

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشکده فنی

گروه مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

تحلیل عددی نمودار حد شکل دهی تکامل یافته در فرایندهای تدریجی شکل دهی
ورق‌های فلزی

از:

محمد زعیمی

اساتید راهنما:

دکتر علی باستی

دکتر مجید علی طاولی

استاد مشاور:

مهندس کتایون محمدی

تقدیم به پدر و مادرم

که سایه مهربانیشان سایه سار زندگی می باشند،

به پاس اخلاص و فداکاری بی دریغشان

با تشکر فراوان

از جناب آقای دکتر علی باستی به خاطر راهنمایی‌ها، انتقال معلومات و تجربیات ارزشمندشان، باشد که

گوشه‌ای از زحماتشان را جبران کرده باشم.

از جناب آقای دکتر مجید علی طاوولی به دلیل همراهی در انجام پروژه و تجربیاتشان

از سرکارخانم مهندس کتایون محمدی به خاطر راهنمایی‌های کارساز و مفید

فهرست مطالب

چکیده فارسی.....س

چکیده انگلیسی.....ش

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ فرایندهای شکل دهی ورق فلزی ۲
- ۱-۲-۱ فرایند نوردکاری ۴
- ۲-۲-۱ فرایند شکل دهی کششی ۴
- ۳-۲-۱ فرایند کشش عمیق ۵
- ۴-۲-۱ فرایند خمکاری ۵
- ۵-۲-۱ فرایند شکل دهی چرخشی ۶
- ۶-۲-۱ هیدروفرمینگ ۷
- ۱-۶-۲-۱ هیدروفرمینگ ورق ۷
- ۲-۶-۲-۱ هیدروفرمینگ لوله ۸
- ۷-۲-۱ شکل دهی با سرعت بالا ۸
- ۱-۷-۲-۱ شکل دهی انفجاری ۹
- ۲-۷-۲-۱ شکل دهی هیدرولیکی انفجاری ۱۰
- ۸-۲-۱ فرایندهای شکل دهی به روش افزایشی ۱۰
- ۱-۸-۲-۱ فرایند چکش کاری ۱۰
- ۲-۸-۲-۱ فرایند شکل دهی چند نقطه‌ای ۱۱
- ۳-۸-۲-۱ فرایند شکل دهی لیزری ۱۱
- ۴-۸-۲-۱ شکل دهی با جت آب ۱۲
- ۵-۸-۲-۱ فرایند چرخشی ۱۲
- ۹-۲-۱ پرکاربردترین فرایندهای شکل دهی افزایشی ۱۳
- ۱-۹-۲-۱ فرایند شکل دهی افزایشی تک نقطه‌ای ۱۳
- ۲-۹-۲-۱ فرایند شکل دهی افزایشی با ابزار متقابل ۱۵

- ۱۵..... فرایند شکل دهی افزایشی دونقطه‌ای. ۳-۹-۲-۱
- ۱۶..... فرایند شکل دهی چندمرحله‌ای ۱۰-۲-۱
- ۱۸..... نقص‌های رایج در شکل دهی ورق فلزی ۳-۱
- ۱۸..... چروکیدگی ۱-۳-۱
- ۱۸..... گوش دار شدن ۲-۳-۱
- ۱۸..... شکست سطحی، موضعی شدن و پارگی ۳-۳-۱

فصل دوم : نمودار حد شکل دهی

- ۲۲..... مقدمه ۱-۲
- ۲۲..... مفهوم باریک شوندگی موضعی و باریک شوندگی پخشی ۲-۲
- ۲۳..... رهیافت کلی به مسئله ناپایداری ۳-۲
- ۲۴..... اثر ناهمگنی بر کرنش یکنواخت ۱-۳-۲
- ۲۷..... نمودار حد شکل دهی ۴-۲
- ۲۹..... تعیین تجربی نمودار حد شکل دهی ۵-۲
- ۳۲..... تعیین نظری نمودار حد شکل دهی ۶-۲
- ۳۳..... ۱-۶-۲ تحلیل خطی در پیش بینی نمودار حد شکل دهی
- ۳۴..... ۱-۱-۶-۲ باریک شوندگی پخشی سويفت
- ۳۵..... ۲-۱-۶-۲ روش انشعابی هیل بوسیله تئوری شارش
- ۳۶..... ۳-۱-۶-۲ روش انشعابی با تئوری ورتکس
- ۳۷..... ۴-۱-۶-۲ تئوری جونز-گیلیز (JG)
- ۳۷..... ۵-۱-۶-۲ تحلیل بر پایه ناپایداری برشی
- ۳۷..... ۶-۱-۶-۲ تحلیل ناپایداری
- ۳۸..... ۷-۱-۶-۲ تئوری گرادیان کرنش
- ۳۸..... ۲-۶-۲ تحلیل غیرخطی در پیش بینی نمودار حد شکل دهی با روش مارسینیاک و کوچینسکی
- ۴۰..... ۱-۲-۶-۲ تاثیر سخت شوندگی ماده
- ۴۱..... ۲-۲-۶-۲ تاثیر مسیر کرنش
- ۴۶..... ۳-۲-۶-۲ تاثیر ناهمسانگردی ماده و توابع تسلیم بر مدل M-K
- ۴۷..... ۷-۲ مدل‌های ساختاری ورق‌های فلزی

- ۱-۷-۲ معیار تسلیم ۴۷
- ۲-۷-۲ رابطه کار- سختی ۵۷

فصل سوم: نمودار حد شکل دهی بر اساس مدل M-K

- ۱-۳ اصول مدل M-K ۵۹
- ۱-۱-۳ محاسبه رابطه بین ρ و α ۶۵
- ۲-۱-۳ همگرایی روش نیوتن- رافسون ۶۶
- ۲-۳ تاثیر زاویه راستای اولیه شیار ۷۲
- ۳-۳ تاثیر پارامتر ناهمگنی هندسی ۷۲
- ۱-۳-۳ تاثیر مشتقات ضریب ناهمگنی در محاسبات نمودار حد شکل دهی ۷۵
- ۲-۳-۳ تاثیر پارامتر اسکالر f_0 ۷۶
- ۴-۳ پیش بینی تاثیر خواص ماده بر نمودار حد شکل دهی ۷۶
- ۱-۴-۳ تاثیر ضرایب ناهمسانگردی ۷۷
- ۲-۴-۳ تاثیر ضریب توانی نرخ کرنش ۸۰
- ۵-۳ تاثیر توابع تسلیم ۸۲
- ۶-۳ بررسی تاثیر ریزساختار در فلزات دوفازی ۸۴
- ۷-۳ نمودار تنش حد شکل دهی ۸۸

فصل چهارم: نمودار حد شکل دهی با وجود تنش نرمال

- ۱-۴ مطالعات اولیه ۹۳
- ۲-۴ تعمیم مدل M-K با اعمال تنش نرمال ۹۷

فصل پنجم: نمودار حد شکل دهی تکامل یافته

- ۱-۵ مقدمه ۱۰۴
- ۲-۵ فرایند شکل دهی چرخشی ۱۰۶
- ۳-۵ مکانیزم‌های موثر در افزایش شکل پذیری ۱۰۸
- ۱-۳-۵ تاثیر نیروهای برشی ۱۰۹
- ۲-۳-۵ تاثیر تنش تماسی ۱۱۰
- ۴-۵ فرضیات مورد نیاز به منظور تعمیم مدل M-K با وجود شش مولفه تنش ۱۱۲
- ۵-۵ تعمیم مدل M-K با وجود هر شش مولفه تنسور تنش ۱۱۴

۶-۵ ترسیم نمودار حد شکل دهی بر اساس شش مولفه تنسور کرنش ۱۱۹

۷-۵ اندازه گیری تجربی کرنش های بین ضخامتی ۱۲۶

فصل ششم: نتایج و پیشنهادات

۱-۶ نتایج ۱۳۰

۲-۶ پیشنهادات ۱۳۱

مراجع ۱۳۳

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲. خلاصه‌های از مطالعات صورت گرفته در زمینه تاثیر نوع توابع تسلیم بر پیش بینی نمودار حد شکل دهی ۴۶
- جدول ۱-۳. خصوصیات مواد شامل ST12 و AK steel، AA5XXX ۷۱
- جدول ۲-۳. خواص مکانیکی برای دو نوع ورق فولادی و آلومینیومی [۴۵] ۷۶
- جدول ۳-۳. ترکیبات شیمیای فولاد DP600 ۸۴
- جدول ۴-۳. نمونه‌هایی با حجم‌های مختلف مارتنزیت تحت شرایط مختلف ۸۵
- جدول ۵-۳. ضرایب رابطه سخت شونده‌گی وک ۸۶
- جدول ۱-۴. خصوصیات مواد مورد استفاده در تعیین تاثیر تنش نرمال در شکل پذیری [۴۳] ۹۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱. طبقه بندی فرایندهای شکل دهی..... ۳
- شکل ۲-۲. فرایند نوردکاری ۴
- شکل ۲-۳. فرایند شکل دهی کششی ۴
- شکل ۲-۴. فرایند کشش عمیق ۵
- شکل ۲-۵. فرایند خمکاری ۶
- شکل ۲-۶. فرایند شکل دهی چرخشی ۷
- شکل ۲-۷. هیدروفورمینگ ورق ۸
- شکل ۲-۸. هیدروفورمینگ لوله ۸
- شکل ۲-۹. کاربردهای شکل دهی انفجاری ۹
- شکل ۲-۱۰. فرایند چکش کاری ۱۱
- شکل ۲-۱۱. فرایند شکل دهی چند نقطه‌ای ۱۱
- شکل ۲-۱۲. فرایند شکل دهی لیزری ۱۲
- شکل ۲-۱۳. فرایند چرخشی مرسوم ۱۲
- شکل ۲-۱۴. فرایند چرخش برشی ۱۳
- شکل ۲-۱۵. فرایند شکل دهی افزایشی تک نقطه‌ای ۱۴
- شکل ۲-۱۶. فرایند شکل دهی افزایشی با ابزار متقابل ۱۵
- شکل ۲-۱۷. فرایند شکل دهی افزایشی دونقطه‌ای با قالب جزئی ۱۶
- شکل ۲-۱۸. فرایند شکل دهی افزایشی دونقطه‌ای با قالب کامل ۱۶
- شکل ۲-۱۹. فرایند شکل دهی چند مرحله‌ای ۱۷
- شکل ۲-۲۰. گوش دار شدن ۱۹
- شکل ۲-۲۱. شکست سطحی ناشی از موضعی شدن کرنش‌ها ۱۹
- شکل ۲-۱. (الف) باریک شونده‌گی پخشی و (ب) باریک شونده‌گی موضعی ۲۳
- شکل ۲-۲. نمونه کشش تک محوری با ابعاد ناهمگن ۲۵
- شکل ۲-۳. مقایسه کرنشها در نمونه‌های کشش به ازای ضرایب ناهمگنی مختلف f ، با فرض $n=0/25$ [۱] ۲۶
- شکل ۲-۴. اثر ضریب ناهمگنی بر کرنش حدی ناحیه b درحین کشش تک محوری [۱] ۲۶
- شکل ۲-۵. تاثیر مرکب f و n بر کرنش حدی ناحیه b درحین کشش تک محوری [۱] ۲۷
- شکل ۲-۶. نمودار حد شکل دهی کیلر-گودین ۲۸
- شکل ۲-۷. نمودار مرسوم حد شکل دهی ۲۹
- شکل ۲-۸. متداولترین شبکه‌ها در تعیین نمودار حد شکل دهی به روش تجربی ۳۰
- شکل ۲-۹. (الف) اندازه گیری کرنش‌ها به با استفاده از میکروسکوپ دیجیتالی، (ب) تغییر شکل دواير حک شده بر روی ورق فلزی ۳۲
- شکل ۲-۱۰. پیش بینی باریک‌شونده‌گی پخشی توسط منحنی حد شکل دهی سويفت ۳۴

- شکل ۲-۱۱. نمودار حد شکل دهی پیش بینی شده توسط معیار هیل و معیار سویفت [۱].....۳۶
- شکل ۲-۱۲. نمایش ساده‌ای از مدل M-K ۳۸
- شکل ۲-۱۳. نمودار تجربی حد شکل دهی فولاد تحت مسیرهای کرنش مختلط [۳۰] ۴۲
- شکل ۲-۱۴. نمودار تجربی حد شکل دهی Armco iron تحت مسیرهای کرنش مختلط [۳۰] ۴۲
- شکل ۲-۱۵. نمودار تجربی حد شکل دهی آلیاژ آلومینیم 6111 T4 تحت مسیرهای مختلط، پیش کرنش تحت کشش یکسان دومحوری [۳۱] ۴۳
- شکل ۲-۱۶. افزایش حدود کرنش بدلیل فاصله زمانی بین پیش کرنش و کرنش نهایی آلیاژ آلومینیم 6111 T4 (الف) اعمال کرنش تحت کشش تک محوری (ب) اعمال کشش تحت کشش یکسان دومحوری [۳۱] ۴۴
- شکل ۲-۱۷. نمودار تجربی حد شکل دهی آلیاژ آلومینیم 6111 T4 تحت مسیرهای مختلط، پیش کرنش تحت کشش تک محوری [۳۱] ۴۵
- شکل ۲-۱۸. نمودار تجربی حد شکل دهی آلیاژ آلومینیم 6111 T4 تحت مسیرهای مختلط، پیش کرنش تحت کشش تک محوری و با چرخش راستای تنش اصلی ماکزیمم بعد از پیش کرنش [۳۱] ۴۵
- شکل ۲-۱۹. مکان هندسی ون میسز و ترسکا ۴۸
- شکل ۳-۱. مدل M-K به همراه یک نقص اولیه ناشی از ناهمگنی ماده ۵۹
- شکل ۳-۲. راستای شیار در مدل M-K ۶۵
- شکل ۳-۳. ناهمگرایی در حل معادلات غیرخطی مربوط به پیش بینی حدود کرنش بوسیله روش نیوتن-رافسون بدون الگوریتم ارجاع دهنده [۴۲] ۶۹
- شکل ۳-۴. همگرایی در حل معادلات غیرخطی مربوط به پیش بینی حدود کرنش بوسیله روش نیوتن-رافسون همراه با الگوریتم ارجاع دهنده [۴۲] ۶۹
- شکل ۳-۵. فلوجارت تعیین نمودار حد شکل دهی ۷۰
- شکل ۳-۶. نمودار حد شکل دهی پیش بینی شده برای فولاد کم کربن ST12 ۷۱
- شکل ۳-۷. تاثیر زاویه اولیه شیار در نمودار حد شکل دهی ۷۲
- شکل ۳-۸. حدود کرنش پیش بینی شده برای یک ماده ایزوتروپیک براساس مدل M-K [۴۴] ۷۳
- شکل ۳-۹. حدود کرنش پیش بینی شده برای یک ماده ایزوتروپیک براساس مدل اصلاح شده M-K توسط [۴۴] ۷۴
- شکل ۳-۱۰. اهمیت مشتقات ضریب ناهمگنی در پیش بینی نمودار حد شکل دهی [۴۲] ۷۵
- شکل ۳-۱۱. تاثیر پارامتر ناهمگنی اولیه f_0 در منحنی حد شکل دهی ۷۶
- شکل ۳-۱۲. نمودار حد شکل دهی پیش بینی شده توسط مدل M-K برای فولاد [۴۵] ۷۷
- شکل ۳-۱۳. نمودار حد شکل دهی پیش بینی شده توسط مدل M-K برای آلومینیم [۴۵] ۷۷
- شکل ۳-۱۴. نمونه آزمون کشش به صورت تسمه‌ای که از ورق بریده شده، به منظور محاسبه Γ_0 ۷۸
- شکل ۳-۱۵. تاثیر ضریب ناهمسانگردی بر نمودار حد شکل دهی پیش بینی شده توسط مدل M-K برای فولاد [۴۵] ۷۹
- شکل ۳-۱۶. تاثیر ضریب ناهمسانگردی بر نمودار حد شکل دهی پیش بینی شده توسط مدل M-K برای آلومینیم [۴۵] ۷۹
- شکل ۳-۱۷. تاثیر نمای کرنش سختی (n) بر نمودار حد شکل دهی پیش بینی شده توسط مدل M-K برای فولاد [۴۵] ۸۰
- شکل ۳-۱۸. تاثیر نمای کرنش سختی (n) بر نمودار حد شکل دهی پیش بینی شده توسط مدل M-K برای آلومینیم [۴۵] ۸۰
- شکل ۳-۱۹. دو روش تعیین m، (الف) دو منحنی تنش-کرنش پیوسته، با آهنگهای کرنش مختلف، که در یک کرنش مقایسه

- می‌شوند، (ب) ایجاد تغییر ناگهانی در آهنگ کرنش در حین آزمون کشش ۸۱
- شکل ۳-۲۰. تاثیر حساسیت به ضریب توانی نرخ کرنش (m) بر نمودار حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده توسط مدل M-K برای فولاد [۴۵] ۸۲
- شکل ۳-۲۱. تاثیر حساسیت به ضریب توانی نرخ کرنش (m) بر نمودار حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده توسط مدل M-K برای آلومینیم [۴۵] ۸۲
- شکل ۳-۲۲. تاثیر توابع تسلیم بر نمودار حد شکل‌دهی برای آلیاژ آلومینیم [۳۹] ۸۳
- شکل ۳-۲۳. تاثیر توابع تسلیم بر نمودار حد شکل‌دهی برای آلیاژ آلومینیم [۴۶] ۸۳
- شکل ۳-۲۴. منحنی‌های محاسبه شده و منحنی‌های تجربی [۴۷] برای نمونه‌های تولیدی با نرخ حرارتی (۱°C/s) ۸۵
- شکل ۳-۲۵. منحنی‌های محاسبه شده و منحنی‌های تجربی [۴۷] برای نمونه‌های تولیدی با نرخ حرارتی (۱۰۰°C/s) ۸۶
- شکل ۳-۲۶. منحنی حد شکل‌دهی برای برای نمونه‌هایی با حجم مارتنزیت متفاوت، تولید شده با نرخ حرارتی (۱°C/s) ۸۷
- شکل ۳-۲۷. منحنی حد شکل‌دهی برای برای نمونه‌هایی با حجم مارتنزیت متفاوت، تولید شده با نرخ حرارتی (۱۰۰°C/s) ۸۷
- شکل ۳-۲۸. تبدیل منحنی‌های حد شکل‌دهی (FLD) به منحنی‌های تنش حد شکل‌دهی (FLSD) [۵۴] ۹۱
- شکل ۴-۱. تاثیر تنش نرمال بر نمودار حد شکل‌دهی [۵۹] ۹۶
- شکل ۴-۲. مدل تعمیم یافته M-K با اعمال تنش نرمال ۹۷
- شکل ۴-۳. مقایسه نتایج تجربی و عددی بدون اعمال تنش نرمال σ_3 برای ST12 ۹۹
- شکل ۴-۴. حدود شکل‌دهی تجربی و نظری برای AA6011 با تنش نرمال (Mpa) -۱۲ ۱۰۰
- شکل ۴-۵. حدود شکل‌دهی تجربی و نظری برای STKM-11A با تنش نرمال (Mpa) -۵۶ ۱۰۰
- شکل ۴-۶. تاثیر تنش نرمال بر افزایش شکل‌پذیری برای AA6011 ۱۰۱
- شکل ۴-۷. تاثیر تنش نرمال بر افزایش شکل‌پذیری برای STKM-11A ۱۰۱
- شکل ۵-۱. مقایسه حدود باریک شونده‌گی و حدود شکست ۱۰۵
- شکل ۵-۲. وابستگی نمودار حد شکل‌دهی به کرنشهای برشی بین ضخامت [۶۵] ۱۰۶
- شکل ۵-۳. نمونه ساده‌ای از فرایند شکل‌دهی چرخشی [۶۵] ۱۰۷
- شکل ۵-۴. مقایسه فرایند شکل‌دهی چرخشی و فرایند مرسوم شکل‌دهی با پانچ [۶۵] ۱۰۸
- شکل ۵-۵. تاثیر سرعت چرخشی و انتقالی ابزار بر حدود کرنش [۶۵] ۱۰۸
- شکل ۵-۶. تاثیر تنش نرمال و مولفه‌های برشی تنش بر مکان هندسی ون میسرز، (الف) مکان هندسی بدون تنش نرمال و تنش برشی (ب) مکان هندسی با در نظر گرفتن تنش نرمال و (ج) مکان هندسی با در نظر گرفتن تنش برشی ۱۰۹
- شکل ۵-۷. تاثیر تنش برشی بر شکل‌پذیری. منحنی بالا کرنش کرنش نرمالیزه شده، منحنی پایین تنش تسلیم نرمالیزه شده ۱۱۰
- [۶۷] ۱۱۰
- شکل ۵-۸. نمونه‌های از آزمون کشش به همراه اعمال تنش نرمال ۱۱۱
- شکل ۵-۹. نقص اولیه و دستگاه‌های مختصات مورد استفاده در تحلیل M-K ۱۱۲
- شکل ۵-۱۰. پیش‌بینی نمودار حد شکل‌دهی آلومینیم ۱۰۵۰ و مقایسه با نتایج آلود و شولر ۱۲۱
- شکل ۵-۱۱. پیش‌بینی نمودار حد شکل و تاثیر پارامتر α_{zz} برای آلومینیم ۱۰۵۰ و مقایسه با نتایج آلود و شولر ۱۲۱
- شکل ۵-۱۲. نمودار حد شکل‌دهی تکامل یافته با $\alpha_{zz}=0$ برای آلومینیم ۱۰۵۰، (الف) پیش‌بینی توسط [۶۰]، (ب) و (ج) پیش‌بینی صورت گرفته ۱۲۲

- شکل ۵-۱۳. نمودار حد شکل دهی تکامل یافته برای مقادیر مختلف α_{zz} برای آلومینیم ۱۰۵۰ ، (الف) پیش بینی توسط [۶۰]،
 (ب) پیش بینی صورت گرفته ۱۲۳
- شکل ۵-۱۴. آزمایش طراحی شده آلود به منظور بررسی تاثیر کرنشهای برشی بر قابلیت شکل پذیری [۶۰] ۱۲۴
- شکل ۵-۱۵. کرنشهای حدی بدست آمده طبق تست کشش به همراه پره خطی [۶۰] ۱۲۵
- شکل ۵-۱۶. گسترش کرنشهای برشی بین ضخامتی در تست طراحی شده با پره خطی [۶۰] ۱۲۵
- شکل ۵-۱۷. روش تجربی تعیین کرنشهای بین ضخامتی ۱۲۷
- شکل ۵-۱۸. اندازه گیری کرنشهای بین ضخامتی ۱۲۸

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ مقدمه

۲-۱ فرایندهای شکل دهی ورق فلزی

۳-۱ نقصهای رایج در شکل دهی ورق فلزی

۱-۱ مقدمه

بهینه سازی فرایندهای شکل دهی ورق های فلزی از طریق شبیه سازی عددی، تبدیل به یک فاکتور کلیدی در بهبود کیفیت، جلوگیری از هدر رفتن مواد، صرفه جویی در زمان و سودآوری اقتصادی در بسیاری از صنایع از جمله خودروسازی، هوا فضا، ساختمان سازی و صنایع الکترونیکی شده است.

به منظور افزایش اطمینان به ابزارهای تحلیلی و مدل های ریاضی که قادر به شبیه سازی این فرایندها هستند، تلاش های بسیاری صورت گرفته که سبب کاهش آزمایشات زمان بر و پرهزینه مربوط به اصلاح ابزار می شود. مدت عمر منابع، بازیافت مواد و انرژی از جمله مشکلاتی هستند که سبب شده تا در مدیریت منابع طبیعی بازنگری صورت گیرد. به طور خاص در صنعت خودروسازی، یک استراتژی اصلی، کاهش وزن خودرو می باشد که یکی از مهمترین فواید آن، کاهش سوخت مصرفی و متعاقباً کاهش در گازهای خروجی آلاینده به محیط می شود. بنابراین هدف کاهش وزن به همراه افزایش ایمنی سرنشینان و مقاومت در برابر خوردگی، سبب شده تا در سال های اخیر استفاده از ورق های فولادی کم کربن، ورق های آلومینیومی و آلیاژهای آن بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

۲-۱ فرایندهای شکل دهی ورق فلزی

دو روش مهم در تبدیل یک فلز به یک محصول مناسب، شکل دهی فلز و ماشین کاری است. شکل دهی فلز شامل تغییر شکل ماده به صورت تغییر شکل پلاستیک پایدار است که به دو گونه ی شکل دهی حجمی^۱ و شکل دهی ورق^۲ طبقه بندی می شود. در فرایندهای شکل دهی حجمی، نسبت حجم به مساحت قطعه کاری زیاد است، نوردکاری^۳، کشش سیم^۴ و اکستروژن^۵

^۱ Bulk metal forming

^۲ Sheet metal forming

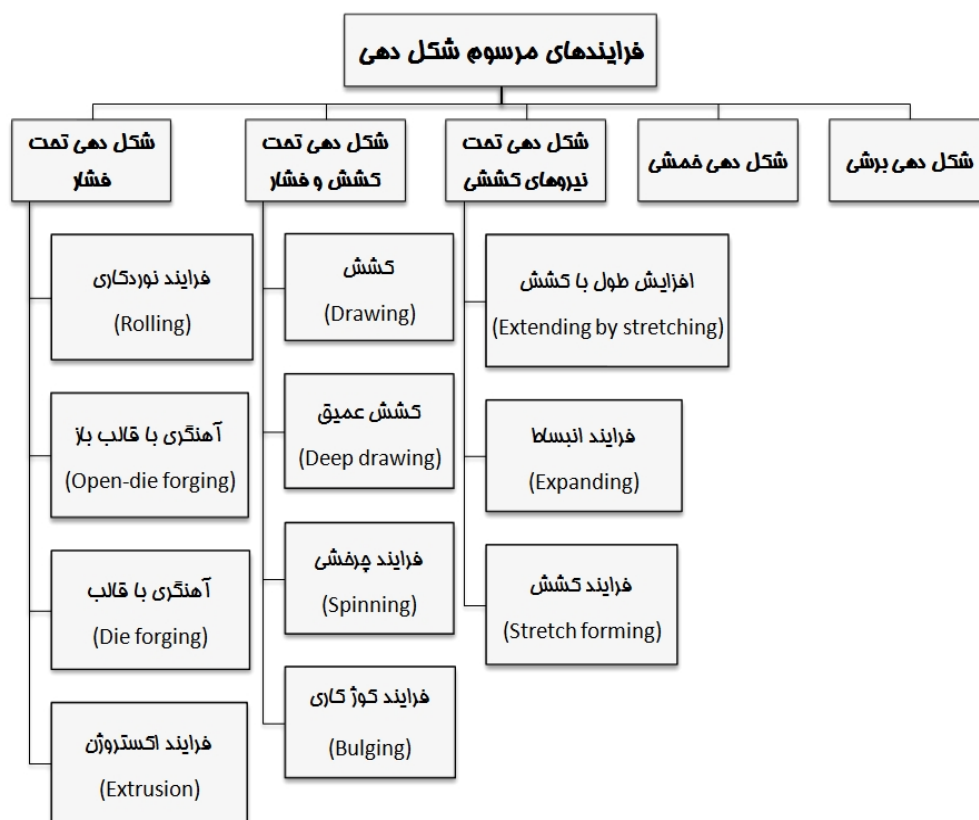
^۳ Rolling

^۴ Wire drawing

^۵ Extrusion

نمونه‌هایی از این نوع فرایندها می‌باشند. فرایند شکل‌دهی ورق‌های فلزی فرایندهایی هستند که با اعمال نیرو بر ورق‌ها به هندسه مطلوب بدون حذف قسمتی از ماده منتج می‌شوند. در طی این فرایندها نیروی اعمال شده سبب تولید تنش‌های بیشتر از تنش تسلیم ماده شده و سبب تغییر شکل پلاستیک بدون ایجاد شکست می‌شود. بنابراین ورق‌ها را می‌توان به انواع پیچیده‌ای از شکل‌ها طی فرایندهایی مثل کشش، خمش و غیره درآورد.

در شکل‌دهی ورق، نسبت حجم به سطح قطعه کم است. ورق‌ها معمولاً ضخامتی کمتر از ۶ میلیمتر دارند در این فرایند تغییر ضخامت در طی تغییر شکل پلاستیک نامطلوب است. نمونه‌هایی از این فرایندها عبارتند از: کشش عمیق^۱، خمکاری^۲. لازم به ذکر است که بسیاری از این فرایندها علی‌رغم قدمت بسیار زیاد، نقش عمده‌ای را در صنایع امروزه ایفا می‌کنند. طبقه بندی کلی فرایندهای مرسوم شکل‌دهی در شکل ۱-۱ آورده شده و در ادامه به بررسی پرکاربردترین و مهمترین فرایندها در شکل‌دهی می‌پردازیم.



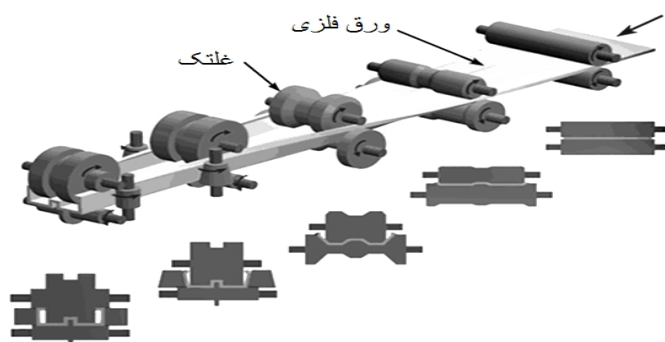
شکل ۱-۱. طبقه بندی فرایندهای شکل‌دهی

¹ Deep drawing

² Bending

۱-۲-۱ فرایند نوردکاری^۱

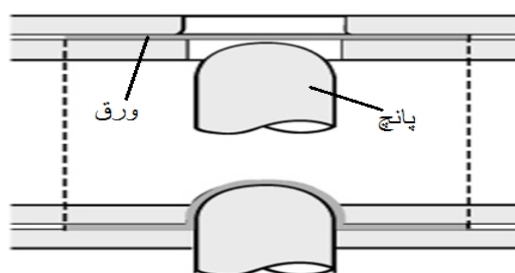
فرایندی است که ورق از طریق چند مرحله اعمال خمش شکل می‌گیرد. فرایند بر روی یک خط رل که شامل چند ایستگاه است صورت می‌گیرد. هر ایستگاه شامل یک غلتک^۲ است که در هر دو طرف ورق قرار دارد. شکل و اندازه غلتک‌ها می‌تواند مختص ایستگاه مربوط به خودش باشد و هم می‌تواند مستقل از آن باشد. غلتک‌ها می‌توانند تحت زوایای مختلفی و در بالا و پایین ورق قرار گیرند. با عبور ورق از هر ایستگاه تغییر شکل پلاستیک و خمش صورت می‌گیرد.



شکل ۱-۲. فرایند نوردکاری

۱-۲-۲ فرایند شکل دهی کششی^۳

فرایندی که در آن ورق کاملاً از اطراف گیردار شده و در حین کشیده شدن، روی قالب^۴ خم می‌شود. قطعات تولید شده معمولاً بزرگ بوده و شعاع خمش بزرگی نیز دارند. قطعات ساخته شده به این روش می‌توانند شکل یک منحنی ساده یا شامل سطح مقطع غیریکنواخت و پیچیده باشند. مواد مطلوب برای این فرایند مواد نرم از جنس آلومینیم، برنج و فولاد نرم می‌باشد.



شکل ۱-۳. فرایند شکل دهی کششی

^۱ Rolling

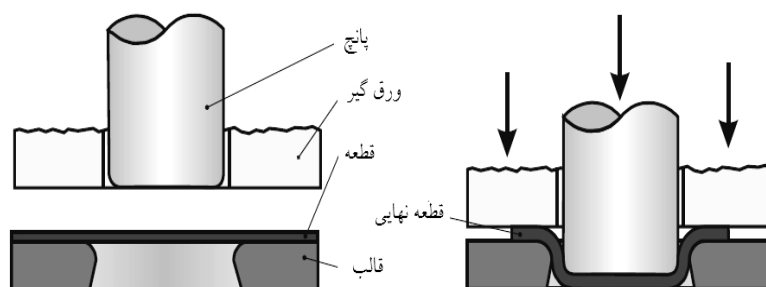
^۲ Roller

^۳ Stretch forming

^۴ Die

۳-۲-۱ فرایند کشش عمیق^۱

در ابتدا ورق مسطح فلزی بین قالب و ورق گیر^۲ قرار گرفته و نحوه قرارگیری پانچ به گونه‌ای است که در راستای محور مرکزی قالب می‌باشد. وقتی فرایند شروع می‌شود نواحی خارجی ورق تحت تنش‌های کششی شعاعی کشیده می‌شوند. با حرکت ورق به سمت قالب و به دلیل رفتار کششی بین قالب و پانچ، ناحیه داخلی شروع به نازک شدن می‌کند. به منظور جلوگیری از چروکیدگی در لبه‌های قطعه، از ورق گیر استفاده می‌شود.



شکل ۴-۱. فرایند کشش عمیق

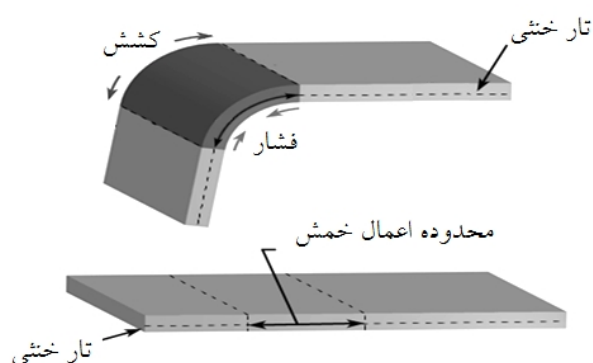
قطعاتی که به روش کشش عمیق تولید می‌شوند دارای عمقی بیشتر از شعاع خود می‌باشند. این قطعات می‌توانند دارای سطح مقطع‌های مختلفی باشند که نوع استوانه‌ای و مستطیلی آن متداول‌ترینند. این فرایند برای مواد نرم مانند آلومینیم، برنج، مس و فولاد نرم عملکرد مطلوبی دارند. اگر در این فرایند نتوان در یک مرحله اعمال بار به شکل مورد نظر دست یافت می‌توان آن را در چند مرحله کوچکتر انجام داد. فرق فرایند پرس با کشش عمیق به میزان تشکیل جریان پلاستیک و عمق قالب می‌باشد که در کشش عمیق بیشتر از پرس می‌باشد.

۴-۲-۱ فرایند خمکاری^۳

فرایندی است که با اعمال نیرو بر ورق آن را به یک زاویه مناسب شکل می‌دهد. فرایند خمش سبب تغییر شکل در امتداد یک محور می‌شود، اما برای ایجاد اشکال پیچیده می‌توان از چند مرحله خمش در امتداد محورهای مختلف استفاده کرد. قطعات

^۱ Deep drawing^۲ Blank holder^۳ Bending

ایجاد شده می‌توانند خیلی کوچک در حد یک نبشی یا حتی اشکالی به طول ۲۰ فوت^۱ باشند. فرایند خمش سبب ایجاد کشش و فشار در ورق می‌شود. قسمت بیرونی ورق تحت تاثیر کشش و قسمت داخلی آن تحت فشار می‌باشند. تنها قسمتی که تحت فشار و کشش قرار نمی‌گیرد تار خنثی است که طول آن طی پروسه ثابت می‌ماند.



شکل ۱-۵. فرایند خمکاری

وقتی یک ورق فلزی تحت خمش قرار می‌گیرد تنش‌های باقیمانده^۲ در ورق بوجود می‌آید که سبب می‌شود بلافاصله بعد از خمش، یک حرکت فنری در جهت مخالف خمش صورت گیرد این ریکاوری الاستیک ملزم می‌کند که ورق در هنگام خمش مقدار بیشتری از آنچه مطلوب است خم شود. خمش ورق را می‌توان با دادن حرارت، اعمال فشار هیدروستاتیک و اعمال نیروی فشاری بیشتر افزایش داد.

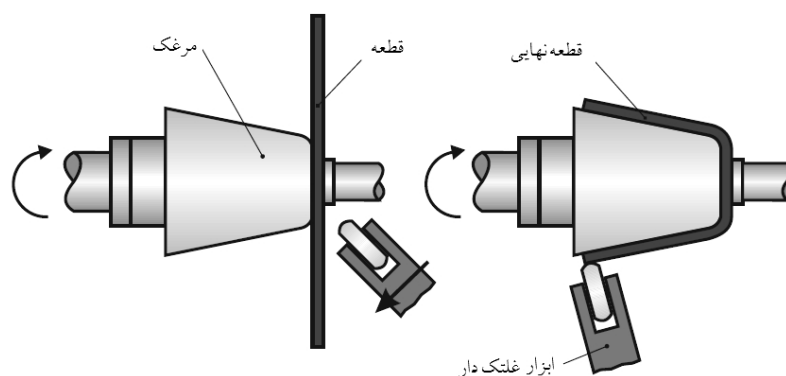
۱-۲-۵ فرایند شکل‌دهی چرخشی^۳

مادامی که ورق فلزی با سرعت بالا در حال چرخش است غلتک توسط ابزار بر آن نیروی فشاری وارد کرده و تغییر شکل صورت می‌گیرد. اشکالی که می‌توان از این روش تولید کرد حالت تقارن محوری دارند و اغلب به صورت استوانه، مخروط و نیم کره هستند.

^۱ Foot

^۲ Residual stress

^۳ Spinforming



شکل ۱-۶. فرایند شکل دهی چرخشی

۱-۲-۶ هیدروفرمینگ^۱

شکل دهی توسط فشار سیال، هیدرو فرمینگ یا شکل دهی هیدرولیکی یا قالب زنی هیدرولیکی^۲، یک نوع خاص از شکل دهی است که از سیال هیدرولیکی فشار بالا برای پرس کردن قطعه به داخل قالب، استفاده می شود. راهی مقرون به صرفه برای شکل دهی فلزات چکش خوار (انعطاف پذیر) همانند آلومینیوم یا برنج، به قطعاتی با وزن کم و ساختاری سخت و محکم می باشد.

۱-۲-۶-۱ هیدروفرمینگ ورق^۳

تغییر شکل هیدرولیکی ورق دو گونه است، یکی توسط کیسه ای انعطاف پذیر بدون تماس مستقیم مایع با ورق و دیگری بدون کیسه بطوریکه سیال با ورق تماس مستقیم دارد. هنگامی که یک ورق هیدروفرم می گردد به جای کشیده شدن، بر روی قالب پخش گردیده و سبب نازک شدگی کمتر در ماده می شود. همچنین با کاهش میزان سخت شوندگی و افزایش قابلیت شکل پذیری، نیازی به آنیل کردن نمی باشد. بسیاری از قسمت های بدنه اتومبیل ها برای شکل دهی بهتر از این نوع فرم دهی استفاده می کنند.

¹ Hydroforming

² Hydromolding

³ Sheet hydroforming