نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 2، پاییز و زمستان1397، صفحه 109-99

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

محمدصالح شیخ محمد می آبادی[1]،افشین کازرونی[1*]، محمود مرادی[2]

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 لیزرND:YAG جوشکاری St12 و پلی کربنات انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده ایجاد اتصال بینSt12 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 حرارتیCIN 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 کارگرفته شده است. نتایج نشان می دهد ایجاد اتصال سبب تنش‌های پسماند کششی روی سطح فلز و تنش های پسماند فشاری روی سطح پلیمر می‌شود.

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

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: afshin.kazerooni@gmail.com

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

Experimental and numerical investigation of laser assisted St12 to polycarbonate welding

M.Saleh Shaikh Meiabadi[1], A. Kazerooni[*1], M. Moradi[2]
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, Polycorbonate, 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 شکل‌های پیچیده محدودیت داشته و به مراحل آماده سازی نیاز دارند. در حالی که جوشکاری لیزری فلز به پلیمر[1] 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 حباب‌های کوچکی به دلیل تجزیه جزئی پلیمر شکل می‌گیرد. 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 حفره‌های سطحی رانده می شود و منجر به ایجاد اتصال مکانیکی می‌گردد [۵]. همچنین در حالت مذاب زنجیرهی پلیمری قادر به ایجاد پیوند هیدروژنی با اکسید سطحی فلز به عنوان یک واکنش ثانویه است. بدین ترتیب پیوند مستحکمی بین اتم‌ها همچنین پیوند ملکولی بین ملکول‌های فلز و پلیمر از طریق لایه اکسید سطح فلز تشکیل می‌شود [۵و۶]. بنابراین در جوشکاری لیزری فلز به پلیمر نه تنها اتصال مکانیکی بلکه پیوندهای واندروالسی و شیمیایی ایجاد می‌گردند [۵و۷] در نتیجه اتصالی از نوع مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی پدید می‌آید [۶]. جوشکاری لیزری فلز به

1 - Laser assisted metal to polymer welding

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

پلیمر قادر به اتصال ترموپلاستیک‌های مهندسی به تقریبا اغلب فلزها می‌باشد [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 می‌شود و اتصال شکل می‌گیرد. 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 نمی‌آید. 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[1] و اتصال با رسانایی حرارتی[2] انجام می‌شود. 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 می‌شود. 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 مستقیما به فلز برخورد می نماید و دمای آن را افزایش می دهد و از طریق رسانش منجر به ذوب پلیمر می شود. این روش غالبا به منظور اتصال پلاستیک های مات و کامپوزیت های زمینه پلیمری به فلزها به کارگرفته می شود.

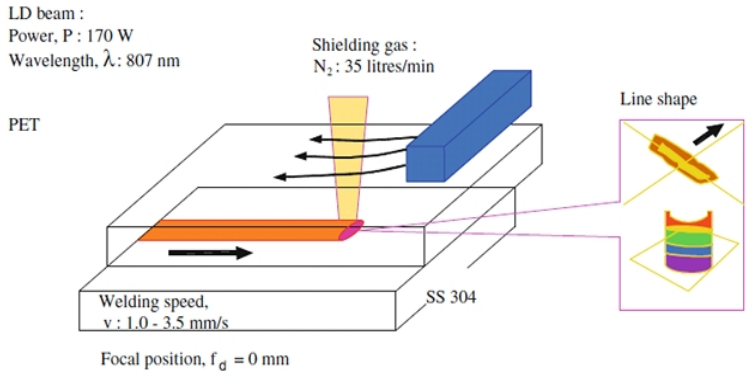
شکل (۲) جوشکاری لیزری فلز به پلیمر به روش اتصال با رسانایی را نشان می‌دهد. جدول(۱) مواد، روش اتصال و نوع لیزر به کار گرفته شده در تحقیقات را نشان می دهد. با این وجود به تحقیقات بیشتری به منظور بررسی اتصال غیرمشابه فلز و پلیمر به خصوص آنالیز ترمومکانیکی فرآیند جوشکاری وجود دارد. همچنین مطالعات کمی در ارتباط با تنش های پسماند حاصل از جوشکاری لیزری فلز به پلیمر انجام شده است. St12 و پلی کربنات از پرکاربرد ترین 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 عمدتا 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 حرارتیCIN به منظور توصیف توزیع توان لیزر مورد استفاده قرار گرفته است. از نرم افزار فورترن جهت برنامه نوسی 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 می‌گردد. بنابراین از مدل اجزاء محدود جهت پیش‌بینی تنش‌های پسماند در اتصال فلز به پلیمر استفاده شده است.

2- مواد اولیه و روش آزمایش

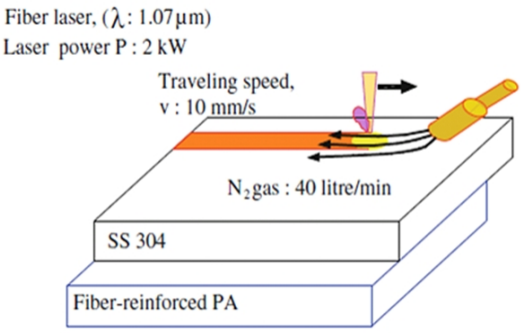
فولاد نرم St12 دارای شکل دهی خوب و استحکام بالا است، لذا از پرکاربردترین انواع ورق در صنایع خودروسازی و لوازم خانگی محسوب می شود. پلی کربنات یکی از پر کاربردترین ترموپلاستیک های مهندسی است که بعضی از گریدهای آن شفاف هستند. پلی کربنات دارای استحکام بالا، چقرمگی، مقاومت در برابر حرارت همچنین پایداری ابعادی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

1 -Transmission joining
2 -Heat conduction joining

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

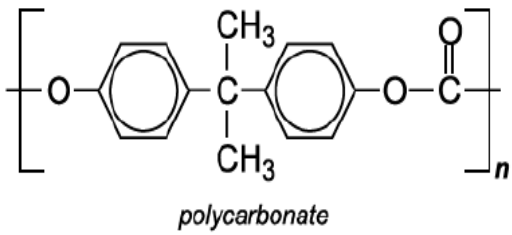


شکل۱ – جوشکاری لیزری فلز به پلیمر به روش اتصال با عبور لیزر [۹]



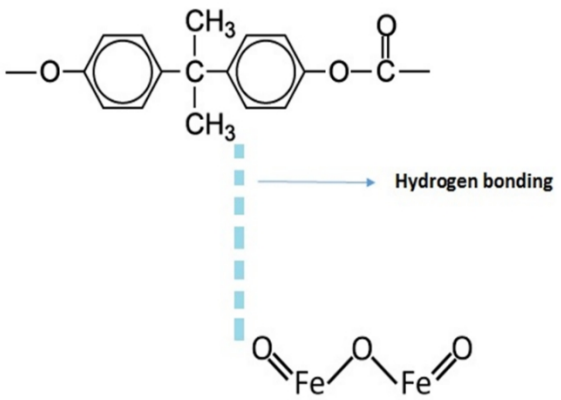
شکل۲ – جوشکاری لیزری فلز به پلیمر به روش اتصال با رسانایی حرارتی [۹]

پلی کربنات هم‌چنین یک عایق مناسب است به همین دلیل در بسیاری از قطعات الکترونیکی و سخت افزار های مخابرتی 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 CH_3 است. حلقه بنزن در زنجیره پلی کربنات، C_6H_4 با نماد دایره درون شش وجهی نمایش داده می‌شود. ساختار پلی کربنات در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل۳– زنجیره ملکولی پلی کربنات

با انجام جوشکاری لیزری بینSt12 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 گونه‌های ملکولی موجود در پلی کربنات است. در این اتصال پیش بینی می شود پیوندی بین اتم ها همچنین پیوندملکولی بین ملکول‌های فلز و پلاستیک از طریق لایه اکسید روی سطح فلز تشکیل می‌شود. پیوند های هیدروژنی هنگامی که پیوندهایF-H،N-H و O-H موجود باشند می‌تـوانند بـه وجود آیند. هنگامی که ترکیبات آلی در دمای بالا 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 پیـوندها 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 می‌شود. 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 می‌دهد. در حالت مذاب زنجیره‌ی پلیمری قادر به ایجاد پیوند هیدروژنی به عنوان یک واکنش ثانویه است.



شکل۴– پیوند هیدروژنی فرضی بین ملکول پلی کربنات و اکسید آهن

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

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

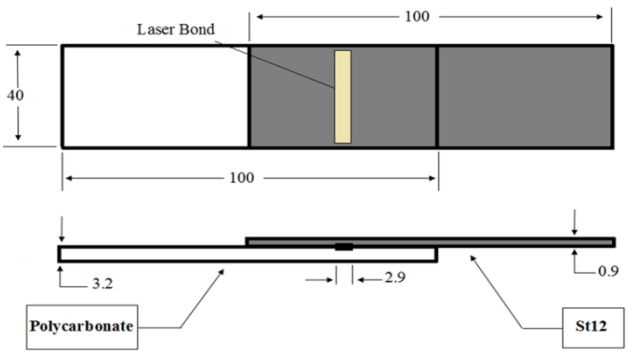
عنوان	نویسنده مسئول	سال	پلیمر	فلز	روش اتصال	نوع لیزر
اتصال مستقیم فلز به پلیمر	Seiji Katayama [۵]	2008	PE	Stainless steel AISI 304	TJ	دیود لیزر
آنالیز المان محدود حرارتی/ مکانیکی میکرو اتصال تیتانیم و پلی آمید بوسیله لیزر	Ankitkumar P. Dhorajiya[۱۰]	2010	PA66	Titanium	TJ	لیزر فیبری
اتصال مستقیم بوسیله لیزر آلیاژ AZ91D منیزیم و پلی اتیلن ترفنات	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	HCJ	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 ترفنات بوسیله لیزر پالسی ND:YAG	FarazilaYusof [۱۳]	2012	PET	Aluminium A5052	TJ	ND:YAG
استراتژی های جدید جهت اتصال پلی آمید و فولاد AISI 304 بوسیله لیزر	Cenigaonaindia [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	HCJ	fiber-coupled diode laser
اتصال مستقیم PA6 به فلز یا پلاستیک های مهندسی	Kwang-Woon[۱۶]	2013	CFRP(PA6)	zinc-coated steel	HCJ	دیود لیزر
بررسی اتصال فولاد ضد زنگ 304 به PMMA به کمک لیزر پالسی ND:YAG	FuratI.Hussein [۱۷]	2013	PMMA	Stainless steel AISI 304	TJ, HCJ	ND:YAG
اتصال مستقیم مس و پلی اتیلن ترفنات 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 ترکیبیتیتانیم خالص تجاری و PET با کاربرد در وسایل پزشکی	Chan[۲۱]	2016	PET	Pure Ti	TJ	لیزر فیبری

از یک لیزرNd: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.

طول خط جوش ۳۵/۸ میلیمتر و پهنای متوسط آن ۲/۹ میلیمتر بوده است. نتایج نشاندهنده ایجاد اتصال بینSt12 و پلی کربنات است. شکل(۶) نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد.



شکل۵- شماتیک نحوه قرارگیریSt12 و پلی کربنات

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

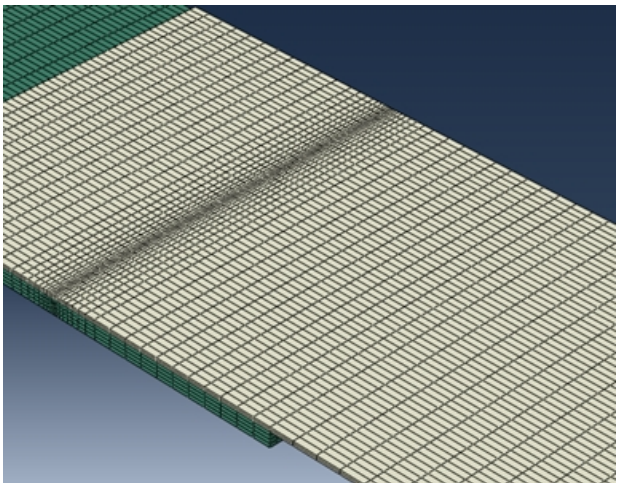


شکل ۶ – نمونه های جوشکاری St12 و پلی کربنات

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 می دهد. در این تحلیل St12 روی پلی کربنات قرار گرفته است. به منظور انجام تحلیل ترمومکانیکی از المان‌های دما- جاجایی[1] استفاده شده است. این نوع المان به منظور تحلیل حرارتی گذرا به‌کار گرفته می‌شود و یک راه حل همزمان غیر خطی از دما و تغییر شکل برای مسائل ترمومکانیکی ارائه می دهد. 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 کارآیی شبیه‌سازی در نرم افزار آباکوس و اطمینان از صحت نتایج آن، اعتبارسنجی[2] وصحت سنجی[3] 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 افزایشی افت‌هاست و توزیع دمایی‌که هدف اولیه از حل اجزاء 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 وحرارتی مواد، تعریف صحیح شرایط مرزی وانتخاب 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.


شکل۷ –مدل سه بعدی قطعات در نرم افزار آباکوس

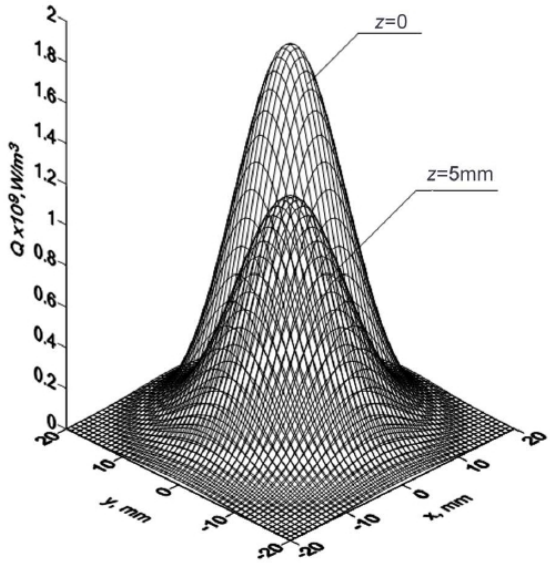
توصیف مناسب از توزیع توان منبع حرارتی دارای اهمیت بسیاری در مدلسازی عددی فرآیند جوشکاری لیزری است، چراکه توزیع شار حرارتی، شکل حوضچه مذاب و توزیع دمایی در مواد را مشخص می کند. همچنین چگونگی جذب انرژی لیزر و انتقال حرارت از سطح به درون مواد در توزیع دمایی حین فرآیند اثر گذار است [۲۲]. مدل گوسین توزیع 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 می یابد. 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 زیرتعریف می‌گردد [۲۴]:

$$Q(r,z) = \frac{kK_z\eta_L Q_L}{\pi\left(1-e^{(K_z s)}\right)} e^{-(kr^2+K_z z)}\left(1-u(z-s)\right) \qquad (۱)$$

1 -Coupled temperature-displacement elements
2 -Validation
3 -Verification

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

در این رابطه Q_L توان لیزر، η_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 پله‌ای هویساید هستند. مدل توزیع حرارتی CIN در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل۸ – توزیع حرارتی CIN [۲۲]:

معادله اساسی هدایت حرارتی، بیانگر توزیع حرارتی درقطعه برمبنای قانون بقای انرژی، ظرفیت قطعه برای ذخیره این انرژی و میزان انتقال حرارت در مرزها برطبق قانون فوریه است. انتقال حرارت سه‌بعدی در مختصات کارتزین به صورت زیر بیان می گردد:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q=\rho(T)C(T)\frac{\partial T}{\partial t} \quad (۲)$$

که در این فرمول kx (T)، ky (T) و kz (T) هدایت حرارتی غیرایزوتروپیک، ρ(T) دانسیته وابسته به حرارت، C(T) ظرفیت گرمائی وابسته به حرارت، t زمان وQ تولید حرارت داخلی به ازای واحد حجم می‌باشد. طبیعی است که برای یک ماده ایزوتروپیک، هدایت حرارتی در هر سه جهت مختصات باهم برابر خواهد بود. درهنگام جوشکاری مقداری ازحرارت ازطریق انتقال حرارت همرفت، تابش و رسانش تلف می‌گردد. در تحلیل حرارتی،شرط مرزی ضروری عبارت است از:

$$T(x,y,z,0)=T_0 \quad for\ (x,y,z)\in D \quad (۳)$$

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

$$k_n\frac{\partial T}{\partial t}-q+h(T-T_0)+\sigma\varepsilon(T^4-T_0^4)=0 \quad (۴)$$
$$(x,y,z)\in S$$

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

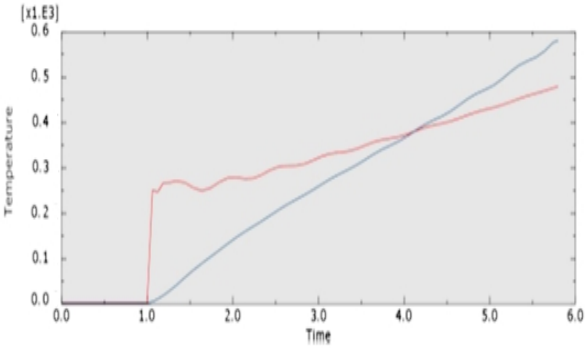
S سطوحی را نشان می دهد که در معرض تابش، همرفت و شار حرارتی قرار گرفته اند. k_n ضریب انتقال حرارت در هر نود بر حسب (W/m K) است که وابسته به دما درنظرگرفته شده است. q نشانگر شار حرارتی به صورت عمود بر سطوح قطعات بر حسب (W/m^2) است. h_{conv} ضریب هدایت حرارتی همرفت را نشان می دهد. ضریب هدایت حرارتی همرفت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

4- نتایج حل حرارتی

در فرآیند جوشکاری St12 به پلی کربنات به روش رسانایی حرارتی در اثر تابش لیزر دمای فلز نسبتا 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 نسبتا کم قطعات دما به طور ناگهانی افزایش پیداکرده و به نوعی تابش لیزر در نقاط ابتدایی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

مسیر حرکت سبب پیش گرم نقاط انتهایی مسیر حرکت شده است. شکل (۹) سیکل دمایی برحسب زمان درنقطه ی ابتدایی و انتهایی جوش حین فرایندجوشکاری را نشان می دهد. همانطورکه 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 بیشترمی 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 پروفیل‌هایی 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 ازپایان فرآیند جوشکاری، دما کاهش یافته و با گذشت زمان قطعات به دمای محیط خواهند رسید.



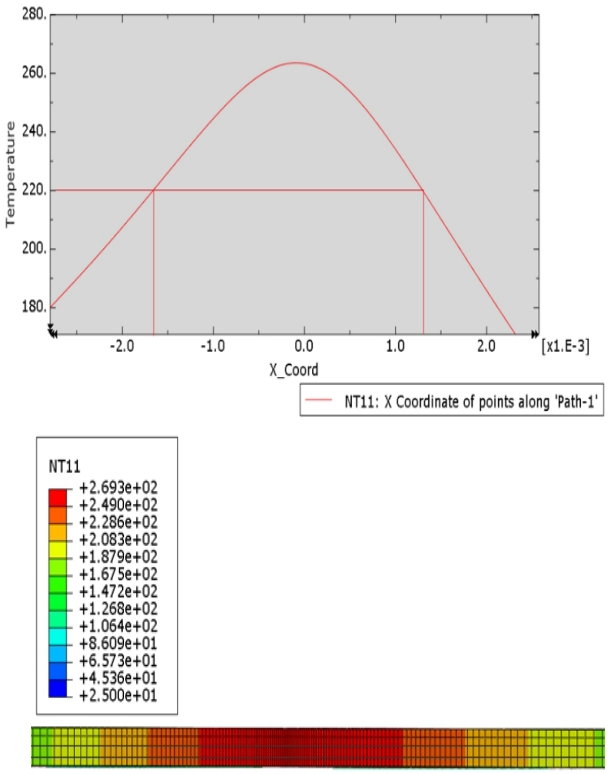
شکل ۹ – سیکل دمایی برحسب زمان در ابتدا (رنگ قرمز) و انتهای خط جوش (رنگ آبی)

5- بررسی صحت مدل حرارتی

از صحت نتایج مدلسازی عددی به کمک آزمایش های تجربی باید اطمینان حاصل نمود زیرا ازنتایج تحلیل حرارتی به عنوان بار ورودی در تحلیل مکانیکی استفاده می‌گردد. برای این منظور پهنای جوش شبیه سازی شده به کمک تحلیل حرارتی با پهنای واقعی جوش مقایسه شده است. بابررسی دما در پلیمر محدوده ای از پلی کربنات که به دمای بالای نقطه ی ذوب۲۲۰ 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.

شکل (۱۱) پهنای جوش در نقاط ابتدایی، میانی و انتهایی را در خط جوش به طول ۳۵/۸ میلیمتر نشان می دهد.جدول(۲) مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی درسه 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 می‌توان از این نتایج برای تحلیل مکانیکی وبه دست آوردن تنش‌های پسماند در مدل استفاده کرد. اختلاف نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی ناشی از فرضیات ساده‌کننده‌ای است که برای حل به روش اجزاء محدود درنظرگرفته شده است.



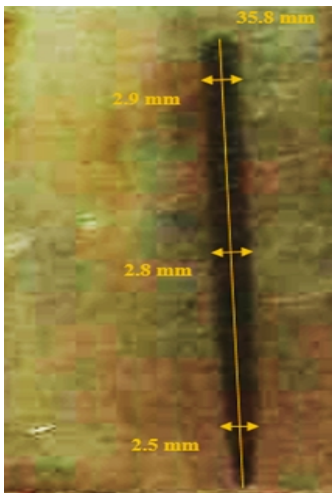
شکل ۱۰ – تعیین پهنای جوش با بررسی پروفیل دمایی در مقطع عرضی جوش الف) پروفیل دمایی در مقطع عرضی جوش و ب) کانتور دمایی در صفحه X-Y از مقطع عرضی جوش.

6- نتایج تحلیل مکانیکی

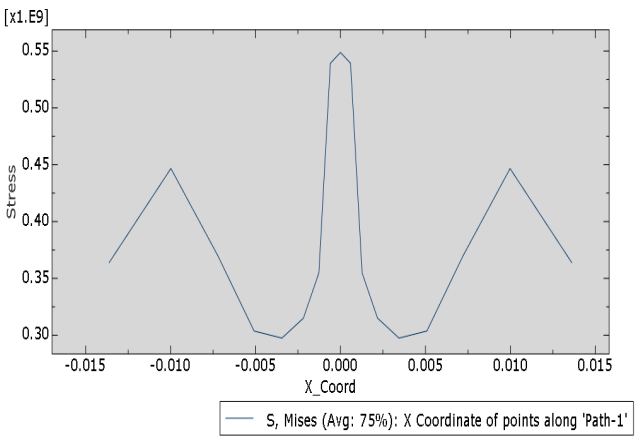
تنش های پسماند بعدازاتمام کامل فرآیند وخنک شدن کامل سازه تا دمای اتاق به وجود می‌آیند. شکل(۱۲) تنش‌های

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

پسماند فون میزز روی سطح فلز در مقطع عرضی را نشان می‌دهد. تنش های پسماند فون میزز در خط مرکزی ماکزیمم است و با فاصله گرفتن ازخط مرکزی جوش به طورمتقارن 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 میزز روی سطح فلز درنقاط ابتدایی وانتهایی 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 شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشخص می شود تنش‌های پسماند روی سطح فلز درجهات طولی و عرضی جوش،کششی هستند.

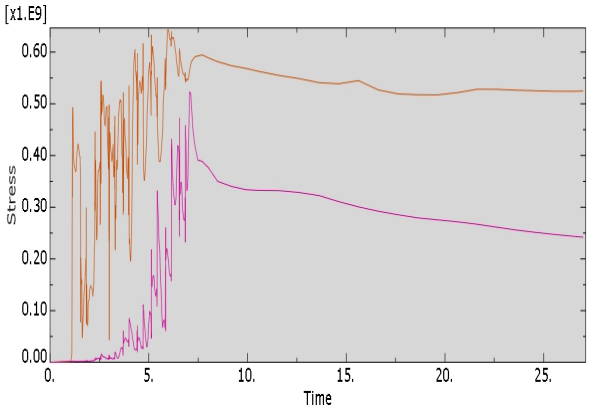


شکل ۱۱ –پهنای واقعی جوش در سه نقطه ی ابتدایی، میانی و پایانی

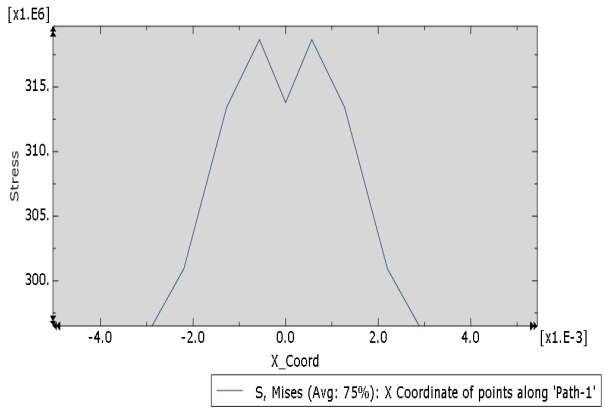


شکل ۱۲– تنشهای پسماند روی سطح فلز در مقطع عرضی

شکل(۱۴) تنش های پسماند فون میزز روی سطح پلیمر در مقطع عرضی را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد تنش پسماند در روی پلیمر دارای دو ماکزیمم در دو طرف خط جوش و یک مقدار میانی در مرکز جوش است. چنین الگویی تقریبا 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

تنش‌های پسماند ناشی از بارهای حرارتی در هرماده هنگامی‌که انبساط وانقباض ناشی ازافزایش 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 می‌نمایند، درحالیکه اتصالی بین آند و ایجاد شده است. در سمت فلز انقباض های بیشتر و سریعتری رخ خواهد داد، چرا که انبساط ورسانایی حرارتی فلز بیشتراست. بنابراین تنش پسماند درسطح فلز کششی و متعاقبا 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.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

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 (µm)	شماره نقطه	درصدخطا (٪)	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 St12و 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 پلی‌کربنات واتم اکسیژن از اکسیدآهن فراهم می آورد.

۲-صحه سنجی مدل اجزاء محدود به کمک آزمایش تجربی انجام گردید و مدل اجزاء محدود قادر به پیش بینی پهنای جوش می باشد.

۳- پهنای جوش در طول خط جوش افزایش می یابد.

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 ابوذر، 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 پلی‌آمید۶ در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و مقایسه آن با نتایج تجربی. علوم و فناوری جوشکاری ایران. ۱۳۹۶; ۳ (۱) :۴۱-۲۹.

۳- کیاحسینی سیدرحیم، تیموری مصطفی، محمدی بایگی سید جواد. تمرکز تنش دراتصال سوپرآلیاژهایIn۷۱۸ وMar-۲۴۷ Mحین 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," *ScriptaMaterialia* 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., Kawahitoc, 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., Gillnera, 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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

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:YAGPaser," *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

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]