

## بررسی تجربی و عددی فرآیند جوشکاری لیزری فولاد St12 و پلی کربنات

محمد صالح شیخ محمد می آبادی<sup>1</sup>، افشین کازرونی<sup>1\*</sup>، محمود مرادی<sup>2</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۲۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۳)

### چکیده

جوشکاری لیزری روشی نوین به منظور اتصال مستقیم فلزها و پلیمرها است که منجر به ایجاد نوعی پیوند فیزیکی و شیمیایی بین فلز و پلیمر می‌گردد. در این پژوهش امکان اتصال غیرمشابه St12 و پلی کربنات از نظر تئوری بررسی شده است. سپس به کمک لیزر ND:YAG جوشکاری St12 و پلی کربنات انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده ایجاد اتصال بین St12 و پلی کربنات است. به منظور آنالیز حرارتی و مکانیکی فرآیند جوشکاری، مدل اجزاء محدود قطعات به کمک نرم افزار آباکوس ایجاد شده است. همچنین از مدل منبع حرارتی CIN به منظور توصیف توزیع توان لیزر استفاده شده و نرم افزار فورترن به منظور توصیف مدل حرارتی در شبیه سازی جوشکاری به کار گرفته شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی نشان می دهد مدل اجزاء محدود قادر به پیش بینی پهنای جوش است، بنابراین صحت نتایج مدل اجزاء محدود تایید شد و مدل اجزاء محدود به منظور پیش بینی تنش های پسماند به کار گرفته شده است. نتایج نشان می دهد ایجاد اتصال سبب تنش های پسماند کششی روی سطح فلز و تنش های پسماند فشاری روی سطح پلیمر می شود.

**کلمات کلیدی:** اتصال غیر مشابه، جوشکاری لیزری، St12، پلی کربنات، آنالیز ترمومکانیکی.

## Experimental and numerical investigation of laser assisted St12 to polycarbonate welding

M.Saleh Shaikh Meiabadi<sup>1</sup>, A. Kazerooni<sup>\*1</sup>, M. Moradi<sup>2</sup>

1-Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, SRTT University, Tehran, Iran

2-Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

(Received 14 February 2018 ; Accepted 14 July 2018)

### Abstract

Laser welding is a novel method for direct joining of metals and polymers, which leads to a mechanical and chemical bond between metal and polymer. In this study, feasibility of dissimilar joining between St12 and polycarbonate is studied theoretically. Then, the ND: YAG laser is implemented to join St12 and Polycarbonate. Empirical results indicate creation of a joint between St12 and polycarbonate. In order to conduct thermomechanical analysis of the welding process, the finite element model has been developed by Abaqus software. In addition, the cylindrical-involution-normal (CIN) heat source model was used to describe the laser power distribution and FORTRAN software has been used to define the thermal model in welding simulation. Comparison of experimental and simulation results shows that the finite element model is capable of predicting weld width, and therefore the results of the finite element model are verified. Therefore, the finite element model is used to predict residual stresses. The results disclose that dissimilar bonding creates residual tension stresses on the metal surface and compressive residual stresses on the polymer surface.

**Keywords:** Dissimilar joint, Laser welding, St12, Polycarbonate, Thermomechanical analysis.

### 1- مقدمه

بکارگیری اتصال غیر مشابه در ساختار محصولات نوین نسبت به گذشته افزایش یافته است. محققان بسیاری از روش جوشکاری اصطکاکی به منظور دستیابی به اتصال غیر مشابه استفاده نموده‌اند [۱-۳]. فلزها و پلیمرها به طور گسترده در صنایع مختلف از قبیل خودروسازی، هوافضا، ساخت تجهیزات پزشکی، بسته بندی و... به کار گرفته می شوند. اتصال مکانیکی و اتصال چسبی روش های متداول اتصال فلز ها و پلیمرها هستند. این روش ها در اتصال قطعه های کوچک و شکل های پیچیده محدودیت داشته و به مراحل آماده سازی نیاز دارند. در حالی که جوشکاری لیزری فلز به پلیمر<sup>۱</sup> قادر به حل مشکلات تکنولوژیکی اتصال فلزها و پلیمرها است [۴]. اتصال مستقیم فلز و پلیمر با ذوب نمودن ترموپلاستیک به کمک لیزر در سطح تماس دو قطعه و تشکیل حباب های کوچک درون

پلاستیک مذاب انجام می شود. در محل برخورد لیزر حباب های کوچکی به دلیل تجزیه جزئی پلیمر شکل می گیرد. شکل گیری این حباب های کوچک در ایجاد اتصال بسیار موثر است، زیرا این حباب ها سبب اعمال فشار به پلاستیک مذاب، روی سطح فلز می گردند. در اثر این فشار پلاستیک مذاب به درون حفره های سطحی رانده می شود و منجر به ایجاد اتصال مکانیکی می گردد [۵]. همچنین در حالت مذاب زنجیره ی پلیمری قادر به ایجاد پیوند هیدروژنی با اکسید سطحی فلز به عنوان یک واکنش ثانویه است. بدین ترتیب پیوند مستحکمی بین اتم ها همچنین پیوند ملکولی بین ملکول های فلز و پلیمر از طریق لایه اکسید سطح فلز تشکیل می شود [۵و۶]. بنابراین در جوشکاری لیزری فلز به پلیمر نه تنها اتصال مکانیکی بلکه پیوندهای واندروالسی و شیمیایی ایجاد می گردند [۵و۷] در نتیجه اتصالی از نوع مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی پدید می آید [۶]. جوشکاری لیزری فلز به

1 - Laser assisted metal to polymer welding

طریق رسانش منجر به ذوب پلیمر می شود. این روش غالباً به منظور اتصال پلاستیک های مات و کامپوزیت های زمینه پلیمری به فلزها به کارگرفته می شود.

شکل (۲) جوشکاری لیزری فلز به پلیمر به روش اتصال با رسانایی را نشان می دهد. جدول (۱) مواد، روش اتصال و نوع لیزر به کار گرفته شده در تحقیقات را نشان می دهد. با این وجود به تحقیقات بیشتری به منظور بررسی اتصال غیرمشابه فلز و پلیمر به خصوص آنالیز ترمومکانیکی فرآیند جوشکاری وجود دارد. همچنین مطالعات کمی در ارتباط با تنش های پسماند حاصل از جوشکاری لیزری فلز به پلیمر انجام شده است. St12 و پلی کربنات از پرکاربردترین مواد مورد استفاده در صنایع خودروسازی و لوازم خانگی هستند. در این پژوهش یک لیزر ND:YAG به منظور جوشکاری St12 و پلی کربنات به کار گرفته شده است. تاکنون عمدتاً از لیزر فیبری و دیود لیزر در جوشکاری لیزری فلز به پلیمر استفاده شده است. به منظور آنالیز ترمومکانیکی و تعیین تنش های پسماند فرایند جوشکاری از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. مدل منبع حرارتی CIN به منظور توصیف توزیع توان لیزر مورد استفاده قرار گرفته است. از نرم افزار فورترن جهت برنامه نویسی تابع توزیع توان استفاده شده و برای انجام آنالیزها به آباکوس متصل شده است. نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی دارای انطباق مناسبی هستند لذا صحت نتایج مدل اجزاء محدود تایید می گردد. بنابراین از مدل اجزاء محدود جهت پیش بینی تنش های پسماند در اتصال فلز به پلیمر استفاده شده است.

## 2- مواد اولیه و روش آزمایش

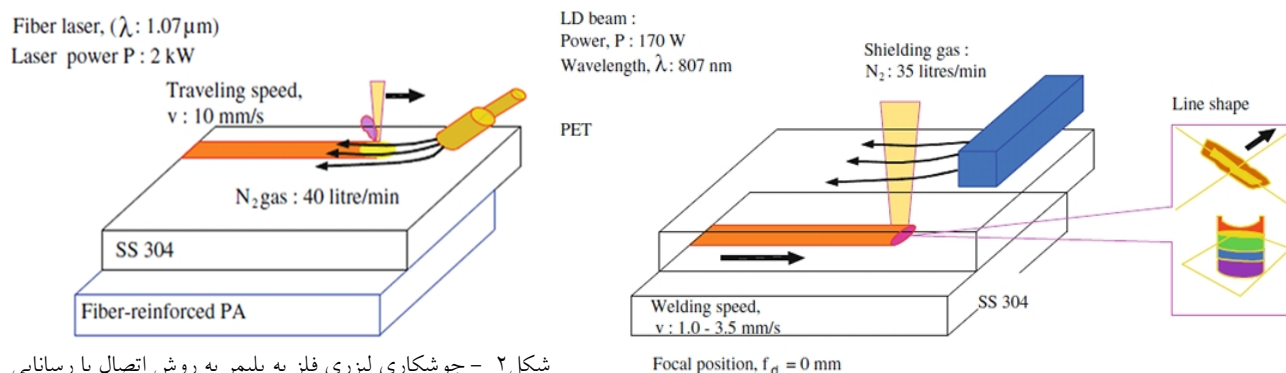
فولاد نرم St12 دارای شکل دهی خوب و استحکام بالا است، لذا از پرکاربردترین انواع ورق در صنایع خودروسازی و لوازم خانگی محسوب می شود. پلی کربنات یکی از پرکاربردترین ترموپلاستیک های مهندسی است که بعضی از گریدهای آن شفاف هستند. پلی کربنات دارای استحکام بالا، چقرمگی، مقاومت در برابر حرارت همچنین پایداری ابعادی و رنگ مناسب است.

پلیمر قادر به اتصال ترموپلاستیک های مهندسی به تقریباً اغلب فلزها می باشد [۸]. در جوشکاری لیزری فلز به پلیمر دمای ذوب و تجزیه پلیمر از اهمیت بسیاری برخوردار است. در دمایی بین این دو دما، آزادسازی حباب در پلیمر آغاز می شود و اتصال شکل می گیرد. ماکزیمم دما در سطح تماس دو ماده نباید از دمای تجزیه پلیمر بیشتر شود زیرا در غیر اینصورت پلیمر تجزیه می گردد و اتصالی بوجود نمی آید. در جوشکاری لیزری فلز به پلیمر خواص نوری مواد عامل تعیین کننده در نوع لیزر و چیدمان قطعه ها است. جوشکاری لیزری فلز به پلیمر به دو روش اتصال با عبور لیزر<sup>۱</sup> و اتصال با رسانایی حرارتی<sup>۲</sup> انجام می شود. روش اتصال با عبور لیزر به منظور جوشکاری پلاستیک های شفاف که قادر به عبور پرتو لیزر باشند استفاده می گردد. در این حالت پرتو لیزر از پلاستیک عبور می نماید و توسط سطح فلز جذب می شود. دمای فلز با جذب انرژی لیزر بالا رفته و این حرارت از طریق رسانش به پلاستیک منتقل می گردد که موجب افزایش دمای آن و در ادامه ذوب پلاستیک می شود. در دمایی پایین تر از دمای تجزیه پلاستیک آزادسازی حباب اتفاق می افتد. سطح قطعه ها باید قبل از اتصال به کمک الکل یا استون تمیز گردد. شکل (۱) جوشکاری لیزری فلز به پلیمر به روش اتصال با عبور لیزر را نشان می دهد. همچنین این شکل نشان می دهد از گاز محافظ نظیر نیتروژن به منظور خنک کاری و تمیز نگهداشتن پلاستیک استفاده شده است. هنگام انجام فرآیند جوشکاری باید دو قطعه توسط نگهدارنده به منظور افزایش سطح تماس به یکدیگر فشرده شوند. نیروی نگهدارنده موجب افزایش رسانایی حرارتی بین قطعات نیز می گردد. در صورتی که شفافیت پلاستیک از ۶۰٪ بالاتر باشد، روش اتصال با عبور لیزر بکار گرفته می شود [۹].

روش اتصال با رسانایی حرارتی هنگامی به کار گرفته می شود که پلاستیک قادر به عبور پرتو لیزر نباشد بنابراین فلز روی قطعه پلاستیکی قرار می گیرد. در این حالت پرتو لیزر مستقیماً به فلز برخورد می نماید و دمای آن را افزایش می دهد و از

1 -Transmission joining

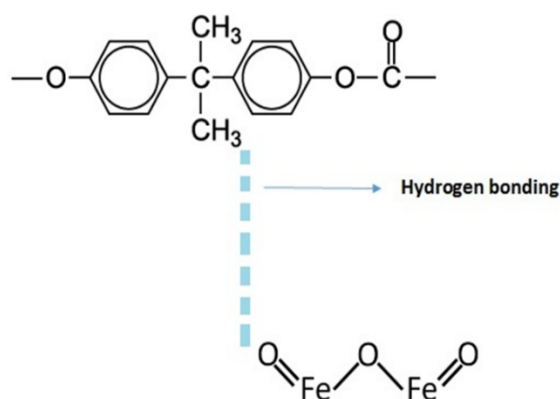
2 -Heat conduction joining



شکل ۱ - جوشکاری لیزری فلز به پلیمر به روش اتصال با عبور لیزر [۹]

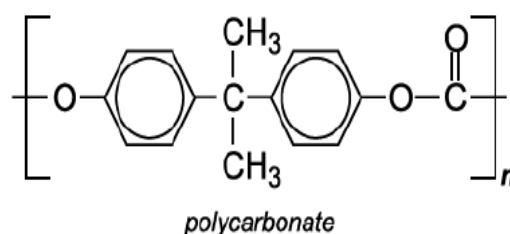
شکل ۲ - جوشکاری لیزری فلز به پلیمر به روش اتصال با رسانایی حرارتی [۹]

حرارت داده می شوند، به تشکیل ترکیبات آروماتیک تمایل پیدا می کنند. پایداری حرارتی پلیمرها، تابع فاکتورهای گوناگونی است. از آنجا که مقاومت حرارتی تابعی از انرژی پیوندی است، وقتی دما به حدی برسد که باعث شود پیوندها گسیخته شوند، پلیمر از طریق انرژی ارتعاشی شکسته می شود. افزایش دمای پلی کربنات در فرآیند جوشکاری لیزری فلز به پلیمر سبب افزایش تمایل به تشکیل ترکیبات آروماتیک می شود. همچنین هنگامی که دما به حد کافی بالا رود پیوندها گسیخته می شود. این شرایط زمینه مناسبی جهت تشکیل پیوند هیدروژنی بین اتم های هیدروژن زنجیره پلیمری پلی کربنات و اتم اکسیژن از اکسید آهن فراهم می آورد. شکل (۴) پیوند فرضی بین ملکول پلی کربنات و اکسید آهن را نشان می دهد. در حالت مذاب زنجیره پلیمری قادر به ایجاد پیوند هیدروژنی به عنوان یک واکنش ثانویه است.



شکل ۴ - پیوند هیدروژنی فرضی بین ملکول پلی کربنات و اکسید آهن

پلی کربنات هم چنین یک عایق مناسب است به همین دلیل در بسیاری از قطعات الکترونیکی و سخت افزار های مخابراتی مورد استفاده قرار می گیرد. در خودرو پلی کربنات جزء ترموپلاستیک های پر کاربرد در اتصال با اجزاء فلزی است. پلی کربنات دارای دو حلقه ی بنزن در زنجیره ملکولی و دو گروه  $\text{CH}_3$  است. حلقه بنزن در زنجیره پلی کربنات،  $\text{C}_6\text{H}_4$  با نماد دایره درون شش وجهی نمایش داده می شود. ساختار پلی کربنات در شکل (۳) نمایش داده شده است.



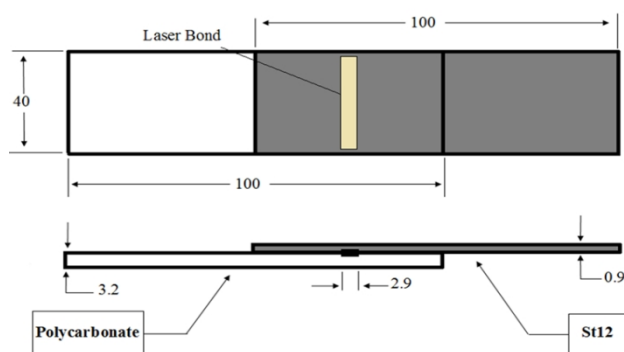
شکل ۳ - زنجیره ملکولی پلی کربنات

با انجام جوشکاری لیزری بین  $\text{St12}$  و پلی کربنات پیش بینی می شود در سطح اتمی و ملکولی پیوندی فیزیکی و شیمیایی بین آن دو ایجاد شود که عامل آن واکنش پذیری اکسید آهن سطح فلز با گونه های ملکولی موجود در پلی کربنات است. در این اتصال پیش بینی می شود پیوندی بین اتم ها همچنین پیوند ملکولی بین ملکول های فلز و پلاستیک از طریق لایه اکسید روی سطح فلز تشکیل می شود. پیوند های هیدروژنی هنگامی که پیوندهای  $\text{O-H}$  و  $\text{N-H}$ ،  $\text{F-H}$  موجود باشند می توانند به وجود آیند. هنگامی که ترکیبات آلی در دمای بالا

جدول ۱ - مواد، روش اتصال و نوع لیزر به کار گرفته شده در اتصال مستقیم به کمک لیزر

| عنوان                                                                                                        | نویسنده مسئول                | سال  | پلیمر              | فلز                      | روش اتصال | نوع لیزر                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------|--------------------|--------------------------|-----------|---------------------------|
| اتصال مستقیم فلز به پلیمر                                                                                    | Seiji Katayama [۵]           | 2008 | PE                 | Stainless steel AISI 304 | TJ        | دیود لیزر                 |
| آنالیز المان محدود حرارتی/ مکانیکی میکرو اتصال تیتانیوم و پلی آمید بوسیله لیزر                               | Ankitkumar P. Dhorajiya [۱۰] | 2010 | PA66               | Titanium                 | TJ        | لیزر فیبری                |
| اتصال مستقیم بوسیله لیزر آلیاژ AZ91D منیزیم و پلی اتیلن ترفتات                                               | M. Wahbaa [۷]                | 2011 | PET                | AZ91D                    | TJ        | دیود لیزر                 |
| اتصال مستقیم به کمک لیزر بین سرامیک و پلاستیک                                                                | Kawahito [۶]                 | 2011 | PET                | Ceramic Si3N4            | TJ        | دیود لیزر                 |
| اتصال به کمک لیزر ترکیب های فلز پلیمر                                                                        | Andreas Roesner [۱۱]         | 2011 | PC, PA66, PA66GF30 | Stainless steel          | H CJ      | دیود لیزر                 |
| اثر شرایط سطح آلومینیم روی اتصال به کمک لیزر ورق آلومینیم 1050 و ورق های پلی پروپیلن با بکارگیری اینسرت      | Makoto Hino [۱۲]             | 2011 | PP                 | Aluminum 1050            | TJ        | دیود لیزر                 |
| اثر آندیزه کردن روی اتصال آلیاژ A5052 آلومینیم و پلی اتیلن ترفتات بوسیله لیزر پالسی ND:YAG                   | Farazila Yusof [۱۳]          | 2012 | PET                | Aluminium A5052          | TJ        | ND:YAG                    |
| استراتژی های جدید جهت اتصال پلی آمید و فولاد AISI 304 بوسیله لیزر                                            | Cenigaonandia [۱۴]           | 2012 | PA6                | Stainless steel AISI 304 | TJ        | دیود لیزر                 |
| پتانسیل اتصال های ترکیبی فلز-پلیمر ساخته شده به کمک لیزر                                                     | Bergmann [۱۵]                | 2012 | PA66, PA6 GF45     | DC01                     | H CJ      | fiber-coupled diode laser |
| اتصال مستقیم PA6 به فلز یا پلاستیک های مهندسی                                                                | Kwang-Woon [۱۶]              | 2013 | CFRP(PA6)          | zinc-coated steel        | H CJ      | دیود لیزر                 |
| بررسی اتصال فولاد ضد زنگ 304 به PMMA به کمک لیزر ND:YAG                                                      | Furat I. Hussein [۱۷]        | 2013 | PMMA               | Stainless steel AISI 304 | TJ, H CJ  | ND:YAG                    |
| اتصال مستقیم مس و پلی اتیلن ترفتات بوسیله لیزر های فمتو ثانیه                                                | Tomokazu Sano [۱۸]           | 2013 | PET                | Cu                       | TJ        | femto-second Laser        |
| بررسی برهمکنش های حرارتی در اتصال به کمک لیزر PMMA و فولاد                                                   | Bauernhuber [۱۹]             | 2014 | PMMA               | S235                     | TJ        | Nd:YAG                    |
| یک تکنولوژی اتصال نوین به منظور اتصال مستقیم فلزات و پلیمرها                                                 | Chen [۲۰]                    | 2016 | PET                | Ti                       | TJ        | ND:YAG                    |
| اتصال لیزری مواد غیر مشابه به کمک لیزر فیبری: اتصال ترکیب تیتانیوم خالص تجاری و PET با کاربرد در وسایل پزشکی | Chan [۲۱]                    | 2016 | PET                | Pure Ti                  | TJ        | لیزر فیبری                |

طول خط جوش ۳۵/۸ میلیمتر و پهنای متوسط آن ۲/۹ میلیمتر بوده است. نتایج نشاندهنده ایجاد اتصال بین St12 و پلی کربنات است. شکل (۶) نمونه های جوشکاری شده را نشان می دهد.



شکل ۵- شماتیک نحوه قرارگیری St12 و پلی کربنات

از یک لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر به منظور اتصال St12 به پلی کربنات استفاده شده است. در این فرآیند فولاد St12 روی پلی کربنات قرار گرفت، بنابراین از روش جوشکاری با رسانایی حرارتی استفاده شده است.

شماتیک قطعات St12 و پلی کربنات در شکل (۵) نشان داده شده است.

ابعاد نمونه St12 ۱۰۰×۴۰×۰/۹ میلیمتر و ابعاد نمونه ی پلی کربنات ۱۰۰×۴۰×۳/۲ میلیمتر است. پرتو لیزر دارای توان ۲۱۰ وات و قطر ۲۰۰ میکرومتر می باشد. سرعت حرکت لیزر ۵/۶ میلیمتر بر ثانیه و محل تمرکز پرتو لیزر روی سطح St12 تنظیم شده است.

محدود می‌باشد، بررسی شده است. ریزکردن المانها تاحدی انجام شده است که کمتر از ۱۰ درصد اختلاف، درنتایج ایجاد گردد. بعلاوه پارامترهای بسیاری چون تعریف صحیح خواص فیزیکی و حرارتی مواد، تعریف صحیح شرایط مرزی و انتخاب مناسب تابع توزیع شار حرارتی لیزر درصحت نتایج موثر هستند. در این تحلیل خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی مواد وابسته به دما تعریف شده است.

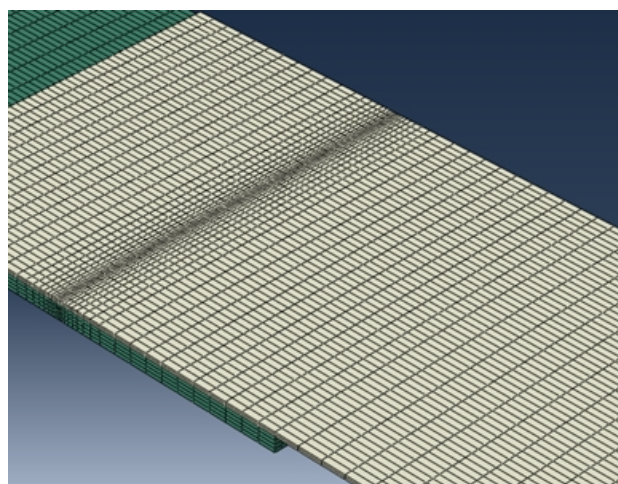


شکل ۶ - نمونه های جوشکاری St12 و پلی کربنات

### 3- شبیه سازی فرآیند جوشکاری لیزری

به منظور بررسی پدیده‌های حرارتی و مکانیکی در فرآیند جوشکاری لیزری یک مدل اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس ایجاد شده است. از نرم‌افزار فورترن به منظور توصیف منبع حرارتی با توزیع CIN استفاده شده است و با متصل نمودن نرم‌افزار فورترن به نرم افزار آباکوس، بار حرارتی به مدل سه‌بعدی اعمال شده است. شکل (۷) مدل سه بعدی قطعات در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد. در این تحلیل St12 روی پلی کربنات قرار گرفته است. به منظور انجام تحلیل ترمومکانیکی از المان‌های دما- جابجایی<sup>۱</sup> استفاده شده است. این نوع المان به منظور تحلیل حرارتی گذرا به کار گرفته می‌شود و یک راه حل همزمان غیر خطی از دما و تغییر شکل برای مسائل ترمومکانیکی ارائه می‌دهد. به منظور جلوگیری از افزایش بی مورد زمان تحلیل اجزاء محدود، اندازه مش در محل تابش لیزر بسیار ریز و در سایر نواحی یزرگتر در نظر گرفته شده است.

برای بررسی کارایی شبیه‌سازی در نرم افزار آباکوس و اطمینان از صحت نتایج آن، اعتبارسنجی<sup>۲</sup> و صحت سنجی<sup>۳</sup> در مورد نتایج انجام گرفته است. منظور از اعتبارسنجی، اطمینان از روش پیاده‌سازی آنالیز اجزاء محدود (صرف‌نظر از صحت جواب‌های بدست آمده) و در واقع تایید همگرایی جواب‌ها است. به منظور بررسی اعتبار تحلیل اجزاء محدود، تعداد المان‌ها در محل تابش لیزر با انجام آزمایش های متعدد افزایشیافته‌است و توزیع دمایی که هدف اولیه از حل اجزاء



شکل ۷ - مدل سه بعدی قطعات در نرم افزار آباکوس

توصیف مناسب از توزیع توان منبع حرارتی دارای اهمیت بسیاری در مدلسازی عددی فرآیند جوشکاری لیزری است، چراکه توزیع شار حرارتی، شکل حوضچه مذاب و توزیع دمایی در مواد را مشخص می‌کند. همچنین چگونگی جذب انرژی لیزر و انتقال حرارت از سطح به درون مواد در توزیع دمایی حین فرآیند اثر گذار است [۲۲]. مدل گوسین توزیع حرارتی اغلب به صورت شعاعی در مدلسازی عددی فرایند جوشکاری به کار گرفته می‌شود [۲۳]. هر چند که با تحلیل فرآیند جوشکاری لیزری آشکار می‌شود که جذب پرتو لیزر با افزایش نفوذ در مواد کاهش می‌یابد. مدل CIN تخمین مناسبی از توزیع حرارتی حجمی ارائه می‌دهد. در این مدل به ارتباط دانسیته توزیع توان و عمق نفوذ مواد توجه شده است. مدل CIN طبق رابطه زیر تعریف می‌گردد [۲۴]:

$$Q(r, z) = \frac{kK_z \eta_L Q_L}{\pi(1 - e^{-(K_z s)})} e^{-(kr^2 + K_z z)} (1 - u(z - s)) \quad (1)$$

1 - Coupled temperature-displacement elements

2 - Validation

3 - Verification

این شرط بیانگر دمای اولیه در هنگام شروع تحلیل است و برابر ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. شرط مرزی طبیعی عبارتست از [۷]:

$$k_n \frac{\partial T}{\partial t} - q + h(T - T_0) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) = 0 \quad (4)$$

$(x, y, z) \in S$

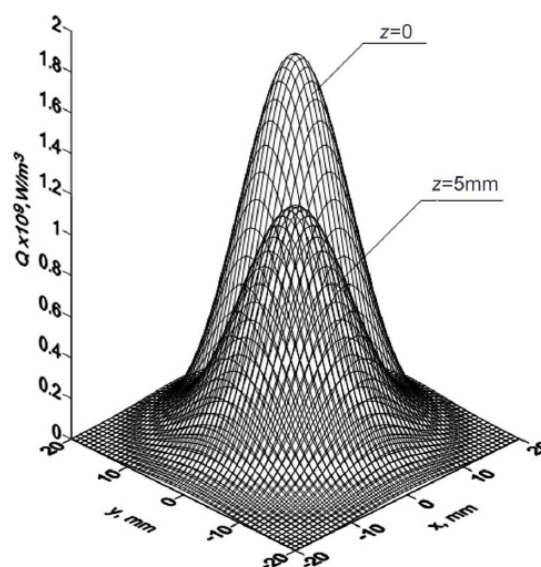
این شرط در روی سطوحی که در معرض جابجایی، تشعشع و رسانش حرارتی قرار دارند اعمال می گردد. سطحی از قطعه که در تماس با هوا است، حرارت را از طریق همرفت از دست می دهد. همچنین حین جوشکاری بین فلز، پلیمر و سطوح نگهدارنده رسانش وجود دارد، به علاوه در حین جوشکاری در اثر ایجاد حرارت از سطح انرژی ساطع می شود.

S سطوحی را نشان می دهد که در معرض تابش، همرفت و شار حرارتی قرار گرفته اند.  $k_n$  ضریب انتقال حرارت در هر نود بر حسب (W/m K) است که وابسته به دما در نظر گرفته شده است.  $q$  نشانگر شار حرارتی به صورت عمود بر سطوح قطعات بر حسب (W/m<sup>2</sup>) است.  $h_{conv}$  ضریب هدایت حرارتی همرفت را نشان می دهد. ضریب هدایت حرارتی همرفت وابسته به دما است، اما به دلیل آنکه تأثیراتلاف حرارت همرفت در دماهای بالا نسبت به اتلاف حرارت تابش ناچیز است، بنابراین در این بررسی ضریب هدایت همرفت به صورت ثابت فرض می گردد.  $\sigma$  ثابت استفان- بولتزمان ثابت و برابر (۵/۶۷ × ۱۰<sup>-۸</sup> W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>) در نظر گرفته شده است.  $\varepsilon$  میزان تشعشع ماده و برای یک سطح واقعی میزان تابش کمتری از یک می باشد.

#### 4- نتایج حل حرارتی

در فرآیند جوشکاری St12 به پلی کربنات به روش رسانایی حرارتی در اثر تابش لیزر دمای فلز نسبتاً بالا می رود و سطح پلاستیک در تماس با فلز داغ ذوب می شود. در جوشکاری لیزری منبع حرارتی متحرک، تغییر خواص حرارتی و فیزیکی مواد حین فرآیند و خنک کاری سریع قطعات سبب ایجاد تغییرات سریع در پروفیل های دمایی می گردد. با پیشروی منبع حرارتی با توجه به ضخامت نسبتاً کم قطعات دما به طور ناگهانی افزایش پیدا کرده و به نوعی تابش لیزر در نقاط ابتدایی

در این رابطه  $Q_L$  توان لیزر،  $\eta_L$  راندمان لیزر،  $K_Z=3/s$  نمای توان منبع حرارتی،  $r_0$  شعاع پرتو لیزر،  $k=3/r_0^2$  ضریب تمرکز پرتو لیزر،  $s$  عمق نفوذ پرتو لیزر و  $u(z-s)$  تابع پله ای هویساید هستند. مدل توزیع حرارتی CİN در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸ - توزیع حرارتی CİN [۲۲]:

معادله اساسی هدایت حرارتی، بیانگر توزیع حرارتی در قطعه بر مبنای قانون بقای انرژی، ظرفیت قطعه برای ذخیره این انرژی و میزان انتقال حرارت در مرزها بر طبق قانون فوریه است. انتقال حرارت سه بعدی در مختصات کارتزین به صورت زیر بیان می گردد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho(T) C(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

که در این فرمول  $k_x(T)$ ،  $k_y(T)$  و  $k_z(T)$  هدایت حرارتی غیرایزوتروپیک،  $\rho(T)$  دانسیته وابسته به حرارت،  $C(T)$  ظرفیت گرمایی وابسته به حرارت،  $t$  زمان و  $Q$  تولید حرارت داخلی به ازای واحد حجم می باشد. طبیعی است که برای یک ماده ایزوتروپیک، هدایت حرارتی در هر سه جهت مختصات باهم برابر خواهد بود. در هنگام جوشکاری مقداری از حرارت از طریق انتقال حرارت همرفت، تابش و رسانش تلف می گردد.

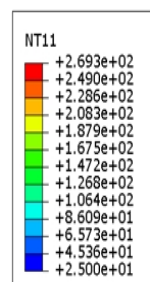
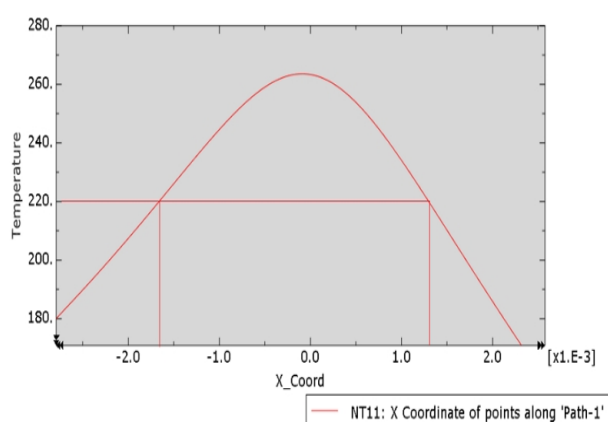
در تحلیل حرارتی، شرط مرزی ضروری عبارت است از:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad \text{for } (x, y, z) \in D \quad (3)$$



شکل (۱۱) پهنای جوش در نقاط ابتدایی، میانی و انتهایی را در خط جوش به طول  $35/8$  میلیمتر نشان می دهد. جدول (۲) مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی در سه نقطه ابتدایی (۱)، میانی (۲) و انتهایی (۳) خط جوش را نشان می دهد.

انطباق مناسب بین نتایج شبیه سازی و تجربی نشان دهنده انتخاب مدل منبع حرارتی مناسب، تعیین صحیح خواص حرارتی - فیزیکی مواد و مش بندی مناسب قطعات است، لذا می توان از این نتایج برای تحلیل مکانیکی و به دست آوردن تنش های پسماند در مدل استفاده کرد. اختلاف نتایج شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی ناشی از فرضیات ساده کننده ای است که برای حل به روش اجزاء محدود در نظر گرفته شده است.

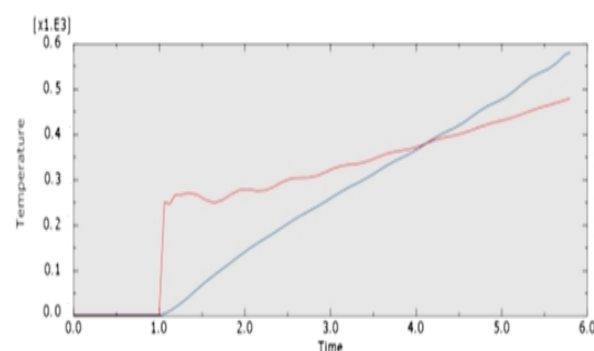


شکل ۱۰ - تعیین پهنای جوش با بررسی پروفیل دمایی در مقطع عرضی جوش (الف) پروفیل دمایی در مقطع عرضی جوش و (ب) کانتور دمایی در صفحه X-Y از مقطع عرضی جوش.

## 6- نتایج تحلیل مکانیکی

تنش های پسماند بعد از اتمام کامل فرآیند و خنک شدن کامل سازه تا دمای اتاق به وجود می آیند. شکل (۱۲) تنش های

مسیر حرکت سبب پیش گرم نقاط انتهایی مسیر حرکت شده است. شکل (۹) سیکل دمایی برحسب زمان در نقطه ی ابتدایی و انتهایی جوش حین فرایند جوشکاری را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود در نقطه ابتدایی دما به طور ناگهانی افزایش می یابد اما در نقطه پایانی تارسیدن لیزر به پایان خط جوش دما به تدریج افزایش می یابد و از دمای نقطه ابتدایی نیز بیشتر می گردد. بررسی ها نشان می دهد بدلیل آنکه ضریب انتقال حرارت فلز از پلیمر بزرگتر است تغییرات دمایی در فلز سریع تر از پلیمر است. نکته قابل توجه در بررسی پروفیل هایی دمایی در مرحله خنک کاری تغییرات بسیار در توزیع دمایی لحظات ابتدایی خنک کاری و یکنواخت تر شدن الگوی خنک شدن در لحظات پایانی است. پس از پایان فرآیند جوشکاری، دما کاهش یافته و با گذشت زمان قطعات به دمای محیط خواهند رسید.



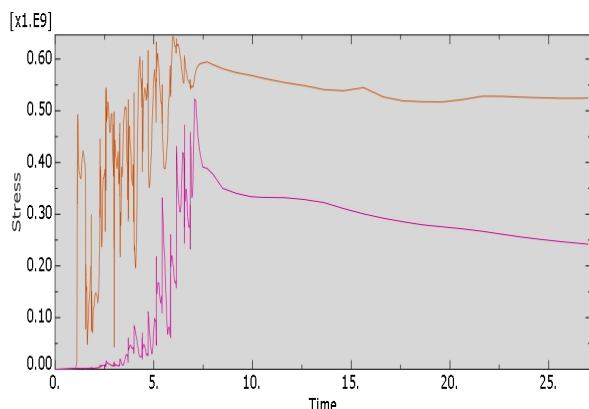
شکل ۹ - سیکل دمایی برحسب زمان در ابتدا (رنگ قرمز) و انتهای خط جوش (رنگ آبی)

## 5- بررسی صحت مدل حرارتی

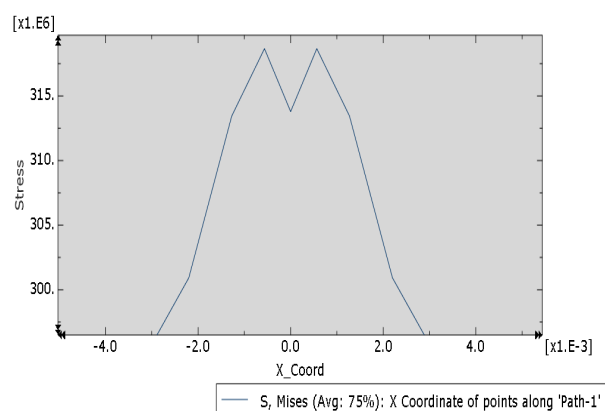
از صحت نتایج مدلسازی عددی به کمک آزمایش های تجربی باید اطمینان حاصل نمود زیرا از نتایج تحلیل حرارتی به عنوان بار ورودی در تحلیل مکانیکی استفاده می گردد. برای این منظور پهنای جوش شبیه سازی شده به کمک تحلیل حرارتی با پهنای واقعی جوش مقایسه شده است. با بررسی دما در پلیمر محدوده ای از پلی کرنات که به دمای بالای نقطه ی ذوب  $220$  درجه سانتیگراد رسیده است تعیین می گردد و می توان پهنای جوش را پیش بینی نمود. شکل (۱۰-الف) پروفیل دمایی در مقطع عرضی و کانتور دمایی (ب) جوش را نشان می دهد.



پسماند در روی پلیمر دارای دو ماکزیمم در دو طرف خط جوش و یک مقدار میانی در مرکز جوش است. چنین الگویی تقریباً در طول خط جوش ثابت است.



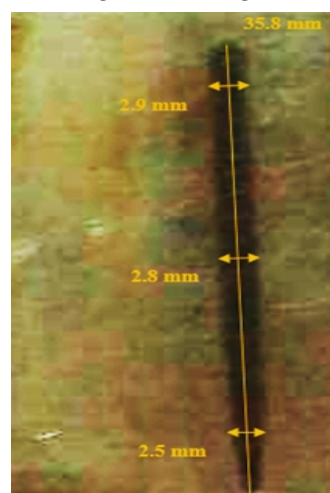
شکل ۱۳ - تنش پسماند روی سطح فلز در نقطه ی ابتدایی (رنگ بنفش) و انتهایی (رنگ قرمز) جوش



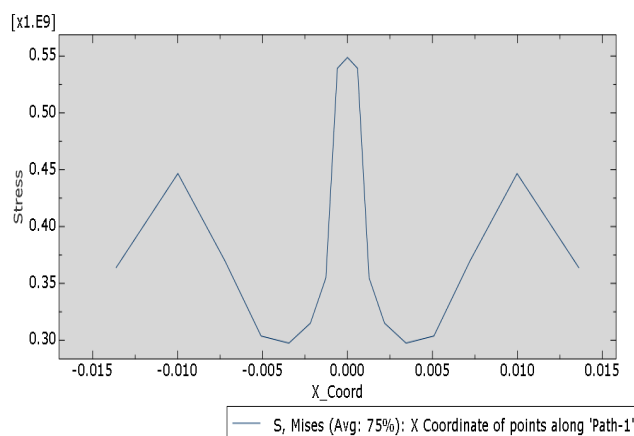
شکل ۱۴ - تنش پسماند روی سطح پلیمر در مقطع عرضی

تنش های پسماند ناشی از بارهای حرارتی در هر ماده هنگامی که انبساط و انقباض ناشی از افزایش یا کاهش دما محدود شود، رخ خواهند داد. ایجاد اتصال بین فلز و پلیمر مانع انبساط و انقباض آزادانه مواد می گردد. هنگامی که خنک کاری آغاز می شود فلز و پلیمر هردو شروع به انقباض می نمایند، درحالی که اتصال بین آن دو ایجاد شده است. در سمت فلز انقباض های بیشتر و سریعتری رخ خواهد داد، چرا که انبساط و رسانایی حرارتی فلز بیشتر است. بنابراین تنش پسماند در سطح فلز کششی و متعاقباً در سطح پلیمر فشاری خواهد بود. بنابراین تنشهای پسماند به دلیل تفاوت های موجود در انبساط و انقباض های حرارتی مواد غیر مشابه در دوطرف اتصال همراه با انجماد پلیمر پس از فرایند اتصال ایجاد می شود.

پسماند فون میز روی سطح فلز در مقطع عرضی را نشان می دهد. تنش های پسماند فون میز در خط مرکزی ماکزیمم است و با فاصله گرفتن از خط مرکزی جوش به طور متقارن کاهش می یابد. همچنین این شکل می دهد که تنش های پسماند روی سطح فلز در جهت x کششی هستند. شکل (۱۳) تنش های پسماند فون میز روی سطح فلز در نقاط ابتدایی و انتهایی خط جوش را نشان می دهد. همچنین این شکل نشان دهنده این است که مقدار تنش پسماند در انتهای خط جوش نسبت به ابتدای جوش بیشتر است. با بررسی شکل های (۱۲) و (۱۳) مشخص می شود تنش های پسماند روی سطح فلز در جهات طولی و عرضی جوش، کششی هستند.



شکل ۱۱ - پهنای واقعی جوش در سه نقطه ی ابتدایی، میانی و پایانی



شکل ۱۲ - تنشهای پسماند روی سطح فلز در مقطع عرضی

شکل (۱۴) تنش های پسماند فون میز روی سطح پلیمر در مقطع عرضی را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد تنش

جدول ۲ - مقایسه نتایج حرارتی به دست آمده از مقادیر تجربی با نتایج شبیه سازی

| شماره نقطه | سرعت جوشکاری (mm/s) | توان لیزر (W) | شعاع پرتولیزر ( $\mu\text{m}$ ) | شماره نقطه | درصد خطا (%) | پهنای تجربی (mm) | پهنای شبیه سازی (mm) |
|------------|---------------------|---------------|---------------------------------|------------|--------------|------------------|----------------------|
| ۱          | ۵/۶                 | ۲۱۰           | ۱۰۰                             | ۱          | -۵/۲         | ۲/۵              | ۲/۶۳                 |
| ۲          | ۵/۶                 | ۲۱۰           | ۱۰۰                             | ۲          | -۸/۹         | ۲/۸              | ۳/۰۵                 |
| ۳          | ۵/۶                 | ۲۱۰           | ۱۰۰                             | ۳          | -۹/۶         | ۲/۹              | ۳/۱۸                 |

## 7- نتیجه گیری

در این پژوهش جوشکاری لیزری St12 و پلی کربنات سبب ایجاد اتصال بین فلز و پلیمر گردید. به منظور بررسی پدیده‌های حرارتی و مکانیکی در فرآیند جوشکاری لیزری یک مدل اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس ایجاد شد. از نرم افزار فورترن به منظور توصیف منبع حرارتی با توزیع CIN استفاده شد و با متصل نمودن نرم افزار فورترن به نرم افزار آباکوس، بار حرارتی به مدل سه بعدی اعمال گردید. نتایج زیر از این پژوهش قابل دستیابی است:

۱- با انجام جوشکاری لیزری St12 و پلی کربنات به نظر می‌رسد واکنش پذیری اکسید آهن سطح فلز باگونه‌های ملکولی حاضر در سطح پلیمر زمینه مناسبی جهت تشکیل پیوند هیدروژنی بین اتمهای هیدروژن زنجیره پلیمری پلی کربنات و اتم اکسیژن از اکسید آهن فراهم می‌آورد.

۲- صحنه سنجی مدل اجزاء محدود به کمک آزمایش تجربی انجام گردید و مدل اجزاء محدود قادر به پیش بینی پهنای جوش می‌باشد.

۳- پهنای جوش در طول خط جوش افزایش می‌یابد.

۴- ایجاد اتصال سبب ایجاد تنش های پسماند کششی روی سطح فلز و تنش های پسماند فشاری روی سطح پلیمر می‌گردد.

## منابع

۱- صادقیان بهزاد، طاهری زاده ابوزر، عطاپور مسعود، صالحی طلیعه، نصوحیان مجید. شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی فولاد زنگ‌نزن به آلیاژ آلومینیوم با روش المان محدود و شبکه عصبی مصنوعی. علوم و فناوری جوشکاری ایران. ۱۳۹۶؛ ۳ (۱): ۸۸-۹۸.

۲- آقاجانی درازکلا حامد، حسین زاده مرتضی، الیاسی مجید.

شبیه‌سازی رفتار پلی‌آمید ۶ در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و مقایسه آن با نتایج تجربی. علوم و فناوری جوشکاری ایران. ۱۳۹۶؛ ۳ (۱): ۴۱-۲۹.

۳- کياحسینی سیدرحیم، تیموری مصطفی، محمدی بایگی سید جواد. تمرکز تنش دراتصال سوپرآلیاژهای In۷۱۸ و Mar-۲۴۷ M-۱۸۰ جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی به روش المان محدود. علوم و فناوری جوشکاری ایران. ۱۳۹۶؛ ۳ (۲): ۵۸-۶۷.

4-Bauernhuber, A., Markovits, T., "Investigating Thermal Interactions in the case of Laser Assisted Joining of PMMA Plastic and Steel," *Physics Procedia*, Vol. 56, pp. 811-817, 2014.

5-Katayama, S., Kawahito, Y., "Laser Direct Joining of Metal and Plastic," *Scripta Materialia* Vol. 59, pp. 1247-1250, 2008.

6-Kawahito, Y., Nishimoto, K., Katayama, K., "LAMP Joining between Ceramic and Plastic," *Physics Procedia*, Vol. 12, pp. 174-178, 2011.

7-Wahbaa, M., Kawahito, Y., Katayama, S., "Laser Direct Joining of AZ91D Thixomolded Mg Alloy and Amorphous Polyethylene Terephthalate," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, pp. 1166-1174, 2011.

8- Katayama, S., Kawahito, Y., Mizutani, M., "Latest Progress in Performance and Understanding of Laser Welding," *Physics Procedia*, Vol. 39, pp 8-16, 2012.

9-Katayama, S., Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing Limited. 2013.

10- Dhorajiya, A.P., Mayeed, M.S., Auner, G.W., Baird, R.J., Newaz, G.M., Patwa, R., Herfurth, H., "Finite Element Thermal/ Mechanical Analysis of Transmission Laser Microjoining of Titanium and Polyimide," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 132(1), pp. 110041-1100410, 2010.

11- Roesner, A., Scheik, S., Olowinsky, A., Gillner, A., Reisgen, U., Schleser, M., "Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids," *Physics Procedia* Vol. 12, pp. 370-377, 2011.

12-Hino, M., Mitooka, Y., Murakami, K., Urakami, K., Nagase, H., Kanadani, T., "Effect of Aluminum Surface

- Polyethylene Terephthalate," *Materials Transactions*, Vol. 54(6), pp. 926-930, 2013.
- 19- Bauernhuber A., Markovits, T., "Investigating Thermal Interactions in the Case of Laser Assisted Joining of PMMA Plastic and Steel," *Physics Procedia*, Vol. 56, pp. 811 – 817, 2014.
- 20- Chen, Y. J., Yue, T. M., Guo, Z. N., "A new laser joining technology for direct-bonding of metals and plastics," *Materials & Design*, Vol. 110, pp. 775-781, 2016.
- 21- Schricker, K., Stambke, M., Bergmann, J.P., "Experimental Investigations and Modeling of the Melting Layer in Polymer-Metal Hybrid Structures," *Materials and Design*, Vol. 103, pp. 278–292, 2016.
- 22- Chan, C.W., Smith, G.C., "Fibre laser joining of highly dissimilar materials: Commercially pure Ti and PET hybrid joint for medical device applications," *Archives of Mechanics*, Vol. 67(1), pp. 3–24, 2015.
- 23- Piekarska, W., Kubiak, W., Saternus, M., Saternus, Z., "Computer Simulation of Temperature Field in Laser Beam Welded Lap Joint," *Archives of Mechanical Technology and Automation*, Vol. 32(1), pp. 37-45, 2012.
- 24- Ranatowski, E., "Thermal Modelling of Laser Welding. Part I: The Physical Basis of Laser Welding," *Advances in Materials Science*, Vol. 1, pp. 34–40, 2003.
- State on Laser Joining between 1050 Aluminum Sheet and Polypropylene Resin Sheet Using Insert Materials," *Materials Transactions*, Vol. 52, pp. 1041-1047, 2011.
- 13- Yusof, F., Yukio, M., Yoshiharu, M., Shukor, M.H., "Effect of Anodizing on Pulsed Nd:YAG Laser Joining of Polyethylene Terephthalate (PET) and Aluminium Alloy (A5052)," *Materials and Design*, Vol. 37, pp. 410-415, 2012.
- 14- Cenigaonaindia, A., Liébana, F., Lamikiz, A., Echegoyen, Z., "Novel Strategies for Laser Joining of Polyamide and AISI 304," *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 92–99, 2012.
- 15- Bergmann, J.P., Stambke, M., "Potential of Laser-Manufactured Polymer-Metal Hybrid Joints," *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 84–91, 2012.
- 16- Woon, J.K., Yousuke, K., Seiji, K., "Laser Direct Joining of CFRP to Metal or Engineering Plastic," *Transactions of JWRI*, Vol. 42, pp. 5-8, 2013.
- 17- Hussein, F.I., Akman, E., Oztoprak, B.G., Gunes, M., Gundogdu, O., Kacar, E., Hajim, K.I., Demir, A., "Evaluation of PMMA Joining to Stainless Steel 304 Using Pulsed Nd:YAG Laser," *Optics & Laser Technology*, Vol. 49, pp. 143–152, 2013.
- 18- Sano, T., Iwasaki, S., Ozeki, Y., Itoh, K., Hirose, A., "Femtosecond Laser Direct Joining of Copper with