندها عبارتند از [۳]:

۱- قطعات تولید شده دارای خصوصیات مکانیکی خوبی هستند.

۲- قابلیت تولید بالا و کوتاه بودن زمان تولید

۳- دقت ابعادی بالا

برخی از محدودیت‌های فرآیندهای شکل‌دهی فلزات عبارتند از [۳]:

۱- نیرو و تنش مورد نیاز برای ایجاد تغییرشکل معمولاً بسیار زیاد است. مقدار آن به نوع فرآیند، جنس قطعه کار و میزان تغییرشکل بستگی دارد.

۲- به دلیل اینکه مقدار نیروی مورد نیاز زیاد است، ابزارها و ماشین‌آلات آن عمدتاً بزرگ، سنگین و گران‌قیمت هستند.

۳- به دلیل هزینه بالای ماشین‌آلات و ابزار مورد نیاز، برای داشتن توجیه اقتصادی، تعداد قطعات تولیدی معمولاً باید زیاد باشد.

فرآیندهای شکل‌دهی فلزات را می‌توان از دیدگاه‌های مختلف دسته‌بندی نمود. از دیدگاه نوع ماده مصرفی، این فرآیندها به دو گروه کلی زیر، تقسیم می‌شوند:

الف) شکل دهی ورقی

مبنای فرآیند شکل دهی ورقی، ایجاد تغییر شکل مومسان مورد نظر در ورق مسطح، جهت تولید یک قطعه مهندسی، با شکل خاص می باشد. این تغییر شکل مومسان در اثر اعمال نیروی خارجی در ورق فلزی ایجاد می شود و مبنای آن معمولاً کشش یا خمش می باشد [۳].

ب) شکل دهی حجمی

در شکل دهی حجمی، معمولاً حجم وسیعی از ماده، تغییر شکل می یابد و نیروی وارده عمدتاً به صورت فشاری می باشد. این فرآیند دارای دو مشخصه زیر می باشد [۳]:

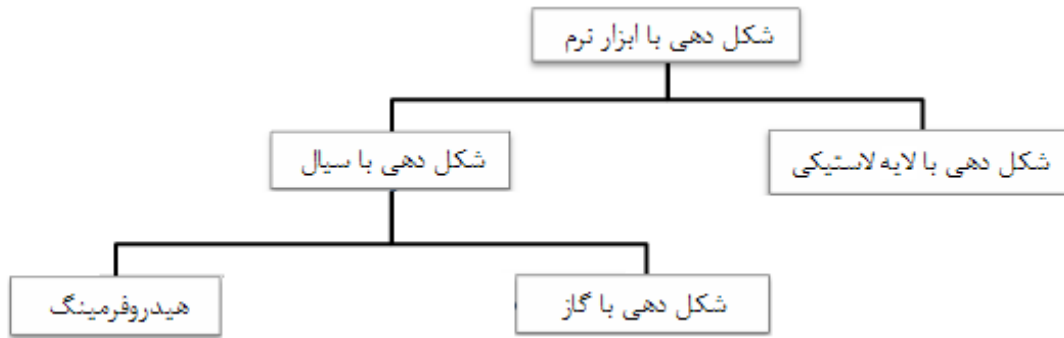
- ۱- شکل یا سطح مقطع قطعه کار، تغییر شکل مومسان یا دائمی زیاد، پیدا می کند.
- ۲- مقدار تغییر شکل مومسان در این فرآیند، نسبت به تغییر شکل کشسان معمولاً به قدری زیاد است که از برگشت فنی قطعه، بعد از تغییر شکل صرف نظر می گردد.

۴-۱ معرفی و دسته بندی فرآیند هیدروفرمینگ

استفاده از محیط های انعطاف پذیر در شکل دهی، یا به عبارت دیگر شکل دهی با ابزار نرم، در طی سال های اخیر به عنوان یک جایگزین مناسب برای شکل دهی قطعات متنوع توخالی و پیچیده، بسیار مورد توجه صنعتگران قرار گرفته است. همانطور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است تکنولوژی شکل دهی با ابزار نرم بر اساس ماده شکل دهنده غیر صلب به دو دسته کلی زیر تقسیم بندی می گردد:

۱- حالت جامد: تکنولوژی شکل دهی با لایه لاستیکی

۲- حالت سیال: تکنولوژی شکل دهی به کمک سیال



شکل ۱-۱ تقسیم‌بندی کلی روش‌های شکل‌دهی با استفاده از ابزار نرم [۴]

هیدروفرمینگ یا شکل‌دهی به کمک سیال در سال‌های اخیر، به یکی از فرآیندهای اصلی شکل‌دهی تبدیل شده است. این فرآیند از قبل از جنگ جهانی دوم توسعه یافته است. کاربردهای آن در صنعت هواپیماسازی آلمان به علت برخی مشکلات و تحقیقات و آزمایشات عملی نسبتاً کم، به بعضی از زمینه‌های خاص محدود می‌شد. اما از سال ۱۹۹۰ به بعد این فرآیند به طور فزاینده‌ای مورد توجه بسیاری از صنایع به خصوص اتومبیل‌سازی قرار گرفته است [۵]. هیدروفرمینگ نام‌های مختلفی دارد مانند: شکل‌دهی هیدرولیکی، کشش عمیق هیدروفرمینگ، شکل‌دهی انعطاف‌پذیر، هیدروبالجینگ، شکل‌دهی فشار بالا، شکل‌دهی فشار پایین و کشش عمیق هیدرومکانیکی.

تکنولوژی هیدروفرمینگ مزایای زیر را به همراه دارد [۵]:

- ۱) در این فرآیند سیال شکل‌دهی که آب یا روغن می‌باشد، نقش سنبه یا ماتریس را ایفا می‌کند و بنابراین هزینه ابزاربندی قالب با ساخت تنها سنبه یا ماتریس به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد.
- ۲) این فرآیند کیفیت و عملکرد قطعات تولیدی را به مقدار قابل توجهی بهبود می‌بخشد و قطعات هیدروفرمینگ، سبک‌تر، ارزان‌تر و مستحکم‌تر می‌باشند. هیدروفرمینگ مواد را موثرتر استفاده می‌کند. در مقایسه با قطعات تولید شده از فرآیند استمپینگ، محصولات هیدروفرمینگ تلرانس، تکرارپذیری و دقت ابعادی بالاتر، برگشت فنری و تنش‌های پسماند کمتری دارند.

۳) قطعات هیدروفرم شده می‌توانند خیلی پیچیده باشند.

معایب و محدودیت‌های هیدروفرمینگ [۵]:

- سیکل زمانی بالا برای تولید
 - نیاز به قالب‌های با کیفیت سطح بالا
 - نیاز به پرس‌های نسبتاً سنگین‌تر برای غلبه بر فشار داخل محفظه که در مقابل حرکت سنبه روی ناحیه نسبتاً بزرگی مقاومت می‌کند.
 - هزینه‌های تجهیزات هیدروفرمینگ تا حدود ۳۰ درصد بالاتر از ابزارهای استمپینگ است.
 - عمر نسبتاً کوتاه سیستم‌های آب‌بند و همچنین طولانی‌تر بودن زمان مورد نیاز برای تعویض قالب
- های هیدروفرمینگ در مقایسه با قالب‌های استمپینگ

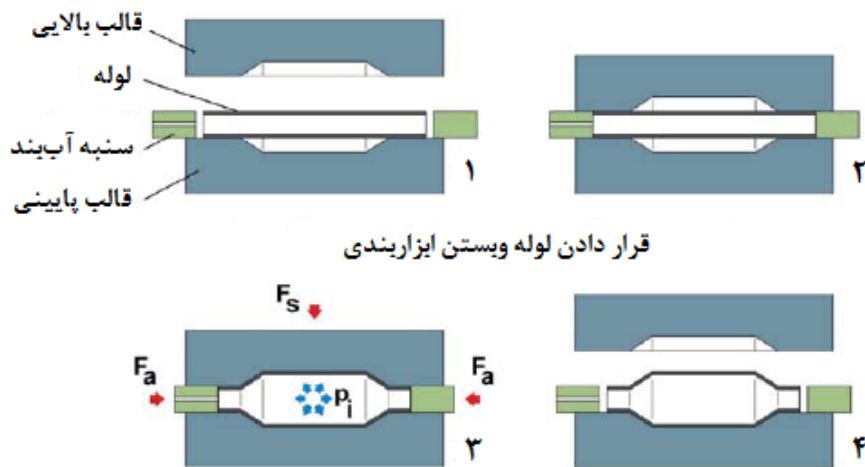
با توجه به هندسه قطعات تولیدی و شکل ماده خام اولیه، فرآیند هیدروفرمینگ را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود: هیدروفرمینگ لوله^۱ و هیدروفرمینگ ورق^۲. مواد لوله‌ای در تولید انبوه قطعات هیدروفرم استفاده می‌شوند در حالی که هیدروفرمینگ مواد ورقی به علت سیکل زمانی تولید بالاتر عمدتاً برای تولید دسته‌ای بکار می‌روند. به علاوه هیدروفرمینگ ورق به نیروهای کلمپ بالاتری در مقایسه با هیدروفرمینگ لوله احتیاج دارد که موجب افزایش شدید هزینه‌های پرس می‌شود. با این حال پیشرفت‌های حاصله در فرآیند و تکنولوژی پرس، به طور افزاینده‌ای کاربردهای وسیع‌تر صنعتی هیدروفرمینگ ورق را توسعه دادند [۶].

۱-۴-۱ هیدروفرمینگ لوله:

در فرآیند هیدروفرمینگ لوله، قطعه کار اولیه داخل حفره قالب که متناظر با شکل نهایی قطعه است، قرار

1-Tube hydroforming
2-Sheet hydroforming

داده می شود، شکل (۲-۱).



باز شدن ابزار بندی و برداشت قطعه هیدروفرمینگ با فشار سیال و تغذیه محوری

شکل ۲-۱ شماتیک هیدروفرمینگ لوله [۶]

قالب‌ها تحت اثر نیروی F_s بسته می‌شوند. در حالی که لوله توسط سیال شکل‌دهی از داخل، تحت فشار P_i قرار می‌گیرد، سنبله‌های آب‌بند، تحت اثر نیروی F_a ماده را به داخل محفظه قالب تغذیه می‌کنند. قطعه تحت عمل کنترل شده و همزمان فشار داخلی و نیروی محوری، شکل می‌گیرد [۶].

در فرآیند هیدروفرمینگ لوله ۴ نوع اصلی برای حالت شکست وجود دارد:

- ۱) کمناش، این عیب معمولاً بر اثر اعمال بار محوری بیش از حد اتفاق می‌افتد.
- ۲) چروکیدگی، بوسیله بار محوری بالا یا فشار داخلی ناکافی رخ می‌دهد.
- ۳) ترکیدگی، ضخامت اولیه لوله از مقدار مورد نیاز کمتر است یا بار محوری ناکافیست.
- ۴) تاخوردگی، هنگامی اتفاق می‌افتد که سنبله‌های محوری در حالی که لوله در داخل قالب در حال انبساط است مواد را به داخل محفظه قالب هدایت می‌کنند. همچنین تا خوردگی در نواحی با انبساط بالا در لوله‌های جدار نازک یا بر اثر تغذیه محوری بیش از حد نیز می‌تواند اتفاق بیفتد.

مزایای اصلی فرآیند هیدروفرمینگ لوله عبارتند از [۷]:

- تولید قطعات پیچیده به طور یکپارچه، که قبلاً تنها از طریق تولید چندین قطعه به طور جداگانه ممکن بود.

- ایجاد قطعات با ابعاد و شکل کاملاً دقیق

- افزایش استحکام قطعات تولیدی بر اثر کارسختی

- امکان کاهش وزن قطعات با استفاده از مواد با استحکام بالا

- صلبیت بالا

- استحکام خستگی بالا

- نیاز به اتصالات بسیار کم برای اشکال پیچیده

از جمله محدودیت‌های فرآیند هیدروفرمینگ لوله می‌توان به زمان سیکل تولید بالا، هزینه تجهیزات پرس بالاتر و اطلاعات کم در زمینه تکنولوژی فرآیند، اشاره نمود. فرآیند هیدروفرمینگ لوله در صنایع خودروسازی، هوافضا، شیرآلات بهداشتی، اتصالات خطوط لوله نفت و گاز و غیره کاربردهای فراوانی دارد. در شکل (۳-۱) تعدادی از محصولات تولید شده با این روش نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۱ نمونه‌هایی از قطعات تولید شده با استفاده از هیدروفرمینگ لوله [۸،۶ و ۹]