به نام خداوند جان و خرد

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای عماد رحیمی پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان بررسی عددی و تجربی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح های ترکیبی (TWB)** در تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۲۱ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - ساخت وتولید پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر حسن مسلمی نائینی	استاد	
استاد مشاور	دکتر حامد دیلمی عضدی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر غلامحسین لیاقت	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمد بخشی جویباری	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر غلامحسین لیاقت	استاد	

آیین‌نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت‌های علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی مکانیک است که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر حسن مسلمی نائینی، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر حامد دیلمی عضدی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتاب‌های عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب عماد رحیمی دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: عماد رحیمی

تاریخ و امضا: ۹۰/۶/۱

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب ..... دانشجوی رشته ..... ورودی سال تحصیلی ۸۸-۸۷ .....
مقطع ..... دانشکده ..... متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: .....

تاریخ: ۹۰/۶/۱

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک- ساخت و تولید

بررسی عددی و تجربی فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی

عماد رحیمی

استاد راهنما:

دکتر حسن مسلمی نائینی

استاد مشاور:

دکتر حامد دیلمی عضدی

(عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران دانشکده فنی و مهندسی اراک)

اسفندماه ۸۹

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

به برادران دوست‌داشتنی‌ام

و تمام کسانی که دوستشان دارم

سپاس‌گزاری

با سپاس فراوان از راهنمایی‌ها وکمک‌های شایان جناب آقای دکتر مسلمی نائینی و آقای دکتر دیلمی عضدی -عضو هیات علمی دانشگاه علم و صنعت ایران واحد اراک- در انجام این پایان‌نامه، همچنین از هم‌یاری‌ها و هم‌فکری‌های دانشجویان آزمایشگاه شکل‌دهی دانشگاه تربیت مدرس خصوصا آقایان مهندس سیامک مزدک، مهندس سید جلال هاشمی، مهندس رسول صفدریان و مهندس امیرحسین روحی تشکر و قدرانی می‌گردد.

همچنین از جناب دکتر محمد حبیبی پارسا و دانشگاه تهران برای انجام آزمایش‌های عملی تشکر می‌شود.

چکیده

استفاده از لوح‌های ترکیبی به علت مزایای فراوان آن‌ها در حال گسترش است؛ اما بکارگیری این لوح‌ها در صنعت نیازمند استفاده از روش‌هایی برای چیره شدن بر مشکل کاهش شکل‌پذیری این لوح‌ها نسبت به مواد پایه‌ی آن‌هاست. از آن‌جایی که فرآیند شکل‌دهی هیدرومکانیکی به عنوان یک فرآیند تولیدی با کاربرد روزافزون برای دستیابی به نسبت‌های کشش بالاتر، امکان تولید قطعات پیچیده‌تر و همچنین توزیع یکنواخت‌تر ضخامت نسبت به فرآیند کشش عمیق متداول مطرح است، مطالعه‌ی شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی به کمک روش کشش عمیق هیدرومکانیکی در این پایان‌نامه مورد توجه قرار گرفت.

در این پایان‌نامه شکل‌دهی هیدرومکانیکی فنجان‌های استوانه‌ای شکل از لوح‌های ترکیبی گرد فولادی با چند نسبت ضخامت، با استفاده از روش اجزاء محدود و مطالعه‌ی تجربی بررسی شده وعلاوه بر مقایسه‌ی ناحیه‌ی کاری لوح‌ها با نسبت‌های ضخامت مختلف، اثر برخی از پارامترهای فرآیند بر توزیع ضخامت و جابجایی خط جوش محصول مطالعه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که ناحیه‌ی کاری لوح‌های ترکیبی به ناحیه‌ی کاری ورق پایه‌ی نازک‌تر آن‌ها بسیار نزدیک است و با افزایش نسبت ضخامت این ناحیه خصوصا در حد بالایی کوچک‌تر می‌شود. افزایش نسبت کشش، افزایش نسبت ضخامت لوح‌ها، افزایش اصطکاک بین ورق‌گیر و ورق و کاهش اصطکاک بین سنبه و ورق، افزایش نازک‌شدگی و جابجایی خط جوش در محصول را به همراه دارند. افزایش فشار نهایی سیال محفظه، کاهش جابجایی خط جوش و نازک‌شدگی در کف فنجان و همچنین افزایش نازک‌شدگی در دیواره را موجب می‌شود. تغییر در اصطکاک بین رینگ کشش و ورق و فشار اولیه‌ی سیال تاثیر چندانی بر جابجایی خط جوش ندارند. برای فشار اولیه بر اساس بیشینه‌ی نازک‌شدگی یک مقدار بهینه وجود دارد.

واژگان کلیدی: شکل‌دهی ورق فلزی، شکل‌دهی هیدرومکانیکی، لوح ترکیبی، ناحیه‌ی کاری، جابجایی خط جوش، توزیع ضخامت.

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه
فصل ۱- مقدمه..... ۱۰
۱-۱- مقدمه..... ۱۱
۱-۲- لوح‌های ترکیبی..... ۱۱
۱-۳- توسعه‌ی فناوری‌های جوشکاری..... ۱۴
۱-۳-۱- جوشکاری لیزری..... ۱۴
۱-۳-۲- جوشکاری خمیری..... ۱۵
۱-۴- شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی..... ۱۵
۱-۵- مروری بر فرآیندهای کشش عمیق..... ۱۶
۱-۵-۱- کشش عمیق سنتی..... ۱۶
۱-۵-۲- فرآیندهای شکل دادن ورق بر پایه‌ی فشار سیال..... ۱۷
۱-۵-۲-۱- فرآیند کشش عمیق با نیروی ورق‌گیری سیال..... ۱۸
۱-۵-۲-۲- فرآیند شکل‌دهی ورق سوپر پلاستیک..... ۱۸
۱-۵-۲-۳- فرآیند شکل‌دهی با سیال ویسکوز..... ۱۹
۱-۵-۲-۴- فرآیند هیدروفرمینگ..... ۲۰
۱-۵-۲-۵- فرآیند کشش عمیق به روش هیدرودینامیک..... ۲۰
۱-۵-۲-۶- فرآیند کشش عمیق با فشار شعاعی..... ۲۱
۱-۵-۲-۷- کشش عمیق به روش هیدرومکانیک..... ۲۲
۱-۵-۲-۸- ویژگی‌های فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی..... ۲۲
۱-۵-۲-۹- مزایا و محدودیت‌های فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی..... ۲۴
۱-۶- مروری بر پژوهش‌های پیشین..... ۲۵
۱-۶-۱- استفاده از فرآیندهای شکل‌دهی با سیال در شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی..... ۲۵
۱-۶-۲- راهکارهای ارائه شده برای افزایش شکل پذیری لوح‌های ترکیبی..... ۲۷
۱-۶-۳- تاثیر نسبت ضخامت و جنس ورق‌های تشکیل دهنده‌ی لوح ترکیبی بر شکل‌دهی..... ۳۰
۱-۷- اهداف و روند پیشبرد پایان‌نامه..... ۳۳
۱-۸- ساختار نوشتار..... ۳۴
فصل ۲- شبیه‌سازی فرآیند..... ۳۵

۲-۱- مقدمه ۳۶
۲-۲- نحوه‌ی شبیه‌سازی ۳۶
۲-۲-۱- هندسه‌ی قالب و لوح و مونتاژ اجزاء ۳۶
۲-۲-۲- شبکه‌بندی ۳۹
۲-۲-۳- خواص ماده ۴۲
۲-۲-۴- شرایط اصطکاکی ۴۴
۲-۲-۵- تعریف منحنی تغییرات فشار سیال ۴۴
۲-۲-۶- لزوم و نحوه‌ی اعمال فشار شعاعی ۴۵
فصل ۳- آزمایش‌های تجربی ۴۷
۳-۱- مقدمه ۴۸
۳-۲- تجهیزات آزمایش ۴۸
۳-۲-۱- قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی ۴۹
۳-۲-۲- مدار کنترل هیدرولیکی ۵۲
۳-۳- مشخصات مواد ۵۳
۳-۴- تهیه‌ی لوح‌های ترکیبی ۵۴
۳-۵- انجام آزمایش‌ها ۵۷
۳-۶- استخراج نتایج آزمایش‌ها ۶۰
فصل ۴- نتایج و بحث ۶۲
۴-۱- مقدمه ۶۳
۴-۲- صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها با استفاده از آزمایش‌های تجربی ۶۳
۴-۲-۲- صحت‌سنجی توزیع ضخامت و جابجایی خط جوش قطعه‌ی ۱ ۶۵
۴-۲-۳- صحت‌سنجی توزیع ضخامت و جابجایی خط جوش قطعه‌ی۲ ۶۶
۴-۳- نتایج شبیه‌سازی‌ها ۶۸
۴-۴- بررسی منحنی‌های ناحیه‌ی کاری بر اساس پارگی ۷۲
۴-۴-۲- مقایسه‌ی ناحیه‌ی کاری یک لوح ترکیبی با لوح‌های ورق‌های پایه‌ی تشکیل دهنده‌ی آن ۷۴
۴-۴-۳- مقایسه‌ی ناحیه‌ی کاری لوح‌های ترکیبی با نسبت‌های ضخامت متفاوت ۷۵
۴-۵- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر توزیع ضخامت و جابجایی خط جوش ۷۶
۴-۵-۱- اثر اعمال فشار شعاعی ۷۶

۴-۵-۲- اثر نسبت کشش ۷۷
۴-۵-۲-۱- بررسی یک نمودار جابجایی خط جوش ۷۹
۴-۵-۳- اثر نسبت ضخامت ۸۳
۴-۵-۴- اثر فشار نهایی سیال ۸۵
۴-۵-۵- اثر فشار اولیه‌ی سیال ۸۷
۴-۵-۶- اثر اصطکاک بین اجزاء قالب و ورق ۸۹
۴-۵-۶-۱- اثر اصطکاک بین ورق‌گیر و ورق ۸۹
۴-۵-۶-۲- اثر اصطکاک بین رینگ کشش و ورق ۹۱
۴-۵-۶-۳- اثر اصطکاک بین سنبه و ورق ۹۳
۴-۵-۶-۴- مقایسه‌ی اثر اصطکاک سطوح اجزاء مختلف قالب ۹۵
فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای ادامه‌ی کار ۹۷
۵-۱- نتیجه‌گیری ۹۸
۵-۲- پیشنهاد برای ادامه کار ۱۰۰

فهرست شکل‌ها

عنوان.....صفحه
شکل ۱-۱ : نمونه‌ی لوح ترکیبی با شش جوشکاری لیزر که در بدنه خودرو استفاده می‌شود..... ۱۳
شکل ۱-۲ : فرآیند کشش عمیق سنتی..... ۱۷
شکل ۱-۳ : کشش عمیق با نیروی ورق‌گیری سیال..... ۱۸
شکل ۱-۴ : فرآیند شکل دادن سوپر پلاستیک ورق..... ۱۹
شکل ۱-۵ : شکل‌دادن ورق با فشار سیال ویسکوز..... ۱۹
شکل ۱-۶ : فرآیند هیدروفرمینگ..... ۲۰
شکل ۱-۷ : فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی..... ۲۱
شکل ۱-۸ : فرآیند کشش عمیق با فشار شعاعی..... ۲۱
شکل ۱-۹ : سمت چپ شماتیک فرآیند کشش عمیق سنتی و سمت راست شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی..... ۲۲
شکل ۱-۱۰ : ناحیه‌ی بالج شده در فضای بین ورق‌گیر و سنبه..... ۲۳
شکل ۱-۱۱ : تغییر شکل ورق در مرحله پیش‌بالجینگ..... ۲۴
شکل ۱-۱۲ : مطالعه‌ی عددی و تجربی پاندا و همکاران بر شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی..... ۲۶
شکل ۱-۱۳ : سیستم هیدرولیک جهت افزایش شکل پذیری لوح ترکیبی..... ۲۸
شکل ۱-۱۴ : مرحله‌ی a، مرحله‌ی اول شکل‌دهی، b و c به ترتیب مراحل دوم و سوم شکل‌دهی..... ۲۸
شکل ۱-۱۵ : الف) ورق‌گیر پله‌دار؛ ب) پین نگه‌دارنده‌ی خط جوش..... ۲۹
شکل ۱-۱۶ : استفاده از نیروهای ورق‌گیری متفاوت جهت افزایش شکل‌پذیری لوح ترکیبی..... ۳۰
شکل ۱-۱۷ : مقایسه‌ی حد شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی با نسبت‌های ضخامت متفاوت..... ۳۱
شکل ۱-۱۸ : کمینه‌ی کرنش اصلی لوح‌های ترکیبی با نسبت‌های ضخامت متفاوت..... ۳۱

شکل ۲-۱ : هندسه و ابعاد قالب استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها..... ۳۷
شکل ۲-۲ : الف) بخش‌های مختلف لوح ترکیبی؛ ب) الگوی شبیه‌سازی خط جوش..... ۳۸
شکل ۲-۳ : الگوی قرارگیری لوح و نحوه‌ی به تعادل رسیدن نیروهای وارده به ورق از جانب سیال در راستای عمود بر خط جوش در صفحه‌ی افقی..... ۳۹
شکل ۲-۴ : دو الگوی برای مش‌بندی لوح‌های دایره‌ای..... ۴۰
شکل ۲-۵ : مقایسه‌ی تاریخچه‌ی انرژی‌های جنبشی و داخلی فرآیند در زمان شبیه‌سازی ۰/۰۵ ثانیه ۴۰
شکل ۲-۶ : تاریخچه‌ی انرژی جنبشی فرآیند در زمان شبیه‌سازی ۰/۰۵ ثانیه..... ۴۱
شکل ۲-۷ : الف) مدلی از اجزاء قالب شبیه‌سازی شده؛ ب) مدلی از ورق ترکیبی شبیه‌سازی شده..... ۴۲
شکل ۲-۸ : نمودار حد شکل‌دادن فولاد کربنی St12..... ۴۳
شکل ۲-۹ : نمودار تغییرات فشار محفظه سیال در زمان شبیه‌سازی..... ۴۴
شکل ۲-۱۰ : فشار شعاعی متفاوت وارده بر دو بخش ورق ترکیبی..... ۴۶
شکل ۳-۱ : قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی..... ۵۰
شکل ۳-۲ : مشخصات ابعادی قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی..... ۵۱
شکل ۳-۳ : فیکسچر- فاصله‌اندازهای ساخته شده برای نسبت‌های کشش مختلف..... ۵۱
شکل ۳-۴ : مدار هیدرولیکی کنترل فشار محفظه‌ی سیال؛ ۱: پمپ هیدرولیک؛ ۲: شیر کنترل فشار پیش‌بالجینگ؛ ۳: فشار سنج برای اندازه‌گیری فشار پیش‌بالجینگ؛ ۴: شیر یک‌طرفه؛ ۵: فشار سنج برای اندازه‌گیری فشار نهایی؛ ۶: شیر کنترل فشار نهایی محفظه..... ۵۲
شکل ۳-۵ : مسیر نوعی فشار داخل محفظه در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی..... ۵۳
شکل ۳-۶ : نمونه‌های آزمون کشش تک محوری..... ۵۴
شکل ۳-۷ : منحنی تنش- کرنش پلاستیک به‌دست آمده از آزمون کشش تک‌محوره..... ۵۴
شکل ۳-۸ : دستگاه جوش لیزر استفاده شده..... ۵۵

شکل ۳-۹ : نحوه‌ی جوشکاری با دستگاه جوش لیزر استفاده شده..... ۵۶
شکل ۳-۱۰ : وقوع پارگی در بخش نازک‌تر نمونه‌های آزمون کشش تک محوره با جوش عرضی..... ۵۶
شکل ۳-۱۱ : پارگی جوش در مراحل اولیه‌ی شکل‌دهی در اثر کیفیت نامناسب جوش..... ۵۶
شکل ۳-۱۲ : قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی..... ۵۷
شکل ۳-۱۳ : پمپ هیدرولیک دستی..... ۵۷
شکل ۳-۱۴ : مجموعه‌ی کنترل فشار سیال محفظه: الف) شیر کنترل فشار؛ ب) فشار سنج..... ۵۸
شکل ۳-۱۵ : مجموعه‌ی تجهیزات کشش عمیق هیدرومکانیکی..... ۵۸
شکل ۳-۱۶ : نمونه‌هایی از لوح‌های ساده‌ی استفاده شده برای تنظیم تجهیزات..... ۵۹
شکل ۳-۱۷ : نمونه‌هایی از لوح‌های ترکیبی پاره شده در اثر کیفیت نامطلوب جوش..... ۵۹
شکل ۳-۱۸ : جوشکاری چندباره‌ی لوح‌های ترکیبی با لیزر..... ۵۹
شکل ۳-۱۹ : انواع پارگی در شکل‌دهی هیدرومکانیکی لوح‌های ترکیبی: الف) شعاع سر سنبه در بخش نازک‌تر لوح؛ ب) شعاع رینگ کشش در بخش نازک‌تر لوح؛ ج) ناحیه‌ی جوش..... ۶۰
شکل ۳-۲۰ : نمونه‌های تولید شده به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی..... ۶۰
شکل ۳-۲۱ : بررسی مسیر خط جوش توسط دستگاه CMM..... ۶۱
شکل ۳-۲۲ : قطعات بریده شده از خط تقارن و میکرومتر سر مخروطی استفاده شده برای اندازه‌گیری ضخامت..... ۶۱
شکل ۴-۱ : قطعات انتخاب شده برای صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها..... ۶۳
شکل ۴-۲ : مختصات خطوط جوش دو قطعه‌ی حاصل از آزمایش‌های تجربی بدست آمده از CMM... ۶۴
شکل ۴-۳ : قطعه‌ی ۱..... ۶۵
شکل ۴-۴ : مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی جابجایی خط جوش قطعه‌ی ۱..... ۶۵
شکل ۴-۵ : مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی توزیع ضخامت قطعه‌ی ۱..... ۶۶

شکل ۴-۶ : قطعه‌ی ۲..... ۶۶
شکل ۴-۷ : مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی جابجایی خط جوش قطعه‌ی ۲..... ۶۷
شکل ۴-۸ :مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی توزیع ضخامت قطعه‌ی ۲..... ۶۸
شکل ۴-۹ : الف) مسیر اندازه‌گیری توزیع ضخامت (خط تقارن)، ب) مسیر اندازه‌گیری جابجایی خط جوش (خط جوش)..... ۶۸
شکل ۴-۱۰ : موقعیت لوح ترکیبی نسبت به محورهای مختصات..... ۶۹
شکل ۴-۱۱ : موقعیت و خلاصه‌ی نتایج برخی شبیه‌سازی‌های انجام شده..... ۷۱
شکل ۴-۱۲ : شبیه‌سازی‌های انجام شده برای نسبت ضخامت ۱/۲۵ با نمایش بیشینه‌ی نازک‌شدگی و یا محل وقوع پارگی..... ۷۲
شکل ۴-۱۳ : شبیه‌سازی‌های انجام شده برای نسبت ضخامت ۱/۵ با نمایش بیشینه‌ی نازک‌شدگی و یا محل وقوع پارگی..... ۷۳
شکل ۴-۱۴ : الف) پارگی در نزدیکی خط جوش؛ ب) پارگی در دیواره..... ۷۳
شکل ۴-۱۵ : مقایسه‌ی ناحیه‌ی کاری یک لوح ترکیبی با لوح‌های ورق‌های پایه..... ۷۴
شکل ۴-۱۶ : مقایسه‌ی ناحیه‌ی کاری لوح‌های ترکیبی با نسبت‌های ضخامت مختلف..... ۷۵
شکل ۴-۱۷ : اثر اعمال فشار شعاعی بر جابجایی خط جوش در طول خط جوش..... ۷۶
شکل ۴-۱۸ : اثر اعمال فشار شعاعی بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن ورق..... ۷۷
شکل ۴-۱۹ : اثر نسبت کشش بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن لوح..... ۷۸
شکل ۴-۲۰ : اثر نسبت کشش بر جابجایی خط جوش در طول خط جوش لوح..... ۷۹
شکل ۴-۲۱ : تنش‌ها در فرآیند کشش عمیق..... ۸۰
شکل ۴-۲۲ : نمونه‌ای از نمودارهای جابجایی خط جوش در نسبت کشش بالا..... ۸۰
شکل ۴-۲۳ : میزان جابجایی چند گره‌ی فلنج به سمت حفره‌ی قالب..... ۸۲

شکل ۴-۲۴ : فلنج باقیمانده‌ی بیشتر در بخش نازک‌تر و بازگشت خط جوش در نسبت کشش ۲/۵.... ۸۳

شکل ۴-۲۵ : اثر نسبت ضخامت بر جابجایی خط جوش در طول خط جوش لوح..... ۸۳

شکل ۴-۲۶ : اثر نسبت ضخامت بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن لوح..... ۸۴

شکل ۴-۲۷ : اثر فشار نهایی سیال بر توزیع ضخامت در طول خط جوش لوح..... ۸۵

شکل ۴-۲۸ : اثر فشار نهایی سیال بر جابجایی خط جوش در طول خط تقارن لوح.....۸۶

شکل ۴-۲۹ : اثر فشار اولیه‌ی سیال بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن لوح..... ۸۷

شکل ۴-۳۰ : اثر فشار اولیه بر بیشینه‌ی نازک‌شدگی..... ۸۸

شکل ۴-۳۱ : اثر فشار اولیه‌ی سیال بر جابجایی خط جوش در طول خط جوش لوح..... ۸۹

شکل ۴-۳۲ : اثر اصطکاک بین ورق‌گیر و ورق بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن لوح..... ۹۰

شکل ۴-۳۳ : اثر اصطکاک بین ورق‌گیر و ورق بر جابجایی خط جوش در طول خط جوش لوح..... ۹۱

شکل ۴-۳۴ : اثر اصطکاک بین رینگ کشش و ورق بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن لوح..... ۹۲

شکل ۴-۳۵ : اثر اصطکاک بین رینگ کشش و ورق بر جابجایی خط جوش در طول خط جوش لوح.. ۹۳

شکل ۴-۳۶ : اثر اصطکاک بین سنبه و ورق بر توزیع ضخامت در طول خط تقارن لوح..... ۹۴

شکل ۴-۳۷ : اثر اصطکاک بین سنبه و ورق بر جابجایی خط جوش در طول خط جوش لوح..... ۹۴

شکل ۴-۳۸ :مقایسه‌ی اثر اصطکاک سطوح اجزاء مختلف قالب بر بیشینه‌ی نازک‌شدگی..... ۹۵

شکل ۴-۳۹ :مقایسه‌ی اثر اصطکاک سطوح اجزاء مختلف قالب بر جابجایی خط جوش در مرکز لوح....۹۶

فهرست جدول‌ها

عنوان.....صفحه
جدول ۲-۲ : خواص مکانیکی فولاد St12..... ۴۳
جدول ۲-۲ : فشار لازم برای جدا نشدن ورق از ورق‌گیر، و ضریب β در صورت انتخاب فشار اولیه‌ی ۵ مگاپاسکال..... ۴۵
جدول ۴-۵ : خلاصه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی اثر فشار اولیه‌ی سیال..... ۸۷
جدول ۴-۵ : خلاصه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی اثر اصطکاک بین ورق‌گیر و ورق ۹۰
جدول ۴-۵ : خلاصه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی اثر اصطکاک بین رینگ کشش و ورق..... ۹۱
جدول ۴-۵ : خلاصه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی اثر اصطکاک بین سنبه و ورق.... ۹۳

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- مقدمه

در فناوری‌های جاری قالب‌گیری در صنایع خودروسازی، دو روش اساسی به منظور رسیدن به قطعه‌ی نهایی وجود دارد؛ روش اول، جداسازی قطعات[1] است. در این تکنیک، هر کدام از بخش‌های قطعه به طور جداگانه قالب‌گیری می‌شود و سپس به منظور رسیدن به قطعه‌ی نهایی، با جوش نقطه‌ای به هم متصل می‌شوند. این روش دارای مزیت‌های گوناگونی است که از آن جمله می‌توان به امکان انتخاب ویژگی‌های موردنظر، از جمله استحکام، ضخامت، مقاومت خوردگی و غیره، در هر یک از بخش‌های قطعه اشاره کرد. این روش دارای معایبی نیز می‌باشد. مشکل اصلی تعدد بالای فرآیندهای شکل‌دهی است که برای بخش‌های مختلف تشکیل دهنده‌ی قطعه‌ی اصلی وجود دارد و به این ترتیب، هزینه‌ی تولید و شکل‌دهی را افزایش می‌دهد. همچنین، هزینه‌ی مونتاژ افزایش می‌یابد (با توجه به افزایش تعداد اتصالات) و امکان بروز مشکلاتی در حین اتصال و قراردهی دقیق قطعات نسبت به هم وجود دارد. روش دیگر، روش یکپارچه[2] است. در روش یکپارچه، قطعه‌ی نهایی از یک قالب واحد به دست می‌آید. به این ترتیب، تعداد ابزارهای موردنیاز، هزینه‌ی مونتاژ و مشکلات موجود در اتصال دقیق قطعات در حین مونتاژ به حداقل می‌رسد. هرچند، مهندس طراح مجبور است از یک ماده با ضخامت و مقاومت خوردگی ثابت در ساخت قطعه‌ی نهایی استفاده کند. باتوجه به این که در این حالت، باید بیشترین ضخامت و استحکام و مقاومت برای کل قطعه انتخاب شود، هزینه و وزن قطعه‌ی نهایی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. یک ایده برای حل مشکلات ذکر شده، استفاده از لوح‌های ترکیبی[3] است [۱]. در ادامه به معرفی این لوح‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲- لوح‌های ترکیبی

لوح ترکیبی، لوحی است که از دو یا چند ورق فلزی مختلف تشکیل شده است که پیش از قالب‌گیری نهایی به هم جوش داده می‌شوند. در لوح‌های ترکیبی، امکان جوشکاری ورق‌های مختلف از جنس‌های

[1] Part separation
[2] Integration method
[3] Tailor Welded Blanks (TWBs)

مختلف و با ضخامت‌ها و پوشش‌های گوناگون فراهم شده است، به طوری که ویژگی‌های موردنظر در بخش‌های مختلف قطعه‌ی نهایی ارضا می‌شود. به این ترتیب، افزایش تعداد ابزارهای موردنیاز به منظور ایجاد قطعه‌ی نهایی لزومی ندارد و مشکلات ناشی از اتصال دقیق قطعات از بین می‌رود. همچنین، با استفاده از این لوح‌ها انعطاف‌پذیری در طراحی قطعات مختلف افزایش می‌یابد و امکان ساخت ورق‌های بزرگ از اتصال ورق‌های بسیار کوچک‌تر فراهم می‌گردد. درواقع، می‌توان قطعاتی را که از عرض اولیه ورق‌ها بزرگ‌تر هستند تولید کرد [۱].

مزیت دیگر استفاده از لوح‌های ترکیبی فراهم شدن امکان استفاده از مزیت‌های فرآیندهای جوشکاری پیوسته‌ای است که بعد از شکل‌دادن قابل استفاده نیستند.

پس از تغییر نگرش اجتماع به سمت بهبود مسایل زیست محیطی، استفاده از ورق‌هایی که با جوشکاری لیزری به هم اتصال یافته اند، در صنعت خودروسازی بسیار گسترش یافته است. کلیه‌ی صنایع در سراسر جهان به رعایت قوانین سخت‌گیرانه‌تر ملزم شده‌اند تا به این ترتیب نگرانی‌های موجود در زمینه‌ی رعایت مسائل زیست محیطی هموارتر گردد. این مساله شامل کاهش ضایعات تولید و افزایش بهره‌وری انرژی می‌باشد. صنعت خودروسازی نیز از این امر مستثنی نمی‌باشد. هرچند، کاهش ضایعات تولید تنها یک مساله‌ی محیط زیستی محسوب نمی‌شود. افزایش بهره‌وری ماده و کاهش ضایعات تولید به طور قابل ملاحظه‌ای بر افزایش سود تولید نیز تاثیرگذار است. تخمین زده شده است که حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد ورق‌های فلزی خریداری شده توسط کارخانجات، به صورت ضایعات از خط تولید خارج می‌گردند [۱].

به موازات کاهش ضایعات، صنایع خودروسازی موظف‌اند تا هرچه بیشتر، قوانین وضع شده در زمینه‌ی کاهش مصرف سوخت را نیز رعایت نمایند. هم‌اکنون توجه کارخانه‌های خودروسازی به استفاده از آلیاژهای سبک وزن در بدنه‌ی خودرو جلب شده است تا با جایگزینی آن‌ها به جای قطعات فولادی سنگین، ضمن کاهش وزن خودرو، استحکام ساختاری آن را بدون تغییر حفظ نمایند. مواد فلزی نظیر آلومینیم و منیزیم، کامپوزیت‌های کربنی و همچنین تعدادی از کامپوزیت‌های فلزی- سرامیکی جدید