بسم الله الرحمن الرحيم

مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی نوشیروانی
دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان:

بررسی تجربی و شبیه سازی اجزاء محدود اثر نرخ کرنش بر نمودار حد شکل دهی ورق فولادی ST14

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

استاد راهنما:
دکتر سید جمال حسینی‌پور

استاد مشاور:
دکتر حامد دیلمی عضدی
مهندس عبدالحمید گرجی

نگارش:
محسن مسلمی

شهریور ۸۸

تشکر و قدردانی

سپاس بیکران پروردگارم را، که مرا یاری نمود تا این تحقیق را به پایان رسانده و حاصل کار را تدوین نمایم. لذا پیش از هر گفتار، سپاس و تقدیر از کلیه سرورانی که در طول انجام این تحقیق به نحوی یاری گرم بودند را برخود لازم و برایشان سزا می دانم.

از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر حسینی پور که زحمت راهنمایی این تحقیق و همچنین نقد و بررسی آن را بر عهده داشتند کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای دکتر دیلمی، استاد مشاور اینجانب، که در شناخت موضوع و فهم مطلب و همچنین دیگر مراحل پروژه از هیچ کوششی دریغ نورزیدند سپاسگذاری می کنم.

از جناب آقای مهندس رفیعی نیا و مسئولین محترم کارگاه دانشگاه علم و صنعت اراک که در آماده سازی نمونه‌ها با اینجانب همکاری نمودند کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای مهندس قاسمی وکارکنان شرکت فرازمان که در ساخت قالب مرا یاری رساندند کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم. از جناب آقای مهندس گرجی که در مراحل تست به من یاری رساندند نیز کمال تشکر را دارم.

در آخر تا ابد قدردان همدلی ها، همیاری ها، و تشویق های پدر و مادر عزیزم، خواهران و برادران نازنینم می باشم.

حاشا که من به موسم گل ترکِ می، کنم — من لاف عقل میزنم این کار کِی کنم

مطرب کجاست تا همه محصول زهد و علم — در کار چنگ و بربط و آواز نی کنم

از قیل و قال مدرسه حالی دلم گرفت — یک چند نیز خدمت معشوق و می، کنم

کی بود در زمانه وفا جامِ می بیار — تا من حکایت جم و کاووس کی کنم

از نامه سیاه نترسم که روز حشر — با فیض لطف او صد از این نامه طی کنم

کو پیک صبح تا گله های شب فراق — با آن خجسته طالع و فرخنده پی کنم

این جان عاریت که به حافظ سپرد دوست — روزی رُخش ببینم و تسلیم وی کنم

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم که همواره دعایشان بدرقه راهم بوده

و

مرحوم دکتر علیرضا صفی خانی

چکیده

نمودار حد شکل دهی[1] یکی از نمودارهای کاربردی در طراحی قالب ورقهای فلزی در فرآیند شکل دهی ورق می باشند. تا زمانیکه کرنشهای اصلی پایین این منحنی در نمودار حد شکل دهی قرار دارند، در آن ناحیه از فلز، گلویی و پارگی رخ نمی‌دهد و در صورت قرارگیری در بالای آن خرابی رخ می‌دهد. کاربرد نمودارهای حد شکل دهی شامل طراحی قطعه، بهینه سازی طراحی قالب، آزمایش قالب وکنترل کیفیت در حین تولید می باشد.

نرخ کرنش در نمودارهای حد شکل دهی از جمله فاکتورهای مهم در شکل‌دهی ورقهاست و تعیین کننده سرعت پرس برای شکل دهی است.

در این تحقیق اثر نرخ کرنش بر نمودار حد شکل دهی ورق فولادی St14 به طور تجربی و شبیه سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از حالت کشش خارج از صفحه استفاده شده و آزمایشات در سه سرعت مختلف صورت گرفته‌اند.

اختلاف بین نمودار حد شکل دهی در سه سرعت مختلف ناشی از شرایط اصطکاکی بوده و یا دقت در انجام آزمایشات بوده است. همچنین جهت انجام شبیه سازی از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. در شبیه سازی از مدل دو شاخه ای شدن برای مشخص کردن زمان پارگی استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصل از شبیه سازی و کار تجربی با هم مقایسه شده اند. نتایج تجربی و شبیه سازی تطابق نسبتا خوبی با هم داشته و اختلاف اندک بین نتایج تجربی و شبیه سازی ناشی از حاشیه امنیت بالای تئوری دوشاخه ای شدن بوده است.

در این تحقیق مشخص شد که سرعتهای در محدوده‌ی پایین شکل دهی تاثیر چندانی در نمودار حد شکل دهی و حد تنش شکل دهی ندارد.

1- Forming Limit Diagram

فهرست

تشکر و قدردانی ..... أ
تقدیم ..... ب
چکیده ..... ت
فهرست ..... ث
فهرست اشکال ..... ح
فهرست جداول ..... د

فصل اول- مقدمه ۱
۱-۱ عیوب موجود در شکل دهی ورقهای فلزی ۳
۱-۱-۱ پارگی (ترک خوردگی) ۴
۱-۱-۲ کمانش و چروکیدگی ۴
۱-۱-۳ واپیچش ۵
۱-۱-۴ سطح نامطلوب قطعه ۵
۱-۲ انواع روشهای آزمون شکل پذیری ۵
۱-۲-۱ آزمونهای ذاتی ۶
۱-۲-۱-۱ آزمون کشش تک محوری ۶
۱-۲-۱-۲ آزمون کشش دومحوری مارسینیاک ۸
۱-۲-۱-۳ آزمون بالج ۹
۱-۲-۲ آزمونهای شباهتی(شبیه سازی) ۹
۱-۲-۲-۱ تست اولسن و تست اریکسون ۱۰
۱-۲-۲-۲ تست خارج از صفحه هکر ۱۱
۱-۲-۲-۳ تست انبساط سوراخ ۱۱
۱-۲-۲-۴ تست سوئیفت ۱۲
۱-۳ نمودار حد شکل دهی ۱۳
۱-۳-۱ تعیین نمودارهای حد شکل دهی ۱۵
۱-۳-۲ شبکه بندی ورق ۱۷
۱-۳-۳ اندازه گیری کرنشها از روی دایره های تغییر شکل یافته ۱۹
۱-۴ نمودار حد تنش شکل دهی ۱۹
۱-۴-۱ کاربرد نمودارهای حد شکل‌دهی در طراحی قطعه وتحلیل اجزاء محدود ۲۰
۱-۴-۲ کاربرد نمودارهای حد شکل‌دهی در بهینه سازی طراحی قالب ۲۱
۱-۴-۳ کاربردهای نمودارهای حد شکل‌دهی در آزمایش قالب ۲۲
۱-۴-۴ کاربردهای نمودارهای حد شکل دهی در عیب‌یابی قالبهای فلزی کششی و کنترل کیفیت در حین تولید ۲۳
۱-۵ مدل گوشه یا دو شاخه ای شدن ۲۴
۱-۶ مروری بر پژوهشهای انجام شده در زمینه نمودارهای حد شکل دهی ۲۵
۱-۶-۱ تاریخچه منحنی حد شکل دهی ۲۵
۱-۷ منحنی حد شکل دهی تنش ۲۸

۱-۷-۱ محاسبه نمودار حد شکل دهی تنش ۳۰
۱-۸ اهداف این پروژه ۳۲

فصل دوم- بررسی تجربی نمودار حد شکل دهی ۳۳
۲-۱ ساخت قالب ۳۴
۲-۲ آماده سازی ورقها ۳۷
۲-۳ شبکه بندی ورقها ۴۰
۲-۴ تست هکر ۴۰
۲-۵ اندازه گیری کرنشهای حدی ۴۱

فصل سوم- مدلسازی اجزاء محدود ۴۴
۳-۱ نحوه انجام مدلسازی اجزاء محدود ۴۵
۳-۲ ایجاد مدل هندسی ۴۵
۳-۳ خواص و رفتار مکانیکی ماده ۴۷
۳-۴ مش بندی مدل ۴۸
۳-۴-۱ خواص المان ۴۹
۳-۵ انتخاب مدل تماسی ۵۰
۳-۶ شرایط مرزی و بارگذاری ۵۰
۳-۷ مراحل رسم نمودار حد شکل دهی ۵۱

فصل چهارم- نتایج و بحث ۵۵
۴-۱ نتایج تجربی حاصل از آزمایشات ۵۶
۴-۲ نتایج حاصل از شبیه سازی ۶۲
۴-۳ مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و کار تجربی ۶۴

فصل پنجم- نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۲
۵-۱ نتیجه گیری ۷۳
۵-۲ پیشنهادات ۷۴
منابع ۷۵
پیوست ۱ ..... ۷۸

فهرست اشکال

شکل(۱-۱) ترکیبی از عملیات مختلف روی قطعه ۳
شکل(۱-۲) ابعاد استاندارد نمونه آزمون کشش ۷
شکل(۱-۳) نمونه ای از منحنی تنش-کرنش مهندسی و حقیقی حاصل از آزمون کشش ۷
شکل(۱-۴) حالت شماتیک قالب بندی آزمون مارسینیاک ۸
شکل(۱-۵) حالت شماتیکی از آزمون بالج ۹
شکل(۱-۶) ابعاد و اندازه ها در تست اولسن ۱۰
شکل(۱-۷) ابعاد استاندارد تست هکر ۱۱
شکل(۱-۸) تست انبساط سوراخ ۱۲
شکل(۱-۹) تست سوئیفت ۱۳
شکل(۱-۱۰) نمونه ای از نمودار حد شکل دهی فولاد ۱۴
شکل(۱-۱۱) اندازه گیری کرنش و نمودار حد شکل دهی برای نوعی فولاد ۱۶
شکل(۱-۱۲) نمونه ای از FLD برای جنس AKDQ ۱۷
شکل(۱-۱۳) نوار شفاف مدرج(نوار مایلر) ۱۹
شکل(۱-۱۴) مناطق مختلف نمودار حد شکل‌دهی ۲۱
شکل (۱-۱۵) مناطق مختلف نمودار حد شکل دهی ۲۲
شکل (۱-۱۶) ایجاد زانویی در منحنی کرنش ضخامتی بر حسب زمان ۲۴
شکل (۱-۱۷) تغییرات مشتق دوم کرنش ضخامتی نسبت به زمان ۲۵
شکل(۱-۱۸) هندسه مورد استفاده برای مسیر کرنشهای مختلف ۲۶
شکل(۱-۱۹) تاثیر پیش کرنش و تغییرات مسیر کرنش بر نمودار حد شکل دهی ۲۹
شکل(۲-۱) طرح شماتیک حالت مونتاژ شده قالب ۳۴
شکل (۲-۲) مقایسه ترمزهای کششی ۳۵
شکل (۲-۳) قسمتهای مختلف قالب- الف: سنبه ب- ماتریس ج- ورقگیر ۳۶
شکل (۲-۴) شماتیک قالب ۳۶
شکل (۲-۵) مجموعه قالب ۳۶
شکل(۲-۶) منحنی تنش- کرنش مهندسی حاصل از تست کشش برای نمونه در راستای نورد ۳۸
شکل(۲-۷) هندسه نمونه های مورد استفاده در آزمایشات تجربی ۳۹
شکل(۲-۸) نمونه های شبکه بندی شده نوع A ۴۰
شکل(۲-۹) مجموعه پرس و قالب ۴۱
شکل (۲-۱۰) گلویی ایجاد شده در ورق پس از شکل دهی ۴۲
شکل(۲-۱۱) نمونه های شکل گرفته با سرعت 10mm/min ۴۳
شکل(۳-۱) حالت شماتیک تست هکر ۴۶
شکل (۳-۲) حالت مونتاژ شده قطعات در ABAQUS ۴۶
شکل(۳-۳) منحنی تنش- کرنش حقیقی ورق فولادی ST14 ..... ۴۷
شکل(۳-۴) حالت مش بندی شده، مجموعه قالب، سنبه، ورقگیر و ورق ۴۹
شکل(۳-۵) نمودار الف)ضخامت و ب)کرنش پلاستیک بر حسب زمان برای نمونه ۲۰۰×۲۰۰ ..... ۵۱
شکل(۳-۶) نمودار کرنش در راستای ضخامت بر حسب زمان ۵۲

شکل(۳-۷) نمودار مشتق دوم کرنش ضخامتی بر حسب زمان ۵۳
شکل(۴-۱) نمونه های شکل گرفته با سرعت 10mm/min ۵۶
شکل(۴-۲) محل پارگی در نمونه هایی با ابعاد 200×200 و 125×200 ..... ۵۷
شکل(۴-۳) تغییر شکل شبکه بندی و تبدیل شدن به بیضی ۵۸
شکل(۴-۴) نمودار FLD نظیر جدول ۵۹
شکل(۴-۵) مقایسه نتایج تجربی با FLC ارائه شده در توسط تانگ و هورا ۵۹
شکل(۴-۶) مقایسه FLD حاصل از سه سرعت مختلف ۶۰
شکل(۴-۷) مقایسه FLSD حاصل از نتایج تجربی و FLSD حاصل از نتایج تانگ و هورا ۶۱
شکل(۴-۸) مقایسه منحنیهای FLSD حاصل از سرعتهای مختلف ۶۱
شکل(۴-۹) منحنی حد شکل دهی فولاد St14 حاصل از شبیه سازی ۶۲
شکل(۴-۱۰) منحنی حد شکل دهی الف) 200mm/min ،ب) 100mm/min ۶۳
شکل (۴-۱۱) مقایسه منحنیهای FLD حاصل از سرعت مختلف ۶۳
شکل(۴-۱۲) مقایسه منحنی حد شکل دهی تنش حاصل شبیه سازی برای سرعتهای مختلف ۶۴
شکل (۴-۱۳) مقایسه منحنی بار – جابجایی تجربی و شبیه سازی در سرعت ۲۰۰ میلیمتر بر دقیقه ۶۵
شکل(۴-۱۴) مقایسه منحنی FLD فولاد St14 حاصل از شبیه سازی و کار تجربی سرعت ۱۰ میلیمتر بر دقیقه ۶۵
شکل(۴-۱۵) مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی ۶۶
شکل(۴-۱۶) مقایسه منحنی FLD فولاد St14 حاصل از شبیه سازی و کار تجربی سرعت ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه ۶۷
شکل(۴-۱۷) مقایسه منحنی FLD فولاد St14 حاصل از شبیه سازی و کار تجربی سرعت ۲۰۰ میلیمتر بر دقیقه ۶۷
شکل(۴-۱۸) مقایسه منحنی FLSD فولاد St14 حاصل از شبیه سازی و کار تجربی سرعت ۱۰ میلیمتر بر دقیقه ۶۸
شکل(۴-۱۹) مقایسه منحنی FLSD فولاد St14 حاصل از شبیه سازی و کار تجربی سرعت ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه ۶۸
شکل(۴-۲۰) مقایسه منحنی FLSD فولاد St14 حاصل از شبیه سازی و کار تجربی سرعت ۲۰۰ میلیمتر بر دقیقه ۶۹
شکل(۴-۲۱) مقایسه نمودار حد شکل دهی در سرعت ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه و ۵ متر بر ثانیه ۷۰
شکل(۴-۲۲) مقایسه نمودار حد تنش شکل دهی در سرعت ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه و ۵ متر بر ثانیه ۷۱

فهرست جداول

جدول(۲-۱) ترکیب شیمیایی نمونه ورق St14 برحسب درصد وزنی ۳۷
جدول(۲-۲) نتایج آزمون کشش در دمای محیط ۳۷
جدول(۳-۱) پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی ۴۸
جدول(۳-۲) مقادیر مربوط ناهمسانگردی ۴۸
جدول (۴-۱) نتایج حاصل از اندازه گیری کرنشها ۵۹

فصل اول

مقدمه

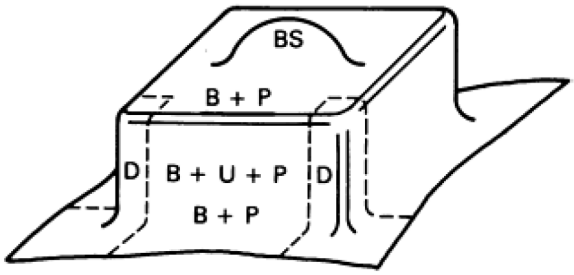
ورقهای فولادی کم کربن کاربرد گسترده‌ای در صنعت، خصوصا صنعت خودرو سازی دارند. بنابراین مطالعه در مورد شکل پذیری این ورقها امری لازم و ضروری است. یکی از این روشها بررسی نمودارهای حد شکل دهی است(FLD[1]). داشتن اطلاعات کافی در مورد شکل پذیری ورقها یکی از مهمترین پارامترهای لازم برای موفقیت آمیز بودن یک فرایند شکل دهی است.

نمودارهای حد شکل دهی ابزار مناسبی برای مطالعه شکل پذیری و قابلیت کشش ورقهاست که در این فصل به معرفی آن پرداخته می‌شود. شکل دهی ورقهای فلزی فرایند تبدیل یک ورق فلزی تخت به شکل مورد نظر است بدون اینکه ورق دچار ترک خوردگی شود و یا اینکه گلویی رخ دهد.

این فرایند ممکن است یک فرایند ساده باشد، مانند خمکاری و یا اینکه یک فرایند پیچیده قالبگیری باشد. در فرایندهای پیچیده ورق درون یک قالب قرار می‌گیرد و به کمک ورقگیر گرفته می‌شود. حرکت ورق به درون قالب توسط ورقگیر کنترل می‌شود.[1]

1 - Forming Limit Diagram

فرایندهای شکل‌دهی ورقهای فلزی تنوع بالایی دارند بنابراین یک تست ساده نمی‌تواند خواص و رفتار مواد را نشان دهد. بنابراین شناسایی خواص مواد و بررسی دقیق فرایند برای تولید قطعه سالم ضروری است. روشهای شکل دهی پیچیده زیادی وجود دارد اما کلیه این روشها ترکیب یا ترتیبی از عملیات پایه شکل دهی –خمکاری[۱]، شکل دهی اتساعی[۲]، کشش، و سکه زنی هستند. شکل(۱-۱) مثالی بر این امر می‌باشد.[1]



شکل(۱-۱) ترکیبی از عملیات مختلف روی قطعه[1]
B, bending; BS, biaxial stretching; D, drawing; P, plane-strain stretching; U, unbending (straightening).

این قطعه در گوشه ها نیاز به عملیات کشش دارد، در قسمت گنبدی شکل عملیات کشش دو محوری نیاز است، در دیواره ها خمکاری، باز کردن خم و کشش کرنش صفحه‌ای، در بالا و پائین دیواره‌ها نیز خمکاری و کشش کرنش صفحه‌ای نیاز است.

۱-۱ عیوب موجود در شکل دهی ورقهای فلزی

مهمترین عیوبی که در شکل دهی ورقهای فلزی رخ می‌دهد عبارتند از: پارگی[۳] (ترک)، چروک خوردگی و کمانش[۴]، اعوجاج و تغییر ابعادی[۵] و سطح نامطلوب.

1 - Bending
2 - Stretching
1- Fracture
2- Buckling and Wrinkling.
3- Shape Distortion.

۱-۱-۱ پارگی (ترک خوردگی)

زمانی رخ می‌دهد که قطعه در معرض نیروهای کشش یا برشی بیش از حد تحمل خود قرار گیرد. در کشش ابتدا ورق در یک منطقه شروع به نازک شدن می‌کند و با ادامه فرایند تغییر شکل در یک ناحیه متمرکز می‌شود که منجر به گلویی و در نهایت پارگی می‌شود. گلویی شدن قطعه در حالت کلی باعث شکست می‌شود زیرا یک عیب واضح و قابل رویت است و باعث کاهش استحکام قطعه نیز می‌شود. بیشتر تستهایی که برای بررسی شکل پذیری به کار می‌روند، با در نظر گرفتن پارگی خواص ورق را بررسی می‌کنند. در برش، پارگی می‌تواند بدون رخداد گلویی اتفاق بیافتد. در این عملیات، ورق توسط یک لبه چاقویی که نیروی برش را اعمال می‌کند، بریده می‌شود. نمونه های بارزی از این نوع پارگی در قطعه زنی و اصلاح قطعات[1] مشاهده می‌شود.[1]

۱-۱-۲ کمانش و چروکیدگی

در یک فرایند قالب گیری معمولی، سنبه با ورق تماس پیدا کرده، ورق را کشیده و به داخل حفره قالب می‌برد. لبه ورق وارد منطقه‌ای می‌شود که محیط کوچکتری دارد، این امر منجر به ایجاد یک تنش فشاری در جهت محیطی می‌شود. اگر این تنش به یک حد بحرانی برسد (که این حد بحرانی به خواص ورق و ضخامت آن بستگی دارد) برآمدگیها و فرورفتگیهای ناچیزی ایجاد می‌کند که چین خوردگی گفته می‌شود. این چین خوردگیها ممکن است تبدیل به برجستگیهای مشخصی شوند و یا حالت موجدار به خود گیرند که به آن چروکیدگی گفته می‌شود که ناشی از کم بودن نیروی ورقگیر است.[1]

1 - Trimming

۱-۱-۳ واپیچش

در فرایندهای شکل دهی ورق به کمک نیروهای وارده دچار تغییر شکل الاستیک و پلاستیک می-شود. به محض برداشتن نیروهای خارجی تنشهای الاستیک قطعه آزاد می‌شوند. در برخی از مناطق این تنشها با کمی تغییر ابعادی، کاملا آزاد میشوند. به هر حال در مناطقی که تحت خمش قرار گرفته اند به دلیل تغییرات ضخامت، تغییرات تنش الاستیک رخ می‌دهد. بنابراین تنشهای موجود در لایه های سطحی ورق با تنشهای موجود در لایه های داخلی ورق اختلاف دارند. اگر این تنشها مقید نشوند و یا توسط هندسه قطعه مهار نشوند، آزاد می‌شوند که منجر به تغییر ابعادی، اعوجاج و یا برگشت فنری می‌شوند.[1]

۱-۱-۴ سطح نامطلوب قطعه

فلزات با تغییر شکل زیاد، خصوصا فلزات دارای دانه های درشت اغلب سطح زبری مانند پوست پرتقال ایجاد می‌کنند که این حالت در قطعات را نمی‌توان نادیده گرفت. یکی دیگر از مشکلات سطوح نامناسب، که در فلزاتی رخ می‌دهد که دارای نقطه تسلیم مشخصی هستند، این است که در این فلزات ماده تا چند درصد بیشتر از نقطه تسلیم کشیده می‌شود و هیچ افزایشی در نیروی کشش اتفاق نمی‌افتد. در اینگونه فلزات تغییر شکل در نواحی کرنش کم و در ناحیه‌ای با نام خطوط لودر و یا کرنشهای انبساطی متمرکز می‌شوند. این عیوب در سطح کرنش متوسط یا بالا ناپدید می‌شوند ولی تقریبا کل قطعات دارای مناطقی با سطح کرنش کم می‌باشند. این عیوب ظاهر بدی ایجاد می-کنند و از طریق رنگ کردن نیز نمی‌توان آنها را پوشاند.[1]

۱-۲ انواع روشهای آزمون شکل پذیری

آزمونهای شکل پذیری مواد به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

آزمونهای ذاتی[1] و آزمونهای شباهتی[2](شبیه سازی)

آزمونهای ذاتی، خواص پایه ماده که مربوط به شکل پذیری ماده است را اندازه گیری می‌کند اما در آزمونهای شباهتی، ماده در شرایطی مشابه شرایط فرایند مورد نظر، دارد قرار می‌گیرد.

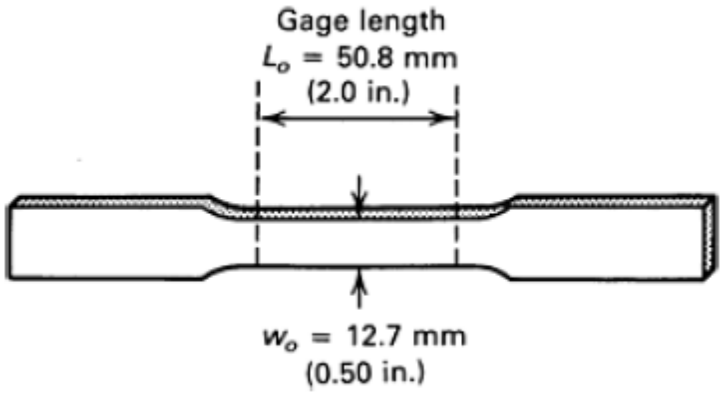
۱-۲-۱ آزمونهای ذاتی

نتایج حاصل از این آزمونهای نسبت به پارامترهایی از قبیل ضخامت، صافی سطح، اصطکاک و... حساسیتی ندارند. مهمترین و پرکاربردترین نمونه از این آزمون را می‌توان آزمون کشش ساده نام برد که خواص مواد مورد نیاز را برای محدوده‌ی گسترده‌ای از فرآیندهای شکل دهی، فراهم می‌کند. تست کشش کرنش صفحه ای، آزمون مارسینیاک، آزمون بالج، آزمون پیچش ورق و آزمون سختی نمونه هایی از این نوع آزمونها می‌باشند

۱-۲-۱-۱ آزمون کشش تک محوری

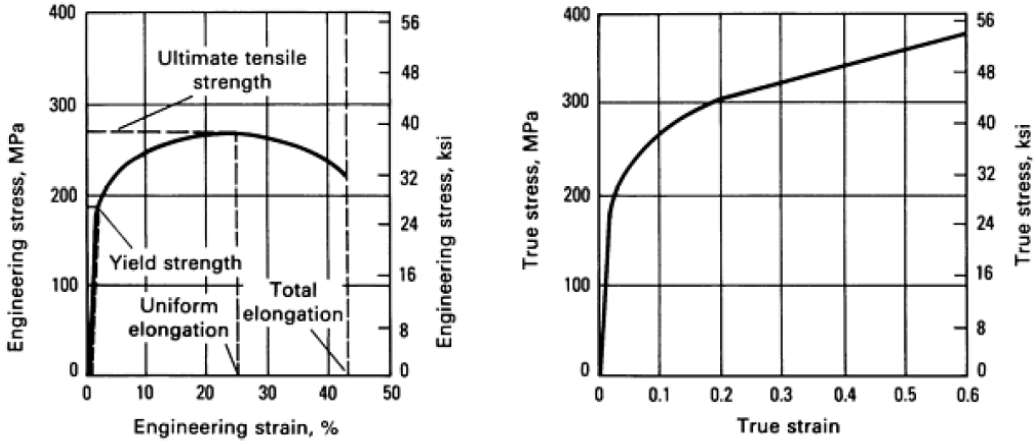
پرکاربردترین آزمون موجود در شکل پذیری ورقهای فلزی است. در این آزمون نمونه ای با ابعاد مشابه شکل(۱-۲) بین دو فک دستگاه قرار می‌گیرد و تا مرحله پارگی کشیده می‌شود و اطلاعات نیرو_جابجایی لحظه به لحظه ثبت می‌شود و سپس این اطلاعات به تنش-کرنش مهندسی یا حقیقی تبدیل می‌شوند.شکل(۱-۳)

1- Intrinsic test
2- Simulative test



شکل(۱-۲) ابعاد استاندارد نمونه آزمون کشش[1]

در طول فرایند نورد ورق، عیوب، ناخالصیها ودانه‌ها (دانه بندی) در راستای نورد افزایش طول می‌دهند. این امر سبب می‌شود که ورقها در جهات مختلف خواص متفاوتی داشته باشند بنابراین در آزمون ورق، ورق را در سه جهت ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد تست می‌کنند که در نتیجه می توان پارامترهای مربوط به ناهمسانگردی را نیز اندازه گیری کرد.

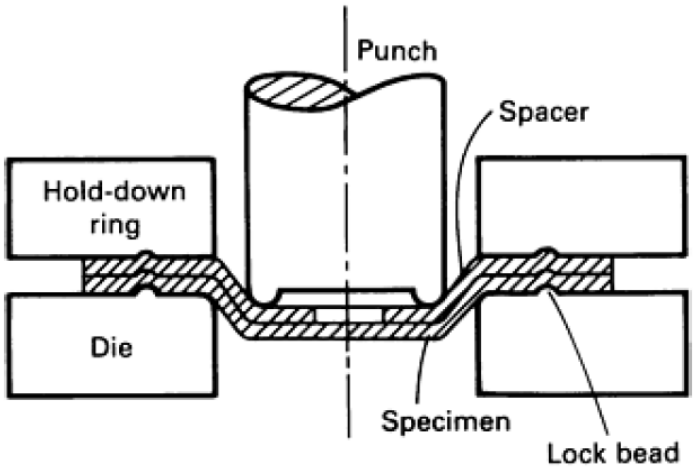


شکل(۱-۳) نمونه ای از منحنی تنش-کرنش مهندسی و حقیقی حاصل از آزمون کشش[1]

در آزمون کشش ابتدا نیرو به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس تا مرحله شکست کاهش می یابد. این امر بدلیل متمرکز شدن تغییر شکل است که باعث کاهش سطح مقطع می‌شود.[1]

۱-۲-۱-۲ آزمون کشش دومحوری مارسینیاک

در این آزمون یک ورق از جنس مورد نظر توسط یک سنبه استوانه‌ای کشیده می‌شود که یک کشش دو محوری را ایجاد می‌کند. همانطور که در شکل(۱-۴) آمده فرورفتگی در مرکز سنبه برای کاهش اصطکاک است.



شکل(۱-۴) حالت شماتیک قالب بندی آزمون مارسینیاک[1]

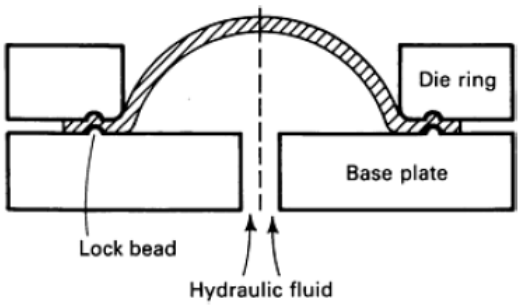
در این آزمون یک صفحه جدا کننده بین سنبه و ورق قرار دارد. این صفحه از جنس ورق مورد آزمایش است و یک سوراخ در وسط صفحه قرار دارد. نقش این صفحه تغییر دادن جهت اصطکاک وارد بر سطح ورق است. زمانیکه از این صفحه استفاده نمی‌شود، اصطکاک سطح مخالف حرکت ورق روی سنبه است و این امر حداکثر کرنش قابل دستیابی را کاهش می‌دهد. این صفحه نیز در طول فرایند همراه با قطعه اصلی تغییر شکل می‌دهد و سوراخ موجود در مرکز آن تغییر شکل آن را ساده‌تر می‌کند.[1]

از جمله کاربردهای این آزمون می‌توان موارد زیر را نام برد:

- تعیین منحنی حد شکل دهی
- تعیین کرنشهای حدی ماده در تغییر شکلهای دو محوری و بدون اصطکاک
- بررسی عیوبی از قبیل ناخالصی از طریق ایجاد کرنشهای حدی

۱-۲-۱-۳ آزمون بالج

همانطور که در شکل(۱-۵) مشاهده می‌شود در این آزمون اطراف ورق توسط یک قالب کـه بـه شـکل یک حلقه می‌باشد، گرفته می‌شود و به کمک یـک پـرس هیـدرولیک فـشار روغـن بـه سـمت مقابـل اعمال می‌شود.



شکل(۱-۵) حالت شماتیکی از آزمون بالج[1]

در این آزمون بعد از اعمال فشار روغن ورق به شکل کروی درآمده، تنش‌ها و کرنش‌هـا را مـی‌تـوان از روی میزان انحنا، میزان کشیدگی و فشار سیال محاسبه کرد[1].

از جمله کاربرد های این آزمون می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تعیین خواص مواد در کشش دو محوری
- آزمایش مواد تا کرنشهای بالاتر نسبت به آزمون کشش تک محوری

۱-۲-۲ آزمونهای شباهتی(شبیه سازی)

این آزمونها اطلاعات محدود و خاصی را که نسبت به ضخامت، شـرایط سـطح، روغنکـاری، هندسـه و نوع ابزار بندی حساس هستند، فراهم می‌کند. این اطلاعات معمولا مربوط به یـک نـوع از فراینـدهای شکل دهی می‌باشند. برای بسیاری از فرایندهای شکل دهـی، آزمونهـایی کـه فراینـد را شـبیه سـازی می‌کنند، بـسیار مفیـدتر و مناسـب‌تـر از آزمونهـای ذاتـی هـستند.در ایـن آزمونهـا قطعـه در معـرض شرایطی مشابه حالت فرایند اصلی قرار می‌گیرد و شامل پارامترهـایی هـستند کـه درآزمونهـای ذاتـی

وجود ندارند از قبیل خم، واخم[1] و اصطکاک بین سطوح قالب و ورق. بدلیل وجود پارامترهای فراوان وموثر در آزمون، این آزمونها تکرار پذیری کمتری نسبت به آزمونهای ذاتی دارند و باید با دقت و کنترل بیشتری انجام گیرند. تست خمش ساده، تست خمش-کشش، تست اولسن و اریکسون، تست خارج از صفحه هکر، تست LDH[2]، تست انبساط سوراخ و تست سوئیفت نمونه‌هایی از تست‌های این روش می‌باشند.[1]

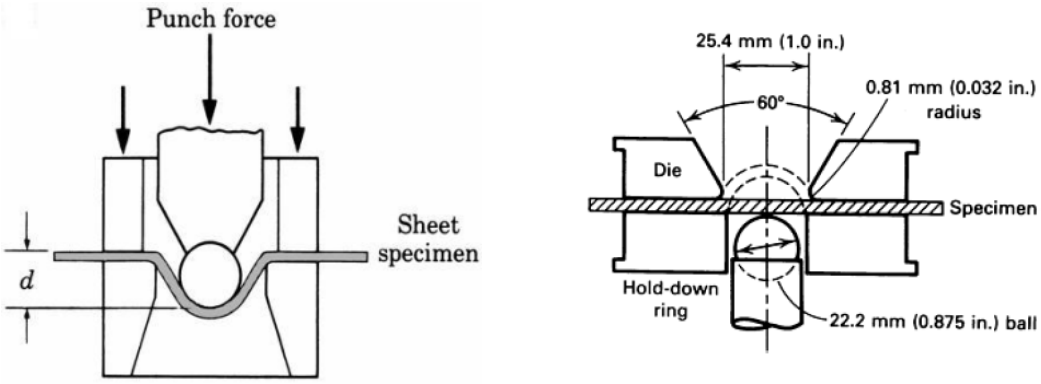
۱-۲-۲-۱ تست اولسن[3] و تست اریکسون[4]

این دو تست مشابه هم هستند و تنها اختلاف آنها در ابعاد قالب و ابزار بندی است.[1]

اولسن: قطر کره ۲۲/۵mm و قطر قالب ۲۵/۴mm

اریکسن: قطر کره ۲۰mm و قطر قالب ۲۷ mm (این تست بیشتر در اروپا استفاده می‌شود).

شکل(۱-۶) شماتیکی از این تست را نشان می‌دهد.



شکل(۱-۶) ابعاد و اندازه ها در تست اولسن[1]

در هردو تست ارتفاع کره در لحظه شکست به عنوان معیار شکل پذیری شناخته می‌شود. ارتفاع کشیدگی کره در حدود ۰/۳ تا ۰/۵ میلیمتر است.[1]

1 - Un Bending
2 - Limit Dome Height
3 - Olsen test
4 - Erichsen Test