



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان:

بررسی نمودار حدشکل دهی (FLD) در حالت گرم ورق آلومینیوم آلیاژی
۵۰۸۳ تجاری

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

اساتید راهنما:

دکتر سید جمال حسینی پور

دکتر حمید باصری

استاد مشاور:

مهندس اصغر شمسی سربند

نگارش:

احسان سلیمانی

تقدیم به

خانواده عزیزم

تشکر و قدردانی

ای که با نامت جهان آغاز شد دفتر ما هم به نامت باز شد

اینک که به لطف خداوند متعال، پس از یک سال تلاش مداوم موفق به انجام این پژوهش شده‌ام، بر خود لازم می‌دانم تا از اساتید محترم، جناب آقایان دکتر سید جمال حسینی‌پور و دکتر حمید باصری، اساتید راهنمای این پایان‌نامه که از هیچ کوششی در راستای انجام این پژوهش دریغ نفرموده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. اینجانب بر خود می‌بالم که در محضر اساتید محترم گروه مکانیک- ساخت و تولید این دانشگاه حضور داشته و از آنان بهره علمی برده‌ام. همچنین از مساعدت‌ها و راهنمایی‌های جناب آقای مهندس اصغر شمسی سریند به عنوان استاد مشاور و حسین رضا محمدلو به عنوان همکار، کمال تشکر را دارم.

در آخر تا ابد قدردان همدلی‌ها، همیاری‌ها، و تشویق‌های پدر و مادر عزیزم و خواهر مهربانم می‌باشم. سلامتی و بهروزی همه این عزیزان را آرزومندم.

احسان سلیمانی

آذر ۱۳۹۰

چکیده

در این پایان نامه منحنی حد شکل دهی (FLD) آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ در حالت گرم به دست آمده و اثر تغییرات دما در نرخ کرنش ثابت و تغییرات نرخ کرنش در دمای ثابت بر منحنی حد شکل دهی، تغییر طول ماده قبل از شکست و مکانیزم شکست مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از روش فرم دهی با دمش گاز^۱ بهره گرفته شده است و به کمک قالب های بیضی شکل با نسبت های قطری متفاوت، مسیرهای کرنش از حالت کشش دو محوری تا حالت کرنش صفحه ای ایجاد شده است. ابتدا با استفاده از تست بالچ آزاد، روابط تحلیلی و نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS 6.9، خواص ماده مورد نظر در دماهای ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰°C به دست آمده و منحنی فشار مورد نیاز برای ایجاد نرخ کرنش ثابت در حین فرآیند شکل دهی تعیین گردیده است. سپس منحنی های حد شکل دهی در دماهای ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰°C و نرخ کرنش ثابت $0.008 S^{-1}$ به دست آمده و اثر تغییرات دما بر شکل پذیری ماده در نرخ کرنش ثابت بررسی شده است. در ادامه منحنی های حد شکل دهی در دمای ثابت ۵۰۰°C و نرخ کرنش های 0.004 ، 0.006 و $0.008 S^{-1}$ به دست آمده و اثر تغییرات نرخ کرنش بر شکل پذیری ماده در دمای ثابت بررسی شده است.

نتایج به دست آمده نشان می دهد که در نرخ کرنش ثابت افزایش دما تا ۵۰۰°C سبب افزایش منحنی حد شکل-دهی شده و افزایش بیشتر دما تا ۵۵۰°C، سبب کاهش تدریجی منحنی حد شکل دهی می شود. همچنین تغییر دما در نرخ کرنش ثابت بر مکانیزم شکست نمونه های تحت آزمون تاثیرگذار است. بر اساس نتایج، در دمای ثابت کاهش نرخ کرنش نیز سبب افزایش تدریجی کرنش های حدی در تمامی مسیرهای کرنش می شود.

واژگان کلیدی: منحنی حد شکل دهی، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، شکل دهی با دمش گاز، مسیر کرنش

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱ نمودار حد شکل دهی	۲
۲-۱ کاربرد منحنی حد شکل دهی	۵
۳-۱ برآورد منحنی حد شکل دهی	۶
۱-۳-۱ بررسی منحنی حد شکل دهی ورق های فلزی	۶
۲-۳-۱ آزمون های نمودار حد شکل دهی	۹
۳-۳-۱ شبکه بندی نمونه ها	۱۴
۱-۳-۳-۱ طراحی دایره ها	۱۴
۲-۳-۳-۱ روش های چاپ دایره ها	۱۶
۳-۳-۳-۱ انتخاب دایره ها	۱۷
۴-۳-۳-۱ روش های اندازه گیری	۱۷
۴-۱ مروری بر پژوهش های انجام شده	۲۱
۵-۱ شرح مسئله و اهداف تحقیق	۳۰
فصل دوم: پژوهش های تجربی	۳۱
۱-۲ تجهیزات مورد استفاده در روش شکل دهی با دمش گاز	۳۲
۲-۲ مراحل انجام کار	۳۴
۳-۲ قالب	۳۶
۴-۲ خواص ماده	۳۸
۱-۴-۲ ترکیب شیمیایی ماده	۳۸
۲-۴-۲ بررسی خواص مکانیکیماده در حالت گرم	۳۹

۳۹	..... آزمایشات عملی ۱-۲-۴-۲
۴۰	..... محاسبات تحلیلی ۲-۲-۴-۲
۴۰	..... محاسبه توان نرخ کرنش m ۱-۲-۲-۴-۲
۴۱	..... محاسبه تنش شکل دهی ۲-۲-۲-۴-۲
۴۲	..... محاسبه کرنش و نرخ کرنش ۳-۲-۲-۴-۲
۴۲	..... محاسبه ضریب نرخ کرنش K ۴-۲-۲-۴-۲
۴۲	..... آماده سازی نمونه های آزمایشی ۵-۲
۴۳	..... شبکه بندی نمونه ها ۱-۵-۲
۴۴	..... منحنی فشار ۶-۲
۴۵	..... روند انجام آزمایش ۷-۲
۴۵	..... نحوه اندازه گیری کرنش های حدی ۸-۲
۴۷	..... محاسبه نمودار حد شکل دهی تنش ۹-۲
۴۹	..... فصل سوم: مدلسازی اجزاء محدود
۵۰	..... مقدمه ۱-۳
۵۲	..... نحوه انجام مدلسازی اجزاء محدود ۲-۳
۵۳	..... ایجاد مدل هندسی ۳-۳
۵۴	..... خواص و رفتار مکانیکی ماده ۴-۳
۵۵	..... مش بندی مدل ۵-۳
۵۶	..... انتخاب مدل تماسی ۶-۳
۵۷	..... شرایط مرزی و بارگذاری ۷-۳
۵۸	..... شبیه سازی منحنی فشار ۸-۳

۵۹	..... فصل چهارم: نتایج و بحث.....
۶۰	..... ۱-۴ خواص مواد.....
۶۰	..... ۱-۱-۴ مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی.....
۶۲	..... ۱-۱-۴ بررسی تغییرات ارتفاع با زمان.....
۶۳	..... ۲-۱-۴ بررسی توزیع ضخامت.....
۶۴	..... ۲-۱-۴ بررسی توان نرخ کرنش m
۶۵	..... ۱-۲-۱-۴ تغییرات توان نرخ کرنش با ارتفاع گنبد.....
۶۶	..... ۲-۲-۱-۴ اثر دما بر توان نرخ کرنش.....
۶۷	..... ۳-۱-۴ بررسی اثر حرارت بر ثابت K
۶۷	..... ۴-۱-۴ بررسی تنش، کرنش و نرخ کرنش.....
۷۰	..... ۲-۴ بررسی منحنی فشار.....
۷۵	..... ۳-۴ بررسی منحنی حد شکل دهی.....
۷۶	..... ۱-۳-۴ منحنی حد شکل دهی در نرخ کرنش ثابت $0.008 S^{-1}$
۷۹	..... ۲-۳-۴ اثر حرارت بر منحنی حد شکل دهی در نرخ کرنش ثابت.....
۸۰	..... ۳-۳-۴ اثر حرارت بر تغییر طول قبل از شکست.....
۸۲	..... ۴-۳-۴ اثر حرارت بر مکانیزم شکست.....
۸۵	..... ۵-۳-۴ منحنی حد شکل دهی در دمای ثابت.....
۸۷	..... ۶-۳-۴ اثر نرخ کرنش بر منحنی حد شکل دهی در دمای ثابت.....
۸۹	..... ۷-۳-۴ اثر نرخ کرنش بر تغییر طول قبل از شکست.....
۹۰	..... ۸-۳-۴ اثر نرخ کرنش بر مکانیزم شکست.....
۹۱	..... ۴-۴ بررسی منحنی حد تنش شکل دهی.....

۹۱	.....۰.۰۰۸ ثابت کرنش دهی در نرخ کرنش ثابت ۱-۴-۴ اثر حرارت بر منحنی حد تنش شکل دهی در نرخ کرنش ثابت ۰.۰۰۸
۹۲	.....درجه سانتیگراد.....۵۰۰ ثابت در دمای ثابت ۲-۴-۴ اثر نرخ کرنش بر منحنی حد تنش شکل دهی در دمای ثابت ۵۰۰
۹۴	.....فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۵	.....۱-۵ نتیجه گیری
۹۷	.....۲-۵ پیشنهادات
۹۸	.....مراجع
۱۰۱	.....پیوست

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): عیوب ایجاد شده در ورق طی فرآیندهای شکل دهی [۱] ۲
- شکل (۲-۱): نواحی تقسیم بندی شده ی منحنی حد شکل دهی بر اساس عیوب [۱] ۳
- شکل (۳-۱): مسیرهای مختلف بارگذاری در نمودار حد شکل دهی [۵] ۶
- شکل (۴-۱): قالب استفاده شده در آزمون اولسن و اریکسن [۱] ۷
- شکل (۵-۱): آزمون هکر در برآورد شکل پذیری ورق های فلزی [۱] ۸
- شکل (۶-۱): نمونه های استفاده شده توسط هکر برای پوشش محدوده کرنش [۶] ۸
- شکل (۷-۱): نمونه های استفاده شده در تست کشش تک محوره [۱] ۱۰
- شکل (۸-۱): تست بالچ هیدرولیکی [۱] ۱۱
- شکل (۹-۱): شماتیک تست کشش در صفحه (مارسینیاک) [۱] ۱۱
- شکل (۱۰-۱): شماتیک تست کشش خارج از صفحه [۷] ۱۲
- شکل (۱۱-۱): نمونه های مورد استفاده برای ایجاد مسیر های مختلف کرنش [۳] ۱۳
- شکل (۱۲-۱): نمونه های مورد استفاده برای ایجاد مسیر های مختلف کرنش در روش هاسک [۸, ۱] ۱۳
- شکل (۱۳-۱): اشکال قابل استفاده به منظور شبکه بندی در استاندارد ISO12004 [۹] ۱۵
- شکل (۱۴-۱): اشکال قابل استفاده به منظور شبکه بندی در استاندارد ASTM E2218-02 [۹] ۱۶
- شکل (۱۵-۱): نوار مایلر برای اندازه گیری کرنش های حدی [۶] ۱۹
- شکل (۱۶-۱): سیستم تحلیلگر شبکه دایره ای به کمک کامپیوتر [۶] ۲۰
- شکل (۱۷-۱): نمونه های استفاده شده برای ایجاد مسیرهای کرنش [۱۶] ۲۳
- شکل (۱۸-۱): اثر حرارت، توان کارسختی و توان نرخ کرنش بر شکل پذیری آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ [۱۶] ۲۴
- شکل (۱۹-۱): تاثیر حرارت، بر منحنی حد شکل دهی آلیاژهای آلومینیوم ۵۷۵۴، ۵۱۸۲ و ۶۱۱۱ [۱۷] ۲۵
- شکل (۲۰-۱): تاثیر توان کرنش n و توان نرخ کرنش m بر منحنی حد شکل دهی PbSn60 [۱۹] ۲۷

- شکل (۱-۲۱): مقایسه نمونه آلومینیوم آلیاژی قبل و بعد از تست کشش تک محوره در دمای 450°C [۲۲] ۲۹
- شکل (۱-۲): تصویر شماتیک تجهیزات مورد استفاده در روش فرم دهی با دمش گاز ۳۳
- شکل (۲-۲): تجهیزات مورد استفاده در روش فرم دهی با دمش گاز ۳۳
- شکل (۳-۲): سیستم کنترل حرارت متشکل از: کوره، المنت، ترموکوپل، نمایشگر، کنتاکتور و فیوز ۳۵
- شکل (۴-۲): سیستم کنترل فشار متشکل از: رگلاتور پروپرشنال، مانومتر، سنسور فشار و سیستم پردازشگر ۳۵
- شکل (۵-۲): طرح شماتیک فرآیند فرم دهی ورق با دمش گاز [۲۷] ۳۶
- شکل (۶-۲): قالب های مورد استفاده برای ایجاد مسیرهای کرنش در روش دمش گاز با نسبت های قطری (الف) ۱:۱، (ب) ۱:۷، (ج) ۱:۶ و (د) ۱:۴ ۳۸
- شکل (۷-۲): نمونه قطعه بالچ شده با روش دمش گاز توسط قالب دایروی شکل ۴۰
- شکل (۸-۲): نمونه قطعه شبکه بندی شده با روش حکاکی لیزر ۴۳
- شکل (۹-۲): نمونه الگوهای انتخاب شده برای اندازه گیری کرنش بر اساس مناطق پارگی، گلویی و ایمن [۲۹،۳۸] ۴۶
- شکل (۱-۳): طرح شماتیک تست بالچ گاز [۳۰] ۵۳
- شکل (۲-۳): تصویر مونتاژ قالب و ورق برای قالب دایروی ۵۳
- شکل (۳-۳): تصویر مونتاژ قالب و ورق برای قالب بیضی شکل با نسبت قطری ۱:۴ ۵۴
- شکل (۴-۳): نمونه مش بندی شده قالب و ورق برای قالب بیضی شکل ۵۶
- شکل (۱-۴): مقایسه نتایج به دست آمده از آزمون عملی و شبیه سازی اجزاء محدود در دماهای مختلف ۶۱
- شکل (۲-۴): مقایسه نتایج تجربی و مدلسازی اجزاء محدود در منحنی تغییرات ارتفاع با زمان ۶۲
- شکل (۳-۴): مقایسه نتایج تجربی و مدلسازی اجزاء محدود در منحنی توزیع ضخامت ۶۴
- شکل (۴-۴): تغییرات توان نرخ کرنش با ارتفاع گنبد را در دماهای ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰ و 550°C ۶۵
- شکل (۵-۴): تغییرات توان نرخ کرنش با دما ۶۶
- شکل (۶-۴): تغییرات ثابت K با دما ۶۷

- شکل (۷-۴): نمودار تنش- کرنش آلیاژ ۵۰۸۳ در دماهای ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰°C ۶۹
- شکل (۸-۴): نمودار تنش- نرخ کرنش آلیاژ ۵۰۸۳ در دماهای ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰°C ۷۰
- شکل (۹-۴): منحنی فشار- زمان برای نرخ کرنش $0.008 S^{-1}$ در دمای ۴۵۰°C ۷۱
- شکل (۱۰-۴): منحنی فشار- زمان برای نرخ کرنش $0.008 S^{-1}$ در دمای ۵۰۰°C ۷۱
- شکل (۱۱-۴): منحنی فشار- زمان برای نرخ کرنش $0.008 S^{-1}$ در دمای ۵۵۰°C ۷۱
- شکل (۱۲-۴): منحنی فشار- زمان برای نرخ کرنش $0.006 S^{-1}$ در دمای ۵۰۰°C ۷۲
- شکل (۱۳-۴): منحنی فشار- زمان برای نرخ کرنش $0.004 S^{-1}$ در دمای ۵۰۰°C ۷۲
- شکل (۱۴-۴): نمونه های شبیه سازی قالب های دایروی و بیضی شکل با نسبت قطری ۰:۴ برای به دست آوردن منحنی فشار ۷۳
- شکل (۱۵-۴): مقایسه منحنی های فشار- زمان تحلیلی و شبیه سازی در قالب دایروی ۷۳
- شکل (۱۶-۴): مقایسه منحنی های فشار- زمان تحلیلی و شبیه سازی در قالب بیضی شکل با نسبت قطری ۱۰:۴ ۷۴
- شکل (۱۷-۴): نمونه الگوهای انتخاب شده برای اندازه گیری کرنش بر اساس مناطق پارگی، گلوبی و ایمن ۷۵
- شکل (۱۸-۴): منحنی حد شکل دهی آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ با روش دمش گاز در دمای ۴۵۰°C نرخ کرنش $0.008 S^{-1}$ ۷۶
- شکل (۱۹-۴): نمونه های حاصل از آزمون بالچ با دمش گاز در دمای ۴۵۰°C و نرخ کرنش $0.008 S^{-1}$ در نمونه های با نسبت های قطری (الف) ۱:۱، (ب) ۱۰:۷، (ج) ۱۰:۶ و (د) ۱۰:۴ ۷۶
- شکل (۲۰-۴): منحنی حد شکل دهی آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ با روش دمش گاز در دمای ۵۰۰°C نرخ کرنش $0.008 S^{-1}$ ۷۷
- شکل (۲۱-۴): نمونه های حاصل از آزمون بالچ با دمش گاز در دمای ۵۰۰°C و نرخ کرنش $0.008 S^{-1}$ در نمونه های با نسبت های قطری (الف) ۱:۱، (ب) ۱۰:۷، (ج) ۱۰:۶ و (د) ۱۰:۴ ۷۷
- شکل (۲۲-۴): منحنی حد شکل دهی آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ با روش دمش گاز در دمای ۵۵۰°C نرخ کرنش $0.008 S^{-1}$ ۷۸
- شکل (۲۳-۴): نمونه های حاصل از آزمون بالچ با دمش گاز در دمای ۵۵۰°C و نرخ کرنش $0.008 S^{-1}$ در نمونه های با نسبت های قطری (الف) ۱:۱، (ب) ۱۰:۷، (ج) ۱۰:۶ و (د) ۱۰:۴ ۷۸
- شکل (۲۴-۴): اثر حرارت بر منحنی حد شکل دهی آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ را در دمای ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰°C برای نرخ کرنش ثابت $0.008 S^{-1}$ ۸۰

شکل (۴-۲۵): اثر حرارت بر درصد تغییر طول قبل از شکست در نرخ کرنش ثابت $0.008 S^{-1}$ و دماهای $500^{\circ}C$ ، $450^{\circ}C$ و $550^{\circ}C$ در مسیر های مختلف کرنش از حالت کرنش صفحه ای تا کشش دو محوری ۸۱

شکل (۴-۲۶): تصویر شماتیک شکست نرم در مواد بر اثر ایجاد حفره شامل بخش های (الف) اعمال نیروی کشش (ب) ایجاد حفره (ج) اتصال حفره ها به یکدیگر و ایجاد ترک (د) شیوع ترک (ه) پارگی ۸۳

شکل (۴-۲۷): تصویر میکروسکوپی از سطح قطعات تحت آزمون در منطقه گلویی ۸۴

شکل (۴-۲۸): منحنی حد شکل دهی آلومینیوم آلیاژی 5083 با روش دمش گاز در دمای $550^{\circ}C$ نرخ کرنش $0.006 S^{-1}$ ۸۶

شکل (۴-۲۹): نمونه های حاصل از آزمون بالچ با دمش گاز در دمای $500^{\circ}C$ و نرخ کرنش $0.006 S^{-1}$ در نمونه های با نسبت های قطری (الف) ۱:۱، (ب) ۱:۷، (ج) ۱:۶ و (د) ۱:۴ ۸۶

شکل (۴-۳۰): منحنی حد شکل دهی آلومینیوم آلیاژی 5083 با روش دمش گاز در دمای $500^{\circ}C$ نرخ کرنش $0.004 S^{-1}$ ۸۷

شکل (۴-۳۱): نمونه های حاصل از آزمون بالچ با دمش گاز در دمای $500^{\circ}C$ و نرخ کرنش $0.004 S^{-1}$ در نمونه های با نسبت های قطری (الف) ۱:۱، (ب) ۱:۷، (ج) ۱:۶ و (د) ۱:۴ ۸۷

شکل (۴-۳۲): اثر نرخ کرنش بر منحنی حد شکل دهی آلومینیوم آلیاژی 5083 را در دمای ثابت $500^{\circ}C$ ۸۸

شکل (۴-۳۳): اثر تغییر نرخ کرنش بر درصد تغییر طول قبل از شکست در دمای ثابت $500^{\circ}C$ و نرخ کرنش های 0.008 ، 0.006 و $0.004 S^{-1}$ در مسیر های مختلف کرنش ۸۹

شکل (۴-۳۴): تصویر میکروسکوپی از سطح قطعات تحت آزمون در منطقه گلویی در دماهای $500^{\circ}C$ و نرخ کرنش های (الف) 0.004 ، (ب) 0.006 و (ج) 0.008 ۹۰

شکل (۴-۳۵): اثر حرارت بر منحنی حد تنش شکل دهی آلومینیوم آلیاژی 5083 را در دمای $450^{\circ}C$ ، $500^{\circ}C$ و $550^{\circ}C$ ، برای نرخ کرنش ثابت $0.008 S^{-1}$ ۹۲

شکل (۴-۳۶): اثر نرخ کرنش بر منحنی حد تنش شکل دهی آلومینیوم آلیاژی 5083 را در دمای $500^{\circ}C$ ، برای نرخ کرنش های ثابت 0.004 ، 0.006 و $0.008 S^{-1}$ ۹۳

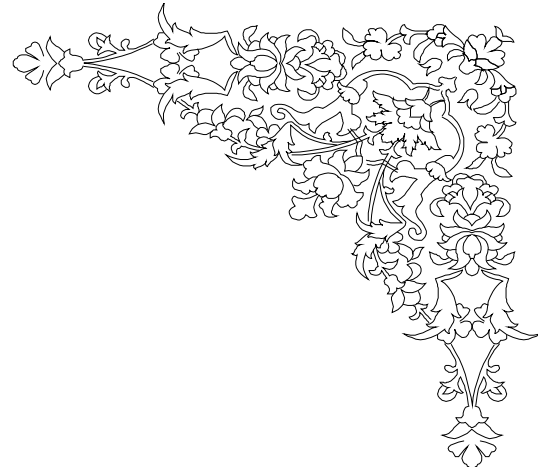
فهرست جداول

جدول (۱-۲): ترکیب شیمیایی آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ ۳۸

جدول (۱-۴) خواص آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳ در دماهای ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰°C ۶۰

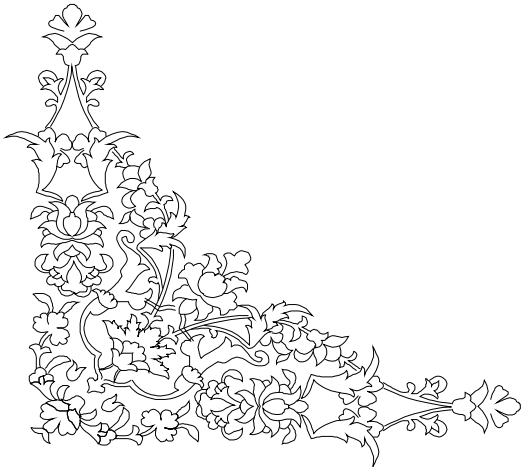
جدول (۲-۴): مقادیر تنش، کرنش و نرخ کرنش در ارتفاعات مختلف در دماهای ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰°C ۶۸

	P
توان کرنش سختی	فشار
توان نرخ کرنش	قطر اولیه دواير حكاكى شده
ضريب استحكام	قطر بزرگ دايره تغيير شكل يافته
تنش حقيقى	قطر كوچك دايره تغيير شكل يافته
كرنش حقيقى	قطر دهانه قالب داىروى
نرخ کرنش	قطر بزرگ دهانه قالب بيضى شكل
كرنش مهندسى	قطر كوچك دهانه قالب بيضى شكل
كرنش در راستاى يك	ارتفاع گنبد
كرنش در راستاى دو	ضخامت اوليه ورق
زمان شكل دهى	ضخامت نهايى ورق
شعاع گنبد	تنش اصلى در راستاى يك
نسبت تنشى	تنش اصلى در راستاى دو
نسبت کرنشى	



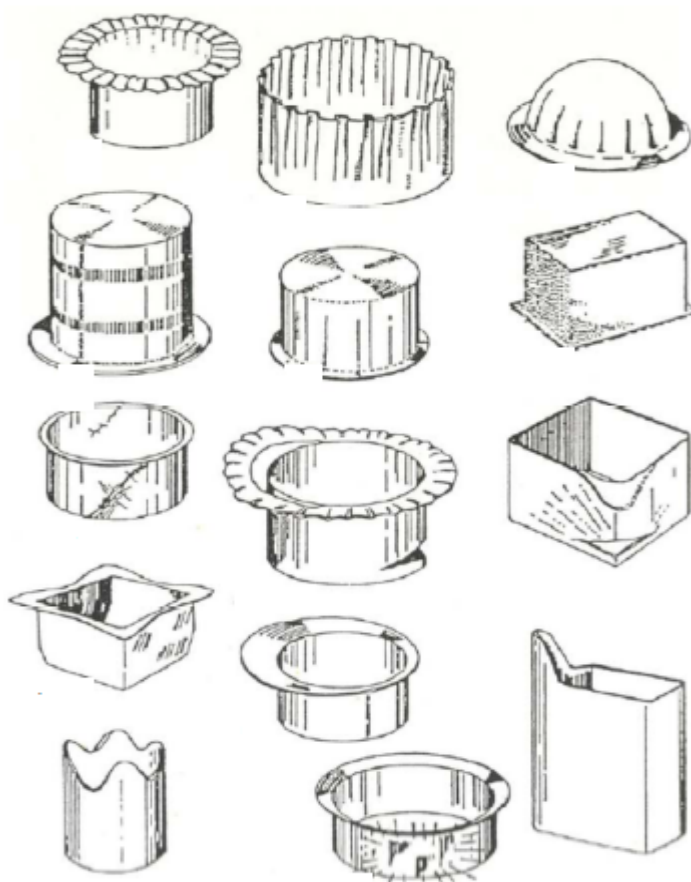
فصل اول

مقدمه



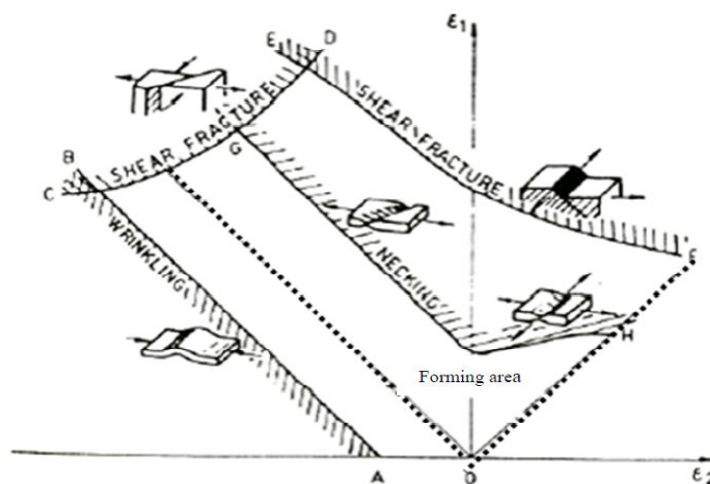
۱-۱ نمودار حد شکل دهی

شکل پذیری یک ورق فلزی، توانایی آن به تغییر شکل در شرایط پلاستیک ایجاد شده بر روی آن بدون هیچ گونه عیبی می‌باشد. عیوب مختلفی در فرآیندهای مختلف شکل دهی وجود دارند که انواع مختلف آن که به دلیل نقص در ساختار ابزار شکل دهی، شرایط روانکاری و یا به دلیل خواص متالورژیکی و مکانیکی ورق ایجاد شده اند در شکل (۱-۱) به طور شماتیک نشان داده شده اند. [۱]



شکل (۱-۱): عیوب ایجاد شده در ورق طی فرآیندهای شکل دهی [۱]

با توجه به مطالب فوق گلوبی شدن، پارگی و چروکیدگی را می‌توان به عنوان معیارهایی به منظور توصیف شکل پذیری ماده بیان کرد [۱]. بر همین اساس مارسینیاک^۱ به منظور بیان شکل پذیری ماده، دیاگرام حد شکل دهی بر اساس کرنش‌های اصلی بزرگتر را با نواحی مشخصی از کرنش‌ها بر پایه نوع عیوب تقسیم بندی کرده است که در شکل (۲-۱) مشاهده می‌شود [۱]. همانطور که مشاهده می‌شود نمودار به نواحی عاری از گلوبی (ناحیه‌ی داخل نمودار ACGHO)، عاری از پارگی (ناحیه داخل نمودار ACDFO) و عاری از چروکیدگی (ناحیه‌ی زیر نمودار AB) تقسیم بندی شده است.



شکل (۲-۱): نواحی تقسیم بندی شده‌ی منحنی حد شکل دهی بر اساس عیوب [۱]

منحنی‌های حد شکل دهی در حقیقت محدوده‌ی کرنش‌هایی است که یک ورق می‌تواند تحمل کند و نشان دهنده ارتباط بین کرنش‌های اصلی بزرگتر ϵ_1 و کوچکتر ϵ_2 می‌باشد. نمودارهای حد شکل دهی در تشخیص مسائل بالفعل و بالقوه‌ی ورقکاری بسیار سودمند واقع شده‌اند. ورق‌هایی را که با شبکه‌های متشکل از دایره‌ها نشانه‌گذاری شده‌اند، می‌توان با استفاده از قالب‌های آزمایشی، یا قالب‌های اصلی که در تولید به کار می‌روند، شکل داد. کرنش‌های موضعی نزدیک به نقطه شکست، یا نقاط مشکوک را می‌توان سنجید و با نمودار

1- Z. Marciniak

حد شکل دهی مقایسه کرد. بدین ترتیب دستیابی به دو هدف ممکن می‌شود. نخست آنکه میتوان نقاط در دسر ساز را شناسایی کرده و شدت مسئله را، حتی در هنگامی که شکست رخ نمی‌دهد سنجید. اگر کرنشهای اندازه گیری شده نزدیک منحنی شکست باشند، احتمالاً شکست بعضی از محصولات از سایش قالب و تغییرات روز به روز دما، نحوه روانکاری، تنظیم قالب ها، یا ضخامت و خواص ورق ناشی می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که در هنگام تولید، بروز مورد شکست در هر ۲۰ قطعه، مشکلی جدی تلقی می‌شود. هدف دوم مقایسه کرنشهای اندازه گیری شده با نمودار حد شکل دهی شناسایی ماهیت مسئله است. در نمودار حد شکل دهی، کمترین مقدار نمودار در راستای عمودی در حالت کرنش صفحه ای دیده می‌شود، بنابراین اگر تغییر شکل در ناحیه بحرانی نزدیک به حالت کرنش صفحه ای باشد، تغییرات روانکاری یا قالبها، که سبب کشیدن بیشتر میشود، سودمند خواهد بود. روانکاری بهتر و گیرش کمتر لبه، کشش را افزایش می‌دهند [۲]. در شکل دهی ورقهای فلزی معمولاً حالت تنش صفحه ای در نظر گرفته می‌شود که دو تنش اصلی σ_1 و σ_2 به هر المان وارد می‌گردد. کرنش هایی که در جهت این تنش ها هستند ϵ_1 و ϵ_2 می‌باشند. علاوه بر کرنشهای فوق، در جهت ضخامت هم کرنش وجود دارد لیکن مرسوم است که منحنی حد شکل پذیری بر اساس کرنشهای موجود در صفحه رسم شود و در واقع نمودار حد شکل دهی نشان دهنده ارتباط بین کرنشهای حدی در این دو جهت است. در هنگام بررسی شکل پذیری ورق اگر ترکیب کرنشهای تمام نقاط ورق در زیر منحنی حد شکل دهی واقع شود ورق بدون پارگی کشیده خواهد شد ولی اگر ترکیب کرنشها در نقاط بحرانی قطعه، بالای این منحنی قرار گیرد ورق مطمئناً پاره خواهد شد و در حقیقت برای موفقیت آمیز بودن عملیات باید ترکیب کرنشهای تمام نقاط ورق زیر منحنی حد شکل دهی واقع شود و قرار گرفتن ترکیب کرنشهای حتی یک نقطه از ورق در بالای منحنی به معنای پارگی ورق در عملیات از همان نقطه خواهد بود. در طراحی عملیات پس از مدل نمودن و به دست آوردن توزیع کرنشها، توزیع کرنشهای بدست آمده با منحنی حد شکل دهی ورق مورد نظر مقایسه

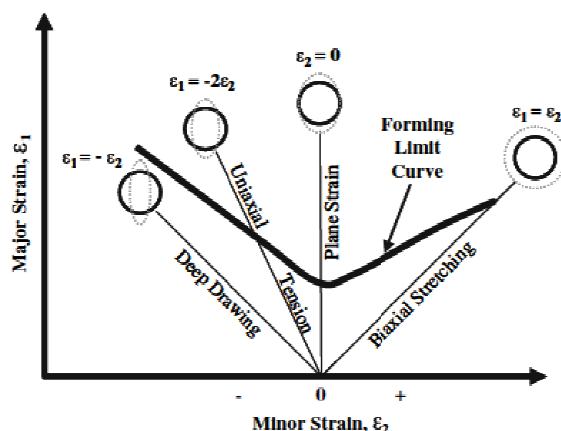
میگردد، اگر ترکیب کرنشهای تمام نقاط ورق در زیر منحنی واقع شد، می‌توان عملیات را موفقیت آمیز دانست [۳].

۱-۲ کاربرد منحنی حد شکل دهی

نمودار حد شکل دهی یکی از نمودارهای کاربردی در طراحی قالب ورقهای فلزی در فرآیند شکل دهی ورق می‌باشند. کاربرد نمودارهای حد شکل دهی شامل طراحی قطعه، بهینه سازی طراحی قالب، آزمایش قالب و کنترل کیفیت در حین تولید می‌باشد. در زیر به نمونه ای از کاربردهای نمودارهای حد شکل دهی اشاره میشود:

در طراحی قطعه فلزی، معیارهای زیادی تأثیر گذار هستند که یکی از آنها، حداکثر عمق کششی است که فراتر از آن در فلز پارگی و یا چروکیدگی رخ می‌دهد. اگر قبل از ساخت قالب و تولید قطعه، این مسأله برای طراح قالب روشن باشد، باعث کمتر شدن هزینه و ضایعات می‌گردد. برای نیل به این مقصود، ابتدا از یک ابزار المان محدود که کار تجزیه و تحلیل ورقها را به عهده دارد استفاده می‌گردد. از نتیجه این تجزیه و تحلیل ها، میتوان کرنش های اصلی و جهات آن را در سطح ورق بدست آورد. مسیرهای مختلف کرنش و شکل دهی در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. نتیجه بدست آمده برای هر المان خاص موجود در ورق را میتوان توسط نمودار حد شکل دهی تجزیه تحلیل کرد و حالت آن المان خاص را بعد از عملیات کشش بدست آورد. به طور مثال اگر المان دارای کرنشهایی باشد که در نمودار حد شکل دهی در ناحیه پارگی نشان داده شده است، آن قسمت از ورق در حین تولید قطعه دارای نقص می‌گردد. لذا یا می‌توان با تغییر در معیارهای مؤثر در ورقکاری و شکل دهی تغییراتی در شکل و سطح نمودار حد شکل دهی داد و یا اینکه شکل و عمق کشش را تغییر داد و یا قطعه را چند مرحله مورد عملیات کشش قرار داد تا شکل نهایی را به خود بگیرد. نمودار حد شکل دهی، در پیش

بینی ایجاد نقص در قطعه کار قبل از تولید کاربرد فراوانی دارد و نه تنها باعث کاهش هزینه در امر تولید قطعه می‌گردد، بلکه سبب بالا رفتن کیفیت ساخت قطعه و قالب مربوط نیز می‌گردد [۴].



شکل (۱-۳): مسیرهای مختلف بارگذاری در نمودار حد شکل دهی [۵]

۱-۳ برآورد منحنی حد شکل دهی

۱-۳-۱ بررسی منحنی حد شکل دهی ورق های فلزی

برای رسم یک منحنی حد شکل دهی نیاز به نقاط مختلفی می‌باشد که هر کدام آنها از یک مسیر بارگذاری خاص بدست می‌آید. یعنی در یک منحنی حد شکل دهی سه ناحیه وجود دارد که عبارتند از:

۱- سمت چپ منحنی حد شکل دهی که در آن کرنش اصلی بزرگتر مثبت و کرنش اصلی کوچکتر منفی می‌باشد.

۲- مرکز منحنی که در آن کرنش اصلی بزرگتر مثبت و کرنش اصلی کوچکتر صفر می‌باشد که به این حالت کرنش صفحه ای گفته می‌شود و معمولاً در نمودارهای حد شکل دهی آن را با FLD_0 نشان می‌دهند.