



سازمان اسناد و کتابخانه ملی جمهوری اسلامی ایران

کتابخانه ملی ایران

دانشکده مهندسی - گروه مکانیک

عنوان پایان نامه:

مدلسازی و بهینه سازی پارامترهای جوشکاری مقاومتی - نقطه‌ای ورق‌های فولادی BH و IF مورد استفاده در بدنه خودرو

سید مهدی حمیدی نژاد

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

اساتید راهنما:

دکتر فرهاد کلاهان

دکتر امیر حسین کوکبی



زمستان ۱۳۸۷

فرم چکیده رساله تحصیلات تکمیلی

نام دانشجو: سید مهدی	نام خانوادگی دانشجو: حمیدی نژاد
استاد راهنما: دکتر فرهاد کلاهان و دکتر امیر حسین کوبی	
دانشکده: مهندسی گروه: مهندسی مکانیک گرایش: ساخت و تولید مقطع: کارشناسی ارشد	
تاریخ دفاع: ۱۳۸۷/۱۲/۱۹	تعداد صفحات: ۱۵۲
عنوان پایان نامه: مدل سازی و بهینه سازی پارامترهای جوشکاری مقاومتی - نقطه ای ورق های فولادی BH و IF مورد استفاده در بدنه خودرو	
کلمات کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه ای، طراحی آزمایشات، مدل سازی رگرسیونی، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی	

چکیده

در این تحقیق، فرآیند جوشکاری مقاومتی - نقطه ای ورق های فولادی گالوانیزه مورد استفاده در صنعت خودرو، با دو جنس متفاوت، مدل سازی و بهینه سازی شده است. بطور کلی در فرآیند جوشکاری نقطه ای، کیفیت اتصالات به میزان زیادی وابسته به مقادیر پارامترهای تنظیمی است. از جمله مهمترین پارامترهای تنظیمی در روش جوشکاری نقطه ای، شدت جریان، فشار الکترودها، زمان جوشکاری و زمان نگهداری است، که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند. مهمترین مشخصه کیفیت جوش در این روش استحکام کششی - برشی است که به عنوان معیار ارزیابی کیفیت جوش در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است. بمنظور ایجاد رابطه دقیق بین پارامترهای ورودی و متغییر پاسخ (استحکام کششی - برشی)، مدل های ریاضی مبتنی بر روش های میانجی و همچنین شبکه های عصبی، استخراج گردیده است. مدل سازی فرآیند بر اساس داده های تجربی بوده که با استفاده از رویکرد طراحی آزمایشات و با دو طرح عاملی کامل و طرح محوری ترکیبی توسعه یافته اند. تمامی آزمایشات در محیط صنعتی و خط تولید بدنه شرکت ایران خودرو انجام شده است. مدل های رگرسیونی ارائه شده شامل توابع درجه اول، درجه دوم و لگاریتمی، برای هر دو طرح آزمایشات، طراحی شده اند. در ادامه یک مدل شبکه عصبی نیز بر اساس تمام داده ها توسعه یافته است. پس از مدل سازی، با استناد بر تحلیل واریانس (ANOVA) و سطح اطمینان ۹۵٪ و درصد خطای مطلق مدل ها، انطباق آنها بر فرآیند واقعی بررسی شده و بهترین مدل انتخاب گردیده است. همچنین اعتبار مدل پیشنهادی بکمک آزمون فرضیات آماری، صحت گذاری و تأیید شده است. بخش دوم تحقیق شامل بهینه سازی پارامترهای جوشکاری، جهت نیل به کیفیت مطلوب اتصالات است. این امر با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک و در راستای تعیین سطوح پارامترهای بهینه برای رسیدن به بهترین استحکام کششی - برشی انجام شده است. نتایج محاسباتی حاصل از بهینه سازی با داده های تجربی مقایسه شده که در تمامی موارد انطباق خوبی را نشان داده است. با توجه به اینکه آزمایشات در شرکت خودرو ایران خودرو و شرکت ساپکو در محیطی کاملاً صنعتی انجام شده است، نتایج این مطالعه در استاندارد سازی رویه های جوشکاری مقاومتی نقطه ای از طریق پیش بینی تاثیر پارامترها بر کیفیت جوش ورق بسیار موثر خواهد بود. بدین ترتیب، سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی، برای کسب کیفیت مورد نظر جوش، قابل تعیین می باشند.

اصالت اثر

اینجانب سید مهدی حمیدی نژاد تأیید می‌نمایم مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب بوده و در صورت استفاده موردی از دست‌آوردهای پژوهشی دیگران مطابق مقررات با آنها ارجاع شده است این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرکی هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و قانونی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

امضاء دانشجو

سید مهدی حمیدی نژاد

تاریخ

امضاء اساتید راهنما

دکتر فرهاد کلاهان

تاریخ

دکتر امیر حسین کویچی

تاریخ

تاییدیه گروه مکانیک

پایان نامه حاضر تحت عنوان :

مدلسازی و بهینه سازی پارامترهای جوشکاری مقاومتی - نقطه‌ای ورق‌های فولادی BH و IF مورد استفاده در بدنه خودرو که توسط آقای سید مهدی حمیدی نژاد تهیه و به هیات داوران ارائه شده، به عنوان کار پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته مکانیک گرایش ساخت و تولید، مورد تایید شورای تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

تاریخ دفاع: ۱۳۸۷/۱۲/۱۹ نمره: درجه ارزشیابی:

اعضای هیات داوران:

نام و نام خانوادگی	سمت	امضا
۱- دکتر فرهاد کلاهان	استاد راهنما	
۲- دکتر امیر حسین کوبی	استاد راهنما	
۳- دکتر خلیل فرهنگدوست	استاد ممتحن	
۴- دکتر علی اکبر اکبری	استاد ممتحن	
۵- دکتر مسعود طهانی	نماینده تحصیلات تکمیلی	

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

آنان که هستی و وجودم از آنهاست و تا بیکران آسمانها
همواره سپاسگزار محبت‌های بی‌پایان و بی‌دریغشان هستم.
آنان که هرچه در توان داشتند برای پیشرفت و ارتقای من
به کار گرفتند و همواره مشوقم در طول دوران تحصیل
بودند.

تشکر و قدردانی

اکنون که با عنایت پروردگار کار نگارش این پایان نامه به سرانجام رسید، وظیفه می‌دانم مراتب امتنان و سپاس خود را از اساتید بزرگوارم آقایان دکتر امیر حسین کوکبی و دکتر فرهاد کلاهان بجای آورم. ایشان با دقت، دانش و تجربیات گرانسنگ خود در طی مراحل انجام این پژوهش دلسوزانه یاری نمودند.

از شرکت ساپکو که با حمایت همه جانبه در انجام هر چه بهتر این پروژه نقش بسزایی داشت سپاسگزارم.

از دوست عزیز و بزرگوارم جناب آقای مهندس محمد حسین حسن‌نیا مسئول گروه کارشناسی بخش قطعات پرسی شرکت ساپکو که مدیریت این پروژه را عهده‌دار بودند و در تمام این مدت دلسوزانه با دانش و پیگیری‌های خود همواره یاری‌ام کردند و باعث دلگرمی‌ام می‌شدند، صمیمانه قدردانی می‌کنم.

از دوستان بزرگوارم در شرکت ساپکو و ایران خودرو آقایان مهندس ذاکری، مهندس زریری از آزمایشگاه متالورژی شرکت ساپکو و آقایان مهندس آریانپور و مهندس عبدلی از بخش مهندسی سالن بدنه سازی شماره ۵ ایران خودرو که مرا در انجام آزمایشات یاری کردند، متشکرم.

از دوستان عزیزم آقایان دکتر محمد جواد عبدالهی، مهندس محمد رضا مجتهدی، مهندس مهدی مطلبی و مهندس میرمسعود باقری که در مدت تحصیل موجب دلگرمی اینجانب بودند تشکر و قدردانی می‌شود.

از خداوند متعال برای همه عزیزان آرزوی موفقیت و بهروزی می‌نمایم.

فصل اول : مقدمه

- ۱-۱- تعریف مسأله ۲
- ۲-۱- اهداف ۴
- ۳-۱- ساختار پایان نامه ۴

فصل دوم: مروری بر منابع و مقالات

- ۱- کارهای تجربی ۷
- ۲- مدلسازی کامپیوتری ۱۱

فصل سوم: فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای

- ۱-۳- پیشگفتار ۱۶
- ۲-۳- انواع جوشکاری مقاومتی ۱۶
- ۳-۳- تعاریف و توضیحات عمومی ۱۷
- ۱-۳-۳- سیکل جوشکاری ۱۸
- ۲-۳-۳- جریان ۱۸
- ۳-۳-۳- زمان ۲۱
- ۴-۳-۳- نیروی الکتروود ۲۳
- ۵-۳-۳- الکتروودها ۲۴
- ۶-۳-۳- اصول فرآیند ۲۵
- ۷-۳-۳- ماهیت مکانیکی ۲۶
- ۸-۳-۳- ماهیت الکتریکی ۲۷
- ۹-۳-۳- توان مورد نیاز ۲۹

فهرست مطالب

- ۳-۳-۱۰- تولید حرارت ۳۰
- ۳-۴-۴- عوامل مؤثر بر جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ۳۲
- ۳-۴-۱- تأثیر جریان ۳۲
- ۳-۴-۲- تأثیر زمان ۳۴
- ۳-۴-۳- تأثیر نیرو و فشار در حین جوشکاری ۳۷
- ۳-۴-۴- تأثیر الکترودها ۳۸
- ۳-۴-۵- تأثیر شرایط سطحی ۳۹
- ۳-۴-۶- تأثیر مقاومت الکتریکی سطح تماس ۴۰
- ۳-۴-۷- تأثیر عناصر شیمیایی در قابلیت جوش مقاومتی ۴۱

فصل چهارم: طراحی آزمایشات

- ۴-۱- معرفی طرح آزمایش ۴۵
- ۴-۲- اهداف طراحی آزمایش‌ها ۴۶
- ۴-۳- مراحل طراحی آزمایش‌ها ۴۷
- ۴-۴- استفاده از تکنیک‌های آماری در انجام آزمایش ۵۰
- ۴-۵- مفاهیم آماری پایه‌ای ۵۰
- ۴-۵-۱- تجزیه و تحلیل واریانس ۵۲
- ۴-۵-۲- تحلیل باقیمانده‌ها ۵۶
- ۴-۵-۳- بررسی ضریب تعیین R^2 ۶۰
- ۴-۶- طرح‌های آزمایش ۶۱
- ۴-۶-۱- طرح‌های عامل کامل ۶۱
- ۴-۶-۲- طرح محوری ترکیبی ۶۱

فصل پنجم: روشهای مدلسازی

- ۵-۱- معرفی مدل رگرسیونی و مراحل ایجاد آن..... ۶۵
- ۵-۱-۱- ساختار مدل‌های چند متغیره..... ۶۵
- ۵-۱-۲- کنترل فرضیات و اعتبار مدل‌های رگرسیونی..... ۶۶
- ۵-۲- مدلسازی به کمک شبکه‌های عصبی..... ۶۹
- ۵-۲-۱- ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی..... ۶۹
- ۵-۲-۲- تقسیم‌بندی شبکه‌های عصبی براساس ساختار..... ۷۱
- ۵-۲-۳- ساختار شبکه‌های عصبی چند لایه..... ۷۲
- ۵-۲-۴- قابلیت یادگیری..... ۷۳
- ۵-۲-۵- قابلیت تعمیم..... ۷۴
- ۵-۲-۶- مقاوم بودن..... ۷۴
- ۵-۲-۷- آموزش شبکه‌های عصبی..... ۷۴
- ۵-۲-۸- قوانین آموزش شبکه‌های عصبی..... ۷۶

فصل ششم: اجرای آزمایشات و اخذ داده‌ها

- ۶-۱- تست موردنظر برای بررسی خواص اتصالات..... ۸۲
- ۶-۲- تجهیزات و مواد مورد بررسی در این تحقیق..... ۸۵
- ۶-۲-۱- مواد مورد بررسی در این تحقیق..... ۸۵
- ۶-۲-۲- معرفی دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مورد استفاده در این تحقیق..... ۸۸
- ۶-۲-۳- معرفی دستگاه تست کشش..... ۹۰
- ۶-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها..... ۹۰

فهرست مطالب

۶-۴- انتخاب فاکتورهای طرح (پارامترهای مورد مطالعه)..... ۹۲

۶-۵- طرح ماتریس آزمایشات..... ۹۲

۶-۶- سطوح تغییر پارامترهای ورودی..... ۹۳

فصل هفتم: مدلسازی فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی گالوانیزه BH و HF

۷-۱- مدل‌های رگرسیونی..... ۱۰۰

۷-۱-۱- مدل‌های رگرسیونی برازش شده بر داده‌های ماتریس طرح عاملی کامل..... ۱۰۰

۷-۱-۲- مدل‌های رگرسیونی برازش شده بر داده‌های ماتریس طرح محوری ترکیبی..... ۱۰۶

۷-۱-۳- مقایسه مدل‌ها..... ۱۱۱

۷-۲- مدل‌سازی به کمک شبکه‌های عصبی..... ۱۱۴

۷-۲-۱- پارامترهای کنترلی در شبکه طراحی شده..... ۱۱۶

۷-۲-۲- اجرای شبکه طراحی شده..... ۱۱۷

۷-۲-۳- ارزیابی شبکه طراحی شده..... ۱۱۸

۷-۲-۴- مدل ریاضی ساخته شده توسط شبکه عصبی..... ۱۱۹

۷-۳- بررسی رفتار مدل اصلاح با تغییر متغیرها از دیدگاه علمی..... ۱۲۰

فصل هشتم: بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری

۸-۱- طراحی بهینه..... ۱۲۹

۸-۲- روش‌های بهینه‌سازی..... ۱۳۰

۸-۳- الگوریتم ژنتیک ساده..... ۱۳۳

۸-۳-۱- معرفی الگوریتم..... ۱۳۳

۸-۳-۲- برازندگی..... ۱۳۵

فهرست مطالب

۱۳۶.....انتخاب-۳-۳-۸

۱۳۸.....عملگرهای ژنتیکی-۴-۳-۸

۱۳۹.....تعریف مسأله بهینه‌سازی تک هدفه فرآیند جوشکاری نقطه‌ای آلیاژهای IF و BH-۴-۸

۱۴۰.....تعیین ماکزیمم نسبی تابع تک هدفه استحکام کششی- برشی-۱-۴-۸

فصل نهم: جمع‌بندی مطالب و ارائه پیشنهادات

۱۴۴.....بحث و بررسی نتایج-۱-۹

۱۴۷.....پیشنهادات برای تحقیقات آینده-۲-۹

۱۴۸.....مراجع

فصل اول

مقدمه

با توجه به پیشرفت روزافزون صنایع خودروسازی و لوازم خانگی، استفاده از روش‌های جوشکاری مقاومتی^۱ (RW) بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این میان جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای^۲ (RSW) ساده‌ترین و پرکاربردترین گونه جوشکاری مقاومتی است که بر روی ورق‌های نازک انجام می‌شود و معمولاً در آن منطقه جوش بصورت پیوسته نیست. این روش در خودروسازی، صنایع نظامی و لوازم خانگی بیشترین کاربرد را دارد. برای مثال در بدنه یک خودرو حدود ۵۰۰۰-۲۰۰۰ نقطه جوش وجود دارد [۴۴]. در صنعت خودروسازی استحکام نهایی سازه بدنه تا حد زیادی وابسته به کیفیت نقطه جوش‌ها دارد. برای رسیدن به این منظور، لازم است که مقادیر متغیرهای تنظیمی فرآیند جوشکاری به طور مناسبی تنظیم شده باشد. در این راستا هدف اصلی این تحقیق نیز طراحی و ارائه روش‌هایی بمنظور شناخت این فرآیند و تعیین ارتباط دقیق بین ورودی‌ها و خروجی‌های آن است.

۱-۱- تعریف مسئله

روش جوشکاری مقاومتی دارای چندین پارامتر موثر است که از میان آنها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

- زمان لازم جهت انجام عملیات جوشکاری (زمان برقراری جریان)
- شدت جریان لازم برای جوشکاری
- نیروی اعمال شده برای ایجاد درگیری بین دو قطعه کار
- مقاومت الکتریکی سطوح تماس
- خواص فیزیکی قطعات
- هندسه قطعاتی که باید به یکدیگر متصل شوند
- ویژگیهای دستگاه جوشکاری

از آنجا که پارامتر زمان لازم برای انجام عملیات جوشکاری معمولاً کمتر از یک ثانیه است، کوچکترین تغییر در مقدار آن می‌تواند عملیات جوشکاری را با مشکل مواجه نماید و یا آنکه ساختار جوش را تغییر دهد.

^۱. Resistance Welding

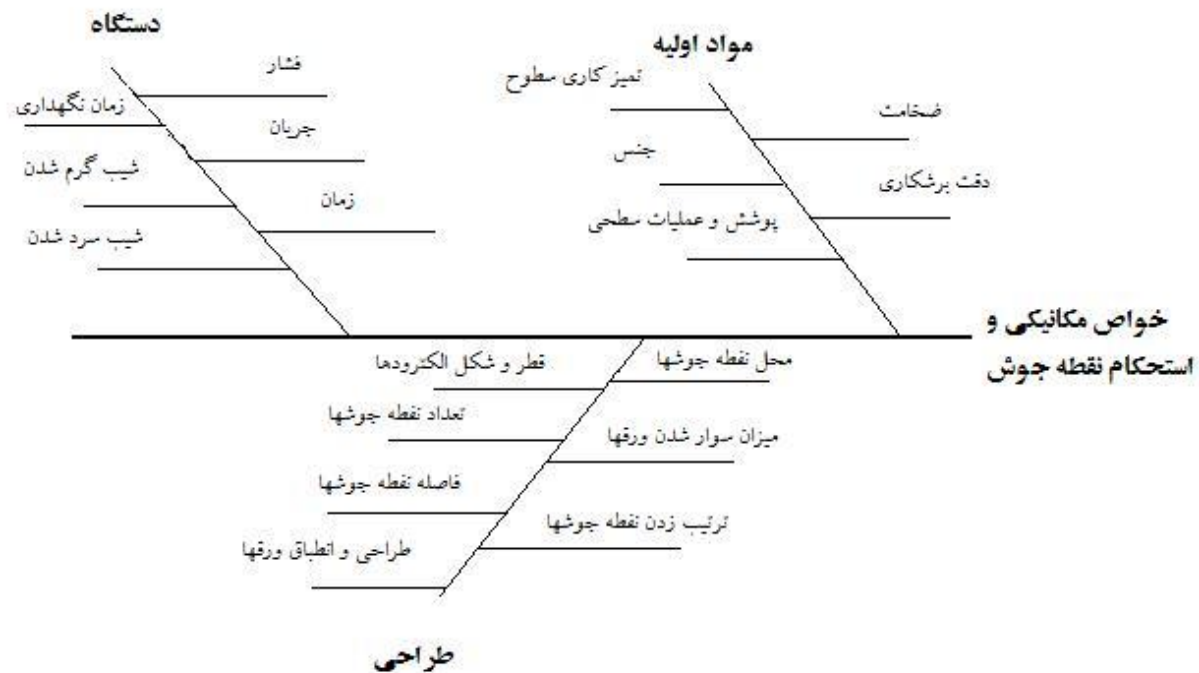
^۲. Resistance Spot Welding

فصل ۱: مقدمه

در این رابطه تحقیقات زیادی صورت گرفته است، برخی از این تحقیقات از دستاوردهای خوبی بر خوردار بوده، در حالیکه اغلب آنها برای مواد و شرایط خاصی بوده و در غالب مواقع داده‌های تجربی ناقص، غیر استاندارد و غیر قابل اعتمادند. در اکثر آنها از یک روش مدل سازی استفاده شده است و عدم مقایسه نتایج با حداقل یک روش دیگر مدلسازی در اغلب آنها دیده می‌شود.

در این پایان نامه تاثیر پارامترهای مقدار جریان، مدت زمان اعمال جریان، نیروی اعمالی الکترودها و مدت زمان اعمال نیروی الکترودها پس از قطع جریان، جهت انجام عملیات جوشکاری، با طرح و انجام آزمایش-های تجربی، و ارائه مدل‌های ریاضی و شبکه عصبی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس با استفاده از تحلیل‌های آماری به اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده پرداخته می‌شود.

در شکل (۱-۱) نمودار علت و معلولی پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی و استحکام نقطه جوش نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: نمودار علت و معلولی پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی و استحکام نقطه جوش

۱-۲- اهداف

اهداف تحقیق حاضر به صورت خلاصه شامل موارد زیر می‌باشد:

- ایجاد ارتباطی دقیق بین پارامترهای تنظیمی و متغیرهای خروجی فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بر روی ورق‌های (IF^3 و BH^4) مورد استفاده در شرکت ایران خودرو، با استفاده از نتایج آزمایشات تجربی، مدلسازی ریاضی و استفاده از شبکه‌های عصبی^۵
- با توجه به اینکه آزمایشات در شرکت خودرو سازی ایران خودرو و شرکت ساپکو در محیطی کاملاً صنعتی انجام شده است، بنابراین نتایج این مطالعه در استانداردهای رویه‌های جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای از طریق پیش بینی تاثیر پارامترها بر کیفیت جوش ورق بسیار موثر و مستند خواهد بود.
- کاهش تنظیمات خط تولید و کاهش ضایعات، با تعیین دقیق تاثیر پارامترهای فرآیند، که این به نوبه خود باعث کاهش هزینه‌های تولیدی و بهبود کیفیت می‌شود.
- اقدام به طراحی و تکمیل بانک اطلاعاتی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در زمینه اتصال ورق‌های فولادی گالوانیزه با جنس‌های متفاوت ذکر شده در صنعت خودرو. لازم به ذکر است این تحقیق برای اولین بار در کشور در صنعت خودروسازی با این حجم از آزمایشات و مدل‌های متفاوت انجام شده است.

۱-۳- ساختار پایان نامه

فصل ۲: پیشینه پژوهش‌ها مرتبط با موضوع تحقیق و فعالیت‌های انجام شده در زمینه شبیه‌سازی این فرآیند، در این فصل ارائه گردیده است.

فصل ۳: در این فصل ابتدا به توصیف فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای و اصطلاحات مربوط به آن پرداخته شده و سپس پارامترهای تاثیر گذار در این روش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

³ Bake Hardenable

⁴ Interstitial Free

⁵ Neural Network

فصل ۴: در این فصل کلیاتی در مورد اصول طراحی آزمایشات و توضیح کارایی آن در این پروژه بیان شده است. آزمایشات عملی انجام شده در این تحقیق با استفاده از رویکرد مزبور طراحی و اجرا شده‌اند.

فصل ۵: در این بخش از تحقیق به تشریح اصول و روش‌های مختلف مدل‌سازی مانند مدل‌سازی آماری و مدل‌سازی به کمک شبکه عصبی پرداخته شده است. روش‌های معرفی شده در این فصل مبنای مدل‌سازی فرآیند جوشکاری مقاومتی- نقطه‌ای بکار رفته در این مطالعه قرار می‌گیرند.

فصل ۶: نحوه انجام آزمایشات تجربی و معرفی تجهیزات و مواد مورد بررسی در این تحقیق در این فصل معرفی می‌شوند. طراحی ماتریس آزمایشات و شناخت پارامترهای ورودی و سطوح آنها و همچنین متغیر پاسخ مورد بررسی در این تحقیق نیز از مطالب ارائه شده در این بخش می‌باشد.

فصل ۷: در این فصل مدل‌های رگرسیونی و مدل شبکه عصبی بر داده‌های حاصل از آزمایشات تجربی، برازش داده شده و پس از ارزیابی و مقایسه، بهترین آنها به عنوان مدل برتر معرفی می‌شود، و در ادامه به بررسی رفتار مدل اصلاح با تغییر متغیرها از دیدگاه علمی شده است.

فصل ۸: لزوم نیاز به استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای تعیین سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی برای کسب کیفیت مورد نظر جوش، در این بخش از تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. و در ادامه با معرفی تابع هدف به بهینه‌سازی آن پرداخته شد، و در نهایت با صحه گذاری به نتایج حاصل به بحث خاتمه داده شده است.

فصل ۹: فصل نهم بخش پایانی این تحقیق است که در آن به جمع‌بندی، نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد برای تحقیقات آتی پرداخته شده است.

فصل دوم

مروری بر منابع و مقالات

در این پروژه به بررسی مقالات و فعالیت‌های انجام شده در زمینه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای پرداخته می‌شود. تحقیقات انجام شده در زمینه فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: کارهای تجربی که شامل تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده و همچنین بررسی مدل‌های آماری و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد. کارهای دیگر به منظور مدل‌سازی المان محدود فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای انجام شده‌اند.

۱- کارهای تجربی

Savage و همکاران [۱]، در سال ۱۹۷۷ مقاومت تماسی الکتریکی استاتیکی قبل و بعد از جوشکاری را مورد مطالعه قرار دادند. تاثیر نیروی الکتروود، جریان و شرایط سطح ماده بر روی مقاومت تماسی استاتیکی قطعه کار با قطعه کار و الکتروود با قطعه کار را نیز بررسی کردند. تاثیر جنس ورق‌ها و نوع پوشش آنها هم در مطالعه آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کار آنها نشان داد که مقاومت تماسی قبل و بعد از جوشکاری رابطه‌ای با استحکام جوش ندارد.

همین نویسندگان [۲]، در سال ۱۹۷۸ تاثیر نیروی الکتروود، شرایط سطحی ماده و نوع پوشش قطعه کار در مقاومت تماسی دینامیکی قطعه کار با قطعه کار و الکتروود با قطعه کار را مورد بررسی قرار دادند و منحنی‌های مقاومت دینامیکی بر اساس زمان را با توجه به پارامترهای ذکر شده ترسیم کردند. آنها سپس شکل هر یک از منحنی‌ها را با توجه به مقاومت کششی و مطالعات متالورژیکی هر جوش تشریح نمودند.

اهمیت دانستن مقاومت فصل مشترک در دماهای بالا Vogler و Sheppard را بر آن داشت تا در سال ۱۹۹۳ دستگاهی در مقیاس آزمایشگاهی بسازند و به وسیله آن مقاومت الکتریکی بین دو ورق نازک را در شرایط فشاری و دمایی مختلف تخمین بزنند. آنها از همین نتایج برای شبیه‌سازی جوش مقاومتی نقطه‌ای استفاده کردند. مطالعه آنها در واقع قسمتی از یک مطالعه گسترده در زمینه شبیه‌سازی ریاضی فرآیند جوشکاری بود [۳].

در سال ۲۰۰۰، پدیده بیرون زدگی مذاب در فرایند جوش نقطه ای توسط Senkara بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که پارامتر نیرو در پدیده بیرون زدگی مذاب عامل بسیار مهمی است [۴].

در سال ۲۰۰۳، Cho و همکاران [۵]، بصورت آزمایشگاهی فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای را مورد مطالعه قرار دادند و تاثیر پارامترهای مختلف را در این فرایند بررسی کردند.

در سال ۲۰۰۵، Song و همکارانش [۶]، مقاومت تماسی الکتریکی را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند و تاثیر فشار سطحی، دما و خواص مواد مختلف را به دست آوردند. آنها این آزمایش‌ها را بر روی موادی مانند فولاد نرم، فولاد زنگ‌نزن و آلومینیوم انجام دادند و نمودارهای مقاومت الکتریکی هر ماده را بر حسب دما و فشار به دست آوردند.

در سال ۲۰۰۶، Vural و همکاران [۷]، تاثیر قطر دکمه جوش را بر روی استحکام خستگی اتصالات جوش مقاومتی نقطه ای بررسی کردند. آنها جنس ورق و قطر دکمه جوش را به عنوان پارامترهای آزمایشگاهی در نظر گرفتند. تستهای خستگی با سیکل بالا انجام شده و منحنی های S-N برای هر نمونه به دست آمد. نتایج کار آنها نشان داد که با افزایش جریان تا مقدار مشخصی، قطر دکمه جوش هم بیشتر می شود. بعد از آن با افزایش جریان به علت ذوب بیش از حد و پدیده بیرون زدگی مذاب^۱ رخ می دهد. همچنین آنها گزارش کردند که با کاهش نیروی اعمالی، عمر خستگی نمونه زیاد می شود. نتیجه گرفته شد که با افزایش قطر دکمه جوش عمر خستگی هم بیشتر می شود.

در سال ۲۰۰۱، Li و همکاران [۸]، آزمایش‌هایی را برای بررسی اثرات شرایط غیرعادی در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای بررسی کردند. این شرایط شامل ناهم محوری مستقیم^۲، ناهم محوری زاویه ای^۳، جوش لبه^۴ و سایش الکتروود و پارامتر خروجی مورد نظر قطر دکمه جوش بود. نتایج کار آنها نشان داد که دو مورد جوش گوشه و ناهم محوری مستقیم مهمترین عوامل موثر بر قطر دکمه جوش می باشند. در حالیکه اثر سایر عوامل بسیار کم بود.

¹ expulsion

² axial misalignment

³ angular misalignment

⁴ edge weld