

بررسی روش جوشکاری لیزر عبوری و پارامترهای مؤثر بر آن

تهمینه عدیلی^۱، رضا عبدی بهنق^۲

۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، گیلان، adili.tahmine@gmail.com

۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۱

چکیده

استفاده از لیزر در جوشکاری پلاستیک‌ها در اوائل دهه ۱۹۷۰ م مطرح شد. اگرچه کاربردهای گسترده صنعتی این فناوری در جوشکاری پلاستیک‌ها از سال‌های پایانی دهه ۱۹۹۰ آغاز شده است. در جوشکاری لیزر عبوری، قطعاتی که باید به هم متصل شوند در کنار هم قرار می‌گیرند و تولید حرارت و ایجاد منطقه جوش همزمان با هم صورت می‌پذیرد. در این روش یکی از قطعاتی که قرار است جوش شود باید قابلیت عبوردهی پرتو لیزر را داشته باشد و قطعه دیگر می‌تواند شفاف یا غیرشفاف باشد که در حالت شفاف بودن قطعه دوم، باید از یک ماده جاذب در فصل مشترک دو قطعه استفاد کرد. پرتو لیزر در قطعه شفاف نفوذ کرده و با رسیدن به قطعه جاذب در فصل مشترک دو قطعه کار به حرارت تبدیل می‌شود و منطقه جوش را ایجاد می‌کند. در این مقاله سعی شده است با مرور تاریخچه جوشکاری لیزر عبوری با تکیه بر کارهای تجربی به بررسی قابلیت‌های فرایند، پارامترهای مؤثر بر آن و کاربردهایش پرداخته شود.

واژگان کلیدی

جوشکاری لیزر عبوری، پلاستیک، ماده جاذب، دما، زمان پرتودهی

۱. مقدمه

نیز شناخته می‌شود [۲]. از میان تمام نام‌های مطرح شده، اگرچه جوشکاری پلاستیک لیزری واژه‌ای است که اغلب برای توصیف این فناوری استفاده می‌شود، جوشکاری لیزر عبوری اصطلاح بسیار مناسبتری در توصیف فرایند به نظر می‌رسد و می‌تواند دقیق‌تر این روند را نشان دهد. این فرایند معمولاً برای اتصال قطعات پلاستیکی، ترموپلاستیکی و برخی از کامپوزیت‌ها به کار گرفته می‌شود. در این نوع روش جوشکاری، دو قطعه اتصالی باید

اتصال انواع پلاستیک‌ها با استفاده از فرایندهای متنوعی انجام می‌شود. این روش‌ها عموماً به سه دسته تقسیم می‌شوند: گرمایش اصطکاکی^۱، گرمایش هدایتی^۲ و گرمایش الکترومغناطیسی^۳ [۱]. جوشکاری لیزر عبوری از جمله انواع جدید و پرکاربرد روش‌هایی است که به تازگی در اتصال قطعات پلاستیکی و کامپوزیتی به کار می‌رود. این نوع جوشکاری با نام‌های دیگری چون جوشکاری لیزر پلاستیکی^۴، جوشکاری عبوری - میانی^۵ و جوشکاری لیزر پلیمری^۶

رفتار متفاوتی داشته باشند. یک قطعه پرتو لیزر را از خود عبور داده و قطعه دیگر به عنوان جذب کننده این پرتو و در جهت تبدیل آن به گرما عمل می کند. در نتیجه فرایند جوشکاری لیزری دقیقاً در نقطه اتصال دو قطعه به هم انجام می شود [۱].

جوشکاری قطعات پلاستیکی به این روش، اهمیت زیادی در کاربردهای صنعتی دارد [۳]. استفاده از این روش نوین به خصوص در صنایع خودروسازی، پزشکی و بسته بندی رشد چشم گیری داشته است. در جوشکاری لیزر پلاستیکی، گرمایی که توسط لیزر برای اتصال قطعات تولید می شود، قابلیت کنترل از لحاظ مقدار انرژی اعمال شده، محل و اندازه حرارت وارده را دارد. بنابراین برای اتصال قطعات بزرگ و کوچکی که خطوط اتصال پیچیده داشته و یا دارای قسمت های حرارتی حساس می باشند، بسیار مفید خواهد بود [۴].

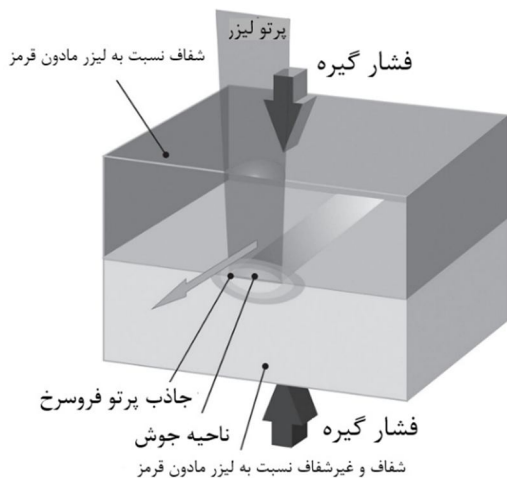
در سال های اخیر تحقیقات گسترده ای در زمینه بهبود استفاده از این فناوری به منظور اتصال مواد مختلف انجام شده است. در سال ۱۹۸۵ م، برای نخستین بار فرایند جوشکاری لیزر عبوری، که در آن با استفاده از یک افزودنی کربنی سیاه رنگ ویژگی جذبی لایه زیرین اصلاح شده بود، توسط تویوتا در ژاپن ارائه شد [۵]. جنبه های دیگر توسعه این فرایند شامل استفاده از طول موج های متفاوت لیزر به منظور اصلاح فعل و انفعالات و در نتیجه اثر حرارتی در پلاستیک ها می باشد. همچنین روش استفاده از این نوع جوشکاری برای اتصال قطعات ضخیم تر و به کار بردن جاذب هایی که برخلاف کربن سیاه کمتر قابل رویت هستند، ارائه شده اند [۴، ۶، ۷]. همچنین استفاده از بخش هایی از پرتو لیزر با شدت بالا و پایین، اعمال آن به منظور اصلاح ویژگی جذب پرتو در پلاستیک ها و امکان ذوب محلی و داخلی قسمت هایی از آنها تنها در جایی که پرتو دارای شدت کافی باشد، نمونه دیگری از کارهای انجام شده در این راستا می باشد [۸].

در ادامه به چند نمونه دیگر از پژوهش های صورت گرفته در این زمینه اشاره شده است. پرابهاکاران و همکاران (۲۰۰۵) یک شبیه سازی عددی از انتقال حرارت در حین جوشکاری لیزر عبوری ارائه دادند. آنها با استفاده از روش اختلاف محدود یک مسئله انتقال حرارت هدایتی ناپایدار یک بعدی را حل کرده، تأثیر شرایط جوشکاری را بر پروفایل دمایی وابسته به زمان بیان کردند. مدل ارائه شده با استفاده از داده های تجربی اعتبارسنجی شده است [۹]. ایلی و همکاران (۲۰۰۷) مطالعه ای در زمینه قابلیت جوشکاری دو

ماده پلیمری براساس ویژگی های حرارتی و نوری آنها انجام دادند. مدل ارائه شده براساس تئوری می و روش مونت کارلو به توصیف رفتار پرتو نور در واسطه های نیمه شفاف پرداخته، تخمین توزیع قدرت لیزر را در نقطه اتصال دو ماده امکان پذیر ساخته است. مدل دیگری که در این تحقیق ارائه شده، براساس روش المان محدود، برآورد میدان دما را در هر دو قسمت جوشکاری شده ممکن ساخته است [۱۰]. ون و اردمن (۲۰۰۷) مدلی از جوشکاری لیزر عبوری با قابلیت استفاده به صورت یک ابزار طراحی تحلیلی ارائه دادند. مدل توسعه یافته در این پژوهش بهینه سازی پارامترهای عملکردی را با در نظر گرفتن مزایای اقتصادی و صرفه جویی در زمان فراهم آورده است. این مدل با استفاده از قانون اول انتقال حرارت و استفاده از هدایت ترماسی، که تابعی از دما و فشار، توزیع گوسی لیزر، و ویژگی های مواد مختلف متغیر با دما از قبیل ضریب جذب می باشد، ساخته شده است. آنها همچنین آزمایشی با استفاده از پلی وینیل کلراید به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی خود ارائه دادند که به فهم بهتر رابطه پارامترهای جوشکاری و کیفیت آن کمک کرده است [۱۱-۱۲]. آچرجی و همکاران (۲۰۱۱) روشی برای حل چندهدفه یک مسئله بهینه سازی به منظور بهبود پارامترهای جوشکاری در فرایند جوشکاری لیزر عبوری ارائه دادند. آنها با استفاده از روش تاگوچی و ترکیب آن با تحلیل رابطه خاکستری، به بهینه سازی همزمان قدرت لیزر، سرعت جوشکاری و موقعیت نقطه تمرکز آن، با در نظر گرفتن استحکام و عرض سطح مقطع جوشکاری پرداخته اند. آنها روش ارائه شده را در مقایسه با نتایج تجربی قرار داده و دریافتند که استفاده از پارامترهای بهینه شده با استفاده از این روش به صورت مؤثری در بهبود مشخصه های جوشکاری عمل می کند [۱۳]. آسکو و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل سازی تحلیلی و عددی از پراکندگی پرتو لیزر در فرایند جوشکاری لیزر عبوری کامپوزیت های ترموپلاستیک ارائه دادند. مدل عددی براساس روش ردیابی اشعه، که روشی برای به دست آوردن چگونگی انتشار نوری پرتو لیزر واسطه های نامتقارن با تغییرات پراکنده ضریب شکست است، به دست آمده است [۱۴].

با مرور تاریخچه فرایند جوشکاری لیزر عبوری می توان به این نتیجه رسید که تحقیقات ثبت شده ای در این زمینه از سوی محققان داخل کشور ارائه نشده است و استفاده از این فرایند، توسط صنایع داخلی، باوجود قابلیت های فراوان آن مورد توجه قرار

$$I(Z) = I_0 e^{-\alpha z} (W/m^2) \quad (1)$$



شکل ۱. نمای شماتیکی از فرایند جوشکاری لیزر عبوری [۴]

به طوری که در این رابطه $I(z)$ شدت نور بوده که به صورت تابعی از ضخامت ماده می باشد. همچنین I_0 شدت نور در زمانی است که $z=0$ باشد و α ضریب جذب و z عمق ماده (ضخامت) می باشد. ضریب جذب به صورت تجربی با استفاده از یک قطعه پلی وینیل کلرایدی تمیز در دمای محیط و دماهای بالاتر به دست آمده است [۱۵]. در نهایت پرتو لیزر عبوری از ماده شفاف، به سطح ماده جاذب برخورد کرده، در آنجا ضریبی از انرژی آن منعکس می شود و مقدار باقیمانده از آن وارد حجم ماده می شود. جذب انرژی پرتو لیزر در ماده جاذب نیز می تواند توسط قانون بییر بیان شود. با توجه به ضخامت ماده جاذب و ضریب جذب آن امکان دارد قسمتی از انرژی لیزر از هر دو قسمت به صورت کامل عبور کند [۱].

۳. پارامترهای جوشکاری

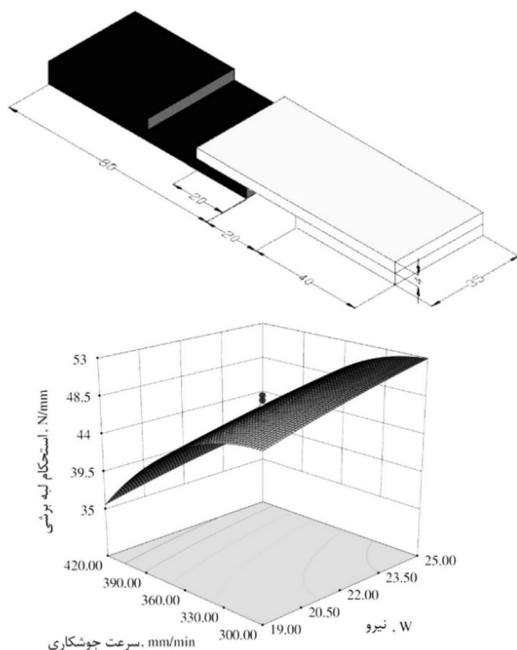
در این نوع جوشکاری مانند همه فرایندهای جوشکاری پلاستیک سه پارامتر اساسی در نظر گرفته می شود: دما، زمان و فشار منطقه جوش. تراکم انرژی در فرایند جوشکاری شامل دو پارامتر دما و زمان می باشد که با استفاده از قدرت لیزر، سایز پرتو و زمان پرتوافکنی (برای فرایند پایدار) یا سرعت جوشکاری (برای فرایندی که یک قسمت اتصالی با لیزر حرکت می کند) تعیین می شود. چگونگی تعیین تراکم انرژی در رابطه ۲ با در نظر گرفتن قدرت، زمان و اندازه نقطه و در رابطه ۳ با در نظر گرفتن قدرت، سرعت و پهنای نقطه بیان شده است.

نگرفته است. با توجه به لزوم به کارگیری این فرایند در صنایع مختلف و با توجه به کمبود منابع اطلاعاتی داخلی در این زمینه، در این مقاله به چگونگی انجام فرایند جوشکاری لیزر عبوری، پارامترهای مؤثر بر این فرایند و همچنین کاربردهای آن در صنایع پرداخته شده است. هدف از ارائه این مقاله معرفی روش نوین و بهینه اتصال قطعات با استفاده از جوشکاری لیزر عبوری و اهمیت کاربردی آن در صنعت می باشد.

۲. روش انجام فرایند

جوشکاری لیزری پلاستیک به دو شکل وجود دارد: جوشکاری لیزر مستقیم و جوشکاری لیزر عبوری. در فرایند جوشکاری پلاستیک ها، جوشکاری لیزر مستقیم کاربرد کمتری نسبت به جوشکاری لیزر عبوری دارد. در جوشکاری لیزر عبوری، چشمه لیزر دارای طول موجی بین $0/8$ تا $1/1$ میکرومتر بوده، که لیزرهایی با انواع دیود، Nd:YAG و فیبر را شامل می شود. پرتو لیزر به سمت دو قطعه ای که بر هم قرار گرفته اند، تابیده می شود. قابلیت تابشی که در این طول موج مشخص انجام می شود، تمایل کمتری به جذب در پلاستیک های طبیعی بدون افزودنی جاذب دارد. لذا در جوشکاری لیزر عبوری دو قطعه ای که قرار است به هم جوش شود باید دارای شرایط خاصی باشند. اصولاً در یک اتصال روی هم، قطعه بالایی شفاف بوده و قابلیت جذب انرژی پرتو لیزر را ندارد. این در شرایطی است که قطعه پایینی می تواند شفاف یا جاذب انرژی لیزر باشد. در صورتی که قطعه پایینی نیز شفاف باشد، افزودنی جاذب لیزر به قطعه پایینی یا به قسمت اتصال دو قطعه اضافه می شود. در نتیجه وقتی قطعات در کنار هم قرار می گیرند، پرتو لیزر از قطعه بالایی عبور کرده و به ماده جاذب بین دو قطعه رسیده و تولید حرارت می کند. حرارت ایجاد شده در فصل مشترک دو قطعه نیز می تواند منجر به اتصال جوشی آنها شود [۴] (شکل ۱). در ادامه به شرح مختصری از نظریه فرایند جوشکاری لیزر عبوری پرداخته شده است. وقتی پرتو لیزر به سطح قطعه شفاف برخورد می کند، بخشی از پرتو برخوردی بازتابیده شده و انرژی باقیمانده از این پرتو وارد حجم ماده می شود. در ادامه بخشی از انرژی پرتوی که به قطعه شفاف وارد می شود، پراکنده و بخشی از انرژی آن جذب می شود. این شرایط را می توان با قانون بییر نشان داد. قانون بییر جذب نور در یک ماده جامد را به صورت رابطه ۱ بیان می کند [۱۵].

ماده را افزایش داده، در نتیجه حجم ذوب شده و استحکام جوشکاری تا زمان رسیدن به دمای بحرانی فروپاشی افزایش می‌یابد [۱۷].



شکل ۲. نمودار تأثیر پارامترهای جوشکاری بر استحکام لبه برشی [۱۷]

۴. کاربردهای جوشکاری لیزر عبوری

جوشکاری لیزر عبوری کاربردهایی گسترده به منظور اتصال پلاستیکی قطعات دارد. عمده‌ترین مورد استفاده از این نوع جوشکاری ساخت ابزار پزشکی از جمله تراشه‌های میکروفلوئیدیک و کاتتر است. تأکید ویژه این نوع کاربرد بر استفاده از لیزر به منظور نمونه برداری سریع و تولید تراشه‌های زیستی بوده، به‌ویژه برای مواردی که در آنها سیلیکون ماده پایه ترجیحی نباشد [۱۸]. در مهندسی پزشکی کاربرد این روش اتصال به‌عنوان یک فناوری تمیز در جوشکاری قطعات پلاستیکی مورد توجه بسیار قرار گرفته است. برای مثال در سیستم‌های تحویل دارو، به‌منظور کمک به بیماران در مدیریت مداوم مقدار داروها، از نوعی پمپ استفاده می‌شود که می‌تواند در مقادیر گوناگون تنظیم شود (شکل ۳). در این ابزار به‌دلیل حساسیت بالای قطعات و نیاز به جوشکاری بدون اثرگذاری بر مواد تشکیل‌دهنده از این روش جوشکاری استفاده می‌شود [۱۹].

اتصال لوله‌های تولید بخار نیروگاه‌های هسته‌ای، از دیگر موارد کاربرد جوشکاری لیزر عبوری است. تولید سیستم‌های لنز نوری متراکم فشرده و آینه‌های فلزی که دارای انعکاس و دوام

$$\text{Energy density} = \frac{\text{Power} \times \text{Time}}{\text{Spot size}} \quad (۲)$$

$$\text{Energy density} = \frac{\text{Power}}{\text{Spot width} \times \text{Speed}} \quad (۳)$$

با توجه به روابط بیان‌شده، مقدار بهینه تراکم انرژی از اهمیت بسیاری برخوردار است. کم‌بودن بیش از حد این پارامتر نشان‌دهنده حرارت نامناسب بوده، در نتیجه مواد در ناحیه جوش در دمای نامناسب بوده، استحکام و طول عمر کافی نخواهند داشت. همچنین زیادبودن بیش از حد این پارامتر سبب افزایش حرارت در ناحیه جوش شده، در نتیجه ایجاد تخلخل، سوختگی یا نیم‌سوز شدن پلاستیک را سبب می‌شود. فشار منطقه جوش ناشی از نیروی گیره‌بندی قطعاتی که قرار است به هم جوش شوند پارامتر دیگری است که به‌وسیله یک سیستم نگهدارنده قطعات کنترل می‌شود. اگرچه این پارامتر به اندازه دو پارامتر دیگر اهمیت ندارد، اما چنانچه قطعه‌کارها به‌درستی در کنار هم قرار نگرفته باشند یا فشار اعمالی جهت اتصال آنها به هم کم یا زیاد باشد، اتصال قطعات در فرایند جوش لیزر به‌صورت کاملاً محکم انجام نخواهد شد و احتمال بروز اتصال معیوب بیشتر خواهد شد [۴].

محققان زیادی به بررسی میزان تأثیر پارامترهای مختلف فرایند بر کیفیت جوش حاصله پرداخته‌اند. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری مهم می‌توان اشاره کرد که مدلسازی جریان حرارتی در جوشکاری لیزر عبوری، راه‌حل مناسبی است که به پیش‌بینی میزان بیشینه دما در محل اتصال دو قطعه به‌صورت تابعی از عمق جوشکاری کمک می‌کند. این شبیه‌سازی می‌تواند تا حدود زیادی از هدررفت منابع استفاده‌کنندگان، به‌ویژه زمان جلوگیری کند. این مدلسازی‌ها عموماً به بررسی تأثیر سه پارامتر مهم جوشکاری شامل توان لیزر، اندازه پرتو و سرعت پیشروی می‌پردازند [۱۶].

به‌عنوان نمونه، شکل ۲ میزان تأثیر هر دو پارامتر جوشکاری (توان و سرعت پیشروی) را بر استحکام برشی اتصال جوشی روی هم دو قطعه اکریلیکی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، سرعت جوشکاری تأثیر منفی بر استحکام برشی قطعه کار دارد؛ زیرا انتقال انرژی و انتشار گرما در ماده در حین فرایند جوشکاری لیزر عبوری وابسته به توان لیزر و زمان تابش بوده، و سرعت بالای جوشکاری زمان تابش را کاهش داده، سبب ایجاد حرارت ورودی کمتر در منطقه جوشکاری می‌شود. در نتیجه حجم کمتری از ماده ذوب شده، استحکام اتصال کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل، افزایش توان لیزر تأثیر مثبتی بر استحکام برشی دارد؛ زیرا افزایش قدرت لیزر حرارت ورودی به

چشمگیر کیفیت جوش از دیگر مزایای استفاده از روش جوشکاری لیزر عبوری می‌باشد. لزوم استفاده از تجهیزات پیشرفته و در نتیجه افزایش هزینه جوشکاری را می‌توان به‌عنوان محدودیت این روش جوشکاری بیان کرد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی روش جوشکاری لیزر عبوری و معرفی آن، چگونگی انجام این فرایند، پارامترهای مؤثر، کاربردها، مزایا و محدودیت‌های آن پرداخته شده است و نتایج زیر به‌دست آمده است. در این روش جوشکاری از یک پرتو لیزر در اتصال جوشی روی هم دو قطعه پلاستیکی استفاده می‌شود. منبع تولیدکننده لیزر بسته به جنس قطعاتی که قرار است جوشکاری شوند تعیین می‌شود. پارامترهای گوناگونی بر کیفیت جوش حاصل در این روش تأثیرگذارند که از میان آنها توان لیزر، سرعت پیشروی، فشار و نوع ماده جاذب در فصل مشترک دو قطعه از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. امروزه جوشکاری لیزر عبوری با توسعه تجهیزات و دارابودن مزایایی چون کمترین تنش مکانیکی، کنترل انرژی دقیق، استحکام جوشی مناسب و سرعت بالا به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف از قبیل خودروسازی و تجهیزات پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهمترین مزیت استفاده از این روش جوشکاری دقت بالا در ناحیه جوشکاری و امکان کاربرد آن در سطوح و مقیاس‌های بسیار کوچک می‌باشد.

بالا بوده، توانایی ورود به لوله‌ها تا حدود ۱۶ میلی‌متر قطر داخلی آنها را داشته، همچنین استفاده از سیستم عبور پرتو در فواصل طولانی حدود ۲۰ متر با استفاده از فیبرهای نوری با قطر کم، در این راستا مفید می‌باشند [۲۰]. از دیگر کاربردهای صنعتی استفاده از این روش جوشکاری می‌توان به صنایع خوردروسازی، مخازن تحت فشار و قطعات ترمز، صنایع بسته‌بندی، قطعات قالب، ظروف غیرقابل نفوذ و حتی منسوجات مصنوعی اشاره کرد [۲۱].



شکل ۳. پمپ مورد استفاده در اندازه‌گیری مقدار دارو [۱۹]

۵. مزایا و محدودیت‌های جوشکاری لیزر عبوری

استفاده از این روش جوشکاری علاوه بر ایجاد جوشکاری دقیق و کنترل‌شده در ناحیه اتصال، جوشکاری منظم را در سطوح و مقیاس‌های بسیار کوچک فراهم می‌کند. همچنین مقاومت بالای اتصال، عدم ایجاد خرابی در مواد اطراف ناحیه جوش، عدم استفاده از مواد چسبنده اضافی، اتصال اشکال پیچیده و سه‌بعدی و افزایش

۷. مأخذ

- [1] H. Potente, J. Korte, F. Becker, Laser transmission welding of thermoplastics: analysis of the heating phase, *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 18, no. 10, pp. 914-920, 1999.
- [2] K. Mistry, Tutorial plastics welding technology for industry, *Assembly Automation*, Vol. 17, No. 3, pp. 196-200, 1997.
- [3] K. Sato, Y. Kurosaki, T. Saito, I. Satoh, *Laser welding of plastics transparent to near-infrared radiation*, in Proceeding of International Society for Optics and Photonics, San Jose, CA, USA, 2002.
- [4] S. Katayama, *Handbook of laser welding technologies*, Elsevier, 2013.
- [5] K. Toyota Jidosha, Laser beam welding of plastic plates, Patent application JP85213304, Vol. 26, 1985.
- [6] I. Jones, R. Wise, *Welding method*, Google Patents, 2003.
- [7] I. Jones, N. Taylor, R. Sallavanti, J. Griffiths, *Use of Infrared Dyes for Transmission Laser Welding of Plastics*, in Proceeding of Laser Materials Processing Conference, San Diego, CA, USA, 1999.
- [8] A. Roesner, P. Abels, A. Olowinsky, N. Matsuo, A. Hino, Absorber-free laser beam welding of transparent thermoplastics, in Proceeding of International Congress on Applications of Lasers & Electro Optics, Temecula, CA, USA, 2008.

- [9] R. Prabhakaran, M. Kontopoulou, G. Zak, P. Bates, V. Sidiropoulos, Simulation of heat transfer in laser transmission welding, *International Polymer Processing*, Vol. 20, No. 4, pp. 410-416, 2005 .
- [10] M. Ilie, J.-C. Kneip, S. Mattei, A. Nichici, C. Roze, T. Girasole, Through-transmission laser welding of polymers–temperature field modeling and infrared investigation, *Infrared Physics & Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 73-79, 2007 .
- [11] J. D. Van de Ven, A. G. Erdman, Laser transmission welding of thermoplastics-Part I: Temperature and pressure modeling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 129, no. 5, pp. 849-858, 2007 .
- [12] J. D. Van de Ven, A. G. Erdman, Laser transmission welding of thermoplastics-part II: Experimental Model Validation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 129, no. 5, pp. 859-867, 2007 .
- [13] B. Acherjee, A. S. Kuar, S. Mitra, D. Misra, Application of grey-based Taguchi method for simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser transmission welding process of thermoplastics, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 9, pp. 995-1006, 2011 .
- [14] A. C. A. Asséko, B. Cosson, M. Deleglise, F. Schmidt, Y. Le Maout, E. Lafranche, Analytical and numerical modeling of light scattering in composite transmission laser welding process, *International Journal of Material Forming*, vol. 8, no. 1, pp. 127-135, 2015 .
- [15] M. Fox, *Optical properties of solids*, AAPT, 2002.
- [16] P. A. Hilton, I. Jones, Y. Kennish, Transmission laser welding of plastics, in *Proceeding the SPIE*, vol. 4831, pp. 44-52, 2003.
- [17] B. Acherjee, D. Misra, D. Bose, K. Venkadeshwaran, Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology, *Optics & Laser Technology*, vol. 41, no. 8, pp. 956-967, 2009.
- [18] C. G. K. Malek, Laser processing for bio-microfluidics applications (part II), *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 385, no. 8, pp. 1362-1369, 2006.
- [19] O. Hinz, *Laser welding in medical engineering*, Leister Process Technologies, Kaegiswil, Switzerland, 2011.
- [20] T. Ishide, O. Matumoto, Y. Nagura, T. Nagashima , Optical fiber transmission of 2 kW cw YAG laser and its practical application to welding, in *Proceeding of The International Congress on Optical Science and Engineering*, The Hague, Netherlands, 1990 .
- [21] I. Jones, Laser welding for plastic components, *Assembly Automation*, vol. 22 no. 2, pp.129-135, 2002.

پی نوشت

-
1. heating by friction
 2. heating by conduction
 3. heating by electromagnetism
 4. laser plastic welding
 5. through-transmission welding
 6. laser polymer welding