



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 3, No. 2, pp.: 140-153
2024

DOI:

10.22034/jssta.2024.42967.1148

Article Info

Received: 2023-12-09
Accepted: 2024-02-19

Keywords

Friction stir welding,
Taguchi method, composite,
aluminum, polycarbonate,
epoxy glue

How to Cite this article

Saeed Ahmadpour Kasgari,
MohammadReza
MohammadAliha, "Optimal
Parameters for Joining Polymer
and Aluminum with an
Adhesive Layer Using Friction
Stir Welding in Aerospace
Industry", *Journal of Space
Science, Technology and
Applications*, vol 3(2), p.:140-
153, 2024.

Optimal Parameters for Joining Polymer and Aluminum with an Adhesive Layer Using Friction Stir Welding in Aerospace Industry

Saeed Ahmadpour Kasgari¹, MohammadReza MohammadAliha²

- 1*- PHD student of School of Industrial Engineering, Iran university of science & technology, Tehran, Iran, ahmadpour_saeed@yahoo.com
2. Faculty of School of Industrial Engineering, Iran university of science & technology, Tehran, Iran, mrm_aliha@iust.ac.ir

Abstract

Paying attention to the increasing use of metal-polymer composites in aerial and space structures and their economic efficiency, it is possible to achieve a more economical and high-quality connection by determining the appropriate parameters. The purpose of this article is to calculate the optimal parameters for the friction stir welding (FSW) process to properly join aluminum to polymer. Polycarbonate sheets and aluminum alloy sheets, widely used materials in the aerospace industry, were employed for FSW. Initially, a traditional FSW was conducted without additional material. Subsequently, for two samples, a layer of epoxy glue was placed between the two sheets, followed by FSW. On the second sample, a restorative FSW was performed with a 10 mm comb stirrer head. The results indicated that the most optimal condition was a spindle speed of 1400 r/min and a welding speed of 50 mm/min, particularly for the sample with epoxy glue and repair welding. Traditional FSW showed flaws, while FSW with adhesive displayed fewer defects. Repair welding significantly influenced the FSW joint, enhancing the cleanliness of the macroscopic appearance of the weld surface. In the tensile test, it was observed that the tensile strength of the repair weld exceeded that of the joint welded by two traditional methods and with glue. Microscopic results revealed more holes in FSW with two traditional methods and with glue, gradually reducing defects during repair welding.



پارامترهای بهینه برای اتصال پلیمر و آلومینیوم با یک لایه چسب با استفاده از جوش اصطکاکی اغتشاشی در صنعت هوافضا

سعید احمدپور کاسگری^۱، محمدرضا محمد علیها^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای تخصصی، مرکز تحقیقات جوش و اتصال، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران ahmadpour_saeed@yahoo.com

۲- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات جوش و اتصال، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران (نویسنده مسئول) mrm_aliha@iust.ac.ir

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال سوم، شماره ۲، صفحه ۱۵۳-۱۴۰
پاییز و زمستان ۱۴۰۲

DOI:
10.22034/jsssta.2024.429670.1148

چکیده

با توجه به استفاده ی روزافزون از کامپوزیت های پلیمری فلزی در سازه های هوایی، فضایی و صرفه ی اقتصادی آن، با تعیین پارامترهای مناسب می توان به اتصال به صرفه و با کیفیت تر دست یافت. هدف از این مقاله، محاسبه ی پارامترهای بهینه فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) برای اتصال مناسب آلومینیوم به پلیمر است. برای FSW ورق پلی کربنات و ورق آلیاژ آلومینیوم به عنوان مواد پر کاربرد در صنعت هوافضا استفاده شد. ابتدا بدون ماده اضافی (سنتی)، سپس برای دو نمونه لایه ای از چسب اپوکسی بین دو ورق قرار گرفت و سپس FSW شدند که روی نمونه دوم، FSW ترمیمی با سر همزن شانه ای ۱۰ میلی متری انجام شد. نتایج نشان داد، بهینه ترین حالت سرعت اسپیندل ۱۴۰۰ r/min و سرعت جوشکاری ۵۰ mm/min و جوشکاری ترمیمی بر روی نمونه چسب اپوکسی بود. در FSW سنتی عیوبی وجود داشت. FSW با چسب، عیوب کمتری مشاهده شد، جوشکاری ترمیمی اثر قوی بر روی اتصال FSW داشته و تمیزی ظاهر میکروسکوپی سطح جوش را بهبود بخشید. در آزمون کشش مشخص شد، استحکام کششی جوش ترمیمی بیشتر از اتصال جوش داده شده به دو روش سنتی و با چسب است. از نتایج میکروسکوپی می توان دریافت که در FSW به دو روش سنتی و با چسب سوراخ های بیشتری وجود دارد و در حین جوشکاری ترمیمی عیوب بتدریج کاهش می یابد.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

واژه های کلیدی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی،
روش تاگوچی، کامپوزیت،
آلومینیوم، پلی کربنات،

نحوه استناد به این مقاله

سعید احمدپور کاسگری، محمدرضا محمدعلیها، "پارامترهای بهینه برای اتصال پلیمر و آلومینیوم با یک لایه چسب با استفاده از جوش اصطکاکی اغتشاشی در صنعت هوافضا"، *دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی*، جلد سوم، شماره دوم، صفحات ۱۴۰-۱۵۳، ۱۴۰۲.

۱-مقدمه

در دو دهه گذشته، تعمیر سازه های هوایی و فضایی با استفاده از کامپوزیت های پلیمری و فلزی توجه زیادی را در صنعت هوافضا به خود جلب کرده است، زیرا صرفه ی اقتصادی بیشتری نسبت به جایگزینی قطعات جدید دارد. با افزایش استفاده از کامپوزیت های فلزی-پلیمری در زمینه هوافضا بازیابی یکپارچگی ساختار با تعمیر قسمت آسیب دیده ضروری است. نگرانی های مربوط به دوام طولانی مدت اتصالات پیوندی تعمیریه همیشه مانع اصلی برای اجزای حیاتی سازه های هوافضا بوده است. در این مقاله تحقیقات در مورد افزایش دوام اتصالات سازه های کامپوزیتی آلومینیوم و پلی مر بررسی شده است تا نگرانی های دوام و مقاومت اتصالات برطرف شود و با بررسی پارامترهای مرتبط با اتصال آلومینیوم و پلیمر بتوان به توسعه ی اتصالات و تعمیر مقرون به صرفه تر، با کیفیت بهتر و قابل اعتماد بیشتر رسید [۱].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) یک فرآیند ترمومکانیکی شامل فعل و انفعالات پیچیده بین پدیده های مختلف می باشد و در طول ناحیه جوش متفاوت است [۲ و ۳]. این نوع جوشکاری برای طیف وسیعی از مواد قابل استفاده بوده و در آن هیچ پاشش و گرد و غباری وجود ندارد و به گاز محافظ و سیم جوش نیازی نیست [۴] و برای طیف وسیعی از مواد و در صنایع مختلف از جمله هوافضا کاربرد دارد [۵]. در صنعت هوافضا از مواد با کیفیت و قدرت بالا استفاده می شود. تجهیزات مورد استفاده در هوافضا نیاز به خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی عالی دارد. با استفاده از مواد پلیمری و ساخت کامپوزیت ها می توان به این مهم دست یافت [۶].

در کارهای مختلفی در زمینه اتصالات فلزی مشابه و غیرمشابه نشان داده شده است که با استفاده از FSW می توان جوشکاری با کیفیت بالاتری ارائه داد [۷-۱۰].. علاوه بر این، مطالعات متعددی در مورد تأثیر پارامترهای ورودی جوش بر روی خواص کیفی و مقاومتی اتصالات دو فلزی وجود دارد [۱۱-۱۸]. اما پلیمرها و آلیاژهای آلومینیوم با یکدیگر تفاوت بسیاری دارند. آلیاژهای آلومینیوم کریستالی هستند اما پلیمرها، زنجیره های مولکولی با طول های مختلف هستند. از آنجایی که زنجیره های مولکولی کوتاه در پلیمرها در حین جوشکاری زودتر از زنجیره های مولکولی بلند در آنها به نقطه ذوب می رسند، پلیمرها ترموپلاستیک بوده و نقطه ذوب ثابتی ندارند بلکه محدوده ذوب دارند. محدوده ی ذوب پلیمرها بسیار کمتر از نقطه ذوب آلیاژ آلومینیوم است.

آلومینیوم 6061 یکی از آلیاژهای آلومینیوم با قابلیت رسوب سختی است، که منیزیم و سیلیسیم عناصر اصلی آلیاژی آن را تشکیل می دهند [۱۹]. آلیاژهای آلومینیوم با هدایت الکتریکی بالا، رنگ نقره ای درخشان، وزن مخصوص پایین و مقاومت به خوردگی بالا یک ماده ی کاربردی در صنعت هوافضا است. همچنین یکی از رایج ترین شکل های پلاستیک، پلی کربنات ها (PC) هستند. پلی کربنات ها شفاف، سبک وزن، با استحکام بالا، مقاوم در برابر ضربه و شرایط آب و هوایی سخت در پنجره های کابین خلبان، سازه های ساختمانی و پوشش برای تجهیزات الکترونیکی استفاده می شود [۲۰]. مواد کامپوزیتی علی رغم هزینه های عموماً بالا در محصولاتی با کارایی بالا که باید سبک و در عین حال به اندازه کافی قوی برای تحمل بارهای زیاد باشند، مانند سازه های هوافضا (دم، بال و بدنه) محبوبیت پیدا کرده اند [۲۱]. موتور توربین گازی هواپیما، تیغه ی فن، نازل تخلیه موتور توربین گازی، پیش رانش موشک، نازل موتور موشک و ضمیمه های نازل، اتاقک پرتاب موتور راکت از جمله مواردی هستند که مواد کامپوزیتی در آنها استفاده شده است [۲۲].

در طول فرآیند جوشکاری، ممکن است آلیاژ آلومینیوم به طور کامل پلاستیکی نشده باشد اما در همین حین مواد پلیمری تخریب شوند. لذا واکنش سطحی مستقیم بین پلیمر و آلیاژ آلومینیوم منجر به بروز مشکلاتی مانند شکل گیری ضعیف جوش و استحکام پایین اتصال می شود [۱۹].

باندینگ چسب یک روش اتصال فاز جامد است که در آن یک چسب بین مواد پایه اضافه می شود و نیروی چسب برای دستیابی به سطح تماس وسیعی از مواد بین چسب، فلز پایه و پلیمر استفاده می شود [۲۳]. پیوند چسب فرآیندی است که در آن دو شریک توسط اینتراک مکانیکی، جذب فیزیکی و اتصال شیمیایی به هم می پیوندند و به طور گسترده در اتصال مواد کامپوزیت استفاده می شود [۲۴]. مطالعات بسیار کمی با تمرکز بر بهسازی سطح قبل از اتصال، تأثیر خاصیت چسب، تشخیص و ارزیابی بخش پیوند خورده انجام شد. چسب اپوکسی به دلیل پلیمری بودن در FSW استفاده شده است [۲۵]. چندین مطالعه در زمینه fsw بین پلیمرهایی مانند پلی متیل متا آکریلیک، پلی پروپیلن، نایلون، پلی اتر کتون، پلی اتیلن با آلیاژهای مانند آلومینیوم و منیزم انجام شده است (۲۶-۳۳). همچنین پژوهش های در زمینه اتصال الومینیوم به پلی کربنات (۳۴-۳۸) انجام شده است که روش های اتصال به کمک چسب و استفاده از

در این معادلات، S انحراف استاندارد، y_i مقدار مشخص اندازه‌گیری شده یا همان پاسخ و n تعداد پاسخها است. تعداد آزمایشات تاگوچی ۹ و دارای ۴ سطح کیفی می‌باشد.

۲-۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ورق پلی‌کربنات با مشخصات جدول (۱) و ورق آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 با مشخصات جدول (۲) بر روی هم قرار می‌گیرند. ابعاد ورق‌ها $200 \times 100 \times 2$ mm می‌باشد. قبل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، سطح ورق آلیاژ آلومینیوم با اتانول پاک می‌شوند تا ناخالصی‌ها و اکسیدهای روی سطح پاک شود. چسب اپوکسی مورد استفاده، خمیر اپوکسی دو جزئی MasterBrace® 1438 است که مشخصات آن در جدول (۳) نشان داده شده است. توان اسمی دستگاه ۱۱ کیلو وات و حداکثر سرعت اسپیندل ۱۵۰۰ دور در دقیقه، طول کل سر همزن ۵۰ میلی‌متر، طول پین همزن ۲/۳ میلی‌متر، طول و قطر انتهای گیره به ترتیب ۴۰ میلی‌متر و ۲۰ میلی‌متر و قطر شانه شفت ۱۰ میلی‌متر است.

ورق آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 و ورق پلی‌کربنات روی همدیگر به‌صورتی قرار می‌گیرند که ورق پلی‌کربنات پایین و ورق آلومینیوم بالا قرار می‌گیرد (شکل ۱). هنگام جوشکاری ابتدا پین همزن را به آرامی داخل قطعه کار قرار داده می‌شود تا جوشکاری شروع شود. به محض اینکه سر همزن به انتهای قطعه کار برسد، آنرا به‌صورت عمودی به سمت بالا حرکت می‌دهیم تا از سطح قطعه کار فاصله بگیرد لذا اثر یک سطح گرد بروی سطح باقی می‌ماند.

ابتدا دو ورق بدون هیچگونه ماده اضافی بر روی هم قرار گرفته و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شدند (نوع اول)، سپس لایه‌ای از چسب اپوکسی مابین دو ورق قرار گرفت و سپس جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شدند (نوع دوم). این نوع جوشکاری برای هر آزمایش دو بار تکرار شد و دو نمونه‌ی کامپوزیت شده تهیه شد که بر روی نمونه دوم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ترمیمی انجام شد (نوع سوم). با انجام آزمایشات متعدد، برای جوشکاری‌ها نوع اول و دوم، عمق فرورفتگی پین همزن روی ۲/۳ میلی‌متر و زاویه ابزار ۲/۵ درجه تنظیم گردید و برای جوشکاری نوع سوم از سر همزن بدون پین با قطر شانه ۱۰ میلی‌متر با فشار به عمق ۰/۲

جوش ترمیمی و همچنین ترکیب هر دو روش با هم به‌عنوان یک خلا تحقیقاتی در آنها بوده است.

در این مطالعه برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از روش نمونه‌گیری بر پایه تاگوچی استفاده می‌شود. روش تاگوچی و طراحی آزمایش‌ها ابزاری قوی برای افزایش کیفیت محصول و رفع علل ایجاد زیان‌های کیفی، به‌ویژه در مراحل پیش از تولید محصول یا ارائه خدمات است [۳۹] و در مطالعات بسیاری از آن استفاده شده است [۴۰-۴۴]. با تغییر پارامترهای مهمی چون سرعت دورانی و سرعت خطی و در نظر گرفتن تاثیر نسبت این دو در کنار هم، نمونه‌های حاصل شده را از نظر عیوب داخلی حاصله از فرآیند اغتشاشی اصطکاکی، توسط تست‌های غیرمخرب بررسی می‌شود و نمونه‌های تایید شده، تحت بررسی‌های میکرو ساختاری میکروسکوپ نوری قرار خواهد گرفت و پس از آن تست‌های مکانیکی کشش انجام می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۱- روش تاگوچی

در روش تاگوچی، نسبت سیگنال به نویز (S/N) ویژگی کیفیتی یا متغیر پاسخ است. بیشترین مقدار این نسبت، مطلوب به‌شمار می‌آید؛ زیرا از اثر فاکتورهای کنترل نشدنی یا نویز کاسته می‌شود. معمولاً سه ویژگی کیفیتی برای S/N تعریف شده است [۴۵]:

الف) مقادیر اسمی نزدیکتر
(۱)

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

ب) بیشتر-بهرتر

(۲)

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) = -10 \log y^{-2}$$

ج) کمتر-بهرتر

(۳)

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{nS} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) = -10 \log \frac{\bar{y}^2}{S^2}$$

جدول (۲). ترکیب شیمیایی فلزات پایه در درصد وزنی آلیاژ

آلومینیوم 6061-T6

عنصر	درصد وزنی
آلومینیوم	۹۵/۹۸-۸۵/۵۶ %
کروم	۰/۰۴-۰/۳۵ %
مس	۰/۱۵-۰/۴ %
آهن	<= ۰/۷ %
منیزیم	۰/۸ - ۱/۲ %
منگنز	<= ۰/۱۵ %
سیلیکون	۰/۴- ۰/۸ %
تیتانیوم	<= ۰/۱۵ %
روی	<= ۰/۲۵ %

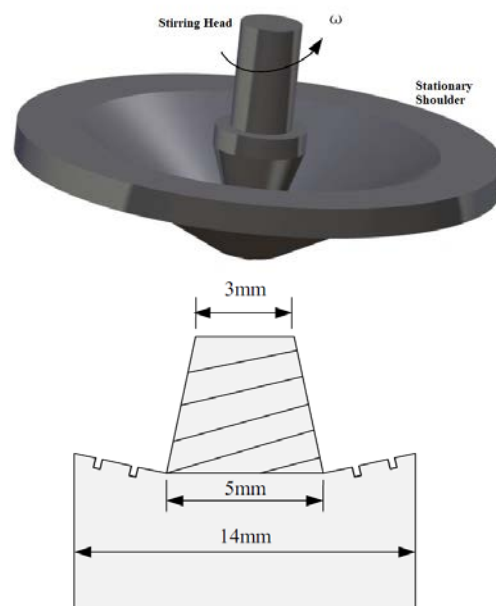
میلی متر استفاده شد (شکل ۲). بر روی تمام نمونه های جوشکاری آزمایش تست کشش انجام شد. در طول جوشکاری ترمیمی، ابزار بایستی به گونه ای تنظیم شود که نقطه شروع جوشکاری همان نقطه شروع جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با جوش چسب اپوکسی باشد. به عبارت دیگر مرکز سر همزن بدون پین دقیقاً در مرکز جوش باشد و سپس اجرا شود.



شکل (۱) نمای قرار گیری آلومینیوم روی پلی کربنات

جدول (۳). خواص خمیر اپوکسی دو جزئی MasterBrace® 1438 [۴۶].

	Part A	Part B
شکل	خمیری	مایع ویسکوز
رنگ	سفید	سیاه
دانسیته (مخلوط)	۱/۳ - ۱/۴ kg/L	
۳۰ °C ضخامت بدون افتادگی (ASTM D2730)	۱۲ mm	
دمای خمش گرمایی (ASTM D648)	۴۸ °C	
دمای کاربرد	۱۰ °C	۳۰ °C
خصوصیات عمل آوری	۱۰ °C	۲۱ °C
فرصت	۱۲۰ minutes	۴۰ minutes
کاربری (100 g)	minutes	minutes
حداقل زمان	5 hours	۳ hours
گیرش	5 hours	۲ hours
جامد شدن اولیه (AASHTOT-237)	۷ days	۱ day
زمان لازم برای جامد شدن کامل (ASTM D695)	۲۱ days	۷ days



شکل (۲) شماتیک شانه و سر همزن

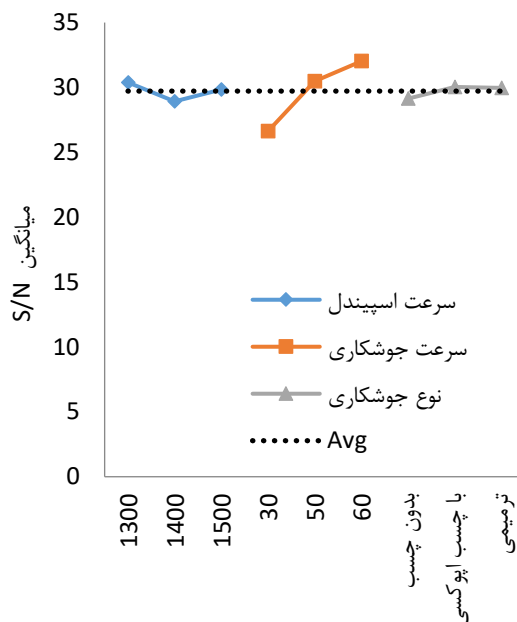
جدول (۱). خواص فیزیکی پلی کربنات (PC)

نیروی برشی	N/mm ² ۷۰-۸۰
ضریب استحکام ضربه	Kj/m ² ۶۰-۸۰
ضریب انبساط حرارتی	۶۵×۱۰ ^{-۶}
حداکثر دمای مورد استفاده	۱۲۵ °C
دانسیته	g/cm ³ ۱/۲۰

۳-نتایج

۳-۱- طراحی آزمایش

طرح آزمایش در روش تاگوجی بر اساس فاکتوریل جزئی است. انتخاب ماتریس ارتوگونال مناسب، وابسته به تعداد



شکل (۳). اثرات اصلی بر روی نسبت S/N



شکل (۴). نمودار تعامل برای نسبت های S/N سرعت اسپیندل نسبت به سرعت جوشکاری

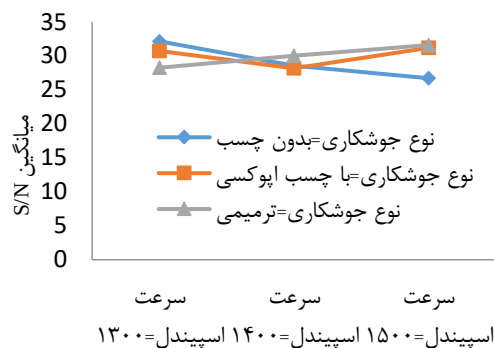
پارامترهای قابل کنترل و سطوح موردنظر دارد. سه پارامتر شامل سرعت اسپیندل، سرعت جوشکاری و نوع جوشکاری در سه سطح مختلف به عنوان پارامترهای متغیر انتخاب شدند (جدول ۴). در نمونه‌هایی که بالاتر و پایینتر از سطوح انتخاب شده جوشکاری شدند عیوبی همانند نقص تونلی مشاهده شد. درجه آزادی کل در یک ماتریس ارتوگونال باید بیشتر از تعداد پارامترها و یا حداقل برابر آن باشد. از این رو ماتریس ارتوگونال تاگوچی $L_{27}(3^3)$ انتخاب شد و تعداد آزمایش‌ها به عدد ۲۷ کاهش یافت. در جدول (۵) نتایج آزمایشات تست کشش این ۲۷ آزمایش نشان داده شده است. همچنین نتیجه انواع مختلف S/N نیز در جدول (۶) نشان داده شده است که با توجه به جدول مذکور بهینه‌ترین حالت سرعت اسپیندل ۱۴۰۰ r/min (سطح ۲) و سرعت جوشکاری ۵۰ mm/min (سطح ۲) و جوشکاری ترمیمی بر روی نمونه چسب اپوکسی (سطح ۳) است. شکل‌های (۳) الی (۶) نشان دهنده اثرات پارامترهای مختلف بر روی S/N اسمی می‌باشد. در تمامی موارد مشاهده می‌شود که اثرات چسب و جوشکاری ترمیمی با سرعت اسپیندل و سرعت جوشکاری بر روی S/N تاثیرگذار است. در آزمایشات انجام شده مشخص شده است، سرعت چرخش مهم‌ترین عامل و سرعت جوش کمترین عامل تاثیرگذار بر استحکام کامپوزیت حاصل از اتصال FSW پلی کربنات و Al6061 است. در مطالعات پیشین نیز مشخص شده است، استحکام کامپوزیت تشکیل شده با سرعت اسپیندل افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به یک نقطه معین کاهش می‌یابد و مقدار پارامترهای بدست آمده در این مطالعه نزدیک به مقدار آنها در تحقیقات مشابه می‌باشد [۲۶ و ۳۶-۳۴].

جدول (۴). پارامترهای طراحی و سطوح مربوطه

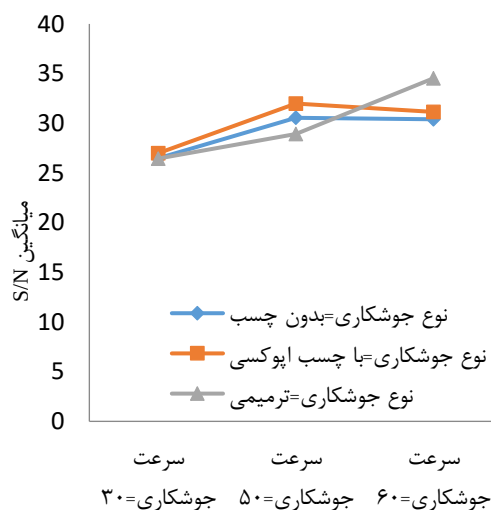
پارامتر	واحد	سطوح		
		۱	۲	۳
سرعت اسپیندل	r/min	۱۳۰۰	۱۴۰۰	۱۵۰۰
سرعت جوشکاری	mm/min	۳۰	۵۰	۶۰
نوع جوشکاری		بدون چسب	با چسب	ترمیمی بر روی نمونه با چسب

جدول (۵). ماتریس ارتوکونال تاگوچی $L27(3^{13})$

استحکام کششی (MPa)	نوع جوشکاری	سرعت جوشکاری	سرعت اسپیندل	شماره آزمایش
۱۶/۸۵	بدون چسب	۳۰	۱۳۰۰	۱
۱۸/۷۹	با چسب اپوکسی	۳۰	۱۳۰۰	۲
۲۱/۳۴	ترمیمی	۳۰	۱۳۰۰	۳
۱۷/۱۲	بدون چسب	۵۰	۱۳۰۰	۴
۱۹/۴	با چسب اپوکسی	۵۰	۱۳۰۰	۵
۲۱/۸۷	ترمیمی	۵۰	۱۳۰۰	۶
۱۷/۶۳	بدون چسب	۶۰	۱۳۰۰	۷
۱۹/۵۳	با چسب اپوکسی	۶۰	۱۳۰۰	۸
۲۲/۱۳	ترمیمی	۶۰	۱۳۰۰	۹
۱۹/۴۲	بدون چسب	۳۰	۱۴۰۰	۱۰
۱۹/۹۶	با چسب اپوکسی	۳۰	۱۴۰۰	۱۱
۲۱/۵۶	ترمیمی	۳۰	۱۴۰۰	۱۲
۲۲/۶۹	بدون چسب	۵۰	۱۴۰۰	۱۳
۱۹/۴	با چسب اپوکسی	۵۰	۱۴۰۰	۱۴
۲۴/۴۸	ترمیمی	۵۰	۱۴۰۰	۱۵
۲۱/۴۵	بدون چسب	۶۰	۱۴۰۰	۱۶
۲۱/۷۹	با چسب اپوکسی	۶۰	۱۴۰۰	۱۷
۲۲/۳۶	ترمیمی	۶۰	۱۴۰۰	۱۸
۲۲/۱۹	بدون چسب	۳۰	۱۵۰۰	۱۹
۲۲/۸۴	با چسب اپوکسی	۳۰	۱۵۰۰	۲۰
۲۳/۱۵	ترمیمی	۳۰	۱۵۰۰	۲۱
۲۲/۷۲	بدون چسب	۵۰	۱۵۰۰	۲۲
۲۱/۷۲	با چسب اپوکسی	۵۰	۱۵۰۰	۲۳
۲۴/۳۲	ترمیمی	۵۰	۱۵۰۰	۲۴
۱۸/۹۶	بدون چسب	۶۰	۱۵۰۰	۲۵
۱۹/۳۷	با چسب اپوکسی	۶۰	۱۵۰۰	۲۶
۲۱/۳۲	ترمیمی	۶۰	۱۵۰۰	۲۷



شکل (۵). نمودار تعامل برای نسبت های S/N سرعت اسپیندل نسبت به نوع جوشکاری



شکل (۶). نمودار تعامل برای نسبت های S/N سرعت جوشکاری نسبت به نوع جوشکاری

تا (۱۰) به وضوح می‌توان مشاهده کرد که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بدون چسب، عیوبی همانند سوراخ‌ها، تونل‌ها، شیارها و برجستگی‌های جوش ظاهر می‌شوند (الف). جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از چسب اپوکسی بین صفحات، می‌تواند به‌طور موثر جوشکاری را پر کند، اما سوراخ‌ها و عیوب شیار در جوشکاری وجود دارد (ب). از سوی دیگر، مشاهده می‌شود که جوشکاری ترمیمی اثر ترمیمی قوی بر روی اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی دارد و تمیزی ظاهر ماکروسکوپی سطح جوش را بهبود می‌بخشد (ج). همچنین از شکل‌های (۷) تا (۱۰)، می‌توان دریافت که به‌دلیل اثر همزن جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ترمیمی (ج)، سطح درز جوشکاری نیروی محوری بیشتری را نسبت به محور اصلی متحمل می‌شود، بنابراین در این سطح کل درز جوش کمی کوچکتر از صفحه افقی به جهت پدیده فرونشست آلیاژ آلومینیوم A6061-T6 است. این پدیده، سر همزن با شانه ۱۰ میلی‌متری نسبت به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از چسب اپوکسی بین صفحات (ب)، جدی‌تر است، به‌طوری‌که در حین جوشکاری ترمیمی، مواد دو طرف جوش اصلی در اثر هم زدن شرکت نمی‌کنند. از این رو، بخشی از مواد آلیاژ آلومینیوم A6061-T6 در دو طرف جوشکاری تحت چرخش پرسرعت سر همزن بدون پین به سمت مرکز درز جوش جریان می‌یابد و ناحیه فرورفتگی را در مرکز پر می‌کند. از درز جوش همچنین می‌توان مشاهده کرد که برای نقص سوراخ که باید در انتهای جوش وجود داشته باشد، سر همزن بدون پین با شانه ۱۰ میلی‌متری می‌تواند به‌طور موثر سوراخ را پس از جوشکاری ترمیمی پر کند. افزایش عمق فرو بردن منجر به وجود مواد باقیمانده در سمت پیشروی می‌شود [۳۷]. گائو و همکاران [۲۷] و شاهمیری و همکاران [۲۸] سطوح اتصال زیرتری را با افزایش سرعت چرخش ابزار و کاهش سرعت جوشکاری بدست آوردند. اگرچه در هنگام عملیات، سرعت چرخش بیش از حد بالا باعث سرریز شدن پلیمر به‌دلیل انبساط حرارتی زیاد آن می‌شود [۲۹]. هوانگ و همکاران گزارش دادند که سرریز به تدریج با کاهش سرعت جوشکاری کاهش می‌یابد [۳۰]. برخلاف رویه رایج، درازکلا و الیاسی [۳۱] و درازکلا و همکاران [۳۲]، فرآیند FSW را به گونه‌ای انجام دادند که پلیمر در بالا، رو به پروب ابزار و فلز در پایین، برای افزایش سرعت خنک کننده پس از برداشتن ابزار، قرار داده شدند.

جدول (۶). نتایج محاسبات انواع S/N

S/N: Smaller is Better	S/N: Larger is Better	S/N: Nominal is Best (MSD with Target)	S/N: Nominal is Best (Variance Only)	S/N: Nominal is Best	
-۲۴/۷۲	۲۴/۷۱	-۲۴/۷۲	۵/۷۸	۳۰/۵۰	۱
-۲۵/۸۸	۲۵/۸۵	-۲۵/۸۸	-۱/۸۹	۲۳/۹۸	۲
-۲۶/۹۲	۲۶/۸۹	-۲۶/۹۲	-۱/۳۰	۲۵/۶۱	۳
-۲۴/۹۰	۲۴/۸۹	-۲۴/۹۰	۳/۹۹	۲۸/۸۸	۴
-۲۵/۸۴	۲۵/۸۴	-۲۵/۸۴	۱۱/۰۳	۳۶/۸۸	۵
-۲۷/۰۱	۲۷/۰۰	-۲۷/۰۱	۲/۴۸	۲۹/۴۹	۶
-۲۵/۰۱	۲۵/۰۱	-۲۵/۰۱	۱۲/۰۷	۳۷/۰۹	۷
-۲۵/۹۸	۲۵/۹۸	-۲۵/۹۸	۵/۳۶	۳۱/۳۴	۸
-۲۷/۱۱	۲۷/۱۰	-۲۷/۱۱	۲/۶۱	۲۹/۷۱	۹
-۲۶/۱۹	۲۶/۱۵	-۲۶/۱۹	-۲/۵۶	۲۳/۶۲	۱۰
-۲۶/۲۴	۲۶/۲۲	-۲۶/۲۴	۲/۴۲	۲۸/۶۶	۱۱
-۲۶/۹۵	۲۶/۹۴	-۲۶/۹۵	۰/۱۶	۲۷/۱۰	۱۲
-۲۷/۲۳	۲۷/۲۳	-۲۷/۲۳	۷/۶۱	۳۴/۸۴	۱۳
-۲۶/۱۲	۲۶/۰۹	-۲۶/۱۲	-۱/۲۱	۲۴/۹۰	۱۴
-۲۷/۹۸	۲۷/۹۷	-۲۷/۹۸	۱/۷۴	۲۹/۷۲	۱۵
-۲۶/۹۱	۲۶/۸۹	-۲۶/۹۱	۰/۲۹	۲۷/۱۹	۱۶
-۲۶/۹۴	۲۶/۹۳	-۲۶/۹۴	۴/۰۵	۳۰/۹۹	۱۷
-۲۷/۱۲	۲۷/۱۲	-۲۷/۱۲	۶/۱۷	۳۳/۲۹	۱۸
-۲۷/۲۷	۲۷/۲۴	-۲۷/۲۷	-۱/۹۵	۲۵/۳۲	۱۹
-۲۷/۴۲	۲۷/۴۰	-۲۷/۴۲	۰/۹۱	۲۸/۳۲	۲۰
-۲۷/۵۹	۲۷/۵۷	-۲۷/۵۹	-۰/۹۵	۲۶/۶۴	۲۱
-۲۷/۳۸	۳۷/۳۷	-۲۷/۳۸	۰/۵۵	۲۷/۹۳	۲۲
-۲۶/۸۶	۲۶/۸۶	-۲۶/۸۶	۷/۳۲	۳۴/۱۸	۲۳
-۲۷/۹۸	۲۷/۹۷	-۲۷/۹۸	۰/۳۷	۲۷/۶۱	۲۴
۲۵/۸۴	۲۵/۸۲	-۲۵/۸۴	۱/۰۸	۲۶/۹۲	۲۵
-۲۵/۹۲	۲۵/۹۱	-۲۵/۹۲	۵/۱۷	۳۱/۰۹	۲۶
-۲۶/۶۳	۲۶/۶۳	-۲۶/۶۳	۱۳/۹۶	۴۰/۵۹	۲۷

۲-۳- مورفولوژی جوشکاری نمونه‌های منتخب

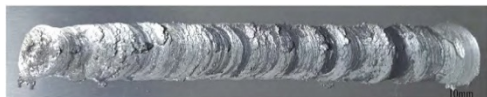
اثر جوشکاری بر کامپوزیت‌های حاصل در شکل‌های (۶) تا (۹) نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر اثر جوشکاری، اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بدون چسب، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با چسب اپوکسی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ترمیمی نشان داده شده‌اند. با توجه به پارامترهای شکل‌های (۷)



الف



ب



ج

شکل (۱۰). مورفولوژی ماکروسکوپی A6061-T6 و PC با $r=1500 \text{ r/min}$ و $v=60 \text{ mm/min}$ (الف) جوشکاری بدون چسب، (ب) استفاده از چسب اپوکسی بین صفحات (ج) جوشکاری ترمیمی

۳-۳- بررسی تست کشش نمونه‌های منتخب

آزمایش کشش بر روی اتصالات جوش داده شده برای تشخیص خواص مکانیکی اتصالات در کامپوزیت تشکیل شده انجام شد. به منظور اطمینان از دقت و صحت نتایج آزمون کشش، چهار مجموعه از پارامترهای فرآیند به عنوان نماینده (سرعت اسپیندل و سرعت جوشکاری) انتخاب شدند. جوش تحت هر مجموعه از پارامترهای فرآیند، ۳ مجموعه (FSW سنتی، FSW با چسب، FSW ترمیمی) از نتایج تست کششی را در بر می‌گیرد و در نهایت از مقدار متوسط ۴ مجموعه به عنوان نتایج تست عملکرد مکانیکی جوش استفاده می‌شود.

داده‌های تست کششی جوشکاری در شکل (۱۱) نشان داده شده است. متوسط نرخ رشد استحکام کششی در جدول (۷) نشان داده شده است. نرخ رشد استحکام کششی از تفاضل نیروی برشی نمونه‌های با چسب و ترمیمی با نمونه‌های سنتی نسبت به همان نیروی برشی در نمونه‌های سنتی ضرب در صد بدست می‌آید. از شکل (۱۱) و جدول (۷) مشاهده می‌شود که استحکام کششی اتصالات جوش داده شده اصطکاکی اغتشاشی بدون چسب کمتر از اتصالات جوش داده شده اصطکاکی اغتشاشی، با چسب تحت دو مجموعه از پارامترهای فرآیند (۳۰-۱۳۰۰ و ۶۰-۱۵۰۰) بوده است. به طور کلی، استحکام کششی استفاده از چسب اپوکسی بین صفحات ۱/۳۱ درصد کمتر از اتصال جوش داده شده سنتی است. برای اتصالات جوشکاری با جوش ترمیمی ۱۰ میلی‌متری، تحت چهار مجموعه پارامترهای فرآیند، استحکام کششی اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ترمیمی بیشتر از اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سنتی بود و میانگین نرخ افزایش ۱۳/۵۱ درصد بود.

در هر دو مطالعه از ایشان وجود خطوط مشترک خاکستری در پارامترهای مختلف فرآیند مشاهده شد.



الف



ب



ج

شکل (۷). مورفولوژی ماکروسکوپی A6061-T6 و PC با $r=1300 \text{ r/min}$ و $v=30 \text{ mm/min}$ (الف) جوشکاری بدون چسب، (ب) استفاده از چسب اپوکسی بین صفحات (ج) جوشکاری ترمیمی



الف



ب



ج

شکل (۸). مورفولوژی ماکروسکوپی A6061-T6 و PC با $r=1400$ و $v=50 \text{ mm/min}$ (الف) جوشکاری بدون چسب، (ب) استفاده از چسب اپوکسی بین صفحات (ج) جوشکاری ترمیمی



الف



ب



ج

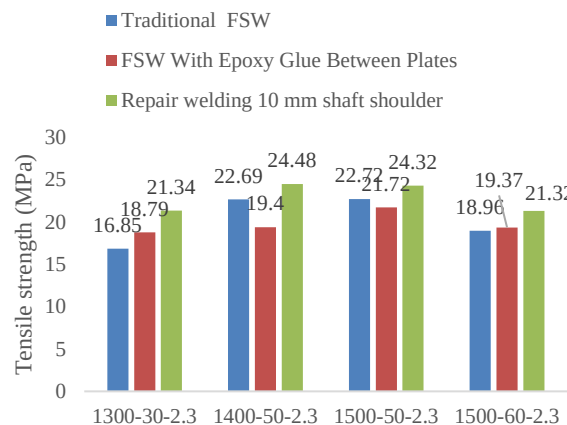
شکل (۹). مورفولوژی ماکروسکوپی A6061-T6 و PC با $r=1500 \text{ r/min}$ و $v=50 \text{ mm/min}$ (الف) جوشکاری بدون چسب، (ب) استفاده از چسب اپوکسی بین صفحات (ج) جوشکاری ترمیمی

کمتر است، بنابراین استحکام کششی سر همزن شانه‌ای ۱۰ میلی‌متری بیشتر از اتصال جوش داده شده سنتی است. در یک مطالعه اخیر توسط خدابخشی و همکاران، مکانیسم چسبندگی بین آلومینیوم و پلیمر در طول فرآیند FSW به‌عنوان برهمکنش شیمیایی با تشکیل اکسید آلومینیوم در سطح مشترک پیشنهاد شده است [۳۳]. همچنین در مطالعه‌ای احتمال آگلومریزاسیون ذرات آلومینیوم داده شده است که این آگلومرها می‌توانند مکان‌هایی برای هسته‌زایی و انتشار ترک در شرایط شکست ناگهانی باشند [۴۷]. در مطالعه‌ای دیگر حضور خوشه‌های آلومینیوم در مسیر شکست در طول گسیختگی کششی نشان داده شده است [۳۸].

۳-۴- تست تجزیه و تحلیل SEM

بر اساس همان پارامترهای فرآیند جوشکاری، سطح مقطع یک اتصال جوش داده شده اصطکاکی اغتشاشی سنتی، با چسب و اتصال جوشکاری ترمیمی شده برای مشاهده در زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار داده شد، همانطور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، ناحیه تاریک آلیاژ آلومینیوم A6061-T6 است. منطقه روشن PC مواد پلیمری است.

از شکل (۱۲) می‌توان دریافت که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (الف و ب)، عیوب سوراخ‌های طولانی‌تری وجود دارد و با افزایش قطر شانه در حین جوشکاری ترمیمی (ج و د) عیوب به تدریج کاهش می‌یابد. در تست ترمیمی جوشکاری، عیوب ناپدید شده‌اند، که نه تنها کیفیت جوش را بهبود می‌بخشد، بلکه ثبات هندسه داخلی مواد جوش را تضمین می‌کند. شکل (۱۱-د) نمای بزرگ شده از پایین ناحیه قطعه است که از چسب اپوکسی بین صفحات استفاده می‌شود. در این قسمت دو ماده کاملاً هم زده و به خوبی ذوب می‌شوند و روند مهاجرت مواد PC در جهت عمودی به سمت بالا مشاهده می‌شود. با این حال، معایبی نیز در تست ترمیمی وجود دارد.



شکل (۱۱). نتایج آزمایش خواص مکانیکی تحت پارامترهای مختلف فرآیند FSW

جدول (۷). نرخ رشد استحکام کششی

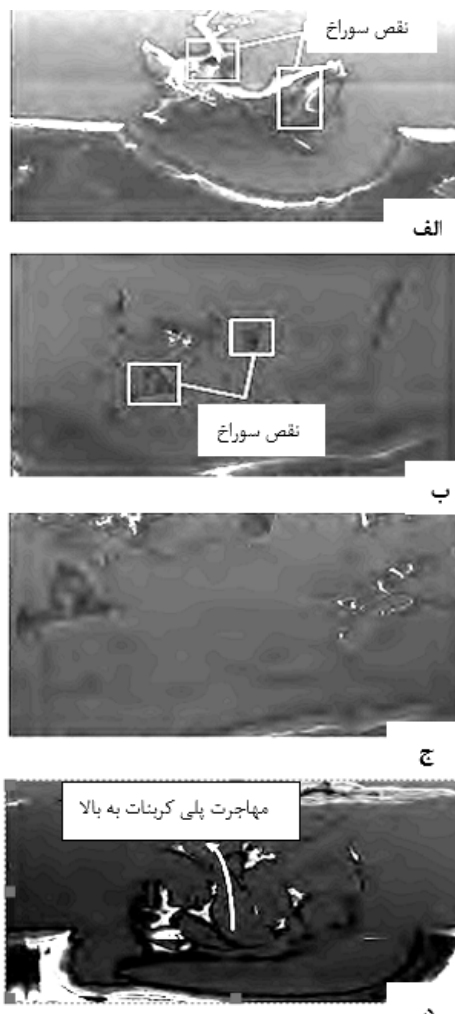
پارامتر	(%) استفاده از چسب	(%) ترمیمی
۳۰-۱۳۰۰	۱۱/۵۱	۲۶/۶۵
۵۰-۱۴۰۰	-۱۴/۵۰	۷/۸۹
۵۰-۱۵۰۰	-۴/۵۰	۷/۰۴
۶۰-۱۵۰۰	-۲/۱۶	۱۲/۴۵
متوسط	-۱/۳۱	۱۳/۵۱

با استفاده از چسب اپوکسی بین صفحات، متوسط نرخ رشد استحکام کششی کمی کمتر از اتصال جوش داده شده سنتی است. از یک طرف، ممکن است به این دلیل باشد که ساختار اصلی جوش در طول فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از چسب از بین می‌رود، بنابراین استحکام کششی کمی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، از آنجایی که نیروی رو به پایین در حین جوشکاری ترمیمی روی ۰/۲ میلی‌متر تنظیم می‌شود، یعنی هم زدن جوش اصطکاکی به‌صورت موضعی بر روی سطح آلیاژ آلومینیوم A6061-T6 انجام می‌شود که تأثیر کمی بر ساختار جوش دارد. در هنگام این جوشکاری، مواد بیشتری در دو طرف جوش اصلی در هم زدن شرکت می‌کنند و چون هم زدن رخ می‌دهد، برخی از مواد جدید که در جوش اول شرکت نکرده‌اند، در اطراف جوش اصلی پر می‌شوند، بنابراین هنگامی که اتصال جوش کشیده می‌شود، مواد فقط یک بار در جوشکاری شرکت می‌کنند و بنابراین احتمال شکسته شدن مواد بخاطر وجود همزن

در طول فرآیند کشش، منشاء ترک شود و از طریق انبساط مداوم به سوراخ‌های دیگر متصل شود و از خواص مکانیکی اتصال کاسته شود. همچنین پس از انجام تست جوشکاری ترمیمی، اثر تقویت تغییر شکل اتصال جوش داده شده کاهش یافته که باعث کاهش استحکام کششی اتصال جوش شده نیز می‌شود. در مطالعه‌ای با مقایسه تصاویر SEM نتیجه گرفته شد، ذرات پلیمری باقی مانده در سطح شکست آلومینیوم AA5058 بزرگتر از ذرات آلومینیوم چسبیده به ماتریس پلی کربنات هستند [۳۵]. در مطالعه‌ای دیگر نیز مشخص شده است ذرات AA 7075 منتقل شده و در داخل ساختار پلی کربنات قفل شده است که نقش مهمی در استحکام کششی و رفتارهای شکستگی دارد [۴۸]. کوئلیو و همکاران نیز انتقال فولاد به آلیاژ آلومینیوم AA6181-T4 را گزارش کردند. آنها پدیده درهم تنیدگی را مشاهده نمودند که فولاد را به داخل آلیاژ آلومینیوم در قسمت بالایی مقاطع اتصال انتقال می‌دهد [۴۹]. به‌طور مشابه، انتقال فولاد به آلیاژ آلومینیوم AA 5083 نیز مشاهده شده است [۵۰].

۴- جمع‌بندی

با توجه نتایج S/N بهینه‌ترین حالت سرعت اسپیندل 1400 r/min و سرعت جوشکاری 50 mm/min و جوشکاری ترمیمی بر روی نمونه چسب اپوکسی بود. آزمایش کشش نشان داد که برای استفاده از چسب اپوکسی بین صفحات، استحکام کششی اتصالات جوش داده شده اصطکاکی اغتشاشی با چسب کمتر از اتصالات جوش داده شده اصطکاکی اغتشاشی بدون چسب تحت دو مجموعه از پارامترهای فرآیند بوده است. به‌طور کلی، استحکام کششی استفاده از چسب اپوکسی بین صفحات $1/31$ درصد کمتر از اتصال جوش داده شده سنتی است. استحکام کششی اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ترمیمی بیشتر از اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سنتی بود و میانگین نرخ افزایش $13/51$ درصد بود. از نظر مورفولوژی، در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سنتی، عیوب سوراخ‌های طولانی‌تری وجود دارد و با افزایش قطر شانه در حین جوشکاری ترمیمی، عیوب به‌تدریج کاهش می‌یابد. پس از جوشکاری ترمیمی، عیوب کوچکی در داخل جوش ایجاد می‌شود که به‌راحتی می‌تواند در طول فرآیند کشش منشاء ترک شود و از طریق انبساط



شکل ۱۲- ساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی جوشکاری، (الف) جوشکاری بدون چسب، (ب) جوشکاری با چسب، (ج) جوشکاری ترمیمی، (د) جوشکاری ترمیمی با نمای بزرگ شده

با توجه به اینکه ورق‌ها دو بار تحت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته است، ساختار اتصال در کامپوزیت تشکیل شده تحت همزن مکانیکی ثانویه و عمل حرارتی قرار می‌گیرد که مستقیماً منجر به گرمای ورودی زیاد به اتصال می‌شود و در نتیجه باعث نرم شدن اتصال می‌شود لذا باعث می‌شود که آزمایش جوشکاری قطعات تغییر شکل جوش بزرگتر و تنش پسماند جوشکاری بالاتری ایجاد کنند و استحکام کششی و ازدیاد طول پس از شکست کمتر است. از طرف دیگر پس از جوشکاری ترمیمی، عیوب کوچکی در داخل جوش ایجاد می‌شود که به‌راحتی می‌تواند

alloy AA7075-T6/pure copper joints”, *Theoretical applied Fracture Mechanics*, vol. 103, p. 102243, 2019

[10] M. R. M. Aliha, M. Shahheidari, M. Bisadi, M. Akbari, M and S. Hossain, “Mechanical and metallurgical properties of dissimilar AA6061-T6 and AA7277-T6 joint made by FSW technique”. *International journal of advanced manufacturing technologies*, vol. 86, pp. 2551-2565, 2016

[11] M. Akbari, H. R. Asiabaraki and M. R. M. Aliha, “Investigation of the effect of welding and rotational speed on strain and temperature during friction stir welding of AA5083 and AA7075 using the CEL approach”, *Engineering Research Express*, vol. 5, p. 025012, 2023

[12] M. Akbari, M. R. M. Aliha, S. M. E. Keshavarz and A. Bonyadi, “Effect of tool parameters on mechanical properties, temperature, and force generation during FSW”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L*, vol. 233, pp.1033-1043, 2019

[13] M. R. M. Aliha, S. M. N. Ghoreishi, D. M. Imani, Y. Fotoohi, and F. Berto, “Mechanical and fracture properties of aluminium cylinders manufactured by orbital friction stir welding”. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, , vol. 43, pp.1514-1528, 2020.

[14] P. Asadi, M. R. M. Aliha, M. Akbari, D. M. Imani, and F. Berto, “Multivariate optimization of mechanical and microstructural properties of welded joints by FSW method”, *Engineering Failure Analysis*, vol. 140, p.106528, 2022..

[15] M. Akbari, M. R. M. Aliha and F. Berto, “Investigating the role of different components of friction stir welding tools on the generated heat and strain”. *Forces in Mechanics*, vol.10, p. 100166, 2023

[16] P. Asadi, M. Akbari, O. Kohantorabi, M. Peyghami, M. R. M. Aliha, S. M. Salehi, and R. Asiabaraki, and F. Berto, “Characterization of the Influence of Rotational and Traverse Speeds on the Mechanical and Microstructural Properties of Wires Produced By the FSBE Method”, *Strength of Materials*, vol. 54, pp.318-330, 2022

[17] M. Akbari, P. Asadi, M. R. M. Aliha and F. Berto, “Modeling and optimization of process parameters of the piston alloy-based composite produced by FSP using response surface methodology”, *Surface Review and Letters*, 2023

مداوم به سوراخ‌های دیگر متصل شود و از خواص مکانیکی اتصال در کامپوزیت کاسته شود. همچنین پس از انجام تست جوشکاری ترمیمی، اثر تقویت تغییر شکل اتصال جوش داده شده کاهش یافته که باعث کاهش استحکام کششی اتصال جوش شده نیز می‌شود.

۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

۶-مراجع

[1] S. Budhe, M.D. Banea and S. De Barros “Bonded repair of composite structures in aerospace application: a review on environmental issues”. *Applied Adhesion Science*, vol. 6, pp. 1-27, 2018.

[2] M. Grujicic, V. Sellappan, M.A. Omar, N. Seyr, A. Obieglo, M. Erdmann and J. Holzleitner, “An overview of the polymer-to-metal direct-adhesion hybrid technologies for load-bearing automotive components,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 197, no.1-3, pp. 363-373, 2008.

[3] S.R. Mishra and W. Murray, “Mahoney: Friction Stir Welding and Processing,” *ASM International*, pp. 163-167, 2007.

[4] G. Çam, “Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM),” *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 77-85, 2022.

[5] K. Singh, G. Singh and H. Singh, “Review on friction stir welding of magnesium alloys,” *Journal of magnesium and alloys*, vol. 6, no. 4, pp. 399-416, 2018

[6] A. Rajput, S.K. Upma, Shukla, N.Thakur, A. Debnath and B. Mangla, “Advanced Polymeric Materials for Aerospace Applications. *Aerospace Polymeric Materials*”, 117-136, 2022.

[7] M.R. Mohammad Aliha, Y. Fotouhi and F. Berto, “Experimental notched fracture resistance study for the interface of Al-Cu bimetal joints welded by friction stir welding”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B*, vol. 232, pp. 2192-2200, 2018

[8] A.R. Torabi, M.H. Kalantari, M. R. M. Aliha, and S. M. N. Ghoreishi, “Pure mode II fracture analysis of dissimilar Al-Al and Al-Cu friction stir welded joints using the generalized MTS criterion”, *Theoretical applied Fracture Mechanics*, vol. 104, p. 102369, 2019

[9] M.R.M. Aliha, M. H. Kalantari, S. M. N. Ghoreishi, A. R. Torabi and S. Etesam, “Mixed mode I/II crack growth investigation for bi-metal FSW aluminum

Composites Part B: Engineering, vol. 219, pp. 108941, 2021.

[30] Y. Huang, X. Meng, Y. Wang, Y. Xie and L. Zhou, "Joining of aluminum alloy and polymer via friction stir lap welding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 257, pp. 148-154, 2018.

[31] M. Elyasi and H.A. Derazkola, "Experimental and thermomechanical study on FSW of PMMA polymer T-joint" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, pp. 1445-1456, 2018.

[32] H.A. Derazkola, R.K. Fard and F. Khodabakhshi, "Effects of processing parameters on the characteristics of dissimilar friction-stir-welded joints between AA5058 aluminum alloy and PMMA polymer," *Welding in the World*, vol. 62, pp. 117-130, 2018.

[33] F. Khodabakhshi, M. Haghshenas, J. Chen, B. Shalchi Amirkhiz, B., Li, and 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*, vol. 22, no. 3, pp. 82-190, 2017.

[34] P.V. Rao, E. Mounika and G. Vikram, "Process parameters optimization on FSW of Polycarbonate and AA6061," *Materials Today: Proceedings*, vol. 19, pp. 637-641, 2019

[35] H.A. Derazkola and M. Elyasi, "The influence of process parameters in friction stir welding of Al Mg alloy and polycarbonate," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, pp. 88-98, 2018

[36] A.R. Patel, D.J. Kotadiya, J.M. Kapopara, C.G. Dalwadi, N.P. Patel and H. Rana, "Investigation of Mechanical Properties for Hybrid Joint of Aluminium to Polymer using Friction Stir Welding (FSW)," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 4242-4249, 2018.

[37] S.M. Rahmat, M. Hamdi, F. Yusof and R. Moshwan, "Preliminary study on the feasibility of friction stir welding in 7075 aluminium alloy and polycarbonate sheet," *Materials Research Innovations*, vol. 18, pp. S6-S515, 2014.

[38] H.A. Derazkola, and F. Khodabakhshi, "Development of fed friction-stir (FFS) process for dissimilar nanocomposite welding between AA2024 aluminum alloy and polycarbonate (PC)." *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 54, pp. 262-273, 2020.

[18] F. Taheri-Behrooz, M. R. Aliha, M. Maroofi and V. Hadizadeh, "Residual stresses measurement in the butt joint welded metals using FSW and TIG methods". *Steel and Composite Structures*, vol. 28, pp. 759-766, 2018

[19] Y. Huang, X. Meng, Y. Xie, L. Wan, Z. Lv, J. Cao and J. Feng, "Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 105, pp. 235-257, 2018.

[20] A.M.Tomizawa and M.C. EB. Faudree, Induced Adhesive Force of Polycarbonate (PC)/Light Metals (Al, Ti) Lamination.

[21] P.E. Irving and C. Soutis, (Eds.). (2019). *Polymer composites in the aerospace industry*. Woodhead Publishing.

[22] A. Misra, A. (2016). Composite materials for aerospace propulsion related to air and space transportation. In *Lightweight Composite Structures in Transport* (pp. 305-327). Woodhead Publishing.

[23] A.V. Pocius, "Adhesion and adhesives technology: an introduction," Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2021.

[24] Z. Libin and X. Jifeng, "Analysis Method of Advanced Composite Material Joining Structure [M]," ed: Beijing: Beihang University Press, 2015.

[25] S. Maggiore, M. Pedemonte, A. Bazurro, P. Stagnaro, R. Utzeri and G. Luciano, "Characterization of the effect of an epoxy adhesive in hybrid FSW-bonding aluminium-steel joints for naval application," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 103, p. 102702, 2020.

[26] C.G. Dalwadi, A.P. Patel, J.M. Kapopara, D.J. Kotadiya, N.D. Patel and H. Rana, "Examination of Mechanical Properties for Dissimilar Friction Stir Welded Joint of Al Alloy (AA-6061) to PMMA (Acrylic)," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 4761-4765, 2018.

[27] Y. Gao, Y. Morisada, H. Fujii and J. Liao,, "Friction stir lap welding of plastic to metal using adjustable tool," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 25, pp. 190-197, 2019.

[28] H. Shahmiri, M. Movahedi and A.H. Kokabi, "Friction stir lap joining of aluminium alloy to polypropylenesheets," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 22, pp. 120-126, 2017.

[29] M. Li, X. Xiong, S. Ji, W. Hu and Y. Yue, "Achieving high-quality metal to polymer-matrix composites joint via top-thermic solid-state lap joining,"

[49] R.S. Coelho, A. Kostka, J.F. dos Santos and A. Kaysser-Pyzalla, "Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure," *Materials Science and Engineering A*, vol. 556, pp. 175-183, 2012.

[50] T. Watanabe, H. Takayama and A. Yanagisawa, "Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 178, pp. 342 – 349, 2006.



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

[39] D.C. Montgomery, "Introduction to statistical quality control. John Wiley & Sons, 2007.

[40] D.M. Imani, M.R. Mohammad Aliha, A. Rajabi Kafshgar and M. Shojaee, "The use of Taguchi method for mix-design optimization of polymer concrete with high resistance against mode I crack growth," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, vol.9, no. 1, pp.1885-1892, 2022.

[41] H. Rahmani, M.Yazdani, M. Yazdani, and M. Nikodel, "The application of Taguchi method in optimizing the mixing design of semi-structural lightweight concrete made with pumice aggregates," In Persian, *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 32, 2016.

[42] N.H. Fattahi, A. Heidari S.M. Hatefi and M. Hashempour, "The application of Taguchi and RSM serial method in predicting and optimizing multi-objective test design and response level of mechanical properties of colored concrete," In Persian, *11th International Conference on Sustainable Development and Urban Development*, 2021

[43] S.Y. Mousavi, M. Pourrafi, B. Ganjaei and A.S. Majreh, "Investigation of properties of concrete containing silica and zeolite using Taguchi method," In Persian, *3rd International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management*, 2015. *Sustainable Development and Urban Development*, 1400.

[44] S.Y. Mousavi, A.S. Mojreh, G.B. Khosravi and M. Pourrafi, "Investigation of properties of lightweight structural concrete containing EPS designed using Taguchi method", In Persian, *2nd International Conference on New Research in Civil Engineering, Architecture and Management*. 2016.

[45] A. Alizadeh and H. Omrani, "An integrated multi response Taguchi-neural network-robust data envelopment analysis model for CO2 laser cutting," *Measurement*, vol. 131, pp. 69-78, 2019.

[46].BASF group, *Master builders solutions*, <https://polyme.ir>, [May 2020].

[47] F. Khodabakhshi, A. Simchi, A.H. Kokabi and A.P. Gerlich, "Similar and dissimilar frictionstir welding of an PM aluminum-matrix hybrid nanocomposite and commercial pure aluminum: microstructure and mechanical properties," *Materials Science and Engineering A*, vol. 666, pp. 225–37, 2016.

[48]A. Kostka, R.S. Coelho, J. Dos Santos and A.R. Pyzalla, "Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy, " *Scripta Materialia*, vol. 60, no.11, pp. 953-956, 2009.