



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد سمنان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

عنوان

بررسی تئوری و تجربی شکل‌پذیری ورق‌های تولید شده به روش

فرآیند نورد تجمعی (ARB)

استاد راهنما

دکتر مهدی گردویی

استاد مشاور

محمد جواد رضوانی

نگارنده

محمد مهدی پیام

مهرماه ۱۳۹۰

همکاری دانشگاه‌های صنعتی شاهرود و

مالک اشتر و راهنمایی‌های اساتید محترم را در انجام این تحقیق

ارج می‌نهم و از ایشان سپاسگزارم

تقدیم به پدرم که بی نیازیم آموخت

به مادرم که به من درس محبت داد

فهرست مطالب

عنوان

شماره صفحه

فصل اول - مقدمه.....	۱-۲۴
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ تعیین شکل پذیری ورق های فلزی.....	۴
۱-۲-۱ روش های بر پایه آزمایشات شبیه سازی شده	۴
۲-۲-۱ روش ارتفاع حدی گنبد	۵
۳-۱ منحنی حد شکل دهی	۶
۴-۱ روش های تعیین کرنش های حدی	۹
۵-۱ فاکتورهای تاثیر گذار بر منحنی حد شکل دهی	۱۱
۱-۵-۱ تاثیر ضخامت	۱۱
۲-۵-۱ تاثیر خواص مکانیکی	۱۲
۳-۵-۱ تاثیر مسیر کرنش	۱۳
۴-۵-۱ تاثیر انحنای سنبه	۱۵
۵-۵-۱ تاثیر دما	۱۶
۶-۵-۱ تاثیر نرخ کرنش	۱۷
۷-۵-۱ سایر پارامترها	۱۷
۶-۱ استفاده از منحنی های حد شکل دهی در صنایع	۱۹
۷-۱ مدل های تئوری پیش بینی منحنی حد شکل دهی	۲۰
۸-۱ تحقیقات انجام شده بر روی ورق های چند لایه و ورق های تولید شده به روش نورد تجمعی	۲۲
۹-۱ اهداف و ساختار تحقیق	۲۳
فصل دوم - مبانی روش های تغییر شکل شدید پلاستیک.....	۲۴-۳۶
۱-۲ مواد ریز دانه.....	۲۶
۲-۲ تغییر شکل شدید پلاستیک (SPD).....	۲۷
۱-۲-۲ تغییر شکل در کانال های مشابه زاویه دار (ECAP).....	۲۸
۲-۲-۲ فرآیند اکستروژن و فشار متوالی (CEC).....	۳۰
۳-۲-۲ تغییر شکل پیچی تحت فشار زیاد (HPT).....	۳۰
۴-۲-۲ فرآیند نورد تجمعی (ARB).....	۳۰
۵-۲-۲ سایر فرآیندها	۳۵
۳-۲ جمع بندی	۳۶

۳۷-۶۰	فصل سوم - بررسی شکل پذیری و تعیین منحنی حد شکل دهی
۳۸	۱-۳ مقدمه
۳۹	۲-۳ مفاهیم اولیه در بارگذاری صفحه‌ای
۳۹	۱-۲-۳ کشش تک محوری
۳۹	۲-۲-۳ نمونه‌های کرنش اصلی
۴۰	۳-۲-۳ شرط حجم ثابت (تراکم ناپذیری)
۴۱	۴-۲-۳ فرآیندهای کلی ورق (تنش صفحه‌ای)
۴۱	۵-۲-۳ نسبت های تنش و کرنش
۴۲	۶-۲-۳ تغییر شکل ورق در حالت تنش صفحه‌ای
۴۳	۷-۲-۳ توزیع کرنش
۴۵	۸-۲-۳ نمودار کرنش
۴۶	۳-۳ حالت‌های تغییر شکل
۴۸	۱-۳-۳ فشار یک محوری، $\rho = -2$
۴۸	۲-۳-۳ ضخامت ثابت یا کشش، $\rho = -1$
۴۹	۳-۳-۳ کشش تک محوری، $\rho = -\frac{1}{2}$
۴۹	۴-۳-۳ کرنش صفحه‌ای، $\rho = 0$
۴۹	۵-۳-۳ انبساط دو محوری مساوی $\rho = 1$
۵۰	۴-۳ تئوری مارسینیاک-کوزینسکی در تحلیل منحنی حد شکل دهی
۵۰	۱-۴-۳ بیان فرضیات مسئله
۵۱	۲-۴-۳ محاسبه نمودارهای حد شکل دادن
۵۳	۳-۴-۳ مدل های لایه معادل ولایه مجزا
۵۴	۴-۴-۳ معیارهای تسلیم ناهمسانگرد
۵۶	۵-۴-۳ استخراج پارامترهای مدل M-K بر اساس معیارهای تسلیم
۵۸	۶-۴-۳ حل عددی معادلات مارسینیاک-کوزینسکی
۵۹	۵-۳ تئوری هیل در گلوئی شدن موضعی
۶۱-۹۸	فصل چهارم - ارائه نتایج و بحث
۶۲	۱-۴ نتایج تحقیق
۶۳	۲-۴ آزمایش‌ها و نتایج تجربی
۶۴	۱-۲-۴ ماده مورد آزمایش
۶۵	۲-۲-۴ ساخت ورق دولایه به روش نورد جمعی
۶۶	۳-۲-۴ آزمون کشش
۶۷	۴-۲-۴ تعیین خواص ناهمسانگردی
۷۰	۵-۲-۴ رابطه کار - سختی

۶-۲-۴	آزمایش کشش در صفحه و خارج از صفحه	۷۲
۳-۴	نتایج تئوری	۷۸
۱-۳-۴	بررسی شکل پذیری ورق های <i>AA1050</i> و پارامترهای موثر بر آن	۷۸
۲-۳-۴	بررسی شکل پذیری ورق دولایه <i>AA1050</i> تولید شده به روش نورد تجمعی	۸۲
۳-۳-۴	تاثیر تعداد مراحل نورد بر شکل پذیری ورق های تولید شده به روش نورد تجمعی	۸۳
۴-۳-۴	بررسی شکل پذیری ورق های چندلایه	۸۶
۵-۳-۴	اثر ضخامت لایه ها بر شکل پذیری ورق های چند لایه	۸۸
۴-۴	نتایج اجزای محدود	۹۰
۱-۴-۴	بررسی اثر پیش کرنش بر شکل پذیری ورق های چند لایه	۹۰

۱۰۲-۹۹	فصل پنجم_ نتیجه گیری و پیشنهادها	۱۰۲-۹۹
۱-۵	نتیجه گیری	۱۰۰
۲-۵	پیشنهادها	۱۰۲

۱۰۳-۱۱۴	پیوست	۱۰۳-۱۱۴
۱۱۵-۱۱۸	مراجع	۱۱۵-۱۱۸

فهرست علائم

F, G, H, L, J, N	ثوابت در معیار ناهمسانگردی هیل
M	نمای معیار تسلیم
P, Q, k	نمای معیار تسلیم
t_a	ضخامت ورق در قسمت سالم در مدل مارسینیاک-کوزینسکی
t_b	ضخامت ورق در قسمت نقص ورق در مدل مارسینیاک-کوزینسکی
E	مدول الاستیسیته
R	زبری سطح
r_0, r_{45}, r_{90}	ضرایب ناهمسانگردی ورق در سه راستای ۰ و ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد
f	ضریب ناهمگنی در ورق
$f(\sigma_{ij})$	تابع تسلیم
f_0	ضریب ناهمگنی اولیه در ورق
K, n, m	ضرایب خواص مواد
d	اندازه دانه
d_0	قطر اولیه دوایر شبکه حک شده بر روی ورق
d_1, d_2	قطرهای بیضی بعد از تغییر شکل ورق
l	طول ورق
t_0	ضخامت اولیه ورق
t	ضخامت ورق
w	عرض ورق
α	نسبت تنش
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	کرنش‌های اصلی
$\bar{\varepsilon}$	کرنش موثر پلاستیک
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	نرخ کرنش موثر پلاستیک
$\bar{\varepsilon}_0$	پیش کرنش
$d\varepsilon_1, d\varepsilon_2, d\varepsilon_3$	نمو کرنش‌های اصلی
$d\bar{\varepsilon}$	نمو کرنش پلاستیک موثر
θ	زاویه باریک شونده‌گی نسبت به محور بارگذاری
μ	ضریب اصطکاک
ρ	نسبت کرنش
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	تنش‌های اصلی
σ_e	تنش موثر

فهرست جداول

شماره صفحه

شماره جدول

جدول ۱-۲ بررسی استحکام کششی نمونه‌های فلزی مختلف تولید شده به روش‌های ARB و ECAP.....	۳۲
جدول ۱-۴ ترکیب شیمیایی مواد سازنده آلومینیوم AA 1050A.....	۶۴
جدول ۲-۴ خواص فیزیکی آلومینیوم AA 1050A.....	۶۴
جدول ۳-۴ خواص مکانیکی ورق‌های تک و دو لایه AA1050 در دمای اتاق.....	۷۲
جدول ۴-۴ خواص شیمیایی ورق‌های آلومینیوم AA1050,AA6016.....	۸۴
جدول ۵-۴ خواص مکانیکی اجزا ورق سه لایه.....	۸۶
جدول ۶-۴ خواص مکانیکی اجزای تشکیل دهنده ورق‌های چند لایه.....	۸۹
جدول ۷-۴ میانگین کرنش‌های پس ماند در لایه‌های ورق ساندویچی بازای درصد کاهش ضخامت متفاوت.....	۹۶

فهرست اشکال

شماره شکل

شماره صفحه

- شکل ۱-۱-۱ عیوب به وجود آمده در شکل دادن ورق های فلزی ۳
- شکل ۱-۲-۱ آزمایشات شکل دهی مخصوص در حالات تغییر شکل متفاوت ۴
- شکل ۱-۳-۱ منحنی حدی ارتفاع ناحیه گنبدی ۵
- شکل ۱-۴-۱ منحنی حد شکل دهی تعریف شده توسط جنسامر ۶
- شکل ۱-۵-۱ منحنی حد شکل دهی تعریف شده توسط کیلر ۷
- شکل ۱-۶-۱ منحنی حد شکل دهی تعریف شده توسط کیلر و گودوین ۷
- شکل ۱-۷-۱ نمودار حد شکل دهی شکست و گلوبی ۸
- شکل ۱-۸-۱ روش براگارد در تعیین کرنش های حدی ۹
- شکل ۱-۹-۱ روش هکر در تعیین کرنش های حدی ۱۰
- شکل ۱-۱۰-۱ تاثیر ضخامت بر منحنی حد شکل دهی ۱۲
- شکل ۱-۱۱-۱ تاثیر ضخامت و کرنش سختی بر FLD_0 ۱۲
- شکل ۱-۱۲-۱ مسیر های کرنش مختلف در بارگذاری های متفاوت ۱۴
- شکل ۱-۱۳-۱ تاثیر انحنای سنبه بر منحنی حد شکل دهی ۱۵
- شکل ۱-۱۴-۱ تاثیر دما بر منحنی حد شکل دهی در آلومینیوم AA5754 ۱۶
- شکل ۱-۱۵-۱ تاثیر دما بر منحنی حد شکل دهی در آلومینیوم AA6111-T4 ۱۷
- شکل ۱-۱۶-۱ تاثیر نرخ کرنش بر منحنی حد شکل دهی در $SPCEN-SD$ ۱۸
- شکل ۱-۱۷-۱ تاثیر نرخ کرنش بر منحنی حد شکل دهی در مس OFHC ۱۸
- شکل ۱-۱۸-۱ اصلاح نقاط بحرانی ۲۰
- شکل ۱-۱۹-۱ تعریف شاخص دقت ۲۱
- شکل ۱-۲۰-۱ مدل های تئوری در پیش بینی منحنی حد شکل دهی ۲۲
- شکل ۱-۲-۱ فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک
- الف) ECAP (ب) HPT (ج) CEC (د) ARB ۲۹
- شکل ۲-۲-۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نمونه های فلزی تولید شده به روش ARB ۳۱
- شکل ۲-۳-۱ تصویر میکروسکوپی از مقطع طولی تسمه آلومینیوم در فضای بین غلطکها در
- الف) نقطه ورودی (ب) نقطه خروجی ۳۳
- شکل ۲-۴-۱ شماتیک مکانیزم ایجاد جوش سرد با استفاده از فرایند جوش سرد نوردی ۳۵
- شکل ۳-۱-۱ جزء مبنا در یک نمونه آزمون کشش که نشان دهنده جهت های اصلی است ۳۹

شکل ۳-۲ تنش ها و کرنش های اصلی برای جزء تغییر شکل یافته در

الف) کشش تک محوری ب) حالت کلی فرآیند ورقی تنش صفحه‌ای ۴۲

شکل ۳-۳ یک جزء از یک ورق تغییر در حالت تنش صفحه‌ای

الف) حالت تغییر شکل نیافته با شبکه های دایره ای و مربعی ۴۳

ب) حالت تغییر شکل یافته ۴۳

ج) کشش های T یا نیرو های انتقال یافته در واحد عرض ۴۳

شکل ۳-۴ الف) کشش عمیق یک فنجان استوانه ای ۴۴

ب) باریکه ای از فنجان که نشان دهنده محل های اندازه گیری های کرنش هاست ۴۴

ج) نمودار های کرنش برای دو مرحله در فرآیند کشش ۴۴

شکل ۳-۵ حالات تغییر شکل در ورق

الف) نمودار کرنش که نشان دهنده حالت های تغییر شکل متناظر با نسبت های مختلف کرنش است ۴۶

ب) انبساط با دو محور یکسان در راس یک گنبد انبساط یافته ۴۷

ج) تغییر شکل کرنش صفحه ای در جداره جانبی یک قطعه طویل ۴۷

د) افزایش طول تک محوری گوشه یک سوراخ حدیده کاری شده ۴۷

ه) کشش یا برش خالص در لبه یک فنجان کشش عمیق یافته ۴۷

و) فشار تک محوری در گوشه یک فنجان کشش عمیق یافته ۴۷

ز) مسیر های مختلف کرنش متناسب ۴۸

شکل ۳-۶ تصویر شماتیک مدل M-K ۵۰

شکل ۳-۷ مراحل حل عددی معادلات حاکم بر تئوری مارسینیاک-کوزینسکی ۵۸

شکل ۳-۸ تصویر شماتیک تئوری گلوبی شدن هیل ۵۹

شکل ۴-۱ مراحل مختلف فرآیند نورد تجمعی ۶۵

شکل ۴-۲ تجهیزات آماده سازی نمونه ها و نمونه ای از ورق دو لایه تولید شده به روش نورد تجمعی ۶۶

شکل ۴-۳ نمونه های آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM E8 ۶۷

شکل ۴-۴ برش نمونه های آزمایش کشش در سه جهت ۹۰ و ۴۵ و ۰ نسبت به جهت نورد ۶۸

شکل ۴-۵ نمونه های آزمایش کشش در تعیین ناهمسانگردی ۶۹

شکل ۴-۶ منحنی تنش-کرنش آلومینیوم ۱۰۵۰ در ورق های تک و دولایه،

که از آزمون کشش تک محوری به دست آمده است ۷۱

شکل ۴-۷-۱ نمونه های آزمایش کشش در صفحه ورق های تک و دو لایه قبل و بعد از آزمایش ۷۳

شکل ۴-۸ قالب سنبه سرکروی جهت آزمون کشش خارج از صفحه ۷۳

شکل ۴-۹ شکل و اندازه نمونه های آزمایش کشش خارج از صفحه با سنبه سرکروی ۷۴

شکل ۴-۱۰ الگوی شبکه دایره ها جهت تعیین کرنش ها بعد از تغییر شکل طبق استاندارد ASTM E2218 ۷۵

شکل ۴-۱۱ نمونه هایی از آزمایش خارج از صفحه بر روی ورق های تک لایه و دو لایه ۷۶

شکل ۴-۱۲ منحنی تجربی حد شکل دهی آلومینیوم AA1050 ۷۷

شکل ۴-۱۳ منحنی تجربی حد شکل دهی آلومینیوم AA1050 تولید شده به روش نورد تجمعی ۷۷

شکل ۴-۱۴ مقایسه نتایج تئوری مدل M-K با یافته های تجربی، در ورق های AA1050 ۷۸

شکل ۴-۱۵ اثر توان کرنش سختی بر شکل پذیری ورق های فلزی ۷۹

- شکل ۴-۱۶ منحنی های حد شکل دهی به ازای مقادیر متفاوت r ۸۰
- شکل ۴-۱۷ منحنی های حد شکل دهی بدست آمده با استفاده از معیار هاسفورد به ازای مقادیر متفاوت r ۸۰
- شکل ۴-۱۸ اثرگذاری زبری سطح ورق های فلزی بر منحنی حد شکل دهی در آلومینیوم AA1050 ۸۱
- شکل ۴-۱۹ اثرگذاری ضخامت ورق های فلزی بر منحنی حد شکل دهی در آلومینیوم AA1050 ۸۲
- شکل ۴-۲۰ نتایج تئوری و تجربی منحنی حد شکل دهی در ورق های دو لایه AA1050 تولید شده به روش ARB ۸۲
- شکل ۴-۲۱ منحنی تنش کرنش ورق های آلومینیوم
- بازای مراحل متفاوت از نورد تجمعی الف) AA6016 ب) AA1050 ۸۳
- شکل ۴-۲۲ مقایسه بین منحنی های حد شکل دهی بازای تعداد مراحل مختلف نورد تجمعی بر روی AA1050 ۸۵
- شکل ۴-۲۳ مقایسه بین منحنی های حد شکل دهی بازای تعداد مراحل مختلف نورد تجمعی بر روی AA6016 ۸۵
- شکل ۴-۲۴ چیدمان ورق های ساندویچی AA5182 / پلی پروپیلن AA5182 ۸۶
- شکل ۴-۲۵ نتایج تئوری و تجربی کرنش های حدی برای پوسته آلومینیومی ۸۷
- شکل ۴-۲۶ مقایسه مدل های تئوری لایه معادل و لایه مجزا به منظور تعیین منحنی حد شکل دهی ورق ساندویچی ۸۸
- شکل ۴-۲۷ ترکیب اجزا در ورق دو لایه (اندازه ها به میلیمتر) ۸۹
- شکل ۴-۲۸ مقایسه نتایج تئوری و تجربی نمودارهای حد شکل دهی، در ورق دو لایه و اجزای آن ۸۹
- شکل ۴-۲۹ تغییرات کرنش حدی بازای نسبت ضخامت لایه ها در ورق های دو لایه و اجزای آن، بدون پیش کرنش ۹۰
- شکل ۴-۳۰ تصویر شماتیک ترکیب لایه های ورق ساندویچی Cu/Fe/Cu ۹۱
- شکل ۴-۳۱ ورق مش بندی شده در محیط ABAQUS ۹۲
- شکل ۴-۳۲ مقایسه نتایج درصد کاهش ضخامت مس در نورد ورق ساندویچی ۹۴
- شکل ۴-۳۳ مقایسه نتایج درصد کاهش ضخامت فولاد در نورد ورق ساندویچی ۹۴
- شکل ۴-۳۴ توزیع تنش ون میسز در ورق دو لایه نورد شده به ازای تغییر ضخامت های ۱۰-۲۰-۳۰-۴۰ و ۵۰ درصد ۹۵
- شکل ۴-۳۵ توزیع کرنش معادل در ورق دو لایه نورد شده به ازای تغییر ضخامت های ۱۰-۲۰-۳۰-۴۰ و ۵۰ درصد ۹۶
- شکل ۴-۳۶ اثر پیش کرنش بر منحنی حد شکل دهی ورق مس ۹۶
- شکل ۴-۳۷ اثر پیش کرنش بر منحنی حد شکل دهی ورق فولاد ۹۷
- شکل ۴-۳۸ اثر پیش کرنش در لایه های ورق ساندویچی Cu/Fe/Cu بر منحنی حد شکل دهی ۹۷

چکیده

نورد جمعی یکی از انواع روش‌های تغییر شکل مومسان شدید است که امکان تولید فلزاتی با استحکام بالا و اندازه دانه‌های نانومتری را فراهم می‌کند. در این تحقیق ورق‌های آلومینیوم AA1050 به روش نورد جمعی تولید شده و شکل پذیری آنها با استفاده از روش‌های تئوری و تجربی تعیین شده است. در پیش‌بینی تئوری منحنی حد شکل‌دهی، از روش مارسینیاک-کوزینسکی مبتنی بر نقص اولیه در ورق با شرط تنش صفحه‌ای استفاده شده است که این نقص هندسی در ورق به صورت تابعی از اندازه دانه، زبری سطح و کرنش موثر در هر لحظه لحاظ گردید. ناهمسانگردی در رفتار ورق با استفاده از سه معیار تسلیم هیل، هاسفورد و بارلات مدل‌سازی و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. در تعیین منحنی‌های حد شکل‌دهی تجربی از کشش صفحه‌ای و همچنین کشش خارج از صفحه با سنبه سرکروی بر روی نمونه‌هایی با ابعاد متفاوت استفاده شد. نتایج نشان دهنده کاهش سطح منحنی حد شکل‌دهی در مرحله اول نورد است در حالی که شکل‌پذیری به همراه استحکام تسلیم با افزایش شمار مراحل نورد بهبود می‌یابد به طوری‌که شکل‌پذیری و استحکام در پایان مرحله چهارم نورد، بر خواص ورق‌های اولیه برتری می‌یابد.

در بخش دیگری از این تحقیق شکل‌پذیری ورق‌های چندلایه فلزی مورد بررسی قرار گرفت. در بخش تئوری به منظور پیش‌بینی کرنش‌های حدی، مدل‌های لایه معادل و لایه مجزا ارائه گردید. با مدل‌سازی عددی فرآیند نورد ورق چند لایه به کمک نرم‌افزار ABAQUS 6.10 پیش‌کرنش موثر ایجاد شده در هر یک از لایه‌ها محاسبه و در کد عددی روش لایه مجزا مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این بخش با استفاده از یافته‌های تجربی دیگر مقالات صحت‌گذاری شد. مشخص شد که تعیین کرنش‌های حدی با استفاده از روش لایه مجزای ارائه شده، ضمن توافق مطلوب با نتایج تجربی، از اعتبار بالاتری در تعیین منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های چند لایه برخوردار است.

کلید واژه‌ها

منحنی حد شکل‌دهی، نورد جمعی، مدل مارسینیاک-کوزینسکی، ورق‌های چندلایه فلزی.

فصل اول

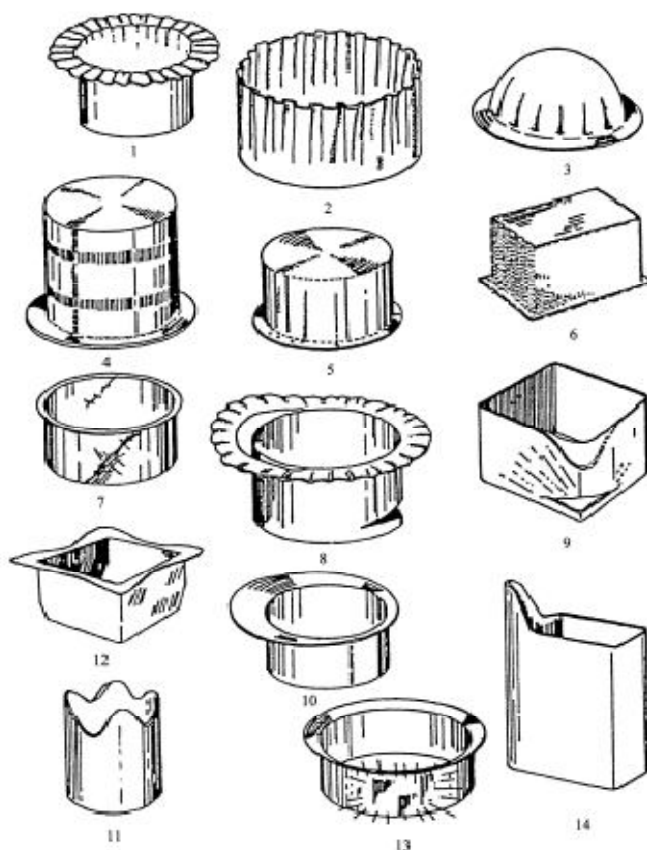
مقدمه

۱-۱- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی^۱ از مهمترین عملیات بر روی فلزات به شمار می‌رود و نسبت بزرگی از محصولات فلزی تولید شده در کشورهای صنعتی بر پایه این فرآیند می‌باشد. لزوم کاهش هزینه و افزایش عملکرد قطعات تولیدی و کاهش هر چه بیشتر وزن قطعات به همراه افزایش استحکام آنها، نیاز به تعیین مرزهای محدود کننده‌ی شکل‌دهی را توجیه می‌کند. هرچند که از جمله مزایای ورق‌های فلزی، مدول کشسانی بالا و استحکام زیاد است به گونه‌ای که قطعات تولید شده از ورق‌ها سخت بوده و از نسبت استحکام به وزن مطلوبی برخوردارند، اما بازار گسترده ورق‌های فلزی در صنایع همواره استفاده از ورق‌هایی با استحکام بالاتر را مقرون به صرفه می‌سازد و امروزه ورق‌های چند لایه به سرعت جانشین ورق‌های معمول شده است. با این وجود به دلیل نقصان دانش و تجربه در شکل‌پذیری مواد جدید، هنوز مسیر طولانی در رسیدن به استفاده وسیع این مواد در مقیاس صنعتی وجود دارد. توسعه فرآیند تولید بهینه در شکل‌دهی ورق‌های چند لایه فلزی، نیازمند فهم و دانش کاملی از عیوب به وجود آمده حین شکل‌دادن ورق‌های فلزی است. نمونه‌ای از این عیوب در شکل ۱-۱ آورده شده است.

^۱ Sheet Metal Forming

شکل دادن ورق‌های فلزی به اشکال مطلوب اغلب منجر به وقوع ناپایداری مادی و ساختاری می‌شوند که معرف محدوده شکل‌پذیری ورق‌های فلزی‌اند و عاملی محدودکننده در تولید محسوب می‌شود. برای یک ورق فلزی کشیده شده، دو شکل از گلوئی موضعی^۱ و پخشی^۲ اتفاق می‌افتد در حالی که گلوئی پخشی قبل از گلوئی موضعی به وقوع می‌پیوندد که در پی آن پارگی در ورق‌های فلزی ایجاد خواهد شد. بر این اساس تعیین معیاری مشخص در تعیین کرنش‌های موضعی می‌تواند راهگشای تعیین پیش‌بینی شکست و وقوع پارگی در ورق‌های فلزی باشد. در ادامه این فصل خلاصه‌ای از تحقیقات سالهای گذشته در انتخاب معیارهای پیش‌بینی شکل‌پذیری ورق‌ها گردآوری شده است.



شکل ۱-۱- عیوب به وجود آمده در شکل دادن ورق‌های فلزی

^۱ Localized Necking

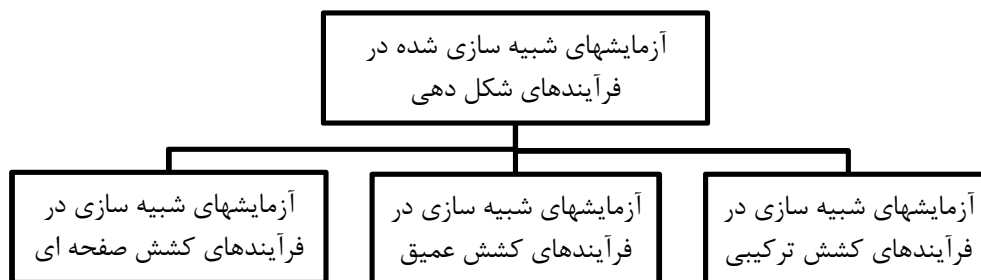
^۲ Diffused Necking

۲-۱- تعیین شکل پذیری ورق‌های فلزی

شکل‌پذیری، قابلیت ورق‌های فلزی در تغییر شکل پلاستیک دائمی به فرم دلخواه است به گونه‌ای که در آن آسیبی مشاهده نشود. در پایان قرن نوزدهم و با رشد و توسعه تکنولوژی شکل‌دادن ورق‌های فلزی، شکل‌پذیری ورق‌های فلزی به عنوان سر فصلی مهم در تحقیقات مطرح شد. جزئیات ارائه شده از این تحقیقات را می‌توان در مراجع [۱-۳] یافت. شماری از اولین محققین علاقه‌مند در این زمینه بسمر، پارکرز، آدامسون، کانسیدر [۴] و اریکسن [۵] بودند که بعدها تحقیقات آنها بوسیله دانشمندان دیگری ادامه پیدا کرد تا آنجایی که روش‌های مختلفی برای تعیین شکل‌پذیری ورق‌های فلزی توسعه یافت.

۱-۲-۱- روش‌های بر پایه آزمایش‌های شبیه‌سازی شده

فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی را می‌توان در دو نوع اصلی از تغییر شکل: کشش^۱ و خمش^۲ [۶] طبقه‌بندی کرد و البته فرآیند کشش خود شامل دو زیر مجموعه اتساع^۳ و کشش عمیق^۴ است. آزمایش‌های شکل‌دهی مختلف و مخصوصی برای هر یک از حالات تغییر شکل اشاره شده توسعه یافته‌اند. به گونه‌ای که در فرآیند کشش، آزمایش‌های شبیه‌سازی شده برای کشش صفحه‌ای، کشش عمیق و کشش ترکیبی وجود دارد. در شکل ۲-۱، جزئیاتی از آزمایش‌های شبیه‌سازی شده در مقالات [۱، ۳، ۷] آورده شده است.



شکل ۲-۱- آزمایش‌های شکل‌دهی مخصوص در حالات تغییر شکل متفاوت

^۱ Drawing

^۲ Bending

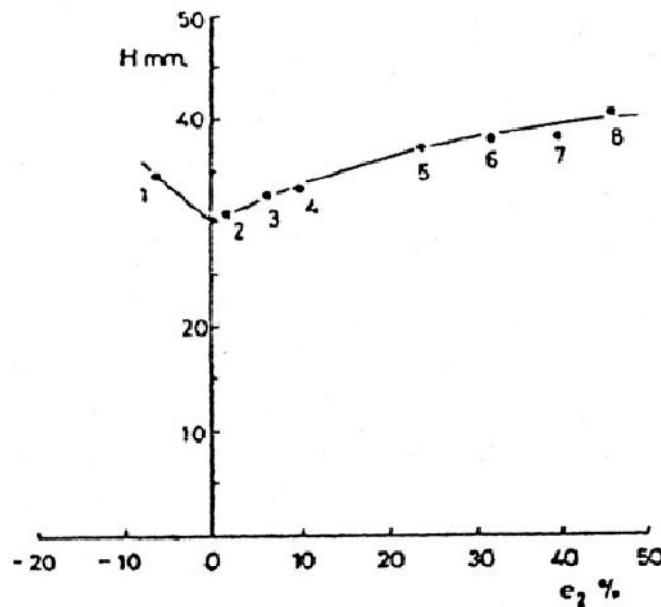
^۳ Stretching

^۴ Deep drawing

۱-۲-۲- روش ارتفاع حدی گنبد^۱

برپایه مشاهدات در یورس [۸] و قوش [۹]، با اندازه‌گیری ارتفاع گنبد حاصله از کشش با سنبه سرکروی^۲، در نمونه‌های مستطیلی و یا نمونه‌های ساخته شده بر اساس طرح ناکازیما، کمترین کرنش در لحظه شکست، به عنوان معیار شکل‌پذیری پیشنهاد شد. با رسم منحنی از نقاط بدست آمده در نتیجه آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌هایی با اندازه عرض متفاوت، نموداری مشابه با شکل ۱-۳ حاصل می‌شود [۱۰]. بعدها روش‌های اصلاح شده ای توسط محققین انگلیسی تحت عنوان آزمایش کشش پارگی و همچنین توسط محققین آمریکایی تحت عنوان روش ارتفاع حدی گنبد توسعه یافت.

ارتفاع بدست آمده از نمونه‌ی مرتبط با کرنش صفحه‌ای به عنوان شاخص شکل‌پذیری شناخته می‌شود که با عنوان LDH_0 معرفی می‌شود. این ارتفاع کمترین مقدار در بین سایر مقادیر بدست آمده از نمونه‌های دیگر است. و عرض نمونه مرتبط با حالت کرنش صفحه‌ای به عنوان یکی از مشخصه‌های ماده تعیین می‌گردد. علیرغم مزایای این روش، به دلیل پراکندگی زیاد نتایج در مقادیر LDH_0 و همچنین شمار بالای آزمایش‌های تجربی، کمتر در صنعت استفاده می‌شود.



شکل ۱-۳- منحنی ارتفاع ناحیه گنبدی [۱۰]

¹ Limit Dome Height (LDH) Method

² Hemi-spherical punch