دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه ساخت و تولید

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان :

شبیه سازی جوشکاری لیزر CO_2 بر روی آلیاژ Ti 6AL4V

نگارنده :

معین عزیزپور

استاد راهنما :

دکتر مجید قریشی

تابستان ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه ساخت و تولید

تاییدیه هیآت داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه حاضر تحت عنوان : " **شبیه سازی جوشکاری لیزر CO_2 بر روی آلیاژ Ti 6AL 4V** " توسط آقای **معین عزیزپور** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته : **مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید** در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۲۷ مورد تائید قرار میدهند.

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه :

شبیه سازی جوشکاری لیزر CO_2 بر روی آلیاژ Ti6AL4V

استاد راهنما : آقای دکتر قریشی

نام دانشجو : معین عزیزپور

شماره دانشجویی : ۹۰۰۵۹۴۴

اینجانب معین عزیزپور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی مینمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می باشد و در مواردی که از پژوهش های دیگران استفاده شده است منبع آن ذکر گردیده است. بعلاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در این پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه فرمت مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت نموده ام.

تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از راهنمائی ها و زحمات استاد محترم و گرانقدر جناب آقای دکتر قریشی که از ابتدای راه و در طی انجام این تحقیق، با راهنمائی های خود مرا در نگارش این اثر یاری نمودند و جناب آقای دکتر خدایگان و دکتر ظهور که زحمت داوری این اثر را به عهده گرفته اند و همچنین از جناب آقای دکتر خرم که با هدایت و حمایت های بی دریغشان یاری ام نمودند کمال تشکر را دارم.

و در پایان از زحمات خانواده خوبم و دوستان عزیزم و سایر کسانی که در تدوین این تحقیق مرا یاری نمودند متشکرم و از خداوند منان سلامت و سعادت ایشان را خواستارم.

چکیده

جوشکاری لیزر از جمله روش های نوین جوشکاری است که سرعت و دقت بسیار بالای آن کاربرد این فرآیند را گسترش داده است. تحقیق حاضر به شبیه سازی جوشکاری لیزر توسط نرم افزار SYSWELD بر روی آلیاژ Ti6Al4V که پرکاربردترین آلیاژ تیتانیوم است می پردازد. در این تحقیق هندسه سطح مقطع جوش توسط شبیه سازی بدست آمده و پس از مقایسه آن با داده های تجربی اثر پارامترهای مختلف بر روی اندازه آن از جمله سرعت، میزان توان ورودی و محل تمرکز اشعه بررسی می گردد. بررسی سختی قسمت های مختلف قطعه کار و نحوه تاثیر توان ورودی و سرعت بر آن ، توزیع حرارت روی سطح قطعه و انتخاب مدل منبع حرارتی مناسب از دیگر مواردی است که در این شبیه سازی به آن پرداخته شده است.

فهرست

مقدمه..... ۱

فصل۱ تحقیق در منابع..... ۴

۱-۱ مقدمه..... ۵

۱- ۲ پیشینه و روشهای مدلسازی انتقال حرارت در فرآیند جوشکاری..... ۵

۱- ۳ بررسی های انجام گرفته روی هندسه جوش توسط روش های تحلیلی..... ۶

۱-۴ بررسی های انجام گرفته روی هندسه جوش توسط روش های آماری..... ۷

۱- ۵ شبیه سازی های انجام گرفته روی هندسه جوش توسط روش المان محدود..... ۹

۱- ۶ بررسی انجام شده روی هندسه جوش با آزمایشات تجربی ۱۱

۱– ۷ تحقیق حاضر..... ۱۲

فصل ۲ روری بر جوشکاری لیزر..... ۱۴

۲- ۱ مقدمه..... ۱۵

۲-۲ پدیده لیزر..... ۱۵

۲-۳ جوشکاری لیزر..... ۱۸

۲-۳- ۱ رسانشی..... ۱۸

۲-۳-۱-۱ گرم کردن مستقیم..... ۱۹

۲-۳-۱-۲ انتقال انرژی..... ۲۰

۲-۳-۲ حالت رسانشی/ نفوذی..... ۲۰

۲-۳-۳ حالت نفوذی (سوراخ کلید) ۲۰

۲-۴ مزایای جوشکاری لیزر..... ۲۱

۲-۵ محدودیت های جوشکاری لیزر..... ۲۲

۲-۶ لیزرهای صنعتی..... ۲۳
۲-۶-۱ لیزرهای Nd:YAG ۲۳
۲-۶-۲ لیزرهایCO2..... ۲۵
۲-۶-۳ مقایسه بین لیزر Nd:YAG و CO2 ..... ۲۷
۲-۷ متالورژی جوشکاری..... ۲۸
فصل ۳ آلیاژ Ti6Al4V و جوشکاری آن..... ۳۱
۳-۱ مقدمه..... ۳۳
۳-۲ مشخصات و خواص تیتانیوم و آلیاژهای آن..... ۳۳
۳-۳ آلیاژ..... ۳۶
۳– ۳- ۱ ریز ساختار تشکیل دهنده آلیاژTi6Al4V ۳۷
۳-۴ جوشکاری تیتانیوم و آلیاژهای آن..... ۴۰
۳-۴-۱ گاز محافظ..... ۴۲
فصل ۴ مدلسازی و آنالیز المان محدود..... ۴۴
۴-۱ مقدمه..... ۴۵
۴- ۲ شبیه سازی جوشکاری..... ۴۵
۴-۳ معرفی نرم افزار Sysweld ۴۷
۴-۳-۱ مزایای شبیه سازی..... ۴۸
۴-۳-۲ پارامترهای مهم شبیه سازی در سیسولد..... ۵۰
۴-۳-۳ مراحل شبیه سازی..... ۵۰
۴- ۴ مدلسازی و روابط ریاضی..... ۵۳
۴- ۵ آزمایشها و معرفی تجهیزات آزمایش..... ۶۳
۴-۵-۱ دستگاه گیوتین..... ۶۴
۴-۵-۲ دستگاه سنگ زنی تخت..... ۶۴

۴-۵-۳ دستگاه لیزر ۶۴
۴-۵-۴ دستگاه میکرو سختی سنج ۶۵
۴-۶ انجام جوشکاری لیزر ۶۶
۴-۷ آزمایش میکرو سختی سنجی ۶۶
فصل ۵ بحث بر روی نتایج ۶۷
۵- ۱ مقدمه ۶۸
۵-۲ متغیرهای ورودی و خروجی ۶۸
۵ – ۳ اثر منبع حرارتی ۶۹
۵ – ۴ اثر محل تمرکز پرتو ۷۱
۵ – ۵ سختی ۷۴
۵ – ۶ اثر سرعت جوشکاری بر توزیع حرارت ۷۷
۵- ۷ اثر میزان حرارت ورودی ۷۸
فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۳
پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۸۵
مقاله تحریر شده ۸۲
منابع و مآخذ ۸۶
Abstract ۸۷

فهرست اشکال و جداول

شکل ۲- ۱ . برانگیخته شدن الکترون، جذب انرژی و انتقال آن به تراز بالاتر ۱۶

شکل ۲-۲ . نشر الکترون و ساطع شدن فوتون..... ۱۶

شکل ۲-۳ موارد کاربرد لیزر در مصارف مختلف..... ۱۷

شکل ۲-۴. جوشکاری لیزر به روش رسانشی..... ۱۹

شکل ۲-۵ . روش های روی هم قرار گیری قطعات در جوشکاری به روش گرم کردن مستقیم ۱۹

شکل ۲-۶ . جوشکاری در حالت نفوذی ۲۱

شکل ۲- ۷ شمایی از مدار لیزر ND:YAG..... ۲۵

شکل ۲- ۸ شمایی از لیزر CO2..... ۲۶

شکل ۲ – ۹ دستگاه لیزر ND:YAG و فیبرهای نوری متصل به کلگی لیزر ۲۸

شکل ۲ – ۱۰ سطح مقطع حاصل از جوشکاری لیزر، پرتو الکترونی ، GMAW..... ۲۹

شکل ۳- ۱ . دو ساختار عمده شبکه کریستالی تیتانیوم..... ۳۳

جدول ۳- ۱ . تعدادی از عناصر آلیاژی پایدار کننده فازهای آلفا و بتا ۳۳

شکل ۳- ۲. ساختار حاصل از سرد شدن آهسته از دمای بالای تغییر فاز β..... ۳۷

شکل ۳- ۳ ریز ساختار بوجود آمده در آلیاژ Ti6Al4V بعد از کوئنچ شدن از دماهای مختلف..... ۳۸

شکل ۴- ۱ . مش بندی هندسه المان محدود ۵۴

شکل ۴-۲ . منبع حرارتی روی قطعه در لحظات ابتدایی جوشکاری ۵۶

شکل ۴-۳ . منبع حرارتی سه بعدی مخروطی گاوسین ۵۷

شکل ۴ - ۴ مدهای مختلف لیزر ۵۸

جدول ۴-۱ . پارامترهای منبع گاوسین بدست آمده در مدلسازی جوشکاری ۶۰

شکل ۴-۵ . حوزه ها، سطوحی که با محیط اطراف انتقال حرارت انجام میدهند ۶۲

شکل ۴-۶ . دستگاه لیزر مورد استفاده در تحقیق.....۶۴

شکل ۵-۱ . مقایسه ابعاد منطقه جوش با نتایج حاصل از شبیه سازی با منبع حرارتی گلداک و گاوسین ۶۹

شکل ۵-۲ تاریخچه دمایی روی سطحی از قطعه کار و عمود بر خط جوش.....۶۹

شکل ۵-۳ . ابعاد جوش بدست آمده از آزمایش در مقایسه با نتایج حاصل از شبیه سازی ۷۱

شکل ۵-۴ . نمودار مقایسه عرض جوش و عمق نفوذ با محل تمرکز پرتو ۷۲

شکل ۵- ۵ . عرض و عمق نفوذ اندازه گیری شده در توان ۱۷۰۰ وات ، سرعتmms ۴۰ .....۷۳

جدول ۵-۱ .مقادیر سختی RC حاصل از داده های تجربی ۷۴

شکل ۵-۶ . پراکندگی سختی در منطقه ذوب و فلز پایه در توان ۱۲۰۰ وات و سرعت mm/s ۳۶.....۷۴

شکل ۵-۷ . اثر توان های مختلف جوشکاری در سختی حاصل از شبیه سازی ۷۵

شکل ۵-۸. اثر سرعت های مختلف جوشکاری در سختی حاصل از شبیه سازی.....۷۶

شکل ۵- ۹ . تغییرات دمایی یک نقطه از سطح قطعه در سرعت های مختلف.....۷۷

شکل ۵-۱۰. منطقه ذوب بدست آمده از شبیه سازی المان محدود و مقایسه آن با داده ی عملی ۷۹

شکل ۵ -۱۱. سطح مقطع جوش بدست آمده از شبیه سازی در انرژی های ورودی مختلف ۷۹

شکل ۵ -۱۲. تغییرات دمایی یک گره روی سطح قطعه با گذر زمان در انرژی های ورودی مختلف.....۸۰

شکل ۵ -۱۳. نمودار تغییرات دمایی چند نقطه در سطح قطعه کار ۸۱

مقدمه

جوشکاری فرآیندی صنعتی است که در آن دو ماده (فلزی یا غیر فلزی) را به یکدیگر به روش ذوبی، غیر ذوبی، با فشار یا بدون فشار به وسیله ی ماده ی واسط (پر کننده) یا بدون ماده ی واسط جوش می دهند تا یک اتصال ایجاد شود. در واقع در فرآیند جوشکاری دو یا چند قطعه به هم متصل می شوند و یک عضو پیوسته را تشکیل می دهند. جوشکاری بر روی طیف وسیعی از فلزات از جمله فولاد، مس، آلومینیوم، برنج و بسیاری دیگر از آلیاژها انجام می شود. مهندسین و جوشکاران با روش های مختلف جوشکاری و با استفاده از طیف گسترده مواد می توانند اتصال ها را با ضخامت، اندازه و شکل مورد نظر، اجرا کنند. جوش ها همانند بست های مکانیکی عمل می کنند و در اتصالات سازه ها جهت انتقال نیرو و انتقال تنش ها از یک عضو سازه به عضو های دیگر استفاده می شوند. برای ایجاد یک اتصال قوی اغلب از روش ذوب قطعه با مواد واسط (پرکننده) استفاده می شود که به شکل یک حوضچه از مواد مذاب (حوضچه مذاب) می باشد که پس از انجماد، اتصال ایجاد می شود.

جوشکاری لیزر از جمله روش های نوین جوشکاری های ذوبی می باشد. سرعت و ظرافت بالا و دقت بسیار، از جمله عواملی است که کاربرد این فرآیند جوشکاری را در صنایع مختلف گسترش داده است. با تابش پرتو پر انرژی لیزر به سطح مورد نظر، حرارت مورد نیاز برای ایجاد حوضچه مذاب و انجام فرآیند اتصال فراهم می گردد.

Ti6Al4V مهمترین و پرکاربردترین آلیاژ تیتانیوم است بطوری که بیش از ۵۰ ٪ مصرف کل تیتانیوم مختص این آلیاژ میباشد. آلیاژ Ti6Al4V دارای فاز دوتایی آلفا+ بتا بوده و استحکام آن بطور متوسط با عملیات حرارتی قابل افزایش است. ورقه هایی از این آلیاژ تا ضخامت ۱۵ میلی متر بطور کامل قابلیت عملیات حرارتی شدن را دارند. استحکام این آلیاژ بطور قابل ملاحظه ای بیشتر از تیتانیوم خالص است در حالی که سختی و ویژگی های حرارتی آن با تیتانیوم خالص یکسان است.

امروزه در صنایع تولیدی کیفیت مهمترین ویژگی هر محصول است. کیفیت میتواند به عنوان میزان رضایت مشتری از محصول برآورد شود. در حیطه جوشکاری، کیفیت جوش به مشخصات مکانیکی فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت بستگی داشته و تحت تاثیر ویژگی های متالورژیکی و ترکیب شیمیایی جوش میباشد. علاوه بر این شکل هندسی گرده جوش نیز از مهمترین عوامل تاثیر گذار روی کیفیت جوش است. بنابراین شکل هندسی گرده جوش نقش مهمی در تعیین مشخصات مکانیکی اتصالات جوش شده دارد. بیشترین تلاش تولید کنندگان برای حصول به ترکیبی درست از پارامترهای جوشکاری است که بوسیله آن بتوان بهترین اتصال جوشی را بدست آورد.

هدف اصلی تحقیق حاضر پیش بینی شکل هندسی منطقه جوش توسط روش المان محدود میباشد. از آنجایی که آزمایشات عملی برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف روی هندسه جوش و منطقه مذاب امری وقت گیر و بسیار پرهزینه است استفاده از روش های المان محدود جایگزین مناسبی برای نیل به این هدف میباشد که در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق علاوه بر پیش بینی هندسه جوش و بررسی تاثیر اثر محل تمرکز پرتو بر ابعاد آن سختی نواحی مختلف قطعه کار نیز توسط نرم افزار محاسبه شده و با داده های عملی مقایسه می شود. از دیگر نتایج بدست آمده از شبیه سازی جوشکاری در نرم افزار بررسی اثر توان و سرعت در توزیع سختی و نحوه پراکندگی حرارت است. همچنین برای انتخاب صحیح منبع حرارتی مقایسه ای بین مدل منبع حرارتی دو بیضوی گلداک و منبع مخروطی سه بعدی گاوسین انجام می شود.

در تحقیق حاضر در فصل اول ابتدا به مروری بر روی تحقیقات پیشین پرداخته شده و پیشینه روش های انتقال حرارت در جوشکاری و تحقیقات پژوهشگران پیشین به تفکیک پژوهش به روش های آماری ، المان محدود و صرفا تجربی مورد بررسی قرار می گیرد. در فصل دوم ابتدا مختصری راجع به پدیده لیزر پرداخته شد و سپس انواع جوشکاری لیزر ، مزایا و محدودیت های آن مورد بررسی قرار گرفته می شود. در این فصل همچنین دو نوع از مهمترین لیزر های صنعتی با هم مقایسه شده و به متالورژی جوشکاری و شبیه سازی لیزر پرداخته می شود. در فصل سوم در ابتدا مختصری راجع به

مشخصات ماده تیتانیوم و آلیاژهای آن پرداخته شده و در ادامه خواص آلیاژ Ti6Al4V، مورد استفاده در این پژوهش و ریز ساختار آن مورد بررسی قرار می گیرد. در انتهای این فصل به اطلاعاتی در رابطه با جوشکاری تیتانیوم و آلیاژهای آن از جمله انتخاب صحیح گاز محافظ و محیط مناسب جوشکاری پرداخته می شود. در فصل چهارم شبیه سازی فرآیند جوشکاری ارائه شده است و اشاراتی به نرم افزار سیسولد، مزایا و کاربردهای مختلف آن در صنعت می شود و در ادامه به تفصیل نحوه و مراحل شبیه سازی فرآیند و روابط ریاضی حاکم بر مساله ارائه می شود. در فصل پنجم و ششم نتایج حاصل از شبیه سازی جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی در این زمینه ارائه می شود.

فصل ۱

تحقیق در منابع

۱-۱ مقدمه

در این بخش به پیشینه تحقیق در شبیه سازی لیزر و کارهای تجربی پرداخته شده است. در ابتدای این فصل مختصری از پیشینه و روش های مدلسازی انتقال حرارت آورده شده و در ادامه بررسی های پیشین انجام شده بر روی هندسه جوش طبقه بندی شده به چهار روش عددی، آماری، المان محدود و صرفا تجربی تشریح شده است. در نهایت به ویژگی منحصر به فرد تحقیق حاضر در مقایسه با سایر تحقیقات پیشین انجام شده اشاره شده است.

۱- ۲ پیشینه و روشهای مدلسازی انتقال حرارت در فرآیند جوشکاری

تئوری اساسی شار حرارتی که به وسیله فوریه گسترش داده شد، توسط روزنتال[۱] در سال ۱۹۳۰ جهت مدلسازی منبع حرارتی متحرک بکار برده شد[1]. این مدل حرارتی که در اواخر سال ۱۹۳۰ منتشر شد ، همچنان روش تحلیل قابل قبولی جهت محاسبه توزیع دمای گذرا در فرایند ، در نقاط دورتر از حوضچه مذاب جوشکاری است به طوری که که محققان بسیاری تاکید کرده اند که مدل خطی و نقطه ای روزنتال نتایج نادرستی در نقاط نزدیک جوش (منطقه ذوب وناحیه متاثر از حرارت) ارائه میکند. به طوری که این مدل در مرکز منبع حرارتی دمای بینهایت را نشان میدهد که خلاف واقعیت است و همچنین ثابت فرض نمودن خواص مکانیکی با تغییر دما در طی فرایند جوشکاری میزان دقت محاسبات را کاهش میدهد. به منظور برطرف نمودن مشکلات روش تحلیلی ، محققان روش المان محدود را به منظور آنالیز انتقال حرارت در طی فرایند جوشکاری گسترش دادند. بدین ترتیب با بکار بردن مدل خطی و نقطه ای روزنتال، در روش المان محدود برخی از محدودیت های این روش برطرف شد و امکان تحلیل مدل های پیچیده ممکن شد، اما همچنان مدل های مذکور ضعف های عمده ای در پیش بینی گرادیان درجه حرارت در طی فرایند جوشکاری داشتند.

---

[۱] Rosenthal

با گسترش روشهای تحلیل عددی از جمله المان محدود و اختلاف محدود و همچنین توسعه امکانات سخت افزاری، مدل های پیشرفته تری جهت مدلسازی منبع حرارتی و پدیده هدایت در جوشکاری ارائه گردید. از جمله مدل منبع حرارتی به صورت توزیع گاوسین با اعمال شار حرارتی سطحی بر روی قطعه شبیه سازی شده و نشان داده شده است. این مدل که به مدل دیسکی معروف است نسبت به روش خطی و نقطه ای دقیق تر بوده و توزیع حرارت در قطعه را با صحت بیشتری مدل میکند. با این وجود بسیاری از محققان پیشنهاد کردند که به منظور شبیه سازی هر چه دقیق تر نفوذ حرارتی در ضخامت قطعه توسط منطقه ذوب شده باید شار حرارتی بصورت حجمی اعمال شود. در این راستا کوک[۱] حرارت ورودی را بصورت توزیع چگالی توان توسط روش اختلاف محدود اعمال نمود[2]. به منظور مدل سازی هر چه دقیق تر منبع حرارتی که قادر به پیش بینی توزیع دما در حوضچه جوش و اطراف آن و همچنین تطبیق شکل هندسی حوضچه و مقدار نفوذ در قطعه در جوشکاری هایی که نسبت عمق به عرض جوش مانند روش های جوشکاری با پرتو لیزر و پرتو الکترونی زیاد نبود مدل دو بیضوی توسط گلداک[۲] و همکارانش مطرح شد[3]. برای روشهای جوشکاری با نسبت عمق به عرض زیاد نیز مدل مخروطی سه بعدی گاوسین مورد استفاده قرار گرفت.

۱- ۳ بررسی های انجام گرفته روی هندسه جوش توسط روش های تحلیلی

هانبین و لونجی[۳] یک مدل ریاضی برای پیش بینی هندسه گرده جوش قطعات جوشکاری شده از جنس آلیاژ تیتانیوم ارائه دادند. در این تحقیق آنها با حل معادلات انرژی ، مومنتوم و جرم و در نظر گرفتن اثر پلاسما و سوراخ کلید و همچنین آنالیز ریاضی حرکت جریان مذاب حاصل از جوشکاری تیتانیوم موفق به بدست آوردن کانتورهای دما شدند. آنها همچنین نشان دادند که اثر مارانگونی[۴] نقش

---

[۱] Cook

[۲] Goldak

[۳] Hanbin & Lunji

[۴] Marangoni effect

مهمی در انتقال حرارت از مرکز حوضچه مذاب به سمت خارج از آن دارد. با در نظر گرفتن اثر مارانگونی در محاسبات، حوضچه مذاب کوچکتر بوده و با واقعیت همخوانی بیشتری دارد[4].

رای و المر[۱] به جوشکاری سه فلز تانتالوم ، فولاد ضد زنگ و Ti6Al4V توسط پرتو لیزر پرداختند. آنها هندسه سوراخ کلید جوش ایجاد شده را توسط حل عددی جریان مذاب و انتقال حرارت بدست آوردند. آن ها برای این امر انعکاسات پرتو رخ داده در سوراخ کلید را در نظر گرفته و با حل معادلات مومنتوم و قانون بقای انرژی موفق به بدست آوردن کانتورهای دما و تعیین مرز بین ماده مذاب و فلز پایه شده و نتایج حاصل از تحلیل را با نتایج حاصل از داده های عملی مقایسه کردند. آن ها همچنین ریز ساختار نواحی حاصل از انجماد را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که که کاهش سرعت جوشکاری باعث میشود که ریز ساختار انجماد بصورت دانه های درشت نمایان شده و کمتر بصورت ساختار دندریتی باشد[5].

۱-۴ بررسی های انجام گرفته روی هندسه جوش توسط روش های آماری

ساتیا و عبدالجالی[۲] هندسه گرده جوش فولاد ضد زنگ سوپر آستنیت 904 L را تحت جوشکاری لیزر با استفاده از روش تاگوچی به عنوان یک روش آماری طراحی آزمایشات (DOE) بررسی کردند. در این روش تعدادی از پارامترهای جوشکاری از جمله قدرت لیزر، سرعت حرکت منبع حرارت و محل تمرکز پرتو بهینه سازی شد. همچنین کیفیت جوشکاری با اندازه گیری عرض گرده و عمق نفوذ مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج تجربی مقایسه شد[6]. با این حال در روش تاگوچی در بیشتر مواقع اثر متقابل همه فاکتورها در نظر گرفته نمیشود و از این رو برای بحث و بررسی بر روی نتایج روشی با قابلیت اطمینان بالا نمی باشد.

---

[۱] Ray & Elmer

[۲] Sathiya & Abduljalee

بن یونس و الابی[۱] اثر سرعت، توان و محل تمرکز پرتو را در جوشکاری لب به لب فولاد متوسط کربن توسط لیزر را روی هندسه گرده جوش و اندازه منطقه متاثر از حرارت با استفاده از روش آماری RSM[۲] بررسی کردند. طراحی آزمایش با روش باکس بهنکن[۳] انجام شد و معادلات خطی و درجه دوم برای پیش بینی هندسه جوش و میزان حرارت ورودی بکار گرفته شد[7].

بالاسوبرامانیا و شانموگام[۴] نیز با روش آماری باکس بهنکن به بررسی پارامترهای ورودی در جوشکاری لیزر ورق ۶/۱ میلی متری فولاد ضد زنگ در حالت لب به لب پرداختند. حالت گذرای توزیع حرارت و اندازه ابعاد حوضچه مذاب ، عمق نفوذ و عرض گرده با استفاده از نرم افزار المان محدود SYSWELD محاسبه شد. منبع حرارت بصورت منبع گاوسین مخروطی سه بعدی برای آنالیز دمایی غیر خطی گذرا مورد استفاده قرار گرفت [8].

اوگور و بایرام اوغلو[۵] با استفاده از روش های آماری گری و تاگوچی به بهینه سازی گرده جوش در جوشکاری TIG[۶] روی فولاد ضد زنگ پرداختند. آنها برای این کار تابع هدف بدست آمده از ۱۶ آزمایش مختلف را با روش های فوق بهینه سازی کردند. پارامترهای بهینه سازی شده در جوشکاری TIG شامل عرض گرده ، طول و ارتفاع آن ، عمق نفوذ و منطقه متاثر از حرارت بود. روش تاگوچی به دنبال روش گری برای حل مساله مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در این تحقیق میزان اثر فاکتورهای مختلف بر روی کیفیت نهایی جوش توسط آنالیز واریانس (ANOVA) بررسی شد. در

---

[۱] Benyounis & Olabi

[۲] Response Surface Method

[۳] Box_Behnen

[۴] Balasubramania & Shanmugam

[۵] Ugur & Bayramoglu

[۶] Tungsten inert gas