بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

عنوان:

مطالعه فرآیند کشش عمیق گرم به کمک روش اجزای محدود

اساتید راهنما:

دکتر بهزاد سلطانی

دکتر عباس لقمان

به وسیله:

سید امیر اوصیاء

آذر ۱۳۸۸

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

سپاس فراوان از خدای قادر که توانایی فراگیری علم و دانش را به ما عطا فرمود.
وظیفهٔ خود می‌دانم از تمامی اساتید بزرگوار به ویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد، تشکر و قدردانی نمایم.
از استاد گرامی و بزرگوار جناب آقای دکتر سلطانی به خاطر راهنمایی اینجانب در انجام این پایان‌نامه، نهایت تشکر و سپاس‌گزاری را دارم.
در پایان از خانوادهٔ خود به خصوص پدر و مادر عزیزم که همواره یار و پشتیبان من بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

چکیده

در سالهای اخیر استفاده از آلیاژهای منیزیم در شکل‌دهی ورق فلزی به دلیل چگالی پایین و استحکام بالا، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. از آنجائیکه آلیاژ منیزیم دارای قابلیت شکل‌دهی پایین در دمای اتاق می‌باشد، شکل‌دهی گرم برای تولید قطعات ورقی آلیاژ منیزیم توسعه یافته است. در فصل اول به معرفی فرآیندهای شکل‌دهی ورق و کشش عمیق گرم پرداخته شده است. فصل دوم شامل فرمول‌بندی اجزای محدود غیرخطی فرآیندهای با تغییرشکل بزرگ، حرارت و همچنین تحلیل کوپل مکانیکی- حرارتی برای حل عددی فرآیند کشش عمیق گرم می‌باشد. معادلات متشکله الاستیک- پلاستیک و قیود تماسی نیز در این فصل بیان شده است. در فصل سوم شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق گرم با در نظر گرفتن انتقال حرارت بین ورق با ابزار در یک قالب دایره‌ای در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS/Standard انجام شد. به منظور تأیید نتایج عددی، منحنی‌های نیروی سنبه، توزیع ضخامت و نسبت کشش حدی- دمای شکل‌دهی، با نتایج تجربی و عددی محققان دیگر مقایسه شد. نتایج اجزای محدود و تجربی توافق خوبی با هم داشته و نشان می‌دهند که نسبت کشش حدی با زیاد شدن دمای شکل‌دهی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار نسبت کشش حدی ۲٫۵ در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد بدست آمد. در فصل چهارم پارامترهای مؤثر در فرآیند کشش عمیق گرم مانند انتقال حرارت، ضریب اصطکاک و سرعت سنبه مورد بحث قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که انتقال حرارت نقش مهمی در افزایش قابلیت شکل‌دهی ایفا می‌کند. با مقایسهٔ کشش عمیق گرم همدما با غیرهمدما اثر انتقال حرارت و محل پارگی ورق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر ضریب اصطکاک بر ماکزیمم نیروی سنبه و نسبت کشش حدی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضریب اصطکاک منجر به افزایش نیروی سنبه و کاهش نسبت کشش حدی می‌شود. به علاوه نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای شکل‌دهی، حداکثر ضریب اصطکاک برای تولید قطعهٔ بدون عیب افزایش می‌یابد. در بخش پایانی تأثیر سرعت سنبه بر نسبت کشش حدی بررسی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت سنبه، مقدار نسبت کشش حدی کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی ورق فلزی - کشش عمیق گرم - آلیاژ منیزیم - روش اجزای محدود

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مروری بر فرآیندهای شکل‌دهی ورق و معرفی کشش عمیق گرم

۱-۱. شکل دادن و اهداف آن ۱
۱-۲. فرآیندهای شکل‌دهی فلزات ۲
۱-۲-۱. طبقه‌بندی بر اساس اندازه و شکل قطعه ۲
۱-۲-۱-۱. فرآیندهای شکل‌دهی حجمی ۲
۱-۲-۱-۲. فرآیندهای شکل‌دهی ورق فلزی ۳
۱-۲-۲. طبقه‌بندی بر اساس دما ۳
۱-۲-۲-۱. سردکاری ۳
۱-۲-۲-۲. داغ‌کاری ۳
۱-۲-۲-۳. گرم‌کاری ۴
۱-۳. پارامترهای مؤثر در فرآیندهای شکل‌دهی ۵
۱-۳-۱. ماده قطعهٔ اولیه(شمش) ۵
۱-۳-۲. شرایط ابزار ۵
۱-۳-۳. انتخاب ابزار و تجهیزات ۵
۱-۳-۴. محصول ۶
۱-۳-۵. منطقهٔ تغییرشکل ۶
۱-۳-۶. محیط کار ۶
۱-۴. معرفی فرآیندهای شکل‌دهی ورق فلزی ۶
۱-۴-۱. برشکاری ۶
۱-۴-۲. خمکاری ۷
۱-۴-۳. شکل‌دهی کششی ۷
۱-۴-۴. شکل‌دهی چرخشی ۷
۱-۴-۵. شکل‌دهی انفجاری ۸
۱-۴-۶. کشش عمیق ۸
۱-۴-۶-۱. بررسی نواحی مختلف در فرآیند کشش عمیق ۱۰
۱-۴-۶-۲. قابلیت کشش ورق ۱۱
۱-۴-۶-۳. عوامل مؤثر در فرآیند کشش عمیق ۱۱

۱-۵. کشش عمیق گرم ۱۳
۱-۵-۱. گرم کردن خارجی ۱۵
۱-۵-۲. گرم کردن داخلی ۱۵

فصل دوم: فرمول‌بندی اجزای محدود غیرخطی فرآیندهای با تغییرشکل بزرگ و حرارت

۲-۱. مقدمه‌ای بر روش اجزای محدود ۱۸
۲-۲. تحلیل خطی اجزای محدود ۱۹
۲-۳. تحلیل غیرخطی اجزای محدود ۲۱
۲-۳-۱. تحلیل غیرخطی مادی ۲۱
۲-۳-۲. تحلیل غیرخطی هندسی ۲۲
۲-۳-۳. تحلیل غیرخطی تماسی ۲۳
۲-۴. فرمول‌بندی معادلات نموی مکانیک محیط پیوسته ۲۳
۲-۴-۱. مقدمه ۲۳
۲-۴-۲. اصل کار مجازی ۲۵
۲-۴-۳. نمادگذاری تانسوری ۲۷
۲-۴-۴. گرادیان تغییرشکل، تانسورهای تنش و کرنش ۲۷
۲-۴-۵. فرمول‌بندی لاگرانژی کلی و به هنگام شده محیط پیوسته ۲۹
۲-۵. گسسته‌سازی اجزای محدود معادلات حاکم محیط پیوسته ۳۴
۲-۶. روابط متشکله الاستیک- پلاستیک ۳۷
۲-۶-۱. کرنش حقیقی و مهندسی ۳۷
۲-۶-۲. تنش حقیقی و مهندسی ۳۹
۲-۶-۳. تنش و کرنش انحرافی ۴۳
۲-۶-۴. فرمول‌بندی الاستیک- پلاستیک همسانگرد ۴۴
۲-۶-۴-۱. تابع تسلیم ۴۵
۲-۶-۴-۲. معیار سخت‌شوندگی ۴۷
۲-۶-۴-۳. قانون جریان ۴۹
۲-۶-۵. روش برگشت شعاعی ۵۳
۲-۷. شرایط تماسی ۵۵
۲-۷-۱. اصطکاک در شکل‌دهی فلزات ۵۵
۲-۷-۲. معادلات محیط پیوسته ۵۶
۲-۷-۳. روش پیشنهادی برای حل مسائل تماسی ۵۹

۲-۸. فرمول‌بندی اجزای محدود انتقال حرارت ۶۲
۲-۸-۱. معادلات حاکم بر انتقال حرارت ۶۲
۲-۸-۲. اصل دماهای مجازی ۶۴
۲-۸-۳. معادلات نموی انتقال حرارت ۶۵
۲-۸-۴. گسسته‌سازی اجزای محدود معادلات انتقال حرارت ۶۷
۲-۹. تحلیل کوپل مکانیکی- حرارتی ۶۹
۲-۹-۱. تحلیل کوپل مکانیکی- حرارتی متوالی ۷۰
۲-۹-۲. تحلیل کوپل مکانیکی- حرارتی کامل ۷۰

فصل سوم: حل عددی فرآیند کشش عمیق گرم ورق از جنس آلیاژ منیزیم در یک قالب دایره‌ای با ABAQUS

۳-۱. تاریخچه فرآیند کشش عمیق گرم ۷۲
۳-۲. حل اجزای محدود فرآیند کشش عمیق گرم در ABAQUS ۷۵
۳-۲-۱. هندسه فرآیند کشش عمیق گرم ۷۵
۳-۲-۲. رفتار ماده ۷۷
۳-۲-۳. تحلیل کوپل مکانیکی- حرارتی ۷۹
۳-۲-۴. شرایط تماسی ۸۰
۳-۲-۵. شرایط مرزی و بارگذاری ۸۰
۳-۲-۶. المان تغییرمکان- دما ۸۱
۳-۲-۷. مدل اجزای محدود ۸۳
۳-۲-۸. نتایج تحلیل اجزای محدود ۸۴
۳-۳. مقایسه نتایج شبیه‌سازی در ABAQUS با نتایج تجربی و عددی ۹۸

فصل چهارم: بررسی پارامترهای مؤثر در فرآیند کشش عمیق گرم

۴-۱. تحلیل کشش عمیق گرم همدما و مقایسه با غیرهمدما ۱۰۴
۴-۱-۱. تأثیر انتقال حرارت در بهبود قابلیت شکل‌دهی ۱۰۴
۴-۱-۲. محل نازک‌شدگی و پارگی ورق ۱۰۸
۴-۲. بررسی تأثیر ضریب اصطکاک در فرآیند کشش عمیق گرم ۱۱۱
۴-۲-۱. تأثیر ضریب اصطکاک بر نیروی سنبه ۱۱۱
۴-۲-۲. تأثیر ضریب اصطکاک بر نسبت کشش حدی ۱۱۳
۴-۳. بررسی تأثیر سرعت سنبه در فرآیند کشش عمیق گرم ۱۱۴

نتیجه‌گیری ۱۱۷
پیشنهادات ۱۱۹
منابع و مآخذ ۱۲۰
پیوست ۱۲۳

فهرست جدولها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱. انواع فرآیندهای شکل‌دهی بر اساس دمای کاری قطعه ۴
جدول ۲-۱. فرم انتگرالی و ماتریسی اجزای فرمول‌بندی لاگرانژی کلی ۳۵
جدول ۲-۲. فرم انتگرالی و ماتریسی اجزای فرمول‌بندی لاگرانژی به هنگام‌شده ۳۵
جدول ۲-۳. فرم انتگرالی و ماتریسی اجزای فرمول‌بندی غیرخطی مادی با تغییرشکل کوچک ۳۶
جدول ۲-۴. فرم انتگرالی و ماتریسی بردار بار خارجی در فرمول‌بندی اجزای محدود ۳۶
جدول ۳-۱. هندسهٔ قطعه‌کار و ابزار ۷۶
جدول ۳-۲. خواص عمومی ورق از جنس آلیاژ منیزیم AZ31B ۷۷
جدول ۳-۳. خواص الاستیک ورق از جنس آلیاژ منیزیم AZ31B ۷۷
جدول ۳-۴. خواص حرارتی قطعه‌کار و ابزار ۷۹
جدول ۳-۵. جابجایی سنبه و زمان انجام فرآیند در نسبت کشش‌های مختلف ۸۱
جدول ۳-۶. مقایسهٔ ماکزیمم نیروی سنبه بدست آمده از روش عددی با روش تجربی در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد ۹۹
جدول ۳-۷. مقایسهٔ خطای موجود در نیروی سنبه بدست آمده از روش عددی با روش تجربی ۱۰۰
جدول ۳-۸. مقایسهٔ مینیمم ضخامت ورق بدست آمده از روش عددی با روش تجربی در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد ۱۰۲
جدول ۳-۹. مقایسهٔ خطای موجود در مینیمم ضخامت ورق بدست آمده از روش عددی با روش تجربی ۱۰۲

فهرست شکلها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱. فرآیند شکل‌دهی کششی ورق ۷
شکل ۱-۲. فرآیند شکل‌دهی چرخشی ورق ۸
شکل ۱-۳. فرآیند کشش عمیق قبل و بعد از تغییرشکل ۹
شکل ۱-۴. تنش‌های وارده بر سه ناحیهٔ ورق در فرآیند کشش عمیق ۱۰
شکل ۱-۵. گرم کردن ورق به صورت داخلی و خارجی در فرآیند کشش عمیق گرم ۱۵
شکل ۱-۶. مدل هندسی فرآیند کشش عمیق گرم ۱۶
شکل ۱-۷. ورق تغییرشکل یافته با توزیع حرارت و مقاومت در فرآیند کشش عمیق گرم ۱۷
شکل ۱-۸. تجهیزات تجربی دستگاه پرس برای فرآیند کشش عمیق گرم ۱۷
شکل ۲-۱. ارتجاعی خطی(تغییرمکان‌های بی‌نهایت کوچک) ۲۰
شکل ۲-۲. غیرخطی مادی(تغییرمکان‌های بی‌نهایت کوچک) ۲۲
شکل ۲-۳. غیرخطی هندسی با تغییرمکان و دوران‌های بزرگ ولی کرنش‌های کوچک ۲۲
شکل ۲-۴. غیرخطی هندسی با تغییرمکان، دوران و کرنش‌های بزرگ ۲۳
شکل ۲-۵. تغییر در شرایط مرزی در تغییرمکان Δ ۲۳
شکل ۲-۶. حرکت جسم در مختصات دکارتی از حالت مرجع تا حالت تغییرشکل‌یافته ۲۴
شکل ۲-۷. اثر توان کرنش سختی روی منحنی تنش- کرنش ۴۱
شکل ۲-۸. منطقهٔ تسلیم سه بعدی برای تئوری فون‌میسز ۴۶
شکل ۲-۹. منطقهٔ تسلیم دو بعدی برای تئوری فون‌میسز ۴۶
شکل ۲-۱۰. تغییر سطح تسلیم با تغییرشکل پلاستیک و سخت‌شونگی همسانگرد ۴۸
شکل ۲-۱۱. تغییر سطح تسلیم با تغییرشکل پلاستیک و سخت‌شونگی جنبشی ۴۸
شکل ۲-۱۲. نمایش هندسی جواب تنش در تحلیل الاستیک- پلاستیک(با استفاده از جهات تنش اصلی) ۵۴
شکل ۲-۱۳. تماس بین دو جسم در زمان t ۵۷
شکل ۲-۱۴. تعاریف مورد استفاده در تحلیل تماس ۵۷
شکل ۲-۱۵. شرایط سطح مشترک در تحلیل تماس الف- تماس عمودی ب- تماس مماسی ۵۹
شکل ۲-۱۶. حالت تماس دو بعدی ۶۰
شکل ۲-۱۷. جسم در معرض اثر انتقال حرارت ۶۲
شکل ۲-۱۸. فلوچارت تحلیل کوپل مکانیکی- حرارتی کامل ۷۰

شکل ۳-۱. مدل متقارن محوری فرآیند کشش عمیق گرم در ABAQUS ۷۶
شکل ۳-۲. منحنی تنش- کرنش آلیاژ منیزیم AZ31B در دماهای مختلف..... ۷۸
شکل ۳-۳. تغییر مقاومت تسلیم ورق از جنس آلیاژ منیزیم AZ31B با دما..... ۷۸
شکل ۳-۴. المان هشت گرهی تغییرمکان- دما..... ۸۲
شکل ۳-۵. مدل اجزای محدود..... ۸۳
شکل ۳-۶. توزیع دما در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد در جابجایی‌های مختلف سنبه..... ۸۴
شکل ۳-۷. توزیع دما و کرنش پلاستیک مؤثر در نسبت کشش ۲,۳ و دماهای مختلف..... ۸۶
شکل ۳-۸. توزیع دما و کرنش پلاستیک مؤثر در نسبت کشش ۲,۴ و دماهای مختلف..... ۸۷
شکل ۳-۹. توزیع دما و کرنش پلاستیک مؤثر در نسبت کشش ۲,۵ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد..... ۸۷
شکل ۳-۱۰. منحنی دمای مرکز ورق- جابجایی سنبه در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد..... ۸۸
شکل ۳-۱۱. منحنی نیرو- جابجایی سنبه در نسبت کشش ۲,۳ و دماهای مختلف..... ۸۹
شکل ۳-۱۲. منحنی نیرو- جابجایی سنبه در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد و نسبت کشش‌های مختلف..... ۹۰
شکل ۳-۱۳. منحنی نیرو- جابجایی سنبه در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و نسبت کشش‌های مختلف..... ۹۰
شکل ۳-۱۴. منحنی توزیع ضخامت در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد..... ۹۱
شکل ۳-۱۵. منحنی توزیع ضخامت در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد..... ۹۲
شکل ۳-۱۶. منحنی توزیع ضخامت در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد..... ۹۲
شکل ۳-۱۷. منحنی توزیع ضخامت در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد..... ۹۳
شکل ۳-۱۸. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد..... ۹۴
شکل ۳-۱۹. منحنی نیرو- جابجایی سنبه در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد ۹۴
شکل ۳-۲۰. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۴ و دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد..... ۹۵
شکل ۳-۲۱. منحنی نیرو- جابجایی سنبه در نسبت کشش ۲,۴ و دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد ۹۵
شکل ۳-۲۲. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۵ و دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد..... ۹۶
شکل ۳-۲۳. منحنی نیرو- جابجایی سنبه در نسبت کشش ۲,۵ و دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد ۹۶
شکل ۳-۲۴. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۵ و دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد..... ۹۷

شکل ۳-۲۵. منحنی نیرو- جابجایی سنبه در نسبت کشش ۲,۵ و دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد ۹۷
شکل ۳-۲۶. بررسی تأثیر دمای شکل‌دهی بر نسبت کشش حدی ۹۸
شکل ۳-۲۷. مقایسهٔ منحنی نیرو- جابجایی سنبه در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد با روش‌های تجربی و عددی ۹۹
شکل ۳-۲۸. مقایسهٔ منحنی توزیع ضخامت در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد با روش تجربی ۱۰۰
شکل ۳-۲۹. مقایسهٔ منحنی توزیع ضخامت در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد با روش‌های تجربی و عددی ۱۰۱
شکل ۳-۳۰. مقایسهٔ منحنی توزیع ضخامت در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد با روش‌های تجربی و عددی ۱۰۱
شکل ۳-۳۱. مقایسهٔ منحنی نسبت کشش حدی- دمای شکل‌دهی با روش تجربی ۱۰۳
شکل ۳-۳۲. مقایسهٔ منحنی نسبت کشش حدی- دمای شکل‌دهی با روش‌های تجربی و عددی ۱۰۳
شکل ۴-۱. بررسی تأثیر انتقال حرارت در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۰۵
شکل ۴-۲. بررسی تأثیر انتقال حرارت در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۰۵
شکل ۴-۳. بررسی تأثیر انتقال حرارت در نسبت کشش ۲,۴ و دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۰۶
شکل ۴-۴. بررسی تأثیر انتقال حرارت در نسبت کشش ۲,۴ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۰۶
شکل ۴-۵. بررسی تأثیر انتقال حرارت در نسبت کشش ۲,۵ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۰۷
شکل ۴-۶. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۳ و دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۰۸
شکل ۴-۷. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۴ و دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۰۸
شکل ۴-۸. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۵ و دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۰۹
شکل ۴-۹. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۵ و دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۰۹

شکل ۴-۱۰. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۶ و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۱۰
شکل ۴-۱۱. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۶ و دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد الف- کشش عمیق گرم غیرهمدما ب- کشش عمیق گرم همدما ۱۱۰
شکل ۴-۱۲. منحنی نیرو- جابجایی سنبه در نسبت کشش ۲,۳، دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و ضریب اصطکاک‌های مختلف ۱۱۱
شکل ۴-۱۳. منحنی نیرو- جابجایی سنبه در نسبت کشش ۲,۴، دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و ضریب اصطکاک‌های مختلف ۱۱۲
شکل ۴-۱۴. منحنی نیرو- جابجایی سنبه در نسبت کشش ۲,۵، دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و ضریب اصطکاک‌های مختلف ۱۱۲
شکل ۴-۱۵. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۳، دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد و ضریب اصطکاک ۰,۲ ..... ۱۱۳
شکل ۴-۱۶. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۳، دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و ضریب اصطکاک ۰,۲۲ ..... ۱۱۳
شکل ۴-۱۷. بررسی تأثیر ضریب اصطکاک بر نسبت کشش حدی ۱۱۴
شکل ۴-۱۸. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۳، دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و سرعت سنبه ۲۳ میلیمتر بر ثانیه ۱۱۵
شکل ۴-۱۹. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۴، دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و سرعت سنبه ۱۳ میلیمتر بر ثانیه ۱۱۵
شکل ۴-۲۰. محل پارگی ورق در نسبت کشش ۲,۵، دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و سرعت سنبه ۶ میلیمتر بر ثانیه ۱۱۵
شکل ۴-۲۱. بررسی تأثیر سرعت سنبه بر نسبت کشش حدی ۱۱۶

فهرست علائم و اختصارات

نسبت کشش حدی	LDR
حداکثر قطر ورق	$D_{0,\max}$
قطر سنبه	D_P
انرژی پتانسیل	Π
انرژی کرنشی	Λ
کار	W
بردار نیروی گره‌ای	P
بردار تغییرمکان گره‌ای	U
ماتریس سختی	K
بردار بار خارجی	R
ماتریس تبدیل کرنش- تغییرمکان	B
ماتریس خواص ماده	C
نمو زمان	Δt
تانسور تنش کوشی	σ
نیروی جسمی خارجی	f^B
نیروی سطحی خارجی	f^S
حجم	V
مختصات دکارتی نقطهٔ مادی	x
تغییرمکان مجازی	δU
تانسور کرنش خطی، کرنش انحرافی	e
تانسور گرادیان تغییرشکل	X

C	تانسور تغییرشکل گرین
ε	تانسور کرنش گرین- لاگرانژ
S	تانسور تنش پیولاکرشف نوع دوم، تنش انحرافی
ρ	چگالی
η	تانسور کرنش غیرخطی
F	بردار نیروی‌های نقاط گرهی
ΔU	نمو تغییرمکان
τ	تنش مهندسی
K_L	ماتریس سختی خطی
K_{NL}	ماتریس سختی غیرخطی
H	ماتریس درون‌یابی تغییرمکان
$\bar{\varepsilon}$	کرنش حقیقی
ε_V	کرنش حجمی
k	ضریب مقاومت
n	توان کرنش سختی
D	ماتریس ضرایب الاستیک
E	مدول الاستیسیته
ν	ضریب پواسان
G	مدول برشی
σ_m	تنش میانگین
ε_m	کرنش میانگین
σ_y	مقاومت تسلیم
$d\varepsilon^{pl}$	نرخ کرنش پلاستیک

$\bar{\varepsilon}^{pl}$	کرنش پلاستیک مؤثر
$\bar{\sigma}$	تنش مؤثر
f^C	نیروی تماسی
S_C	سطح تماس
λ	مؤلفه عمودی نیروی سطحی
t	مؤلفه مماسی نیروی سطحی
g	تابع درز
$\dot{u}$	سرعت نسبی
θ	دمای جسم
q	شار حرارتی
k	ضریب هدایت حرارتی
q^B	گرمای تولید شده در واحد حجم
θ^S	دمای سطح جسم
θ_e	دمای محیط
θ_r	دمای منبع تابش
$\delta\theta$	توزیع دمای مجازی
θ'	گرادیان دما
h	ضریب جابجایی
κ	ضریب تابش
$\Re$	بار حرارتی
K^k	ماتریس سختی هدایت
K^c	ماتریس سختی جابجایی
K^r	ماتریس سختی تابش

فصل اول
مروری بر فرآیندهای شکل‌دهی ورق و معرفی کشش عمیق گرم

۱-۱. شکل دادن و اهداف آن

شکل دادن عبارت است از اصول و روشهای تغییرشکل جامدات شکل‌پذیر، با اعمال نیرو به آن. موارد مهمی که در شکل‌دهی مورد بررسی قرار می‌گیرند عبارت‌اند از:

۱- آشنایی با فرآیندهای مختلف شکل‌دهی.

۲- شناخت کمیتها و پارامترهای مؤثر موردنیاز برای مطالعه فرآیندهای شکل‌دهی.

۳- مطالعه و انتخاب مناسب‌ترین روش شکل‌دهی با توجه به خواص مکانیکی ماده و خواص موردنظر محصول در ارتباط با کاربرد آن و هزینهٔ تولید.

۴- تعیین خصوصیات اصلی تجهیزات لازم برای تغییرشکل از لحاظ توان و انتخاب بهینهٔ ابزار و تجهیزات از لحاظ شکل هندسی، ابعاد، مرغوبیت و بازدهی بالای تولید در هر یک از مراحل متوالی تغییرشکل به کمک جمع‌آوری اطلاعات لازم، محاسبه، آزمایش و تحقیق.

۵- طراحی مراحل مختلف شکل‌دهی به کمک قطعاتی با شکل هندسی اولیه ساده و تبدیل آن به شکل نهایی با توجه به کیفیت، زمان و هزینهٔ تولید.

۶- تعیین تنش‌های مؤثر در ناحیهٔ تغییرشکل و همچنین محاسبهٔ نیرو و کار یا انرژی لازم برای رسیدن به حالت پلاستیک در هر یک از روشهای شکل‌دهی.

۷- اتخاذ تدابیر لازم در جهت کاهش هر چه بیشتر نیرو و کار موردنیاز با توجه به صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش زمان تولید، کاهش هزینه‌های تولید، استفاده بهینه از مواد اولیه و افزایش کیفیت محصول در جهت بالا بردن توان رقابت[۱].

امروزه در زمینهٔ تکنولوژی شکل‌دهی، همانند سایر زمینه‌ها، با استفاده از جمع‌آوری تحقیقات علمی و تجربه‌های عملی به دست آمده در مراکز پژوهشی و همچنین مراکز صنعتی، پیشرفتهایی حاصل شده است که همگی موجب افزایش کیفیت و کمیت محصول شده است. هر فرآیند شکل‌دهی فلزات شامل تمام متغیرهای ورودی، از قبیل جنس قطعه یا شمش اولیه و شکل هندسی آن، ابزار شکل دادن(از لحاظ ماده و هندسهٔ آن)، حالت تنش در منطقهٔ تغییرشکل، نوع و نحوهٔ کاربرد ابزار، خصوصیات محصول نهایی و نهایتاً شرایط محیط کارگاه می‌شود. در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات باید ارتباط بین ورودی و خروجی و همچنین تأثیر متغیرهای فرآیند برکیفیت محصول و مسائل اقتصادی آن مورد توجه قرار گیرد. عملیات شکل‌دهی موفق و کسب محصول سالم با شکل و خواص مطلوب، با شناخت کافی از فرآیند شکل‌دهی و خواص فلز به کار رفته امکان‌پذیر خواهد بود[۱].

۱-۲. فرآیندهای شکل‌دهی فلزات

فرآیندهای تغییرشکل فلزات را می‌توان بر اساس اندازهٔ قطعه‌کار و دما طبقه‌بندی نمود که در اینجا به شرح هر کدام از آنها پرداخته می‌شود.

۱-۲-۱. طبقه‌بندی بر اساس اندازه و شکل قطعه

۱-۲-۱-۱. فرآیندهای شکل‌دهی حجمی

این فرآیندها بر روی قطعاتی اعمال می‌شود که نسبت مساحت سطح به ضخامت قطعه کوچک باشد. در طی این فرآیندها، ضخامت یا سطح مقطع جسم تغییر می‌کند. آهنگری، اکستروژن، نورد و کشش سیم از فرآیندهای شکل‌دهی حجمی به شمار می‌روند[۲].

۱-۲-۱-۲. فرآیندهای شکل‌دهی ورق فلزی

در این روش، تغییرشکل بر روی قطعاتی اعمال می‌شود که نسبت سطح قطعه به ضخامت آن بزرگ باشد. برشکاری، خمکاری، شکل‌دهی کششی، شکل‌دهی چرخشی، شکل‌دهی انفجاری و کشش عمیق از فرآیندهای شکل‌دهی ورق محسوب می‌شوند[۲].

۱-۲-۲. طبقه‌بندی بر اساس دما

۱-۲-۲-۱. سردکاری

اگر تغییرشکل پلاستیک در دمای اتاق انجام گیرد به آن سردکاری[۱] گفته می‌شود. سردکاری در فلزات باعث افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری می‌شود. برای افزایش شکل‌پذیری ماده می‌توان از فرآیند بازپخت[۲] در طی فرآیند سردکاری بهره گرفت. در واقع اگر سردکاری بدون بازپخت ادامه یابد، قبل از رسیدن به مرحله نهایی، فلز می‌شکند. به منظور جلوگیری از شکست فلز، می‌توان عملیات سردکاری را درچندین مرحله انجام داد و در صورت‌نیاز در بین مراحل کار عمل بازپخت برروی قطعه انجام گیرد[۲].

۱-۲-۲-۲. داغ‌کاری

اگر تغییر شکل پلاستیک در دمای بالاتر از دمای تبلور مجدد[۳] صورت گیرد به آن داغ‌کاری[۴] می‌گویند. در واقع داغ‌کاری عبارت است از تغییرشکل فلز تحت شرایط دما و نرخ کرنشی که فرآیندهای بازیابی همزمان با تغییر شکل ماده انجام گیرد. در این فرآیند با افزایش دما، انرژی لازم برای تغییرشکل کاهش می‌یابد. حد دمای پایین برای داغ‌کاری یک فلز، پائین‌ترین دمایی است که نرخ تبلور مجدد به اندازه کافی سریع باشد تا از کرنش سختی در آن زمانی که فلز در آن دما قرار می‌گیرد، جلوگیری کند. برای یک فلز، حد دمای پائین داغ‌کاری به پارامترهائی

۱- Cold Working ۲- Annealing

۳- Recrystallisation ۴- Hot Working