نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره2، پاییز و زمستان 1399، صفحه 144-137

اتصال مواد مرکب پایه گرماسخت به روش جوشکاری فراصوتی به کمک لایه واسط هم‌پخت شده

علیرضا جباری راد، داود اکبری* و محمد گلزار

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: 1398/01/20 ؛ پذیرش مقاله: 1399/10/22)

چکیده

در این مقاله، جوشکاری فراصوتی مواد مرکبِ زمینه پلیمری از نوع گرماسخت تقویت شده با الیاف شیشه به کمک هم‌پخت کردن با یک لایه پلیمر گرمانرم بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که هم‌پخت کردن باعث ایجاد اتصالی مناسب بین زمینه گرماسخت و لایه گرمانرم در زمان پخت نمونه می‌شود و در نتیجه اتصالی با کیفیت مناسب ایجاد می نماید. ابعاد جوش ایجاد شده در نمونه‌ها، با اختلاف زیادی بزرگ‌تر از ابعاد هورن جوشکاری خواهد بود که این به دلیل حرکت بخش اتصالی گرمانرم به طرفین اتصال در حین جوشکاری است که این مسأله به طور کلی استحکام اتصال را تاحدی بالاتر برده است. طراحی آزمایش با سه پارامتر اصلی زمان، نیرو و دامنه انجام و مقادیر بهینه در اتصال پیش‌بینی گردید. نتایج نشان می‌دهند که پارامتر نیرو در این اتصالات پارامتری غیرتأثیرگذار بوده است و در جوش‌هایی با زمان بالاتر، رزین گرماسخت شروع به تخریب گرمایی کرده است. نتایج آزمون‌های استحکامی نشان می‌دهند که مکانیزم شکست در نمونه‌ها غالباً جدایش بین زمینه گرماسخت و الیاف بوده است و می‌توان با به‌کارگیری پارامترهای بهینه شده، به استحکام برشی در حدود 28/2 مگاپاسکال دست یافت که در مقایسه با سایر روش‌های اتصال، نتیجه مطلوبی می‌باشد.

کلمات کلیدی: جوشکاری فراصوتی، گرماسخت، هم‌پخت.

Ultrasonic welding of thermoset matrix composites reinforced with glass fibers using a co-cured retaining layer

A. JabariRad, D. Akbari*, M. Golzar

Manufacturing Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering,
Tarbiat Modares University, Tehran

(Received 9 April 2019 ; Accepted 11 January 2020)

Abstract

In this paper, ultrasonic welding of glass fiber reinforced thermoses, co-cured whit a thermoplastic has been studied. Co-curing process forms a connection between the thermoset and the thermoplastic while curing the composite. Considering that the calculated stress should not be related to the dimensions of the sample, a horn with a tip dimension smaller than the standard overlap was used. The results show that the actual weld dimensions are bigger than the intended weld dimensions. This has happened due to the movement of the melted thermoplastic to the sideways during the welding. The design of experiment has been done using response surface central composite, and a quadratic equation based on the lap shear strength of the welds containing three principle parameters time, force and amplitude was suggested, as well as predicting the optimum values. The equation shows that the force is an insignificant factor. In

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: daakbari@modares.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

the samples with a higher time value the thermosetting resin started to degrade. The dominant failure mode of the specimens is segregation between the thermoset and fibers. The results show that the optimum parameters can result in a lap shear strength of 28.2 MPa, which is a very decent value compared to other methods of joining.

Keywords: Ultrasonic welding, Thermoset, Co-curing.

1- مقدمه

مواد مرکب با زمینه گرماسخت به دلیل استحکام مناسب و خواص ویژه و همچنین سادگی ساخت و شکل‌دهی اولیه، در تولید تجهیزات مختلف گسترش زیادی پیدا کرده‌اند. با این حال مزیت رقابتی این مواد با اضافه شدن هزینه‌های مونتاژ، که در سازه‌های فضایی هنوز حدود 50% هزینه‌های ساخت را تحمیل می‌کند، تا حد زیادی کاهش می یابد[1]. معمولاً، اتصال کامپوزیت‌های زمینه گرماسخت محدود به اتصالات مکانیکی و چسبی یا ترکیبی از هر دو می‌باشد. همجوشیِ مواد مختلف نیازمند توسعه روش‌های جدید اتصال است تا بتوان بر نقاط ضعف اتصال مکانیکی و چسبی فائق آمد [2]. نقطه ضعف بزرگ اتصال مکانیکی ایجاد سوراخ در قطعه است که منجر به تمرکز تنش و ضعیف شدن سازه‌های نازک کامپوزیتی می‌شود. برای کاهش تمرکز تنش تعداد لایه‌ها و در نتیجه وزن قطعه (موضعی) زیاد می‌شود که به شدت قابلیت کم وزن بودن سازه کامپوزیتی را از بین می‌برد. علاوه بر آن، اتصال مکانیکی با صرف هزینه و وقت زیاد جهت سوراخکاری و آماده‌سازی همراه است و وزن اتصال دهنده‌ها را هم به سازه اضافه می‌کند. اتصال چسبی نیز اگرچه نیازمند سوراخکاری نیست، نیازمند آماده‌سازی سطح دشوار و شدید، دما و فشار و همچنین زمان پخت بالا است، که منجر به افزایش چشمگیر هزینه‌ها می‌شود[3]. به‌علاوه، عوامل حین ساخت سازه‌های چسبی مثل آماده‌سازی سطح، برنامه پخت یا مقدار رطوبت موجود در چسب می‌تواند به شدت روی پایداری بلندمدت اتصالات چسبی کامپوزیت تأثیر گذارد. جوشکاری یک روش کارآمد برای اتصال انواع مواد است که در حال حاضر با توسعه روش‌های جوشکاری برای کامپوزیت‌های با زمینه گرمانرم، قادر به ایجاد اتصال در مدت زمان نسبی کم و با کارایی مشابه یا بهتر از اتصال چسبی و مکانیکی می‌باشد [4]. اتصال جوشی براساس ذوب یا نرم شدن پلیمر گرمانرم با افزایش دما است که موجب افزایش قابلیت حرکت زنجیره‌های مولکولی و همجوشی آن‌ها در سطح اتصال می‌گردد [4]. روش‌های متعدد اتصال جوشی برای اتصال کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم که بر اساس روش‌های مختلف گرم کردن مانند استفاده از صفحات داغ، فشار گاز داغ، مقاومتی، فراصوتی، مایکروویو، لیزر، القایی و اصطکاکی اغتشاشی، توسعه یافته است [5 و6]. با این حال تمامی اتصال جوشی براساس اصلی است که برای کامپوزیت‌های زمینه گرماسخت ممکن نیست چون به دلیل ساختار مولکولیِ اتصال عرضی ، ذوب یا خمیری نمی‌شوند. به همین دلیل جوشکاری سازه‌های کامپوزیت گرماسخت با وجود مزایای فراوان این‌گونه اتصال، به ندرت در پژوهش‌های مختلف مورد توجه بوده است. برای ایجاد قابلیت جوشکاری در سازه‌های کامپوزیتی با زمینه گرماسخت، دان و همکاران [7] روشی را ثبت کردند که طبق آن می‌توان کامپوزیت گرماسخت را به یک کامپوزیت گرماسخت همپخت شده با یک فیلم نازک گرمانرم به روش مقاومتی جوشکاری نمود.

در زمینه جوشکاری پلیمرهای گرماسخت پژوهش‌های بسیار محدودی انجام شده است که البته در بیشتر این پژوهش‌ها روشِ جوشکاری روشی به غیر از فراصوتی بوده است. مک نایت و همکاران [8] با تمرکز بر روی یکی از نقاط ضعفِ این نوع اتصال یعنی تخریب گرمایی، اپوکسیِ هم‌پخت شده با ورق نازک پلیسولفون را به روش مقاومتی جوشکاری کردند و به این نتیجه رسیده‌اند که تخریب گرمایی استحکام برشی را به صورت نمایی کاهش می‌دهد. پتن و همکاران [9] با جوشکاری به روش پرس داغ بر روی قطعات منحنی و واقعیِ بالگرد که از جنس اپوکسی که با یک لایه نازک PVDF هم‌پخت شده‌اند به

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

این نتیجه رسیده‌اند که استحکام این روش از استحکام اتصال چسبی بیشتر است و همچنین اعلام کرده‌اند که بین گرمانرم و گرماسخت شِبه-شبکه نفوذ پلیمری تشکیل شده است. هو [10] معادله‌ای ریاضی جهت پیش‌بینی استحکام نمونه‌های پیش‌آغشته اپوکسی که با ورق نازک پلی‌سولفون هم‌پخت شده‌اند و به روش پرس داغ جوشکاری شده‌اند پیشنهاد و به روش عملی صحه گذاری کرده است. هو [11] همچنین مقایسه‌ای بین نمونه‌های جوش داده شده و چسبانده شده انجام داده است و به این نتیجه رسیده است که استحکام نمونه‌های جوش داده شده در دماهای مختلف و همچنین شرایط محیطی نامناسب بیشتر است. شیلر و بِیر [12] نمونه‌های اپوکسی هم‌پخت شده با PEI و PES را به روش القایی جوشکاری کرده و اولاً نتیجه گرفته‌اند هرچه دمای تحمل اپوکسی بیشتر باشد استحکام بالاتری را می‌توان از اتصال انتظار داشت و ثانیاً بین ضخامت 50، 125 و 250 میکرونی برای لایه نازک گرمانرم، 250 را ضخامت مناسب تشخیص داده‌اند. ویلگاس و روبیو [13] با تمرکز بر تخریب گرمایی گرماسخت، نمونه‌های اپوکسی هم‌پخت شده با PEEK را به روش فراصوتی جوشکاری کرده‌اند و اعلام کرده‌اند که اپوکسی به هیچ عنوان دچار تخریب گرمایی نشده است و شکست از ناحیه هم‌پخت شده اتفاق افتاده است. ویلگاس و مورلقم [14] با هدف اتصال PEEK به گرمانرم، ابتدا گرماسخت را با PEI هم‌پخت نمودند و به این نتیجه رسیده‌اند که بین گرماسخت و PEI یک فازِ میانی تشکیل شده است. سپس جهت هم‌پخت کردنِ خودِ PEEK به گرماسخت اقدام کرده‌اند که پس از شکست در چندین مرحله با استفاده از اعمال UV-O3 موفق به این کار شده‌اند. اندازه‌گیری ضخامت لایه گرمانرم در قبل و بعد جوش نشان داده است که این ضخامت به یک سوم کاهش یافته است. در هر دو حالت شکست اتصال از داخل گرماسخت اتفاق افتاده است و به همین دلیل استحکام هر دو حالت هم نزدیک به هم بوده است. نکته حائز اهمیت، گزارش ارائه شده مبنی بر از بین رفتن استحکام اتصالِ حاصل از هم‌پختِ PEEK به گرماسخت (با استفاده از UV-O3) پس از سه ماه است. یعنی گذشت زمان می‌تواند در پایداری اتصال تأثیر به سزایی داشته باشد. با وجود کاربرد فراوان مواد کامپوزیتی با زمینه گرماسخت، در عمده پژوهش‌های پیشین انجام مطالعه بر روی پارامترها و شناخت تأثیر آن‌ها روی استحکام جوش، تنها بر روی نمونه‌های تماماً گرمانرم انجام گرفته است. از این رو یکی از اهداف این مقاله، انجام بررسی کامل پارامترهای جوشکاری فراصوتی در نمونه‌هایی است که بیشترِ درصد حجمی آن‌ها از رزین‌های گرماسخت تشکیل شده است. لذا در این مقاله، روش جوشکاری فراصوتی جهت ایجاد یک اتصال مطلوب در نمونه‌های کامپوزیت با زمینه گرماسخت توسعه داده شده است. پس از تهیه نمونه‌های هم‌پخت شده، جهت داشتن یک شناخت کلّی از پارامترهای جوشکاری فراصوتی، آزمایش‌های اولیه‌ای بر اساس روش طراحی آزمایش پاسخ سطح-مرکبِ مرکزی طراحی و اجرا شد. با فرض اینکه تنش به دست آمده از یک سطح جوش داده شده مستقل از ابعاد مقطع جوش است، جوشکاری این نمونه‌ها، با هورنی با مقطع مؤثر 9 در 25 میلی‌متر انجام شد و استحکام اتصالات به دست آمده با استفاده از آزمون‌های مکانیکی اندازه گیری و ارزیابی شد.

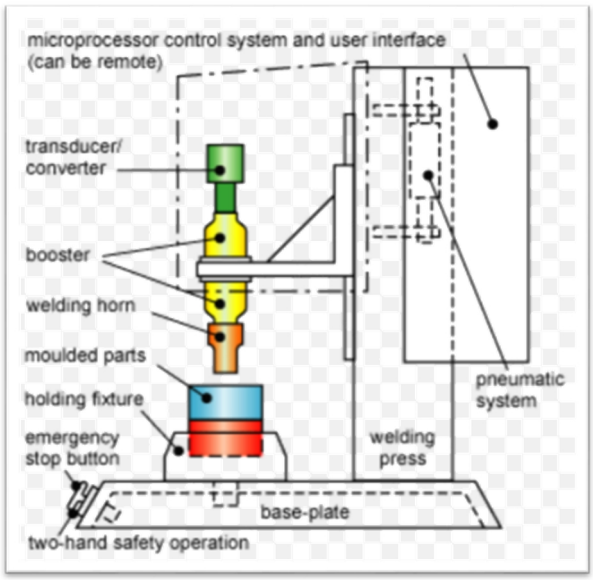
2- جوشکاری فراصوتی

سیستم‌های جوش فراصوتی به طور کلی شامل منبع تولید فرکانس، ترانسدیوسر، تقویت کننده و هورن و همچنین یک بستر یا بدنه می‌باشند. منبع تولید فرکانس، فرکانس ورودی را تبدیل به فرکانس فراصوتی (معمولاً بین 15 تا 60 کیلوهرتز) با ولتاژ بالا می‌کند. این جریان فرکانس بالا، در یک ترانسدیوسر فراصوتی که عموماً از نوع پیزوالکتریک است، موجب ارتعاش مکانیکی می‌شود که دامنه آن بوسیله بوستر یا تقویت کننده تقویت و از طریق یک بخش به نام هورن به قطعه کار منتقل می‌شود.

مجموعه ترانسدیوسر و بوستر و هورن معمولاً از جنس تیتانیوم یا آلومینیم ساخته می‌شود و پیزو الکتریک‌های صنعتی نیز از جنس تیتانیت‌زیرکونیت‌سرب ساخته می‌شود. اتصال بوستر به بدنه دستگاه از محلی تحت عنوان گره انجام می‌گیرد. در این

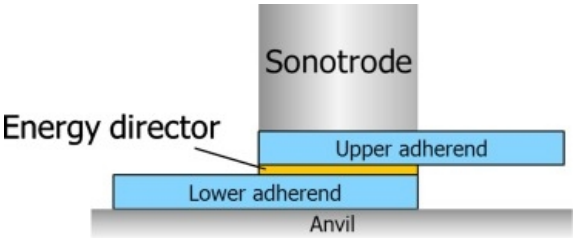
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

محل، ارتعاش تقریباً صفر است و باعث کمترین هدررفت انرژی و ایجاد ارتعاشات ناخواسته در سیستم می‌گردد. شماتیک دستگاه جوش فراصوتی قابل استفاده در جوشکاری پلاستیک‌ها در شکل(1) نشان داده شده است.



شکل1-شمای دستگاه جوش فراصوتی گرمانرم‌ها [19]

انتقال ارتعاش مجموعه محرک به دو قطعه تحت جوش که روی هم و با نیروی استاتیکی مشخص قرار گرفته‌اند، موجب تغییر شکل‌های شدید پلاستیک موضعی در قطعات می‌شود و آن‌ها را داغ می‌کند. علاوه بر تغییر شکل پلاستیک، اصطکاک ایجاد شده بین دو قطعه در سطح مشترک هم تولید گرما می‌کند که سهم کمتری در فرآیند جوشکاری دارد. با گرم شدن دو قطعه تحت نیروی استاتیکی، دما در فصل مشترک دو قطعه بالا رفته و ذوب موضعی در آن منطقه اتفاق می‌افتد. با انتخاب صحیح پارامترها دو قطعه داخل هم فرو می‌رود و یکی می‌شوند. در مرحله بعد زمان استراحتی برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود که در این مرحله ارتعاش وجود ندارد ولی نیروی استاتیکی هنوز در حال اعمال است. در این حالت منطقه ذوب شده سرد و سفت می‌شود و اتصال جوشی در سطح مشترک نمونه‌ها ایجاد می‌گردد.جوشکاری فراصوتی گاها در محل اتصال با استفاده از هدایت کننده انرژی صورت می گیرد. شماتیک اتصال پلیمر گرمانرم با استفاده از روش جوشکاری فراصوتی در شکل (2) نشان داده شده است.



شکل2-مراحل جوشکاری فراصوتی گرمانرم‌ها [20]

3- فعالیت‌های تجربی

مواد پلیمری گرماسخت، به دلیل ذات ترد شوندگی در اثر حرارت، به صورت معمول قابل جوشکاری نیستند. لکن روش‌هایی وجود دارد که می توان قابلیت جوشکاری در این مواد ایجاد نمود. یکی از راه‌های ایجاد این قابلیت، استفاده از واسط پلیمری گرمانرم است. مواد پلیمری گرمانرم به دلیل ذات روان شوندگی و خمیری شدن در اثر حرارت، داخل الیاف و حفره های ماده کامپوزیتی نفوذ می‌کند و واسط ایجاد اتصال می‌گردند. در اینجا مسأله اصلی اتصال این لایه واسطه به دوسطح درگیر در اتصال است. یکی از روش‌های اتصال لایه گرمانرم به زمینه گرماسخت، روش همپخت کردن لایه ها است. در این روش یک لایه نازک ترموپلاستیک در هنگام پخت روی کامپوزیت قرار می‌گیرد و همزمان با پخته شدن، به لایه سطحی ترموست نفوذ می کند. نمونه‌های جوشکاری شده در این پژوهش، لمینت اپوکسی از نوع DGEBA ، تقویت شده با الیاف شیشه بافته شده 200 گرم بر متر مربع انتخاب شدند که پس از لایه چینی دستی، یک لایه گرمانرم نازک روی آن‌ها قرار داده شده است و سپس عملیات پخت روی آنها صورت گرفته است. در واقع این عملیات بایستی بادقت زیاد و به منظور حصول اطمینان از اتصال صحیح این لایه کنترل گردد. جوشکاری فراصوتی توسط دستگاه 2600 وات ساخت شرکت مکس‌واید تایوان انجام شد. فرکانس این دستگاه 15 کیلوهرتز و دارای سیلندر نیوماتیک با قطر 63 میلی‌متر می‌باشد که هر بار فشار باد حدود 300 نیوتن نیرو را حاصل می‌کند. هورنی از جنس آلومینیوم7075-T6 با سطح مقطع مؤثر 9 در 25 میلی‌متر برای اتصال قطعات مورد استفاده قرار گرفته است. تصویر دستگاه در شکل(3) نشان داده شده است.پس از انجام

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جوشکاری برروی نمونه‌ها، آزمون‌های مقاومت مکانیکی توسط دستگاه اس‌تی‌ام20 ساخت شرکت سنتام انجام شد.



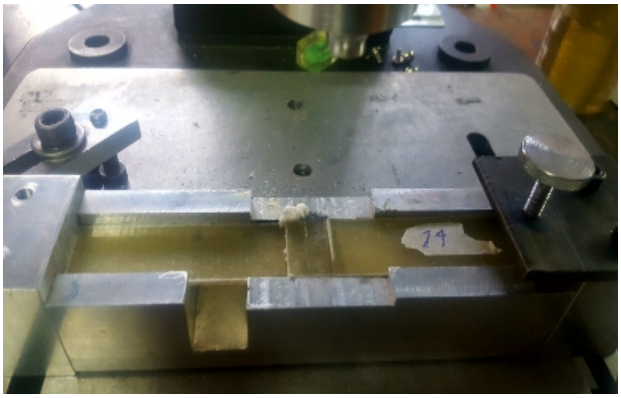
شکل3-بدنه تغذیه دستگاه جوشکاری فراصوتی 2600 وات ساخت شرکت مکس‌واید

جهت جوشکاری فراصوتی و ایجاد نمونه آزمون ها، طبق استاندارد ASTM D5868 به ابعاد 25 در 101 میلی‌متر توسط اره نواری بریده شدند که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل (4) نشان داده شده است.



شکل4-یک نمونه آماده شده جهت جوشکاری فراصوتی

ضخامت نمونه‌ها 2/3±0/1 میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. برای ثابت نگه داشتن نمونه‌ها در حین جوشکاری و جلوگیری از جابجایی و ارتعاش ناخواسته، فیکسچر جوشکاری طراحی و استفاده شد. نحوه قرار گیری نمونه‌ها درون فیکسچر در شکل(5) نشان داده شده است. پارامترهای مورد مطالعه در این مقاله سه پارامتر اصلی فرآیند جوشکاری فراصوتی شامل زمان اعمال ارتعاش، دامنه ارتعاش در حالت آزاد و نیروی استاتیکی اعمالی در زمان جوشکاری هستند.



شکل5-یک نمونه جوشکاری شده درون فیسکچر

بر اساس مطالعات انجام شده در پیشینه پژوهش، این سه پارامتر مهمترین پارامترهایی تأثیرگذار بر روی کیفیت نهایی جوش معرفی شده‌اند [15و16]. با این حال عموم پژوهش‌ها محدود به مواد با زمینه گرمانرم است و در برخی پژوهش‌ها، نیروی استاتیکی غیرتأثیرگذار اعلام شده است [17و 18]. زمان استراحت در تمامی آزمایش‌ها برابر 0/9 ثانیه در نظر گرفته شده است. طراحی و تحلیل آزمایش‌ها در این تحقیق، توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه 11 و به روش پاسخ سطح، مرکب مرکزی انجام شده است.

4- نتایج و بحث

نمونه ها با استفاده از پارامترهای عنوان شده در بخش طراحی آزمایش جوشکاری و سپس براساس ابعاد هندسی استاندارد بریده و تحت آزمون قرار گرفت. براساس تعداد پارامترهای درنظر گرفته شده و سطوح تغییرات آن‌ها در روش مورد استفاده در این مقاله، تعداد 18 آزمایش در مرحله طراحی آزمایش لحاظ شد و جوشکاری بر روی آن‌ها انجام و آزمون استحکام برشی بر روی آنها صورت گرفت. نتایج آزمایشات در جدول(1) نشان داده شده است. در این جدول مشخصات پارامتری هریک از نمونه آزمونها بعلاوه نتایج حاصل از تست برشی نمونه ها به تفکیک و برای هر 18 آزمایش ذکر شده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول1-طراحی آزمایش و نتایج بررسی پارامترهای جوشکاری فراصوتی به روش کامپوزیت مرکزیِ پاسخ سطح

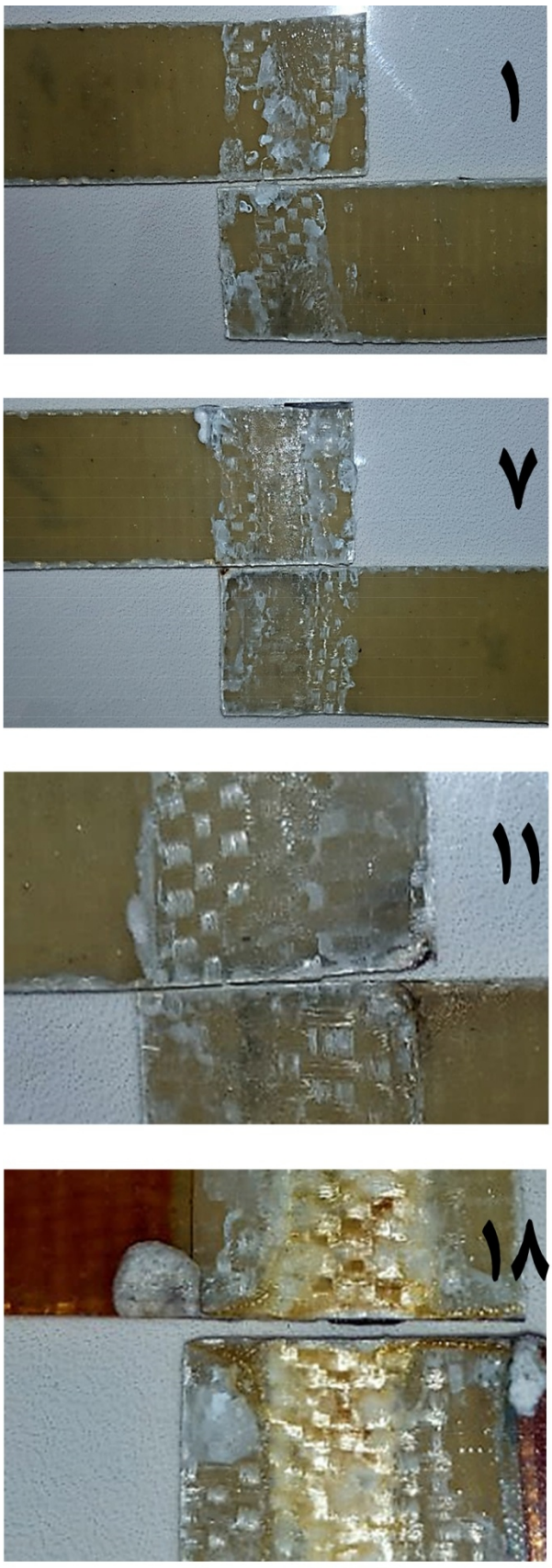
	فاکتور ۱	فاکتور ۲	فاکتور ۳	نتیجه ۱	نتیجه ۱
آزمایش	دامنه:A	نیرو:B	زمان:C	استحکام برشی با سطح مقطع ۹ در ۲۵ میلی‌متر	استحکام برشی با سطح مقطع ۲۵ در ۲۵ میلی‌متر
	میکرون	نیوتن	ثانیه	مگاپاسکال	مگاپاسکال
1	58	900	1	22.9	8.2
2	66	900	1	22.6	8.1
3	62	900	1.5	24.8	8.9
4	58	900	2	20	7.2
5	66	900	2	23.8	8.6
6	62	1350	1	29.5	10.6
7	58	1350	1.5	33.9	12.2
8	62	1350	1.5	23.9	8.6
9	62	1350	1.5	24.6	8.9
10	62	1350	1.5	25.6	9.2
11	62	1350	1.5	25	9
12	66	1350	1.5	23	8.3
13	62	1350	2	25.8	9.3
14	58	1800	1	23	8.3
15	66	1800	1	27.5	9.9
16	62	1800	1.5	27.8	10
17	58	1800	2	16.7	6
18	66	1800	2	14.4	5.2

در ستون نتایج، نتیجه استحکام برشی اتصال با توجه به مقطع جوش با فرض مقطع هورن مورد استفاده ذکر شده است. برای بررسی بیشتر نتایج حاصل از جوشکاری با روش ذکر شده، مقطع شکست نمونه ها به صورت چشمی بررسی شد. بررسی نوع شکست در این اتصال‌ها دو نکته مهم را نشان می‌دهد. اول اینکه شکست در بیشتر نمونه‌ها از نوع جدایش گرماسخت از الیاف بوده است و دوم اینکه جریان یافتن گرمانرم مذاب به طرفین حین جوشکاری عملاً سطح جوش داده شده (25 در 9 میلی‌متر) را به تمام سطح رو هم رفتگی (25 در 25 میلی‌متر) تسری داده است. این نکته باعث شد که در جدول یک، یک ستون افزوده شود و تنش را بر اساس سطح 25 در 25 میلی‌متری هم محاسبه شود. مدل پیشنهادی برای برازش و تحلیل منایج، یک مدل درجه 2 می‌باشد که براساس معادله(1) بیان شده است.

$$\begin{aligned} LSS = {} & -206.922 + 5.67923 \times A + 0.0573187 \times F \\ & + 36.7918 \times T - 9.02778e^{-5} \times A \times F - 0.16875 \\ & \times A \times T - 0.00983333 \times F \times T - 0.0438244 \\ & \times A^2 - 1.408e^{-5} \times F^2 - 6.00476 \times T^2 \end{aligned} \quad (1)$$

در این معادله LSS استحکام برشی،A دامنه ارتعاش، T زمان ارتعاش وF نیروی استاتیکی هستند. استحکام بیشینه و پارامترهای مربوط به آن که توسط نرم‌افزار پیش‌بینی شده است. دامنه 61/468 میکرون، نیرو 1489 نیوتن، زمان 1 ثانیه و استحکام قابل انتظار 28/2 مگاپاسکال است. این اعداد همچنین نشان دهنده این هستند که کران‌های مورد استفاده برای زمان مناسب نبوده‌اند و احتمالاً مقدار بهینهٔ زمان، کمتر از یک ثانیه است. یکی از نکات مهم قابل استناد از نتایج آزمایشات انجام شده این است که همانگونه که در معادله (1) دیده می‌شود، ضرایب جملاتی که دارای فاکتور نیرو هستند، بسیار کوچک می‌باشند. این بدان معنی است که فاکتور نیرو بر خلاف دو فاکتور زمان و دامنه، عاملی غیرتأثیرگذار بر استحکام اتصال مورد بررسی است. تصاویر نحوه شکست 4 نمونه در شکل (7) نشان داده شده است. در نمونه شماره1 بیشتر سطحِ روی هم رفتگی قطعات، در محدوده جوش خورده قرار گرفته است. زمان و دامنه و نیروی کم موجب شده حرکت مذاب در برگیرنده تمام سطح رو هم رفتگی نشود. در نمونه شماره7 بالاترین استحکام حاصل شده است که تمام سطح درگیر بوده است. نمونه شماره11 که نقطه مرکزی طراحی آزمایش مرکب مرکزی است نیز نشان دهنده درگیری تمام سطح است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل6-تصاویر نحوه شکست نمونه‌های 1 و 7 و 11 و18

در نمونه شماره18 که به عنوان نمونه‌ای از جوش‌های 2 ثانیه‌ای است، به وضوح تخریب گرمایی رزین گرماسخت دیده می‌شود. شکست در تمام سطح جوش خورده طبق استاندارد ASTM D5573 از نوع برش الیاف سبک (جدایی رزین از الیاف) بوده است. بر اساس نتایج آزمایشات، پیش‌بینی می‌شود دامنه ارتعاش 61/468 میکرون، نیرو 1489 نیوتن و زمان 1 ثانیه، استحکام 28/2 مگاپاسکال را که بهترین استحکام در نمونه‌های مورد نظر در این پژوهش می‌باشد را نتیجه بدهد.

نتایج در مجموع نشان دهنده اتصال نسبی مناسب لایه ترموپلاست در مرحله همپخت سازی به لایه های ترموست سطحی است. از این رو همپخت سازی به عنوان روش مناسبی در ایجاد اتصال اولیه مورد پذیرش می باشد. مکانیزم جداشدن الیاف از زمینه گرماسخت، مؤید اتصال مناسب لایه گرمانرم است. لذا می‌توان با روش پیشنهادی اتصال مناسبی را پیشنهاد نمود. از طرفی سطح جوش خورده به طور قابل ملاحظه ای از سطح اولیه پیش بینی شده بزرگتر شده است. این موضوع به دلیل نفوذ لایه نازک ترموپلاستیک به اطراف ناحیه جوشکاری در حین عملیات جوشکاری التراسونیک می باشد.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، جوشکاری فراصوتی مواد مرکب با زمینه گرماسخت تقویت شده با الیاف شیشه به کمک هم‌پخت کردن با یک لایه پلیمر گرمانرم بررسی شد. در این راستا از یک ماده گرمانرم به عنوان لایه واسط برای هم‌پخت کردن و افزایش قابلیت جوشکاری نمونه‌ها استفاده شده است. با بررسی‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها شامل جوشکاری نمونه‌ها با پارامترهای مختلف و انجام آزمون استحکام مکانیکی، نتایج به دست آمده به صورت زیر جمع‌بندی می‌شود:

- در نمونه‌های جوشکاری فراصوتی مورد توجه در این مقاله، زمان 2 ثانیه (و بیشتر) موجب تخریب گرمایی زمینه اپوکسی می شود.
- شکست اتصال‌ها طبق استاندارد اِی‌اس‌تی‌ام دی 5573 از نوع برش الیاف سبک (جدایی رزین از الیاف) بوده است، یعنی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

اتصال از جوش شکسته نمی‌شود و از لایه اول لمینت شکسته شده است. از آن‌جایی که انتظار می‌رود جوش از ماده پایه قویتر باشد، این مسأله نشان دهنده مناسب بودن لایه واسط جهت جوشکاری این نوع ماده مرکب است.

- براساس نتایج، دامنه‌ی 61/468 میکرون، نیروی 1489 نیوتن و زمان 1 ثانیه، بهترین استحکام را در حدود 28/2 مگاپاسکال نتیجه می‌دهد.

- نفوذ مذاب گرمانرم به طرفین در حین انجام جوشکاری التراسونیک،موجب افزایش سطح جوش خوردهبه طور قابل ملاحظه ای شده است. این افزایش سطح تا کنون در هیچ پژوهشی گزارش نشده است.

- پارامترهای زمان و دامنه در استحکام نهایی اتصال تأثیرگذار هستند و پارامتر نیرو براساس پژوهش انجام شده و در نمونه‌های مورد نظر در این مقاله غیرتأثیرگذار است.

منابع

[1] T. Löbel, D. Holzhüter, M. Sinapius, C. Hühne, A hybrid bondline concept for bonded composite joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 68, pp. 229-238, 2016.

[2] F. Haddadi, F. Abu-Farha, Microstructural and mechanical performance of aluminium to steel high power ultrasonic spot welding, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 225, pp. 262-274, 2015.

[3] B. A. Hou M, Yuan Q, Welding techniques for polymer or polymer composite components,to ADVANCED COMPOSITE STRUCTURES AUSTRALIA Pty Ltd 2002.

[4] C. Ageorges, L. Ye, M. Hou, Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 32, No. 6, pp. 839-857, 2001.

[5] A. Yousefpour, M. Hojjati, J.-P. Immarigeon, Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 17, No. 4, pp. 303-341, 2004.

[6] R. H. Rizzolo, D. F. Walczyk, Ultrasonic consolidation of thermoplastic composite prepreg for automated fiber placement, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 29, No. 11, pp. 1480-1497, 2015.

[7] J. S. H. M. Roderic C. DonJohn W. Gillespie, Bonding techniques for high performance thermoplastic compositions,to University of Delaware 1997.

[8] S. H. McKnight, B. K. Fink, V. Monnard, P. E. Bourban, J. E. Manson, D. A. Eckel, Jr., AND J. W. Gillespie, Jr., Processing and characterization of welded bonds between thermoset and thermoplastic composites, A. R. Lab, ed., 2001.

[9] M. H. R. Paton, A. Beehag, P. Falzon A Breakthrough in assembly of aircraft composite structures, in 25th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, Hamburg, Germany 2006.

[10] M. Hou, Fusion Bonding of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Laminates, Advanced Materials Research, Vol. 626, pp. 250-254, 2013.

[11] M. Hou, Thermoplastic Adhesive for Thermosetting Composites, Materials Science Forum, Vol. 706-709, pp. 2968-2973, 2012.

[12] O. Schieler, U. Beier, Induction Welding of Hybrid Thermoplastic-thermoset Composite Parts, 2015.

[13] P. V. R. Irene Fernandez Villegas, high-temperature hybrid welding of thermoplastic (cf/peek) to thermoset (cf/epoxy) composites, in 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 2015.

[14] I. F. Villegas, R. van Moorleghem, Ultrasonic welding of carbon/epoxy and carbon/PEEK composites through a PEI thermoplastic coupling layer, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 109, pp. 75-83, 2018.

[15] B. Harras, K. C. Cole, T. Vu-Khanh, Optimization of the Ultrasonic Welding of PEEK-Carbon Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 15, No. 2, pp. 174-182, 1996.

[16] R. Nikoi, M. M. Sheikhi, N. Arab, Experimental Analysis of Effects of Ultrasonic Welding onWeld Strength of Polypropylene Composite Samples, 2015.

[17] S.-J. Liu, I.-T. Chang, Optimizing the Weld Strength of Ultrasonically Welded Nylon Composites, Journal of Composite Materials, Vol. 36, No. 5, pp. 611-624, 2002.

[18] S. J. Liu, I. T. Chang, S. W. Hung, Factors affecting the joint strength of ultrasonically welded polypropylene composites, Polymer Composites, Vol. 22, No. 1, pp. 132-141, 2001.

[19] TWI (2019). Schematic of ultrasonic welding machine. [image] Available at: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/ultrasonic-welding-of-injection-moulded-components-part-1-process-and-equipment-061 [Accessed 9 Mar. 2019].

[20] G. Palardy, H. Shi, A. Levy, S. L. Corre, I.F. Villegas, A study on amplitude transmission in ultrasonic welding of thermoplastic composites, Composites Part A, Volume 113, October 2018, Pages 339-349.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]