مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 431-440

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

اثر سرعت چرخشی ابزار در اتصال اصطکاکی نقطه‌ای آلومینیوم/پلیمر

حسین کرمی پابندی[1]، مجتبی موحدی[2*]، امیرحسین کوکبی[3]

1- کارشناس ارشد، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
2- استادیار، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
3- استاد، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق پستی 11365-11155، m_movahedi@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 آبان 1395
پذیرش: 04 دی 1395
ارائه در سایت: 29 دی 1395

کلید واژگان:
جوش‌کاری اصطکاکی نقطه‌ای
پر شدن مجدد
پلیمر
فلز
استحکام اتصال

چکیده

در این پژوهش، یک فرآیند جدید جوش‌کاری اصطکاکی نقطه‌ای به نام "جوش‌کاری اصطکاکی نقطه‌ای با سوراخ رزوه‌دار"، برای اتصال ورق‌های آلومینیوم و پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کوتاه کربن معرفی شده است. در این روش، اتصال براساس پر شدن مجدد سوراخ رزوه‌دار بر روی ورق فلزی توسط مذاب پلیمر انجام می‌گیرد. مکانیزم‌های اتصال با استفاده از مطالعات ماکرو و میکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، اثر سرعت چرخشی ابزار بر استحکام و انرژی شکست اتصال در دو آزمون کشش-برش و کشش متقاطع ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهند که سوراخ ایجاد شده به‌طور کامل توسط مذاب پلیمر پر می‌شود. تشکیل لایه‌ی واکنشی متشکل از عناصر Al، C و O و همچنین ایجاد قفل مکانیکی بین دیواره‌ی سوراخ رزوه‌دار و پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ، از عوامل موثر بر استحکام اتصال هستند. بیشترین استحکام برشی اتصال حدود 80 درصد استحکام ورق کامپوزیت پلیمری به‌دست آمد. استحکام و انرژی شکست اتصال با افزایش سرعت چرخشی ابزار افزایش یافت که دلیل آن با مطالعه سطح شکست اتصال و تغییرات سختی پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ مشخص گردید.

Effect of tool rotational speed on friction spot joining of aluminum/polymer

Hossein Karami Pabandi, Mojtaba Movahedi*, Amirhossein Kokabi

Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 11365-11155, Tehran, Iran, m_movahedi@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 November 2016
Accepted 24 December 2016
Available Online 18 January 2017

Keywords:
Friction spot welding
Refill
Polymer
Metal
Joint strength

ABSTRACT

In this work, a new friction spot welding process called “Threaded Hole Friction Spot Welding” was introduced to join aluminum and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composite sheets. The new process was based on the filling of the pre-threaded hole on the metallic sheet by the melted polymer. Mechanisms of bonding were investigated using macro/micro structural investigation of the joints. The effects of the tool rotational speed on the mechanical strength and fracture energy of the joints were also studied. The results showed that the hole is completely filled with the melted polymer. Formation of a reaction layer composed mostly of Al, C and O as well as mechanical locking between the threaded hole and the re-solidified polymer inside the hole was effective on the joint strength. Maximum shear-tensile strength of the joints reached to ~80 percent of the strength of the polymeric composite sheet. Moreover, strength and fracture energy of the joints increased with enhancement of the tool rotational speed. Variation of the joint strength was explored in light of the fracture surface features as well as the hardness of the re-solidified polymer inside the hole.

1- مقدمه

با وجود استفاده گسترده از روش‌های سنتی مانند اتصال با چسب و اتصال مکانیکی برای اتصال "نقطه‌ای" فلز-پلیمر، این روش‌ها دارای نقاط ضعف هستند. اتصال مکانیکی باعث افزایش وزن و همچنین ایجاد مراکز تمرکز تنش در سازه می‌شود. نیاز به آماده‌سازی سطح و زمان طولانی ایجاد اتصال نیز از جمله معایب اتصال چسبی است [1-3]. در نتیجه، در سال‌های اخیر روش‌های جدید برای اتصال نقطه‌ای پلیمرها به آلیاژهای فلزی توسعه یافته‌اند.

اتصال التراسونیکی[1] [4] و پرچ تزریقی (ICJ[2]) [5]، دو روش با اصول تقریباً یکسان هستند که برای اتصال پلیمرها به فلزات استفاده می‌شوند. ابیبه[3] و همکارانش [2] دو روش اتصال التراسونیکی و پرچ تزریقی ورق‌های پلی‌آمید و آلومینیوم AA6082 را با هم مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هر دو روش دارای خواص مکانیکی مشابه هستند. اگرچه، روش پرچ تزریقی به دلیل تشکیل حفره در مرکز اتصال دارای نسبت استحکام به وزن بالاتری است. از سوی دیگر، این روش دارای زمان اتصال بیشتری نسبت به روش التراسونیکی می‌باشد. همچنین، در اتصال فلز به پلیمر به روش پرچ

[1] Ultrasonic staking
[2] Injection Clinching Joining
[3] Abibe

Please cite this article using:

H. Karami Pabandi, M. Movahedi, A. Kokabi, Effect of tool rotational speed on friction spot joining of aluminum/polymer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 431-440, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.8.8]

تزریقی، منطقه‌ای به نام منطقه‌ی ترمومکانیکی در ورق پلیمری ایجاد می‌شود که خواص مکانیکی این منطقه در اثر حرارت ورودی کاهش می‌یابد اما خواص فیزیکی آن تغییر نمی‌کند. در پژوهشی دیگر، ابیبه و همکارانش [5] روش پرچ تزریقی را برای اتصال پلی‌آمید تقویت شده با الیاف کوتاه کربن و آلومینیوم AA2024 استفاده کردند. آن‌ها گزارش دادند که حجمی از پرچ که در تماس با سیستم ابزار است و میزان پر شدن حفره، دو عامل کلیدی برای کنترل استحکام اتصال می‌باشند.

روش‌های جوش‌کاری نیز مانند جوش‌کاری اصطکاکی-تلاطمی نقطه‌ای (FSSW[1])، برای اتصال پلیمر به فلز استفاده شده‌اند. اگرچه به خاطر باقی ماندن حفره در مرکز جوش و اثرات منفی آن بر خواص مکانیکی اتصال، روش اتصال اصطکاکی نقطه‌ای (FSpJ[2]) با قابلیت پر کردن مجدد حفره توسط موسسه‌ی GKSS در آلمان ابداع شد [6]. روش FSpJ به‌طور موفقیت آمیز توسط پژوهشگران برای اتصال فلز به کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه و کربن استفاده شده است [7,3]. در پژوهشی که گوشه‌گیر و همکارانش [3] بر روی اتصال اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای آلومینیوم AA2024 به پلیمر تقویت شده با 50% حجمی فیبر کربنی (PPS-CF) انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق نفوذ ابزار در محل اتصال، نیروی برشی لازم برای شکست و مقدار جابجایی تا شکست به دلیل افزایش سطح اتصال در فصل مشترک، افزایش می‌یابد. استیوس و همکارانش [8] جوش‌کاری اصطکاکی نقطه‌ای با فرایند پرکردن مجدد را برای اتصال آلیاژ آلومینیوم AA6181-T4 به کامپوزیت زمینه پلی فنیلن سولفید تقویت شده با الیاف کربن مورد استفاده قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که سرعت چرخشی ابزار بیشترین اثر را بر نیروی شکست جوش‌ها دارد. علاوه‌بر این، افزایش استحکام با افزایش سطح اتصال بین آلومینیوم و پلیمر و همچنین تشکیل قفل مکانیکی ماکروسکوپی در فصل مشترک ورق‌های پایه ارتباط داده شد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که در سرعت‌های چرخشی بالا (1600 rpm)، کاهش ویسکوزیته فلز منجر به کاهش حرارت تولیدی در حین چرخش ابزار و در نتیجه کاهش سطح اتصال بین ورق آلومینیومی و پلیمری در فصل مشترک می‌شود. آندره و همکارانش [10] اثر استفاده از لایه واسط پلی فنیلن سولفید را بر ویژگی‌های اتصال اصطکاکی نقطه‌ای آلیاژ آلومینیوم AA2024-T3 به کامپوزیت زمینه پلی فنیلن سولفید تقویت شده با الیاف کربن بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از لایه واسط پلیمری با ایجاد اتصال مناسب بین این لایه واسط و ورق آلومینیوم، موجب افزایش نیروی شکست اتصال تا 55% در مقایسه با اتصال بدون لایه واسط می‌شود.

در این پژوهش، یک روش جدید جوش‌کاری اصطکاکی نقطه‌ای با نام "جوش‌کاری اصطکاکی نقطه‌ای با سوراخ رزوه‌دار" برای اتصال ورق‌های آلومینیوم آلیاژی AA5052 به پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کوتاه کربن (PP-SCF) استفاده شد. در این روش اتصال‌دهی، در مقایسه با روش اتصال التراسونیکی و پرچ تزریقی، نیاز به ایجاد یک زائده‌ی پلیمری اضافی بر روی ورق پلیمری قبل از آغاز فرایند اتصال نیست و این زایده در حین فرایند و با استفاده از بخش ذوب شده ورق پلیمری در داخل سوراخ شکل می‌گیرد. اگرچه مشابه دو روش مذکور، قبل از شروع فرآیند باید یک سوراخ بر روی ورق فلزی ایجاد شود. علاوه بر این، در روش پرچ تزریقی و روش جوش‌کاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای (بدون فرایند پر کردن مجدد حفره)، یک حفره نیز در اثر نفوذ پین در مرکز اتصال باقی می‌ماند، در صورتی که روش معرفی شده در این پژوهش دارای قابلیت پر شدن مجدد حفره می‌باشد. از سوی دیگر، در روش اتصال اصطکاکی نقطه‌ای با فرایند پر کردن مجدد حفره، جهت ایجاد اتصال نیاز به یک ابزار سه جزئی و سیستم نسبتا پیچیده مکانیکی و الکترونیکی می‌باشد، در حالی که در روش جوش‌کاری اصطکاکی نقطه‌ای با سوراخ رزوه‌دار، اتصال با استفاده از یک ابزار استوانه‌ای ساده بدون پین ایجاد می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که اگرچه به‌دلیل عدم وجود پین در ابزار مورد استفاده در این پژوهش، عمل اغتشاش در فلز پایه آلومینیوم و بنابراین ایجاد قفل‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی بین ورق‌ها در فصل مشترک اتصال انجام نمی‌شود (برخلاف فرایندهای اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای با فرایند پرکردن مجدد)، اما وجود حفره رزوه‌دار پر شده با مذاب پلیمر، باعث ایجاد قفل‌های مکانیکی برای تحمل نیروهای برشی و کششی می‌شود. بعد از ایجاد اتصال بین ورق‌ها، مکانیزم‌های اتصال و همچنین تاثیر سرعت چرخشی ابزار بر رفتار مکانیکی اتصال مطالعه شد.

2- روش پژوهش

2-1- مواد اولیه

آلومینیوم AA5052 به صورت دریافت شده[3] با ضخامت 2 mm به عنوان بخش فلزی اتصال در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. در جدول 1 ترکیب شیمیایی و در جدول 2 خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ AA5052 نشان داده شده است.

در این پژوهش، برای بخش پلیمری ورق کامپوزیتی زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن تولید شد که از پلی‌پروپیلن Z30S به عنوان فاز زمینه و از الیاف کوتاه کربن (SCF[4]) با طول 3 mm و قطر 7 µm به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد. کامپوزیت استفاده شده در این پژوهش در سه مرحله تولید شد. در مرحله اول ساخت کامپوزیت، 15 درصد وزنی الیاف کربن، 60 درصد وزنی پلی‌پروپیلن و 25 درصد وزنی پلیمر قطبی شده با استفاده از دستگاه برابندر[5] در دمای 180 °C به مدت 4 دقیقه و با سرعت

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم AA5052 مورد استفاده در این پژوهش (برحسب درصد وزنی)

Table 1 Chemical composition of AA5052 Aluminum alloy used in this research (%wt.)

نام آلیاژ	عناصر شیمیایی							
	Al	Mg	Cr	Cu	Fe	Si	Mn
AA5052	Base	2.34	0.20	0.004	0.23	0.06	0.006

جدول 2 خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA5052

Table 2 Physical and mechanical properties of AA5052 Aluminum alloy

ویژگی	واحد	مقدار
چگالی	g/cm^3	2.68 [11]
ضریب انبساط حرارتی متوسط	$10^{-6}/K$	23.8 [11]
هدایت حرارتی	W/m.K	138 [11]
ضریب کشسانی	GPa	70 [11]
دمای ذوب	°C	644 [11]
استحکام تسلیم	MPa	214
استحکام کششی	MPa	265
قابلیت افزایش طول (در نقطه شکست)	%	13.5

[1] Friction Stir Spot Welding
[2] Friction Spot Joining
[3] As-received
[4] Short Carbon Fiber
[5] Brabender

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.8.8]

چرخشی 30 rpm با یکدیگر مخلوط شدند. پس از سرد شدن مذاب کامپوزیت اولیه تا دمای اتاق، ترکیب یکنواخت بدست آمده برای استفاده در مرحله بعد آسیاب شد. در مرحله دوم، 20 درصد وزنی از کامپوزیت اولیه به همراه 80 درصد وزنی از همان پلی‌پروپیلن جهت تولید گرانول کامپوزیت نهایی توسط دستگاه اکسترودر دو پیچه (مدل: کوپریون[1] ZSK18) با یکدیگر مخلوط شدند. پس از تهیه گرانول در شرایط دمای 180 °C و سرعت چرخشی 15 rpm، در مرحله سوم ورق‌های کامپوزیتی با ضخامت 2 mm به روش تزریق پلاستیک تولید شدند. در جدول 3، ترکیب شیمیایی و در جدول 4 خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه پلیمری (PP-SCF) تولید شده و در جدول 5 خواص فیزیکی پلی‌پروپیلن Z30S آورده شده است. همچنین در "شکل 1" تصویری از نحوه‌ی توزیع الیاف کربن در زمینه پلی‌پروپیلن Z30S نشان داده شده است.

جدول 3 ترکیب شیمیایی کامپوزیت زمینه پلیمری (PP-SCF) تولید شده در این پژوهش (بر حسب درصد وزنی)

Table 3 Chemical composition of polymer matrix composite (PP-SCF) used in this research (%wt.)

الیاف کوتاه کربن (SCF)	پلیمر قطبی شده (PP-g-MA)	پلی‌پروپیلن (PP-Z30S)
3	5	92

جدول 4 خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه پلیمری (PP-SCF)

Table 4 Mechanical properties of polymer matrix composite (PP-SCF)

استحکام کششی نهایی (MPa)	انرژی ضربه (kJ/m^2)	سختی (Shore D)
35	1.4	72

جدول 5 خواص فیزیکی پلی‌پروپیلن Z30S [12]

Table 5 Physical and mechanical properties of polypropylene Z30S [12]

ویژگی	واحد	مقدار
چگالی	g/cm^3	0.9
شاخص جریان مذاب (MFI)	Dg/min	25
ضریب انبساط حرارتی	$10^{-6}/K$	100-150
ضریب هدایت حرارتی (جامد)	W/m.K	0.17-0.22
ضریب هدایت حرارتی (مذاب)	W/m.K	0.16
دمای نرم شدن	°C	165

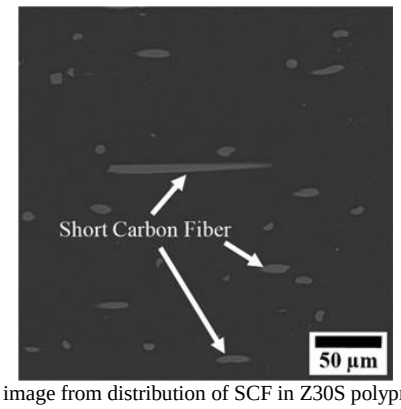


Fig. 1 SEM image from distribution of SCF in Z30S polypropylene matrix

شکل 1 تصویر SEM از نحوه‌ی توزیع الیاف کوتاه کربن در زمینه پلی‌پروپیلن Z30S

[1] Coperion

2-2- فرآیند اتصال‌دهی

ورق‌های آلومینیومی دارای سوراخ رزوه‌دار و کامپوزیتی با ابعاد $70\times30\ mm^2$ برای ایجاد اتصال مورد استفاده قرار گرفتند. جهت ایجاد سوراخ بر روی ورق آلومینیومی، از یک متّه با قطر 4 mm و سپس برای ایجاد رزوه در دیواره‌ی سوراخ (با هدف افزایش میزان استحکام اتصال از طریق ایجاد قفل مکانیکی)، از قلاویز M4 استفاده شد. قطر سوراخ 4 mm در این پژوهش، با توجه به آزمایش‌های اولیه انتخاب شد. از آنجا که نیروی تحملی اتصال متناسب با سطح قاعده سوراخ رزوه‌دار روی ورق آلومینیوم است، سوراخ با قطر کمتر منجر به کاهش نیروی تحملی جوش می‌شود. از سوی دیگر، با افزایش قطر سوراخ، سطح پلیمر ذوب نشده در قاعده سوراخ بیشتر می‌شود. از آنجا که این ناحیه پلیمری ذوب نشده نقش ترک در ناحیه اتصال را بازی می‌کند، نیروی تحملی جوش متناسب با افزایش سطح قاعده سوراخ رزوه‌دار زیاد نشده و استحکام اتصال (نسبت نیروی شکست به سطح قاعده سوراخ) کاهش می‌یابد. ورق‌ها با طرح اتصال لبه روی هم در حالتی که ورق آلومینیومی در بالا و ورق کامپوزیتی در پایین قرار داشت، به یکدیگر اتصال داده شدند. از ابزار بدون پین با قطر شانه‌ی 20 mm جهت ایجاد اتصال بین ورق کامپوزیتی و آلومینیوم سوراخکاری شده استفاده شد. سرعت چرخش ابزار در چهار سطح 500، 1000، 1500 و 2000 rpm در نظر گرفته شد. زمان مناسب برای توقف ابزار بر روی محل اتصال پس از تماس شانه ابزار با سطح ورق آلومینیوم، با توجه به آزمایش‌های اولیه در این پژوهش، 5 s انتخاب شد. در زمان‌های کمتر از 5 s، به دلیل کم بودن حرارت تولیدی، میزان ذوب کامپوزیت پلیمری در فصل مشترک کم بوده و در نتیجه حفره رزوه‌دار توسط مذاب پلیمری به طور کامل پر نمی‌شد. از سوی دیگر، زمان توقف طولانی‌تر ابزار، موجب ذوب بیش از حد پلیمر در فصل مشترک و بیرون‌زدگی مذاب اضافی از کناره‌ی نمونه‌های مورد اتصال می‌شد و در نتیجه ضخامت ورق پلیمر در محل اتصال کاهش می‌یافت. فشار محوری ابزار در اثر حرکت ابزار در راستای محور عمودی به سمت پایین و تا عمق نفوذ 0.3 mm~ توسط دستگاه اعمال شد.

در "شکل 2" شماتیکی از مراحل مختلف روش جدید اتصال‌دهی معرفی شده در این پژوهش، با نام جوش‌کاری اصطکاکی نقطه‌ای با سوراخ رزوه‌دار نشان داده شده است. در مرحله اول این روش، ابزار به صورت هم‌محور با سوراخ موجود بر روی ورق آلومینیومی بالای آن قرار می‌گیرد و دارای سرعت چرخشی مشخصی می‌باشد (شکل 2-a). در مرحله بعد، ابزار پایین آمده و به سطح آلومینیوم نزدیک می‌شود. در اثر تماس سطح شانه‌ی ابزار با سطح آلومینیوم، حرارت اصطکاکی تولید می‌شود و این حرارت با هدایت از سطح ورق آلومینیوم به فصل مشترک ورق‌ها، موجب ذوب پلیمر می‌گردد. اما از آنجایی که پلیمر عایق حرارت می‌باشد، ذوب پلیمر به صورت سطحی و فقط در فصل مشترک اتفاق می‌افتد (شکل 2-b). در اثر فشار محوری ابزار به سمت پایین، مذاب پلیمر در فصل مشترک به سمت کناره‌های محل اتصال سیلان پیدا می‌کند. مذاب پلیمر در اطراف سوراخ موجود بر روی ورق آلومینیومی وارد سوراخ می‌شود و به دلیل وجود رزوه در داخل آن، قفل مکانیکی مناسبی بین پلیمر و آلومینیوم ایجاد می‌گردد (شکل 2-c و d). بعد از زمان توقف کوتاه ابزار (5 ثانیه)، در مرحله آخر ابزار به سمت بالا حرکت کرده (شکل 2-e) و با انجماد پلیمر مذاب در داخل سوراخ، اتصال کامل می‌شود (شکل 2-f).

2-3- بررسی‌های میکروسکوپی

جهت مشاهده سطح مقطع اتصال از میکروسکوپ استریو استفاده شد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.8.8]

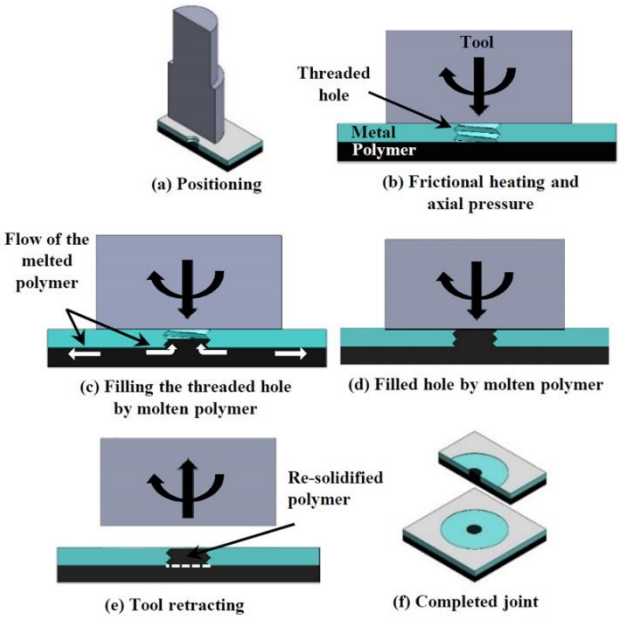


Fig. 2 Schematic of process steps used in this research for joining metal to polymer

شکل 2 شماتیکی از مراحل مختلف روش استفاده شده در این پژوهش جهت اتصال فلز به پلیمر

همچنین، برای بررسی ریزساختار فصل مشترک اتصال و عناصر موجود در آن و نیز مطالعه سطح شکست نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به تفنگ انتشار میدانی (FE-SEM) و آنالیز عنصری با روش طیف‌سنجی تفکیک انرژی (EDS) استفاده شد. جهت افزایش کیفیت تصاویر SEM، بر روی سطح مورد بررسی نمونه‌ها لایه‌ای از طلا نشانده شد.

2-4- بررسی خواص مکانیکی

برای ارزیابی رفتار مکانیکی نمونه‌های اتصال داده شده، آزمون‌های کشش-برش و کشش متقاطع انجام گرفت. جهت بررسی تأثیر ایجاد رزوه بر استحکام کشش متقاطع، نمونه‌ای بدون وجود رزوه در داخل سوراخ اتصال داده شد. ابعاد ورق‌ها در هر دو آزمون $70\times30\ mm^2$ و میزان همپوشانی ورق‌ها برابر $30\times30\ mm^2$ تعیین شد (شکل 3). سوراخ رزوه‌دار در مرکز ناحیه همپوشانی ایجاد گردید. نرخ حرکت فک‌های دستگاه در آزمون کشش، برابر mm/min 0.5 در نظر گرفته شد. جهت کاهش خطاهای آزمایش در حین ایجاد اتصال و آزمون‌های کشش، در هر سرعت چرخشی ابزار، سه نمونه‌ی مشابه تولید شد و میانگین حداکثر نیروی شکست آن‌ها گزارش شد.

برای سختی‌سنجی کامپوزیت زمینه پلیمری از دستگاه سختی‌سنج Shore D استفاده شد. سختی‌سنجی کامپوزیت در دو ناحیه‌ی کامپوزیت پایه و کامپوزیت منجمد شده در داخل سوراخ اولیه انجام گرفت تا تاثیر تغییرات دما در حین فرآیند اتصال‌دهی بر روی سختی کامپوزیت و استحکام آن بررسی شود.

3- نتایج و بحث

3-1- سطح مقطع اتصال

"شکل 4" سطح مقطع اتصال و نواحی مختلف آن شامل ورق‌های پایه، سوراخ رزوه‌دار و کامپوزیت پلیمری منجمد شده در داخل سوراخ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سرعت چرخشی ابزار بر میزان پر شدن سوراخ

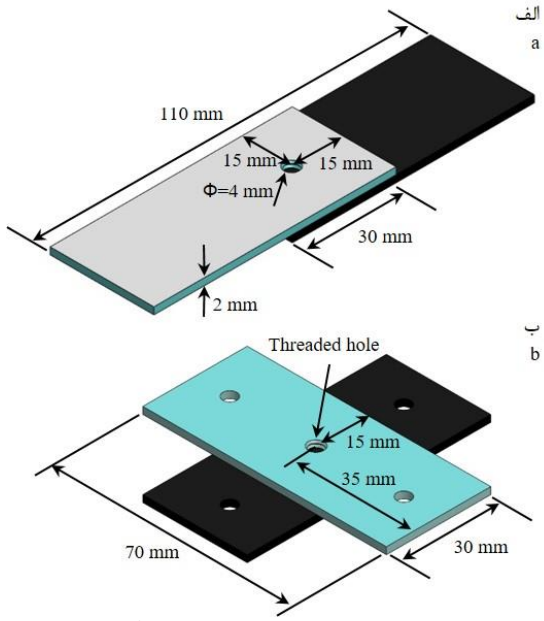


Fig. 3 Schematic of tensile testing specimens and their dimensions: a) Shear-Tensile specimen and b) Cross-Tension specimen

شکل 3 شماتیکی از نمونه‌های آزمون کشش و ابعاد آنها: الف) نمونه‌ی کشش-برش و ب) نمونه‌ی کشش متقاطع

توسط مذاب پلیمر تاثیر دارد. در سرعت چرخشی 500 rpm به دلیل حرارت اصطکاکی کمتر، حجم مذاب پلیمر ایجاد شده برای پر کردن سوراخ نیز کافی نیست. در "شکل a-4" تخلخل و ناحیه پر نشده توسط مذاب پلیمر در محل اتصال و جدایش[1] به وجود آمده در فصل مشترک ورق‌ها به علت عدم وجود نیروی چسبندگی[2] در این نواحی، نشان داده شده است. با افزایش سرعت چرخشی ابزار، حرارت تولید شده بیشتر و در نتیجه پلیمر بیشتری ذوب و وارد سوراخ می‌شود. در سطح مقطع نمونه‌های اتصال داده شده با سرعت چرخشی 1000، 1500 و 2000 rpm، تمام قسمت‌های سوراخ توسط مذاب پلیمر پر شده است و بین دیواره‌ی سوراخ و پلیمر، قفل مکانیکی ایجاد شده است. همچنین، به دلیل تشکیل مذاب پلیمر در فصل مشترک آلومینیوم و کامپوزیت اولیه، یک نیروی چسبندگی نیز در این نواحی بوجود می‌آید [8]. در "شکل‌های c-4 و d" مشاهده می‌شود که در اثر حرارت اصطکاکی زیاد، مقدار اضافی پلیمر مذاب به صورت یک برآمدگی در سطح ورق آلومینیومی منجمد شده است. این برآمدگی بعد از جدا شدن سطح شانه‌ی ابزار از سطح ورق، در اثر فشار ناشی از گیره‌های نگهدارنده‌ی ورق‌ها ایجاد شده است.

3-2- تشکیل لایه واکنشی و مکانیزم‌های ایجاد اتصال

"شکل a-5"، تصویر SEM از سطح مقطع اتصال ایجاد شده بین آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری را نشان می‌دهد. "شکل b-5" نیز فصل مشترک آلومینیوم و پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ (ناحیه A در "شکل a-5") را در بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در که در فصل مشترک یک لایه واکنشی[3] با ضخامت حدود 15 µm وجود دارد. منظور از لایه‌ی واکنشی، لایه‌ای است که بین آلومینیوم و مذاب پلیمر تشکیل شده و اتم‌های هر دو ماده در آن حضور دارند. به نظر می‌رسد این لایه با مکانیزم فرسایش[4] (که

[1] Discontinuity
[2] Adhesion Force
[3] Reaction Layer
[4] Erosion

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.8.8]

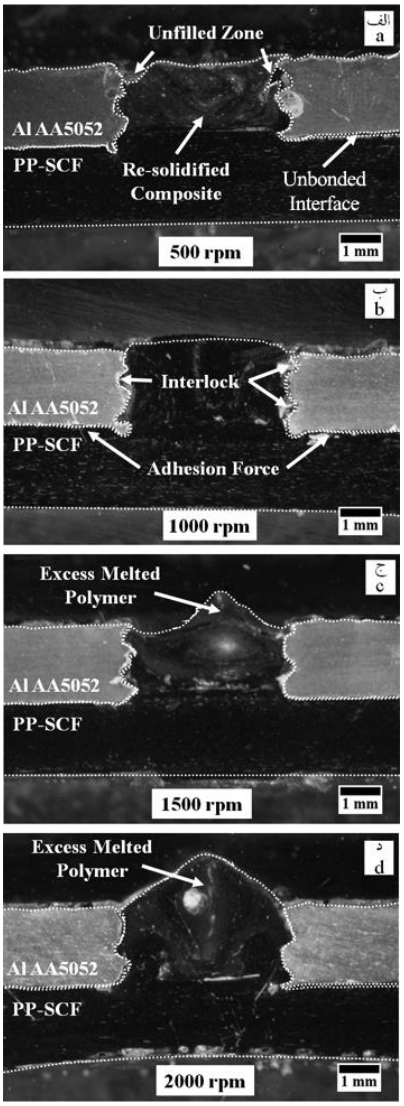


Fig. 4 Stereograph images from cross-section of joints at the rotational speeds: a) 500 rpm, b) 1000 rpm, c) 1500 rpm and d) 2000 rpm

شکل 4 تصاویر استریوگراف از سطح مقطع اتصال‌ها در سرعت‌های چرخشی: الف) 500 rpm، ب) 1000 rpm، ج) 1500 rpm و د) 2000 rpm

یک پدیده شناخته شده در بحث لحیم‌کاری است) شکل گرفته باشد [13]. یعنی در اثر بر خورد مذاب پلیمر به دیواره‌ی آلومینیومی سوراخ در دمای بالا، اتم‌های آلومینیوم از سطح سوراخ جدا شده و وارد مذاب پلیمر می‌شوند و لایه‌ی واکنشی را تشکیل می‌دهند. لازم به ذکر است که لازمه تشکیل لایه‌ی واکنشی با مکانیزم فرسایش، ایجاد حرارت و در نتیجه ذوب پلیمر می‌باشد که این اتفاق با استفاده از ابزار بدون پین نیز در این پژوهش محقق شده است، اگرچه استفاده از ابزار دارای پین و در نتیجه افزایش همزمان دما و میزان اختلاط بین آلومینیوم و پلیمر می‌تواند تشکیل لایه واکنشی را تشویق کند. مقایسه "شکل b-5 و c" نشان می‌دهد که ضخامت لایه با تغییر سرعت چرخشی، تغییر قابل توجهی ندارد؛ اما ترکیب شیمیایی لایه متأثر از سرعت چرخشی ابزار می‌باشد. نتایج آنالیز عنصری بدست آمده از لایه واکنشی برای هر دو نمونه‌ی اتصال داده شده با سرعت چرخشی 500 (کمترین حرارت ورودی) و 2000 rpm (بیشترین حرارت ورودی) در جدول 6 نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت چرخشی ابزار، درصد وزنی آلومینیوم افزایش و درصد وزنی کربن اندکی کاهش یافته است. در توضیح این پدیده می‌توان گفت که هر چه دمای مذاب پلیمر وارد شده به داخل سوراخ بیشتر باشد، میزان فرسایش سطح آلومینیوم در سوراخ و در نتیجه حضور آلومینیوم در لایه واکنشی نیز بیشتر خواهد بود. حضور اکسیژن در این لایه، احتمالا به تخریب پلیمر مذاب ناشی از واکنش آن با اکسیژن مربوط است [1]. در پژوهش انجام شده توسط شهمیری و همکارانش [13] بر روی اتصال اصطکاکی-تلاطمی آلومینیوم AA5052 به پلی‌پروپیلن C30S نیز یک لایه‌ی واکنشی بین آلومینیوم و پلی‌پروپیلن حاوی 8 درصد وزنی آلومینیوم مشاهده شد.

علاوه بر لایه واکنشی، در بعضی نقاط یک شکاف نیز بین لایه‌ی واکنشی و پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ دیده می‌شود. به نظر می‌رسد تشکیل این شکاف به اختلاف قابل توجه بین ضریب انبساط حرارتی مواد پایه مرتبط باشد [2]. ضریب انبساط حرارتی آلومینیوم و پلی‌پروپیلن به ترتیب K^{-1} 23.8×10^{-6} و $100\text{-}150\times10^{-6}$ K^{-1} می‌باشد [12,2]. بالا بودن ضریب انبساط حرارتی پلی‌پروپیلن موجب می‌شود که در مرحله سرد شدن، مذاب پلیمر بیشتر منقبض شده و در نتیجه یک شکاف بین پلیمر و لایه‌ی واکنشی ایجاد شود. از طرفی، میزان تغییرات حجم مذاب در حین سرد شدن به دمای مذاب نیز بستگی دارد و هر چه دمای مذاب بالاتر باشد انقباض آن نیز در حین انجماد بیشتر خواهد بود. از آن‌جا که دمای مذاب پلیمر در سرعت چرخشی 2000 rpm بالاتر بوده است، انتظار می‌رود اندازه شکاف ایجاد شده بین پلیمر منجمد شده و لایه‌ی واکنشی در این نمونه بیشتر باشد. در "شکل c-5" مشاهده می‌شود که شکاف بزرگ در نمونه با سرعت چرخشی 2000 rpm در مرحله‌ی آماده‌سازی نمونه جهت مطالعات ریزساختاری توسط رزین اپوکسی (ماده‌ی مانت سرد) پر شده است. میزان فضای خالی ایجاد شده در همه‌ی قسمت‌های نمونه کاملاً یکسان نبود، چون سطح آلومینیوم تحت فرسایش توسط مذاب پلیمر، در ابعاد میکرون دارای ناهمواری‌های زیادی می‌باشد و این پدیده موجب تغییر اندازه فضای خالی ایجاد شده می‌گردد.

در ناحیه پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ، تعدادی لکه‌های سفید دیده می‌شود که مربوط به براده‌های آلومینیومی هستند (شکل c-5). چون در حین فرآیند اتصال‌دهی، با تماس سطح شانه ابزار با ورق آلومینیومی، ذرات کوچک آلومینیومی به صورت براده از سطح آلومینیوم جدا شده و به بیرون از محل اتصال و داخل سوراخ موجود در ورق آلومینیومی پرتاب می‌شوند. با منجمد شدن مذاب پلیمر در داخل سوراخ، این ذرات درون مذاب پلیمر محبوس می‌شوند.

با توجه به آن‌چه ذکر شد، اتصال ایجاد شده بین ورق‌های آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری، حاصل دو پدیده‌ی ایجاد قفل مکانیکی بین پلیمر منجمد شده و رزوه‌های موجود در سوراخ و همچنین تشکیل لایه‌ی واکنشی بین آنها می‌باشد. از سوی دیگر نتایج بررسی‌های خدابخشی و همکارانش [14,1] در زمینه اتصال اصطکاکی-تلاطمی آلومینیوم به پلیمر نشان داده است که پیوندهای واندروالانسی[1] بین اتم‌های لایه‌ی اکسیدی آلومینیوم و پلیمر شکل

جدول 6 تاثیر سرعت چرخشی ابزار بر درصد وزنی عناصر مختلف در لایه واکنشی

Table 6 The effect of tool rotational speed on weight present of the elements in reaction layer

نام عنصر		سرعت چرخشی ابزار (rpm)	
		500	2000
درصد وزنی (%wt.)	Al	21	38
	C	37	35
	O	33	22

[1] Van der Waals

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.8.8]

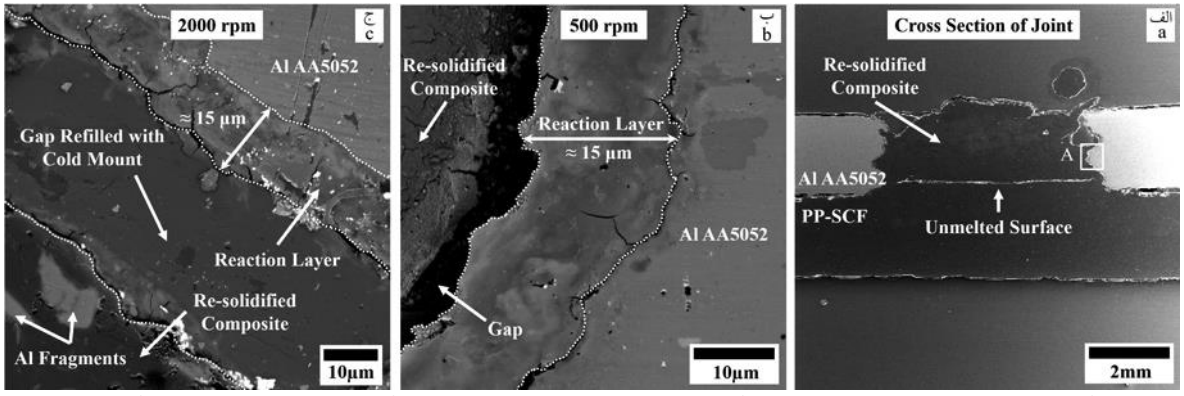


Fig. 5 a) SEM image from a typical cross-section of the joint, b) Reaction layer and the gap formed between Aluminum and re-solidified composite in the threaded hole at the tool rotational speed of 500 rpm (magnified of area "A") and c) Reaction layer and the gap refilled by epoxy resin at the tool rotational speed of 2000 rpm

شکل 5 الف) تصویر SEM از سطح مقطع عرضی اتصال، ب) لایه واکنشی و شکاف ایجاد شده بین آلومینیوم و کامپوزیت منجمد شده در داخل سوراخ در سرعت چرخشی 500 rpm (بزرگنمایی ناحیه A) و ج) لایه واکنشی و شکاف پر شده توسط رزین اپوکسی در سرعت چرخشی 2000 rpm

می‌گیرد. اگرچه شکل‌گیری شکاف بین لایه‌ی واکنشی و پلیمر منجمد شده در ناحیه اتصال می‌تواند اثربخشی تشکیل لایه‌ی واکنشی و همچنین پیوندهای واندروالانسی در ایجاد اتصال در داخل سوراخ را کاهش دهد. این در حالیست که این مکانیزم می‌تواند در نواحی مجاور سوراخ ایجاد شده و در فصل مشترک دو ورق (نواحی دارای نیروی چسبندگی در "شکل 4") مؤثر باشد.

3-3- آنالیز سطح شکست

تصاویر تهیه شده از سطوح شکست نمونه‌ها پس از آزمون کشش متقاطع، در "شکل 6" نشان داده شده‌اند. در نمونه‌های اتصال داده شده با سرعت چرخشی 500، 1000 و 1500 rpm مشاهده می‌شود که شکست از فصل مشترک کامپوزیت منجمد شده و کامپوزیت اولیه رخ داده است. سطح شکست در کامپوزیت پلیمری به‌صورت یک دایره است که در قسمت میانی این دایره، سطح پلیمر ذوب نشده و در سایر نواحی سطح پلیمر ذوب شده دیده می‌شود. سطح ذوب شده در اثر ورود مذاب پلیمر از نواحی بیرونی سوراخ به داخل آن و ایجاد اتصال بین این مذاب و پلیمر اولیه در اثر ذوب سطحی آن به وجود آمده است. با مقایسه "شکل‌های a-6 تا c" ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، مساحت سطح ذوب نشده کاهش یافته است. اما در نمونه جوش‌کاری شده با سرعت 2000 rpm (شکل d-6) احتمالاً سطح ذوب نشده وجود ندارد و یا اندازه آن بسیار کوچک است و به همین دلیل، شکست اتصال در این سرعت چرخشی، با خارج شدن پلیمر از داخل سوراخ اتفاق افتاده است.

در توضیح علت وجود سطح پلیمر ذوب نشده می‌توان گفت که در حین فرآیند، آن قسمت از سطح پلیمر که در قاعده سوراخ دایره‌ای است، هیچ تماسی با ورق آلومینیومی ندارد. بنابراین افزایش دمای ورق آلومینیومی در اثر اصطکاک با ابزار، به طور مستقیم باعث ذوب این بخش از پلیمر نمی‌گردد. بخشی از این سطح پلیمر با ورود مذاب پلیمر از نواحی بیرونی سوراخ به داخل سوراخ و قرار گرفتن مذاب بر روی این سطح ذوب می‌شود. هر چه دمای مذاب پلیمر پر کننده‌ی سوراخ بیشتر باشد، میزان سطح ذوب شده از پلیمر داخل سوراخ نیز افزایش یابد. وجود سطح ذوب نشده در بخش میانی سطح دایره‌ای شکل سوراخ در فصل مشترک دو ورق به معنای عدم وجود اتصال بین پلیمر اولیه و پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ می‌باشد. این درحالیست که در ناحیه بیرونی سطح دایره‌ای شکل سوراخ، در اثر حرارت فلز پایه آلومینیوم، ذوب و اختلاط کامل بین سطح پلیمر اولیه و پلیمر مذاب وارد شده به سوراخ رخ می‌دهد. بدیهی است که وجود قسمت‌های اتصال نیافته در بخش میانی و احاطه شدن آن توسط نواحی بیرونی دارای اتصال، مشابه وجود یک ترک اولیه در این ناحیه خواهد بود. بنابراین اگر پلیمر پر کننده‌ی سوراخ به صورت یک استوانه‌ی کوچک با قطر 4 mm و ارتفاع برابر با ضخامت ورق آلومینیوم (2 mm) در نظر گرفته شود، در قاعده پایین این استوانه، یعنی فصل مشترک پلیمر اولیه و پلیمری که سوراخ را پر کرده است، در اثر ذوب نشدن بخشی از سطح پلیمر اولیه یک ترک وجود دارد. "شکل 7"، نحوه و محل ورود مذاب پلیمر به داخل سوراخ و سطح پلیمر ذوب نشده را نشان می‌دهد.

تصاویر SEM از سطح شکست اتصال ایجاد شده در سرعت چرخشی 500 rpm، تفاوت بین سطوح شکست نواحی مرزی و نواحی داخلی پلیمر موجود در قاعده سوراخ را بهتر نشان می‌دهد (شکل 8). نواحی داخلی سطوح اتصال یافته (منطقه‌ی A در "شکل a-8") دارای سطح زبری هستند، در حالی که سطح شکست نواحی مرزی صاف می‌باشند (منطقه‌ی B در "شکل a-8"). سطح زبر تشکیل شده در ناحیه‌ی A، حاصل تغییر شکل پلاستیک جزئی در این ناحیه است [15]. در واقع پیوندهای تشکیل شده در حین فرآیند بین پلیمر منجمد شده و پلیمر اولیه، قبل از شکست اندکی دچار تغییر شکل پلاستیک شده‌اند، اما در ناحیه B نشانی از تغییر شکل پلاستیک دیده نمی‌شود. این ناحیه که در اثر رشد سریع ترک ایجاد شده است، دارای ویژگی‌های شکست ترد است.

3-4- تغییرات سختی محل اتصال

"شکل 9" نمودار تغییرات سختی پلیمر برحسب سرعت چرخشی ابزار را نشان می‌دهد. میزان سختی بدست آمده از ورق کامپوزیتی اولیه با مراجع همخوانی دارد [12,1]. مقایسه‌ی نتایج ریزسختی‌سنجی از منطقه پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ نسبت به ورق کامپوزیتی اولیه نشان می‌دهد که سختی در این منطقه در مقیاس Shore D حدود 4 الی 6 واحد کاهش یافته است. چون پلیمر ذوب شده تحت تأثیر گرمای ناشی از اصطکاک شانه ابزار با ورق آلومینیومی قرار داشته و کاهش سختی آن به دلیل کاهش وزن مولکولی و درصد بلورینگی پلیمر در اثر حرارت اصطکاکی می‌باشد [16,15]. بررسی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.8.8]

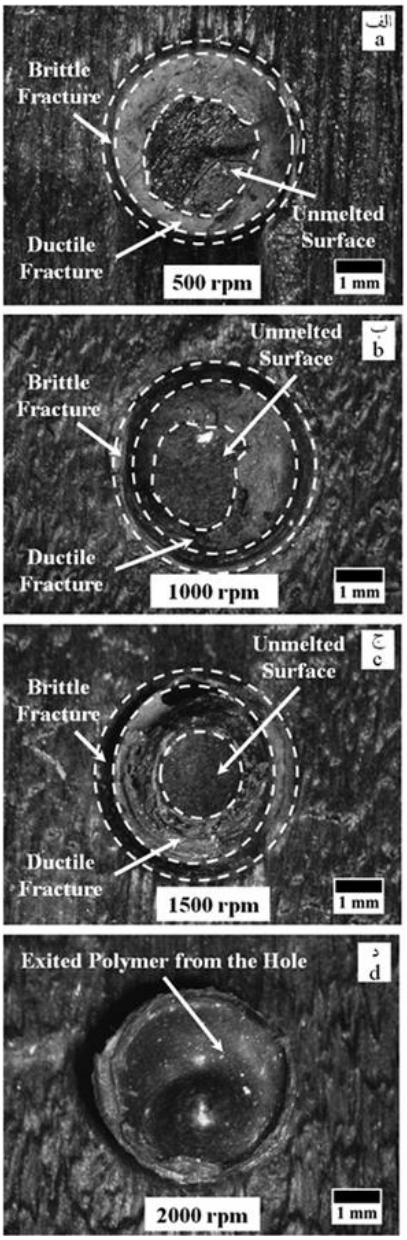


Fig. 6 Fracture surface of polymeric composite sheet; change in the area of unmelted surface and fracture location at different rotational speeds: a) 500 rpm, b) 1000 rpm, c) 1500 rpm and d) 2000 rpm

شکل 6 سطح شکست ورق کامپوزیت پلیمری؛ تغییر مساحت سطح ذوب نشده و محل شکست در سرعت‌های چرخشی مختلف: الف) 500 rpm، ب) 1000 rpm، ج) 1500 rpm و د) 2000 rpm

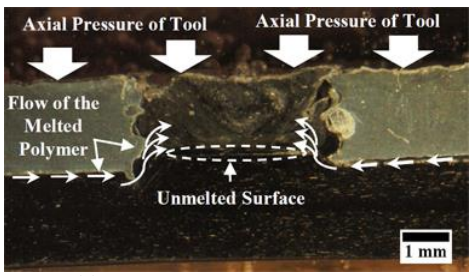


Fig. 7 The way of filling the threaded hole by melted polymer and remaining the unmelted surface at center of the hole base

شکل 7 نحوه‌ی پرشدن سوراخ اولیه توسط مذاب پلیمر و باقی ماندن سطح ذوب نشده در مرکز قاعده سوراخ

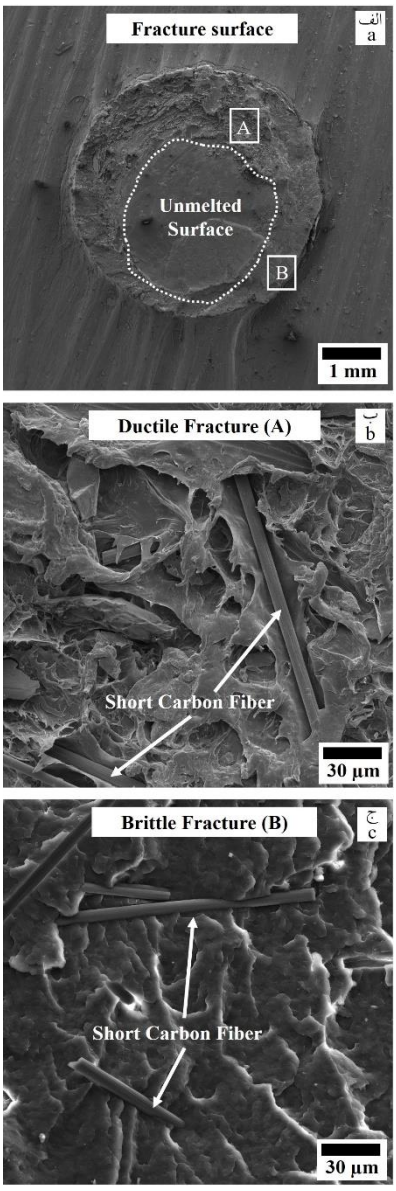


Fig. 8 SEM images of fracture surface at 500 rpm: a) Two different areas on the fracture surface, b) ductile fracture surface (A area) and c) brittle fracture surface (B area)

شکل 8 تصاویر SEM تهیه شده از سطح شکست در سرعت چرخشی 500 rpm: الف) وجود دو ناحیه مختلف در سطح شکست، ب) سطح شکست نرم (ناحیه A)، ج) سطح شکست ترد (ناحیه B)

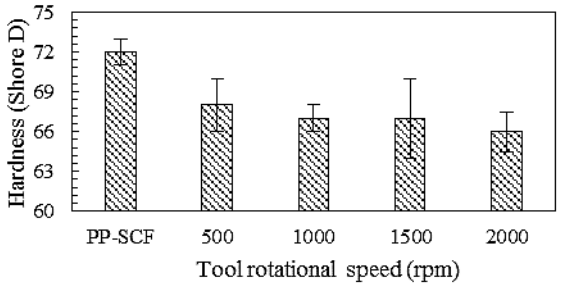


Fig. 9 Hardness variation of the re-solidified composite inside the hole versus the tool rotational speed

شکل 9 تغییرات سختی کامپوزیت منجمد شده در داخل سوراخ برحسب سرعت چرخشی ابزار

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.8.8]

تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر تغییرات سختی پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ نیز نشان می‌دهد که به‌طور کلی با افزایش سرعت چرخشی ابزار، سختی کاهش می‌یابد اما اختلاف مقادیر آن‌ها ناچیز است.

3-5- بررسی استحکام و انرژی شکست اتصال

3-5-1- آزمون کشش متقاطع

"شکل 10" تغییرات نیرو برحسب جابجایی و اثر سرعت چرخشی ابزار بر نیرو و انرژی شکست را در آزمون کشش متقاطع نشان می‌دهد. در "شکل 10-a" مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، نیروی شکست افزایش یافته است. در این نوع روش اتصال‌دهی، با افزایش سرعت چرخشی ابزار دو عامل در نیروی شکست اتصال با یکدیگر رقابت می‌کنند:

1) افزایش نیروی شکست به دلیل افزایش سطح تحمل کننده‌ی نیرو ناشی از کوچک شدن سطح پلیمری ذوب نشده.
2) کاهش نیروی شکست به دلیل کاهش سختی پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ.

با توجه به نتایج آزمون کشش متقاطع، نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، افزایش سطح اتصال بر کاهش سختی کامپوزیت منجمد شده غلبه پیدا کرده و موجب افزایش نیروی شکست شده است. در حین آزمون کشش، وجود سطح ذوب نشده (که در بخش 3-3 ذکر شد) می‌تواند با کاهش سطح تحمل کننده‌ی نیرو، به عنوان موضع تمرکز تنش نیز عمل کرده و استحکام اتصال را کاهش دهد. به همین دلیل در "شکل‌های 7-الف تا ج" مشاهده می‌شود که در نمونه‌های اتصال داده شده در سرعت چرخشی‌های 500، 1000 و 1500 rpm، نمونه‌ها از فصل مشترک کامپوزیت اولیه و کامپوزیت منجمد شده در داخل سوراخ دچار شکست شده‌اند. با افزایش سرعت چرخشی ابزار، حرارت اصطکاکی نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه دمای مذاب پلیمر نیز بیشتر می‌شود. بدین ترتیب پلیمر موجود در قاعده سوراخ استوانه‌ای شکل کاملاً ذوب می‌گردد؛ به طوری که با افزایش سرعت چرخشی ابزار به 2000 rpm، این مساحت بسیار کوچک شده و یا احتمالاً از بین رفته است. همچنین، در سرعت چرخشی بالاتر، سوراخ توسط مذاب پلیمر به صورت کامل‌تر پر شده و قفل مکانیکی بیشتری بین پلیمر و رزوه‌های سورخ ایجاد می‌گردد. به همین دلیل در "شکل 7-d" مشاهده می‌شود که در نمونه‌ی جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی 2000 rpm، نحوه‌ی شکست تغییر کرده و بجای شکست از فصل مشترک، اتصال با خارج شدن کامپوزیت منجمد شده از داخل سوراخ دچار شکست شده است. علاوه بر این، به‌دلیل کاهش طول ترک در فصل مشترک کامپوزیت اولیه و کامپوزیت منجمد شده، میزان جابجایی قبل از شکست نیز همزمان با افزایش نیروی شکست افزایش پیدا کرده است.

با در نظر گرفتن بیشترین نیروی نمونه‌های آزمون کشش متقاطع، در "شکل 10-b" مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، به دلیل افزایش سطح تحمل کننده‌ی نیرو، نیروی شکست اتصال بیشتر شده است.

اثر رزوه در داخل سوراخ بر آزمون‌های کشش-برش و کشش متقاطع با یکدیگر متفاوت است. در آزمون کشش-برش، پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ از محل فصل مشترک دو ورق (قاعده استوانه پلیمری منجمد شده در داخل سوراخ) تحت تنش برشی قرار می‌گیرد و بنابراین رزوه داخل سوراخ اثر چندانی بر تنش برشی تحمل شده توسط اتصال ندارد، مگر آنکه در برابر نیروهای خارج از محور که معمولاً در آزمون‌های کشش-برش وجود دارند مقاومت نماید. اما در آزمون کشش متقاطع، تنش به صورت کششی به پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ وارد شده و تمایل دارد که زائده پلیمری را از داخل سوراخ خارج نماید. در این حالت رزوه‌های موجود در داخل سوراخ می‌توانند با ایجاد قفل‌های مکانیکی نقش مؤثری در تحمل نیروی کشش توسط اتصال داشته باشد. به همین دلیل است که در سرعت‌های چرخشی کمتر از 2000 rpm که ناحیه پلیمری ذوب نشده در قاعده زائده استوانه‌ای شکل وجود دارد، ایجاد قفل مکانیکی بین پلیمر منجمد شده و رزوه‌های سوراخ باعث شکست اتصال از قاعده زائده پلیمری می‌شود. اما با افزایش سرعت چرخشی ابزار به 2000 rpm و افزایش استحکام قاعده زائده پلیمری (بدلیل کاهش سطح پلیمر ذوب نشده)، شکست اتصال با غلبه نیروهای کششی بر قفل‌های مکانیکی، از رزوه‌ها رخ داده و زائده پلیمری از داخل سوراخ خارج می‌شود. برای بررسی اثر رزوه‌دار کردن سوراخ، یک نمونه با سوراخ بدون رزوه در سرعت چرخشی 1000 rpm تهیه شده و تحت آزمون کشش متقاطع قرار گرفت. همان‌طور که در "شکل 11" مشاهده می‌شود، نمونه مذکور در حین آزمون کشش با نیروی بسیار کم (<30 N) و با خروج زائده پلیمری از داخل سوراخ دچار شکست شد. در حالی که شکست نمونه مشابه با سوراخ رزوه‌دار از قاعده پلیمر منجمد شده در داخل سوراخ و نیروی 200 N~ رخ داد.

انرژی شکست برای هر نمونه، با اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی تا حداکثر نیروی شکست بدست آمده در آزمون کشش متقاطع، محاسبه شد. در "شکل 10-b" مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، انرژی شکست نیز افزایش می‌یابد. چون با افزایش سرعت

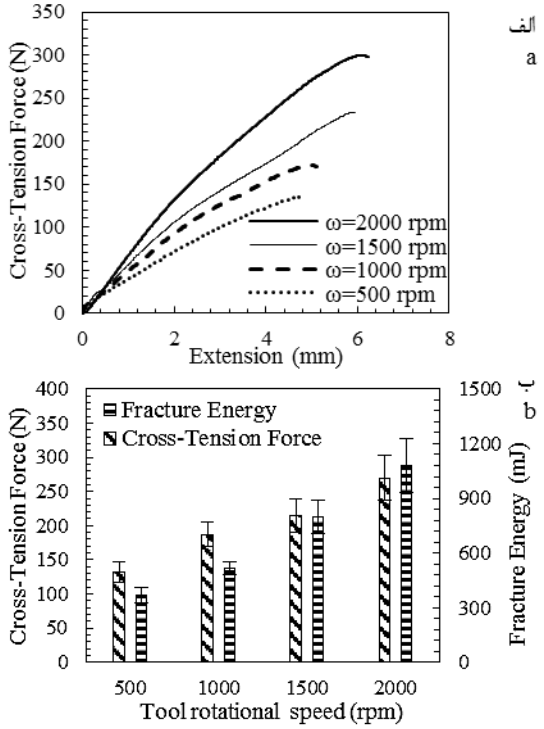


Fig. 10 a) Force-extension curves for cross-tension tests related to the specimens with maximum fracture force at different tool rotational speeds and b) Effect of tool rotational speed on the average cross-tension force and fracture energy of the joints in cross-tension tests

شکل 10 الف) نمودارهای نیرو-جابجایی آزمون کشش متقاطع مربوط به نمونه‌های با بیشینه‌ی نیروی شکست در سرعت‌های چرخشی مختلف و ب) تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر تغییرات میانگین نیروی کشش متقاطع و انرژی شکست اتصال‌ها در آزمون کشش متقاطع

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.8.8]

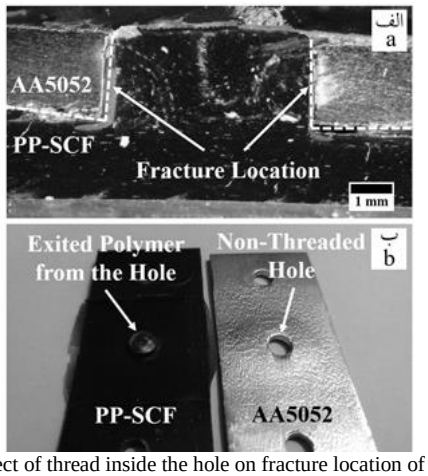


Fig. 11 Effect of thread inside the hole on fracture location of joint in cross-tension test: a) cross-section of joint with non-threaded hole and b) re-solidified polymer drawn out from the non-threaded hole

شکل 11 تاثیر رزوه‌دار کردن داخل سوراخ بر نحوه‌ی شکست اتصال در آزمون کشش متقاطع: الف) سطح مقطع اتصال بدون وجود رزوه در داخل سوراخ و ب) خارج شدن پلیمر از داخ سوراخ بدون رزوه

چرخشی ابزار، نیروی شکست و میزان جابجایی قبل از شکست افزایش پیدا کرده و در نتیجه انرژی شکست بیشتری شده است.

3-5-2- آزمون کشش-برش

تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر نیروی شکست کشش-برش و انرژی شکست در "شکل 12-a" نشان داده شده است. تمام نمونه‌ها در این آزمون از فصل مشترک کامپوزیت اولیه و کامپوزیت منجمد شده دچار شکست شدند. طبق نتایج بدست آمده، تغییرات نیروی شکست اتصال با سرعت چرخشی ابزار در آزمون کشش-برش مشابه نتایج آزمون کشش متقاطع است؛ به طوری که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، نیروی شکست اتصال نیز افزایش یافته است، چون با افزایش سرعت چرخشی، مقدار مذاب پلیمر ایجاد شده و دمای آن بیشتر شده و در نتیجه، با کاهش سطح ذوب نشده، سطحی که در آن بین مذاب پلیمر منجمد شده و پلیمر اولیه اتصال برقرار می‌گردد بیشتر شده و بدین ترتیب سطح تحمل کننده‌ی نیرو افزایش می‌یابد.

با اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی تا حداکثر نیروی شکست بدست آمده در آزمون کشش-برش، انرژی شکست برای هر نمونه محاسبه شد که نتایج آن در "شکل 12-a" مشاهده می‌شود. با توجه به اثر سرعت چرخشی ابزار بر مساحت سطح ذوب نشده، با افزایش سرعت چرخشی، به دلیل افزایش مساحت سطح اتصال یافته انرژی لازم برای شکست نیز بیشتر شده است. همان‌طور که در "شکل 12-a" مشاهده می‌شود، در سرعت چرخشی بالاتر به‌دلیل بیشتر بودن سطح تحمل کننده‌ی نیرو، نیروی شکست اتصال افزایش یافته است؛ به‌طوری که اگر در سرعت چرخشی 2000 rpm، سطح تحمل کننده‌ی نیرو دایره‌ای با اندازه‌ی قطر 4 mm در نظر گرفته شود، استحکام برشی اتصال حدود 80 درصد استحکام ورق کامپوزیتی به‌دست آمده است.

با مقایسه مقادیر انرژی شکست دو کشش متقاطع و کشش- برش (شکل 12-b)، ملاحظه می‌شود که در آزمون کشش متقاطع، انرژی شکست اتصال‌ها بیشتر بوده است. اگرچه نیروی شکست در آزمون کشش متقاطع به دلیل نحوه‌ی بارگذاری آن پایین‌تر است [17]؛ اما با توجه به نمودار تغییرات نیرو برحسب جابجایی برای نمونه‌های آزمون کشش متقاطع، مشاهده می‌شود

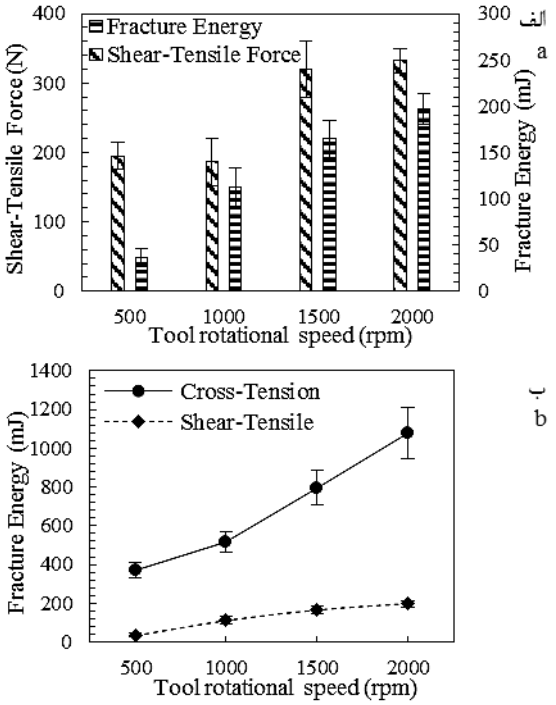


Fig. 12 a) Effect of tool rotational speed on the average shear-tensile and fracture energy of the joints in shear-tensile tests and b) Comparison of fracture energy of the joints in shear-tensile and cross-tension tests

شکل 12 الف) تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر تغییر میانگین نیروی کشش- برش و انرژی شکست اتصال‌ها در آزمون کشش-برش و ب) مقایسه انرژی شکست اتصال‌ها در آزمون‌های کشش-برش و کشش متقاطع

که میزان جابجایی فک‌های دستگاه کشش تا نیروی بیشینه حدود 7-5 mm می‌باشد در حالی که میزان جابجایی تا نیروی بیشینه در آزمون کشش- برش کمتر از 1 mm به‌دست آمد. دلیل بالاتر بودن میزان جابجایی در آزمون کشش متقاطع به خاطر خم شدن و تغییر شکل الاستیک ورق پلیمری در جهت کشش می‌باشد. از آن‌جایی که انرژی شکست مستقیماً به مساحت زیر منحنی نیرو- جابجایی تا نیروی بیشینه مربوط می‌شود، در نتیجه بالاتر بودن مساحت زیر منحنی در آزمون کشش متقاطع موجب بیشتر بودن انرژی شکست در این آزمون نسبت به کشش- برش می‌گردد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرآیند جدید با قابلیت پر شدن مجدد به نام جوش‌کاری اصطکاکی نقطه‌ای با سوراخ رزوه‌دار، برای اتصال ورق‌های آلومینیوم و پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کوتاه کربن معرفی شد. بررسی‌های ریزساختاری و آزمون‌های مکانیکی برای ارزیابی اتصال مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج زیر بدست آمد:

1- نتایج به‌دست آمده بیانگر موفقیت آمیز بودن روش جوش‌کاری اصطکاکی نقطه‌ای با سوراخ رزوه‌دار برای اتصال آلومینیوم به کامپوزیت زمینه پلیمری و پر شدن مجدد سوراخ توسط مذاب پلیمر بود.

2- مکانیزم‌های اصلی اتصال در این روش، ایجاد قفل مکانیکی بین پلیمر منجمد شده و رزوه‌های موجود در سوراخ و همچنین تشکیل لایه‌ی واکنشی بین آن‌ها می‌باشد.

3- لایه‌ی واکنشی تشکیل شده بین آلومینیوم و کامپوزیت منجمد شده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.8.8]

در داخل سوراخ، متشکل از عناصر Al، C و O بود که افزایش سرعت چرخشی ابزار، باعث افزایش درصد Al، و کاهش درصد C و O در لایه‌ی واکنشی شد. اما تغییر سرعت چرخشی ابزار تأثیری بر ضخامت این لایه نداشت.

4- نمونه‌های جوش‌کاری شده با سرعت چرخشی 500، 1000 و 1500 rpm در آزمون کشش متقاطع، از فصل مشترک کامپوزیت اولیه و کامپوزیت منجمد شده در سوراخ دچار شکست شدند، اما با افزایش سرعت چرخشی ابزار به 2000 rpm، به‌دلیل کاهش مساحت سطح پلیمر ذوب نشده، اتصال با خارج شدن کامپوزیت منجمد شده از داخل سوراخ دچار شکست شد.

5- استحکام و انرژی شکست اتصال با افزایش سرعت چرخشی ابزار، به دلیل کاهش سطح ذوب نشده و افزایش سطح تحمل کننده‌ی نیرو، افزایش یافت.

5- مراجع

[1] F. Khodabakhshi, M. Haghshenas, S. Sahraeinejad, J. Chen, B. Shalchi, J. Li, A. P. Gerlich, Microstructure-property characterization of a friction-stir welded joint between AA5059 aluminum alloy and high density polyethylene, *Materials Characterization*, Vol. 98, pp. 73–82, 2014.

[2] A. B. Abibe, M. Sônego, J. F. dos Santos, L. B. Canto, S. T. Amancio-Filho, On the feasibility of a friction-based staking joining method for polymer-metal hybrid structures, *Materials & Design*, Vol. 92, pp. 632–642, 2016.

[3] S. M. Goushegir, J. F. Dos Santos, S. T. Amancio-Filho, Friction spot joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly (phenylene sulfide) composite single lap joints: microstructure and mechanical performance, *Materials & Design*, Vol. 54, pp. 196–206, 2014.

[4] S. T. Amancio-Filho, J. F. Dos Santos, Joining of polymers and polymer–metal hybrid structures: recent developments and trends, *Polymer Engineering & Science*, Vol. 49, No. 8, pp. 1461–1476, 2009.

[5] A. B. Abibe, S. T. Amancio-Filho, J. F. dos Santos, E. Hage, Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer-metal staked joints, *Materials & Design*, Vol. 46, pp. 338–347, 2013.

[6] C. Schilling, J. dos Santos, *Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding*, US Patent No. 6722556 B2, 2004.

[7] K. Martinsen, S. J. Hu, B. E. Carlson, Joining of dissimilar materials, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 2, pp. 679–699, 2015.

[8] J. V. Esteves, S. M. Goushegir, J. F. dos Santos, L. B. Canto, E. Hage, S. T. Amancio-Filho, Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide): Effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength, *Materials & Design*, Vol. 66, No. Part B, pp. 437–445, 2015.

[9] W. Ratanathavorn, *Hybrid Joining of Aluminum to Thermoplastics With Friction Stir Welding*, MSc Thesis, Department of Materials Science and Engineering, KTH-Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012.

[10] N. M. André, S. M. Goushegir, J. F. dos Santos, L. B. Canto, S. T. Amancio-Filho, Friction Spot Joining of aluminum alloy 2024-T3 and carbon-fiber-reinforced poly (phenylene sulfide) laminate with additional PPS film interlayer: Microstructure, mechanical strength and failure mechanisms, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 94, pp. 197–208, 2016.

[11] ASM International Handbook Committee, *Metals Handbook: Vol. 2, Properties and selection–nonferrous alloys and pure metals*, Tenth Edition, pp. 3-215, New York: ASM International Handbook, 1990.

[12] C. Hindle. *Polypropylene (PP)*, Accessed on 2 January 2017; http://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/pp.aspx.

[13] H. Shahmiri, M. Movahedi, A. H. Kokabi, Friction stir lap joining of aluminium alloy to polypropylene sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 22, No. 2, pp. 120–126, 2016.

[14] F. Khodabakhshi, M. Haghshenas, J. Chen, B. Shalchi Amirkhiz, J. Li, A. P. Gerlich, Bonding mechanism and interface characterisation during dissimilar friction stir welding of an aluminium/polymer bi-material joint, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2016, Article in press.

[15] K. Nagatsuka, S. Yoshida, A. Tsuchiya, K. Nakata, Direct joining of carbon-fiber–reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 73, pp. 82–88, 2015.

[16] Z. Kiss, T. Czigány, Applicability of friction stir welding in polymeric materials, *Periodica polytechnica, Mechanical Engineering*, Vol. 51, No. 1, pp. 15–18, 2007.

[17] R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, pp. 261-288, New York: Wiley, 1989.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.8.8]