دانشکده فنی

گروه مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

بررسی تاثیر نرخ کرنش در تغییرشکل پلاستیک (فروریزش) استوانه‌های جدارنازک تحت بار الکترومغناطیس شعاعی

از:

سارا حاتمی

استادان راهنما :

دکتر ابوالفضل درویزه

دکتر منصور درویزه

استاد مشاور:

دکتر علی باستی

شهریور ۱۳۸۹

تقدیم به پدر و مادر نازنینم، آنان که پشتیبان راهم بوده اند، و شجاعت قدم برداشتن در این راه و همت ادامه دادنش را به من داده اند و همواره دعاهایشان بدرقه راهم بوده است.

اکنون که در سایه‌ی لطف خداوند متعال، این پایان نامه به اتمام رسیده است، بجاست که از پدر و مادر عزیزم به دلیل تشویق ها و پشتیبانی های بی‌دریغشان، از جناب پروفسور دکتر ابوالفضل درویزه و جناب پروفسور دکتر منصور درویزه به دلیل راهنمایی‌های ارزشمندشان از جناب آقای دکتر علی باستی به دلیل کمک های صبورانه‌شان، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

و نیز همچنین از اساتید محترم هیت داوران دکتر غلامرضا زارع پور و دکتر علی چائی بخش کمال تشکر را دارم.

از دوستان عزیزی که به نحوی مرا در انجام این پایان نامه یاری کرده اند تشکر می کنم و برایشان آرزوی سلامت و بهروزی دارم.

فهرست مطالب

فصل اول : پیشگفتار ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ مقدمه ای بر شکل دهی الکترومغناطیسی پوسته ها ۲

۱-۳ نگاهی بر پژوهشهای پیشین ۶

۱-۴ روند انجام این پژوهش ۸

فصل دوم : شکل دهی فلزات با روش های سرعت بالا ۹

۲-۱ مقدمه ۱۰

۲-۲ مزایای روش شکل دهی با سرعت بالا (H.V.F) ۱۰

۲-۳ شکل دهی الکتروهیدرولیکی ۱۱

۲-۴ شکل دهی انفجاری ۱۲

۲-۵ شکل دهی الکترومغناطیس ۱۳

۲-۶ پارامترهای موثر در شکل دهی الکترومغناطیسی ۱۴

۲-۷ متغیرهای مؤثر بر پروسه شکل‌دهی مغناطیسی (Variables in the process) ۱۷

۲-۸ متغیرهای مدار الکتریکی ۱۹

۲-۹ شکل‌پذیری ۱۹

۲-۱۰ منبع انرژی ۲۰

۲-۱۱ کاربردهای فرآیند شکل دهی به الکترومغناطیس ۲۰

فصل سوم : تحلیل تغییر شکل پوسته با استفاده از معادلات حرکت ۲۲

۳-۱ مقدمه ۲۳

۳-۲ بررسی رفتار پلاستیک پوسته های استوانه ای تحت بار استاتیکی ۲۳

۳-۲-۱ مولفه های تنش و کرنش وارد بر پوسته استوانه ای ۲۳

۳-۲-۲ پلاستیسیته و معیار پلاستیک شدن ۲۵

۳-۲-۳ اصل پایداری دراکر – شرط تعامد بردارهای نرخ کرنش ۲۷

۳-۲-۴ تئوریهای فرو ریزش پلاستیک ۲۸

۳-۲-۵ نیروی فروریزش پلاستیک در پوسته استوانه ای جدار نازک ۲۹

۳-۲-۶ بررسی روابط حاکم ۲۹

۳-۲-۷ معیار تسلیم-ممان پلاستیک پوسته ۳۰

۳-۳ بررسی رفتار دینامیک پلاستیک پوسته استوانه ای ۳۳

۳-۳-۱ روابط حاکم برای پوسته های استوانه ای تحت بار دینامیکی ۳۴

۳-۳-۲ روابط پایه برای پوسته ی استوانه ای تحت بار دینامیکی ۳۴

۳-۳-۳ بارگذاری دینامیکی ۳۵

۴-۳-۳ پروفیل سرعت عرضی تغییر شکل ۳۶
۴-۳ بارگذاری ضربه ای ۴۲
فصل چهارم: فشار وارد بر استوانه جدار نازک در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس ۴۵
۴-۱ مقدمه ۴۵
۴-۲ عمق نفوذ ۴۶
۴-۳ جریان قطعه کار ۴۶
۴-۴ پارامترهای مدار معادل ۴۷
۴-۵ معادلات الکترودینامیک ۴۸
۴-۶ فشار مغناطیسی ۴۸
۴-۷ تاثیر طول استوانه بر نحوه توزیع محوری فشار ۵۲
۴-۸ جمع بندی ۵۳
فصل پنجم: تحلیل شکلدهی استوانه های فلزی جدار نازک تحت بار الکترومغناطیس به روش انرژی .. ۵۵
۵-۱ مقدمه ۵۶
۵-۱-۱ تحلیل استوانه فلزی جدار نازک ۵۶
۵-۲ نرخ کار نیروی خارجی ۵۸
۵-۳ نرخ تغییرات انرژی جنبشی ۵۸
۵-۴ نرخ کار پلاستیک (نرخ تغییرات انرژی کرنشی پلاستیک) ۶۰
۵-۵ معیار تسلیم ۶۲
۵-۶ تنشهای منتجه ۶۷
فصل ششم: نتایج و بحث ۷۱
۶-۱ مقدمه ۷۲
۶-۲ تدوین برنامه کامپیوتری در روش انرژی ۷۲
۶-۳ بررسی صحت مدل انرژی ارائه شده ۷۳
۶-۴ نتایج مربوط به استوانه های کوتاه و بلند ۸۱
۶-۴-۱ سرعت تغییرشکل و نرخ کرنش ۸۲
۶-۴-۲ جابجایی مرکز پوسته ۸۶
۶-۴-۳ توزیع کرنشها ۹۰
۶-۴-۴ توزیع و تغییرات تنش و نیروهای منتجه ۹۶
۶-۵ نتیجه گیری و بحث ۱۰۳
۶-۶ پیشنهاد ادامه تحقیقات ۱۰۴
مراجع ۱۰۷

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ تعدادی از کاربردهای صنعتی اخیر روشEMF ۳
شکل ۱-۲ اتصالات T شکل در لوله ها..... ۴
شکل ۱-۳انواعی از تغییرشکل و اتصال استوانه های فلزی..... ۵
شکل ۲-۱ دیاگرام مربوط به مدار الکتریکی واحد شکلدهی مغناطیسی..... ۱۴
شکل ۲-۲ تجهیزات اندازه گیری اندوکتانس..... ۱۵
شکل ۲-۳ تنظیم پین ها برای اندازه گیری سرعت تغییر شکل استوانه..... ۱۶
شکل ۲-۴استوانه ها با خطوط مرجع برای اندازه گیری کرنش..... ۱۷
شکل ۲-۵ تغییرشکل مقطع استوانه..... ۲۰
شکل ۲-۶ استوانه جدارنازک آلومینیومی که علاوه بر انبساط دچار شکست (پارگی) نیز شده است..... ۲۱
شکل ۳-۱ مولفه تنش در حالت سه محوری..... ۲۴
شکل ۳-۲ نیروها و ممان های وارده بر وجوه المانی از پوسته..... ۲۴
شکل ۳-۳ تنش های تعمیم یافته روی یک المان پوسته ی استوانه ای..... ۲۵
شکل ۳-۴ معیار تسلیم..... ۲۶
شکل ۳-۵ سطح تسلیم محدب با قانون عمود بودن سطح تسلیم غیر کوژ..... ۲۷
شکل ۳-۶ نمادهای مورد نیاز در پوسته ی استوانه ای..... ۲۹
شکل ۳-۷ توزیع تنش کامل پلاستیک در دیواره به ضخامت H یک پوسته استوانه ای تحت M_s و N_θ ۳۱
شکل ۳-۸ منحنی دقیق تسلیم ۳۲
شکل ۳-۹ معیار دقیق، و معیارهای کرانه ای اندرتنش (مربعی) محیط ABCD و محیط بر آن برای اثر دوگانه N_θ, M_x ۳۳
شکل ۳-۱۰ معیار تسلیم مربع شکل بر اساس تئوری ترسکا..... ۳۵
شکل ۳-۱۱ بار دینامیکی پله ای..... ۳۶
شکل ۳-۱۲ میدان سرعت شعاعی متقارن محوری برای یک پوسته استوانه ای فاز اول فاز دوم فاز سوم..... ۳۹
شکل ۴-۱ نمای شماتیکی از سامانه شکل دهی الکترومغناطیسی استوانه..... ۴۵
شکل ۴-۲ دیاگرام شماتیک مدار شکلدهی الکترومغناطیس..... ۴۷
شکل ۵-۱ پوسته استوانه ایجدار نازکی به طول $2L$..... ۵۷
شکل ۵-۲ المانی به طول dxوشعاع R در حین تغییرشکل..... ۵۷
شکل ۵-۳ بیضیگون تسلیم..... ۶۳
شکل ۵-۴ شرایط مختلف تنشها برای مقطع پوسته..... ۶۴
شکل ۵-۵ مقایسه بین معادله ۵-۴۱ و معیار ارائه شده در حالت $N_\theta = 0$ ۶۵
شکل ۵-۶ مقایسه رابطه ۵-۴۳ و معیار ارائه شده در حالت $N_s = 0$ ۶۶
شکل ۵-۷ مقایسه بین دو معیار ون مایزز و معیار ارائه شده در حالت $M_s = 0$ ۶۶
شکل ۵-۸ منحنی شماتیک تنش-کرنش برای یک ماده کار سخت شونده ۶۹
شکل ۶-۱ جریان ایجاد شده در سیم پیچ: جریان ۱ شکل دهی در استوانه جدار نازک بلند ، جریان ۲ شکل دهی در قطعه کار کوتاه.... ۷۴

شکل ۶-۲ فشار وارد بر استوانه در طی فرآیند الکترومغناطیس بر حسب زمان ؛ ۱ فشار وارد بر استوانه بلند ۲ فشار وارد بر استوانه کوتاه ۷۵
شکل ۶-۳ کرنش محیطی در نقطه میانی پوسته استوانه ای بلند در طی زمان شکلدهی به ازای توابع توزیع مکانی مختلف در مقایسه با نتایج ارائه شده توسط..... ۷۶
شکل ۶-۴ جابجایی نقطه میانی پوسته استوانه ای کوتاه در طی زمان شکلدهی به ازای توابع توزیع مکانی مختلف..... ۷۷
شکل ۶-۵ پروفیل نهایی تغییر شکل پوسته به ازای توابع توزیع مکانی مختلف..... ۷۸
شکل ۶-۶ جابجایی نقطه میانی استوانه به ازای ایمپالسهای مختلف..... ۷۹
شکل ۶-۷ زمان پایان تغییرشکل به ازای ایمپالسهای مختلف..... ۷۹
شکل ۶-۸ برقراری اصل پایداری نرخ تغییرات انرژی در طول روند حل مساله..... ۸۲
شکل ۶-۹الف- سرعت ایجاد شده در طی فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس برای استوانه بلند ب- سرعت ایجاد شده در طی فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس برای استوانه کوتاه..... ۸۴
شکل ۶-۱۰ الف -نرخ کرنش ایجاد شده در طی فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس در استوانه بلند ب- نرخ کرنش ایجاد شده در طی فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس در استوانه کوتاه..... ۸۵
شکل ۶-۱۱ مقایسه تنش تسلیم دینامیکی و استاتیکی استوانه ی جدار نازک فلزی..... ۸۶
شکل ۶-۱۲ تغییرشکل شعاعی نقطه میانی پوسته ی استوانه ای بلند تحت فشار الکترومغناطیس p_1 ..... ۸۷
شکل ۶-۱۳ تغییرشکل شعاعی نقطه میانی پوسته ی استوانه ای کوتاه تحت فشار الکترومغناطیس p_2 ..... ۸۸
شکل ۶-۱۴ تغییر شکل نهایی پوسته به ازای نسبتهای طولی مختلف در شرایط یکسان..... ۸۹
شکل ۶-۱۵ تاثیر نرخ کرنش در کرنش محیطی ایجاد شده در استوانه بلند در طول زمان..... ۹۰
شکل ۶-۱۶ تاثیر نرخ کرنش در کرنش محیطی ایجاد شده در استوانه کوتاه در طول زمان..... ۹۱
شکل ۶-۱۷ توزیع کرنش محیطی بوجود آمده در طول استوانه در زمان های مختلف برای دو مدل مستقل از نرخ کرنش و وابسته به آن الف -استوانه بلند، ب-استوانه کوتاه..... ۹۳
شکل ۶-۱۸ توزیع کرنش طولی بوجود آمده در طول استوانه در زمان های مختلف برای دو مدل مستقل از نرخ کرنش و وابسته آن ۹۴
الف-استوانه بلند ب-استوانه کوتاه
شکل ۶-۱۹ توزیع انحنای طولی بوجود آمده در طول استوانه در زمان های مختلف برای دو مدل مستقل از نرخ کرنش و وابسته به نرخ کرنش الف .استوانه بلند ب.استوانه کوتاه..... ۹۵
شکل ۶-۲۰ توزیع تنش جریان پلاستیک در طول قطعه کار الف- .استوانه بلند ب- استوانه کوتاه..... ۹۷
شکل ۶-۲۱ چگونگی توزیع مقادیر بی بعد نیروهای منتجه در طول استوانه بلند..... ۹۹
شکل ۶-۲۲ تغییرات مقادیر بی بعد نیروهای منتجه در استوانه بلند بر حسب زمان ۱۰۰
شکل ۶-۲۳ چگونگی توزیع مقادیر بی بعد نیروهای منتجه در طول استوانه کوتاه ۱۰۱
شکل ۶-۲۴ تغییرات مقادیر بی بعد نیروهای منتجه در استوانه کوتاه بر حسب زمان ۱۰۲

فهرست جداول

جدول ۲-۱ مقادیر مقاومت ویژه برخی از فلزات ۱۸
جدول ۶-۱ مشخصات هندسی دو نمونه استوانه ی فلزی جدار نازک با طولهای بلندتر از سیم پیچ شکلدهی و کوتاهتر از آن..... ۷۳
جدول ۶-۲ مقادیر خواص مکانیکی استوانه ها از جنس آلومینیوم $AA6063-T6$ ۷۳
جدول ۶-۳ مشخصات مربوط به سیم پیچ شکلدهی..... ۷۴

چکیده

بررسی تاثیر نرخ کرنش در تغییرشکل پلاستیک استوانه‌های جدارنازک تحت بار الکترومغناطیس شعاعی

سارا حاتمی

شکل‌دهی الکترومغناطیس یک روش شکل‌دهی دینامیکی نرخ بالاست که در آن نرخ کرنش‌های بزرگتر از $10^3\ s^{-1}$ بدست می‌آیند. در این فرآیند، اثر متقابل جریان ایجاد شده در قطعه‌کار و میدان مغناطیسی سیم‌پیچی که در مجاورت آن قرار دارد، باعث تغییرشکل قطعه‌کار می‌گردد.هدف اصلی این پایان نامه بدست آوردن تحلیلی بر پایه‌ی معادله‌ی تعادل انرژی به منظور مدلسازی تغییرشکل پلاستیک استوانه‌های فلزی جدار نازک تحت اثر نیروی الکترومغناطیس است. به این منظور سطح تسلیمی ارائه شده که اثرات متقابل نیروها و ممانهای منتجه‌ی داخلی را در بر می‌گیرد. همچنین با ترکیب مدل سخت شوندگی توانی و مدل کوپر سایموند، اثرات سخت شوندگی کرنشی و نرخ کرنش بطور توامان در نظر گرفته می‌شود. روش ارائه شده امکان درنظر گرفتن ترمهای مختلف انرژی جنبشی و کار پلاستیک را فراهم می‌آورد.

واژه های کلیدی:

شکل‌دهی الکترومغناطیسی، روش انرژی، نرخ کرنش بالا، استوانه‌های جدارنازک، روش تحلیلی.

Abstract

The effect of strain rate on the plastic deformation of thin cylindrical tubes subjected to radial electromagnetic pressure

Sara Hatami

Electromagnetic forming is a dynamic, high strain-rate forming method in which strain-rates of $\geq 10^3$ s^{-1} are achieved. In this process, deformation of the workpiece is driven by the interaction of a current generated in the workpiece with a magnetic field generated by a coil adjacent to the workpiece.
The main objective of this thesis is to develop an analytical method - based on the energy balance equation - to model the plastic deformation of thin metallic cylindrical tubes deformed by the use of electromagnetic forces. A yield criterion is proposed, which involves the coupled effect of the axial and circumferential internal force moment resultants and by using a combination of power-law hardening model and Cowper-Symond flow stress equation, both strain hardening and strain rate effects are included. The proposed method permits a consideration of the influence of the different terms of the kinetic energy and the plastic work of the tube.

Keywords:

Electromagnetic forming (EMF), Energy method, high strain-rate, Thin Cylindrical shell, Analytical method.

۱- فصل اول

پیشگفتار

۱-۱ مقدمه

روزانه رویدادهای بسیاری اتفاق می افتد که در آن سازه های مختلف تحت اثر بارهای دینامیکی قرار می گیرند. برخورد هواپیماها، اتومبیلها، انفجارهای ناگهانی در مخازن تحت فشار، بر خوردها و انفجار راکتها و بمبها از جمله این رویدادها می باشند. از این دیدگاه ها طراحی سازه ها باید طوری انجام شود که در مقابل بارهای دینامیکی استحکام کافی داشته باشد و یا آنکه شکست سازه ها به صورت ایمن انجام شود. اما اثر بارهای ناگهانی روی سازه ها از دیدگاه دیگری نیز قابل تامل است و آن استفاده از این روش انتقال انرژی در فرآیندهای ساخت و تولید است. در فرآیند های مختلف فلز کاری همواره پیدا کردن روش هایی با بازدهی بیشتر نسبت به قطعه کار مورد نظر بوده است و روش های مختلفی نیز برای کار روی فلزات با نرخ انرژی بالا ایجاد گردیده است.

فرآیند شکل دهی با سرعت بالا، فرآیندی است که در آن مقداری انرژی در زمان کوتاهی آزاد می‌شود و قطعه کار در برابر فشار زیادی قرار می‌گیرد. در این روش ماده به سرعت و شتاب بالایی می‌رسد و فرآیند در کسر بسیار کوچکی از ثانیه پایان می‌پذیرد. ابزارهای مورد نیاز در این دانش بر پایه روش آزاد سازی انرژی دسته بندی می شوند. در روش های مختلف فلز کاری با نرخ انرژی بالا، انرژی از یک منبع شیمیایی، الکتریکی یا مکانیکی در زمان بسیار کوتاهی به قطعه کار منتقل می‌شود.

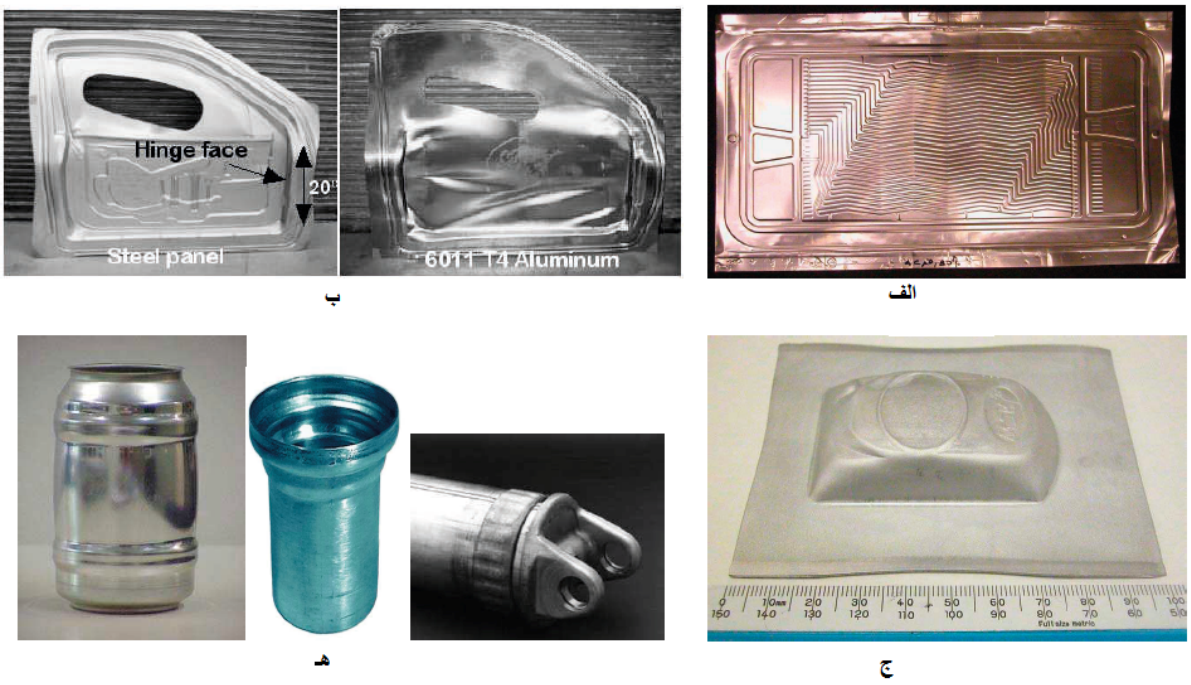
۱-۲ مقدمه ای بر شکل دهی الکترومغناطیسی پوسته ها

در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی (EMF) با بکارگیری انرژی حاصل از تخلیه الکترومغناطیسی به پوسته ها و صفحات فلزی شکل داده می‌شود. از این رو تفاوت اساسی روش فوق با روشهای متداول شکل‌دهی، در بکارگیری موج الکترومغناطیسی به عنوان ابزار فرم دهی می باشد. قابلیت‌های کم نظیر و بعضا منحصر به فرد این روش باعث جلب نظر صنایع مختلفی شده است. توانایی شکل‌دهی قطعات بسیار بزرگ، امکان فرم دهی فلزات با خواص ویژه، حذف نیمی از مجموعه قالب و نتیجتا کاهش پیچیدگی‌های مرتبط با فرآیند طراحی قالب، امکان شکل دهی بدون قالب برخی قطعات ساده، کاهش هزینه و زمان تولید بهبود نسبی خواص مکانیکی و متالوژی پوسته ها پس ازفرآیند شکل دهی و ... از جمله این قابلیت ها می‌با شد.

روش شکل‌دهی الکترومغناطیس در مورد شکلهای خیلی پیچیده و همچنین فلزات با خواص ویژه نظیر فولاد زنگ نزن کار سخت دارای توجیه اقتصادی می باشد.شکل دهی الکترومغناطیسی قادر به تولید قطعات می‌باشد که تولید آنها به روشهای متداول غیر عملی است مزایای اقتصادی استفاده از روش شکل دهی الکترومغناطیسی در این حالت زمانی جلب توجه بیشتر میکند که

عملیات شکل دهی قبل از ماشین کاری قطعات باعث کاهش زمان ماشین کاری ماده مورد نیاز گردد. به این ترتیب بهره گیری از توانمندی های روش شکل دهی الکترومغناطیس در صنایع نظامی و صنایع هوا- فضا مقرون به صرفه می‌باشد.[۱]

شکل دهی الکترومغناطیسی (EMF) کاربرد وسیعی در صنعت دارد.از ابتدای توسعه این روش در عملیاتهای گوناگونی از آن استفاده شده است صنایع هوافضا و اتومبیل سازی از اصلیترین صنایعی‌اند که علاقمند به توسعه این روش هستند. بطور مثال در صنعت اتومبیل سازی تکنولوژی شکل‌دهی سرعت بالا قابلیت کاربرد در ساخت صفحات آلومینیومی بدنهٔ اتومبیل را داراست. تعدادی از کاربردهای صنعتی اخیر روش EMF درشکل ۱-۱ نشان داده شده است. [۲]



ب

الف

ج

هـ

شکل ۱-۱

الف- سازه‌های جدار نازک (سلول سوختی)

ب- کاربرد درصنایع اتومبیل سازی

ج- ساخت بدنه تلفن همراه

هـ- صنایع بسته بندی

استفاده از نیروهای الکترومغناطیسی دفعی با شدت بالا به منظور ایجاد موجهای فشار در سیال نیز از جمله کاربردهای این روش برای شکل‌دهی قطعات فلزی با مقاومت الکتریکی بالا محسوب می‌شود. صنایع الکتریکی این روش را برای مونتاژ ترمینالهای با قطر بالا و نیز برای جا زدن قسمت های فولادی و آلومینیومی در عایق های سرامیکی فوق العاده مفید یافته است.

در حوزه صنایع هسته ای، از این روش برای ایجاد پوشش بروی میله های سوخت هسته ای می توان بهره گرفت. از دیگر کاربردهای این روش، تولید اتصالات T شکل در لوله ها ست. مطابق شکل ۱-۱ ابتدا یک سوراخ جانبی در لوله ایجاد می‌شود

سپس سیم پیچ مارپیچ هم مرکز با سوراخ جانبی قرار می گیرد. با تخلیه خازنها در سیم پیچ اتصال T شکل بین دو استوانه هم جنس یا غیر هم جنس میسر می‌شود. برای مونتاژ سر مخروطی و حلقه های مسی در پرتابه های نظامی این روش به طور موثر می تواند مورد استفاده قرار می گیرد و نیز تبدیل یک استوانه با مقطع دایره به استوانه ای با مقطع مربع با استفاده از روش الکترومغناطیس میسر است.

شکل ۱-۲ اتصالات T شکل در لوله ها

از روش الکترومغناطیس علاوه بر شکل دهی قطعات فلزی، برای اتصالات استوانه های جدار نازک نیز می توان استفاده نمود. همینطور قطعات فلزی مسطح با ضخامت کم را می‌توان بطور آزاد و نیز با استفاده از قالب شکل داد. از کاربردهای فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی به شکل دهی و سر هم بندی همزمان می توان اشاره کرد در شکل دهی و سوراخ کاری به روش الکترومغناطیسی می توان چند عملیات صنعتی را همزمان انجام داد. از دیگر کابردهای این روش در اتصالات حمل کننده است. گشتاور چنین اتصالاتی اغلب با جوش یا پرچ به وجود می‌آید. این روش اتصال از اطمینان کافی برخوردار است، اما ایرادهایی به آن وارد است، برای نمونه در هنگام جوشکاری به دلیل حرارت زیاد، امکان ذوب یکی از فلزات و یا تغییر در ویژگیهای متالوژی آنها وجود دارد. در هنگام پرچکاری نیز ایجاد سوراخ در محل مناسب ممکن است کاری دشوار باشد.از دیگر توانایی های این

روش فشردن می باشد که این روش برای متصل کردن خنک کننده به پاره ای از وسائل برقی سود می‌جویند. بیشتر روشها شکل دهی به صورت تجاری در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۳و۱]

شکل ۱-۳ نمونه ای از قطعاتی است که به روش الکترومغناطیسی شکل دهی شده است. از روش الکترومغناطیسی علاوه بر شکل-دهی قطعات فلزی، برای اتصال استوانه‌های جدار نازک نیز می‌توان استفاده نمود. قطعات فلزی مسطح با ضخامت کم را می‌توان به طور آزاد و نیز با استفاده از قالب شکل داد. [۲]

شکل ۱-۳ انواعی از تغییرشکل و اتصال استوانه های فلزی [۲]

برای تولید قطعاتی که ساخت آنها با روشهای معمول، ناشدنی یا نیازمند عملیات ساخت چند مرحله ای هستیم می‌توانیم از این شیوه بهره گیریم. از روش ایجاد نیروهای الکترومغناطیسی برای مطالعه رفتار سازه‌های تحت بار دفعی می‌توان استفاده کرد. این روش بارگذاری به (Magnetomotive process) موسوم است.

در روش شکل دهی به روش الکترومغناطیس نیازمند طراحی و ساخت دستگاههای مربوطه می‌باشیم. بنابراین امکان تکرار تولید قطعات با مقیاس انبوه در این شیوه وجود دارد. در این روش از شکل دهی، به دلیل محدودیت در ذخیره سازی و ابعاد دستگاه، امکان توانایی انجام کار بر قطعات بزرگ وضخیم را نداریم. موضوع کار این پژوهش بررسی شکل دهی الکترومغناطیسی می باشد. [۱]

۱-۳ نگاهی بر پژوهشهای پیشین

تکنیک شکل‌دهی الکترومغناطیس اولین بار در اواخر ۱۹۵۰ و اوایل ۱۹۶۰ مورد استفاده قرار گرفت. کارهای اولیه ای Furth و

همکارانش در سال ۱۹۵۷-۱۹۵۶ انجام شد [۴و۵]که روابط پایه حاکم بر این فرآیند را بیان می کرد. در ادامه Bridsall و همکارانش در سال ۱۹۶۱، ونیز Meagher در سال ۱۹۶۴ [۶و۷]این فرآیند را بصورت تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند اما نتایج آنها هیچ وقت با نتایج تجربی همخوانی مناسبی نداشت.

گروه دیگری از محققین با رهیافتهای مقدماتی به مدل کردن شکل دهی قطعات با ضخامت کم پرداختند. و در سال ۱۹۶۴-۱۹۶۵، Baines و همکارانش[۸] سیم پیچ و قطعه کار را به عنوان یک مدار مبدل در نظر گرفتند، قطعه کار به صورت یک سیم‌پیچ در تقابل با سیم پیچ شکل‌دهی در نظر گرفته شد و اندوکتانس متقابل، با زمان تغییر نمی‌کند. این تحلیل از تغییر شکل هندسی قطعه کار در طی زمان صرفنظر می کندو نیروی وارد بر قطعه کار را از اندازگیری جریان سیم پیچ بدست می آورد و نتیجه ی این تحلیل عبارت‌های ساده ای برای جریان سیم پیچ و قطعه کار بدست داد. یک معادله تعادل نیرویی نوشته شد، بنابراین معادله حرکت قطعه کار بدست آمد و فشار وارده بر قطعه کار از حل مسئله مقدماتی جریان در دو رسانای موازی محاسبه شد.

از دیگر پیشگامان این عرصه می‌توان به Al-Hasani و همکارانش[۹و۱۰و۱۱] در سال۱۹۷۲ اشاره کرد. آنها سیم‌پیچ و قطعه کار را در یک مدار معادل گردآوری کردند، اندوکتانس و مقاومت این مدار معادل هم تابعی از پارامترهای قطعه کار و هم سیم‌پیچ بود نیروی الکترومغناطیسی با حل معادلات الکترودینامیکی و به روشهای تکراری محاسبات عددی بدست آمد.

سپس Winkler و Jablonski [۱۲]در سال ۱۹۷۸ با حل یک دستگاه معادله دیفرانسیل مرتبه اول بر حسب زمان نشان دادند که روش استفاده از مدار معادل تا چه اندازه موثر است. این دستگاه معادلات دیفرانسیل که شامل مشتقات زمانی جریان در سیم‌پیچ، جریان در قطعه کار و سرعت و شتاب قطعه کار بود، توسط روش رانگ کوتا مرتبه ۴ حل شد.

یکی از مهمترین مشکلات در مدل‌سازی فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس در سه دهه گذشته تبیین ریاضی این فرآیند بود روابط ریاضی معادلات الکترودینامیک – هیدرودینامیک کامل حاکم بسیار پیچیده‌تر از آن هستندکه بتوان یک حل تحلیلی برای آن ارائه داد. در حقیقت حل معادلات حاکم برای مدل‌سازی تغییرات میدان مغناطیسی بواسطه‌ی حرکت قطعه کار تنها به روشهای عددی موثر است. فرآیند شکل دهی شامل مدارهایی با فرکانس بالا و قدرت بالا است که خواص هندسی و الکتریکی آنها با زمان تغییر می‌کند.توسعه روش‌های محاسباتی در طی دهه‌های اخیر توانایی استفاده از الگوریتم‌ها و برنامه‌های سنگین تر را برای حل معادلات پیچیده برای محققین فراهم کرد.

محققینی مثل Takatsu در سال ۱۹۸۷ و همینطور Gourdin و همکارانش، در سال ۱۹۸۹ و همینطور Altynova و همکارانش در سال ۱۹۹۴-۱۹۹۵، تغییرات میدان مغناطیسی با تغییر شکل قطعه کار را مورد بررسی قرار دادند گوردین و آلتینوا به بررسی انبساط دینامیکی حلقه‌های جدار نازک به منظور مطالعه‌ی جریان تنش در نرخ کرنش‌های بالا پرداختند روش آنها بر این

فرض استوار بود که جریان و کرنش روی سطح مقطع نازک قطعه کار به صورت یکنواخت توزیع شده است. این فرض لزوم در نظر گرفتن تاثیرات پراکندگی مغناطیسی را از بین می‌برد. گوردین نیز از روش رانگ کوتا برای حل معادلات دیفرانسیلی بر حسب زمان استفاده کرد. تاکاتسو و همکارانش از تحلیل گوردین یک گام جلوتر رفتند و تاثیرات پراکندگی مغناطیسی را به منظور دستیابی به یک مدل دقیق‌تر در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس ورق‌ها مورد نظر قرار دادند با این کار آنها تغییرات میدان مغناطیسی و جریان بواسطه تغییر شکل قطعه کار را وارد مدل کردند [۱۳و۱۴و۱۵و۱۶].

در سال ۲۰۰۲ Manea و همکارانش[۱۷] یک حل عددی انجام دادند و تاثیرات سرعت در طی فرآیند $(10^3,10^5,10^7)\frac{m}{s}$ شکل دهی الکترومغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند. در این کار نتایج حاصل از حل معادلات ماکسول با در نظر گرفتن قطعه کار به صورت ثابت و قطعه کار متحرک با یکدیگر مقایسه شدند.

در سال ۲۰۰۸ Correia[۱۷] گزارش می‌دهد که نتایج عددی بدست آمده در این محاسبات در سرعت‌های مختلف بیانگر این مطلب هستند که میدان مغناطیسی در یک واسط متحرک، در مقایسه با میدان مغناطیسی در یک واسط ثابت، تغییرات اندکی دارد. این تفاوت تنها برای سرعت‌های خیلی بالا (در حدود 10^7 ثانیه) قابل ملاحظه هستند. او همچنین گزارش می‌دهد که این تفاوت در مقدار میدان مغناطیسی با کوتاه شدن زمان فرآیند کاهش می‌یابد. سرعتی که قطعه کار در طی فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی بدست می‌آورد کمتر از $10^3\frac{m}{s}$ است، و این فرآیند در بازه زمانی چند ده میکرو ثانیه اتفاق می افتد.(که بسیار کمتر از مقداری است که باعث بروز تغییرات قابل توجه حرکت قطعه کار بر میدان مغناطیسی می‌گردد) لذا او نتیجه گرفت که برای فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی محاسبه میدان مغناطیسی با فرض ثابت بودن قطعه کار می‌تواند تقریب بسیار مناسبی باشد.

Thomas و همکارانش[۱۹] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روشهای اصل حساب تغییرات و در نظر گرفتن تغییرات میدان مغناطیس و پتانسیل میدان الکتریکی و تغییر شکل قطعه کار بصورت همزمان، الگوریتمی برای تحلیل شکل دهی قطعات با کرنش‌های محدود بدست آورده‌اند الگوریتم ارائه شده برای حالت شکل دهی متقارن محوری استوانه‌های جدار نازک بکار گرفته شده و توسط روش المان محدود حل شده است.

۱-۴ روند انجام این پژوهش

هدف از این پژوهش مطالعه فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس به منظور مدلسازی شکل دهی استوانه های جدار نازک است. در این بخش بطور خلاصه به محتوای فصول این پایان نامه اشاره می‌شود:

فصل اول این پایان نامه مقدمه و معرفی اصول و کاربردهای فرآیند الکترومغناطیسی می باشد.

در فصل دوم روشهای مختلف شکل دهی با نرخ انرژی بالا (High energy rate forming) به ویژه روش شکل‌دهی الکترومغناطیس معرفی می‌شوند.

در فصل سوم به کمک معادله حرکت پوسته استوانه ای متقارن و با رجوع به تحقیقات پیشین، حرکت پوسته تحت بارهای دینامیکی و ضربه ای مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

در فصل چهارم به کمک معادلات الکترودینامیک حاکم بر مساله، عباراتی برای فشار ایجاد شده در طی فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس استوانه استخراج می‌شود

در فصل پنجم مدلی برای تحلیل فرآیند شکل‌دهی استوانه‌های جدار نازک در روش الکترومغناطیس به کمک حل معادله پایداری نرخ تغییرات انرژی ارائه می‌شود. به این منظور ترمهای مختلف نرخ تغییرات انرژی جنبشی، کار پلاستیک و کار خارجی اعمالی در اثر بارگذاری بصورت تحلیلی محاسبه شده و معادله انرژی شکل می‌گیرد. اثر نرخ کرنش بالای ایجاد شده نیز در این تحلیل وارد شده تا مدل ارائه شده بتواند پاسخ زمانی و مکانی دقیقتری را در مقابل فشار الکترومغناطیسی ارائه کند.

در فصل ششم نتایج حاصل از تحلیل ارائه شده با محاسبه ی جابجایی ها و سرعت فرآیند، ارائه و بحث می شوند و اثرات مختلف بویژه اثر نرخ کرنش در نتایج حاصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.