



تاثیر پارامترهای اصلی بر استحکام در جوشکاری پیوسته فراصوتی کامپوزیت گرمانرم پلی آمید 6 تقویت شده با الیاف پیوسته شیشه

محمدعلی زمانی¹، رضوان عابدینی^{2*}، هادی قربانی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114 rezvanabedini@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1403/04/30

پذیرش: 1403/07/09

کلیدواژگان

جوش پیوسته فراصوتی

کامپوزیت گرمانرم

شیشه پلی آمید 6

استحکام برشی اتصال

جوشکاری پیوسته فراصوتی یکی از روش‌های جدید و بسیار سریع برای اتصال دهی کامپوزیت‌های گرمانرم می‌باشد که در آن با استفاده از امواج فراصوتی توان بالا با فرکانس 20kHz و انتقال آن به فصل مشترک صفحات کامپوزیتی که دارای هم‌پوشانی مشخص می‌باشند، حرارت ویسکوالاستیک تولیدی، منجر به ذوب پلیمر می‌شود. هم‌زمان با اعمال فشار، فرآیند جوشکاری صفحات کامپوزیت در راستای دلخواه بصورت پیوسته انجام می‌شود. در این پژوهش ابتدا با ساخت صفحات کامپوزیت شیشه پلی‌آمید 6 و طرح ریزی آزمایش‌های جوشکاری پیوسته فراصوتی اثر سه پارامتر اصلی این فرآیند شامل توان جوشکاری، سرعت و فشار جوشکاری بر استحکام برشی جوش پیوسته بررسی شد. برای توجیه اثر هرکدام از پارامترها بر روی استحکام جوش از تصاویر سطح شکست اتصال جوش توسط میکروسکوپ نوری و الکترون روبشی بهره گرفته شد. در نهایت مشخص شد که پارامتر توان، رابطه مستقیم و پارامترهای سرعت و فشار، رابطه معکوس با استحکام برشی جوش پیوسته فراصوتی کامپوزیت شیشه پلی‌آمید 6 دارند؛ علاوه بر آن توان، بیشترین و فشار، کمترین تاثیر را بر استحکام جوش دارد.

The effect of main parameters on strength in continuous ultrasonic welding of thermoplastic composite polyamide 6 reinforced with continuous glass fibers

Mohammad Ali Zamani¹, Rezvan Abedini^{1*}, Hadi Ghorbani²

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, Rezvanabedini@iust.ac.ir

Keywords

Continuous ultrasonic welding

Thermoplastic composite

GF/PA6

Shear Strength

Abstract

Continuous ultrasonic welding is one of the new and very fast methods for joining thermoplastic composites, in which by using high power ultrasonic waves with a frequency of 20kHz and transferring it to the interface of the composite plates that have a certain overlap, the viscoelastic heat produced leads to the melting of the polymer and at the same time as the pressure is applied, the welding process of the composite plates in the desired direction is done continuously. In this research, the effect of three main parameters of this process, i.e., welding power, welding speed and pressure, on the lap shear strength of continuous ultrasonic welding is investigated by making glass-polyamide 6 composite plates and planning continuous ultrasonic welding experiments. To justify the effect of each parameter on the welding strength, The images of the fracture surface of the weld joint were used by optical and scanning electron microscopes. Finally, it was found that the power parameter has a direct relationship and the speed and pressure parameters have an inverse relationship with the lap shear strength of continuous ultrasonic welding glass-polyamide6 composite. additionally, power has the greatest effect and pressure has the least effect on weld strength.

1- مقدمه

در صنایعی مانند هوافضا، خودروسازی، دریایی و پزشکی تبدیل شده‌اند [1,2]. کامپوزیت‌های پلیمری وابسته به آنکه زمینه³ تشکیل‌دهنده آن‌ها از نوع پلیمرهای گرمانرم⁴ و یا گرماسخت⁵ باشد؛ به دو دسته کامپوزیت‌های گرمانرم

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف به دلیل ویژگی‌هایی مانند استحکام ویژه¹ بالا، سفتی ویژه² بالا و مقاومت در برابر خوردگی به یکی از مواد پرکاربرد

⁴ Thermoplastics

⁵ Thermosets

¹ Specific Strength

² Specific Stiffness

³ Matrix

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Zamani, M. A., Abedini, R., Ghorbani, H., "The effect of main welding parameters on weld strength in continuous ultrasonic welding of thermoplastic composite polyamide 6 reinforced with continuous glass fibers," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 2, pp. 2490-2500. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2035264.1891>

فرآیند کاهش می‌یابد [11,12]. استفاده از فناوری فراصوتی توان بالا در فرآیندهای صنعتی دیگر نظیر متالورژی پودر داغ¹¹ منجر به افزایش خواص قطعات تولیدی مانند افزایش استحکام، سختی و کاهش ناهمگونی در ساختار مواد شده است [13]؛ این فناوری در فرآیندهای شکل‌دهی موجب کاهش نیروی شکل‌دهی، افزایش دقت ابعادی قطعات و افزایش عمر ابزارآلات می‌شود [14]. فناوری فراصوتی در کاربردهای پزشکی با هدف درمان توده‌های سرطانی و استفاده از ابزارهای جراحی فراصوتی به منظور آسیب وارده کمتر به بافت‌ها بکار گرفته می‌شود [15]. ساخت نانوذرات، پلیمریزاسیون¹² و بهبود کیفیت داروها در کاربردهای سونو شیمیایی¹³ نیز از محاسن استفاده فناوری فراصوتی می‌باشد [16].

جوشکاری فراصوتی به دو صورت نقطه‌ای و پیوسته انجام می‌شود؛ در جوش نقطه‌ای ابزار جوشکاری در حین جوش، نسبت به نمونه‌های کامپوزیت ساکن بوده و صرفاً ناحیه‌ای که ابزار جوشکاری با هم‌پوشانی صفحات در تماس است، جوش داده می‌شود. در جوش پیوسته فراصوتی کامپوزیت‌های گرمانرم، ابزار جوشکاری در حین فرآیند جوش، نسبت به صفحات کامپوزیت در راستای دلخواه حرکت داشته و تمامی مسیر طی شده توسط ابزار جوشکاری، جوش داده می‌شود. ایجاد اتصالاتی با قابلیت حمل بار بالاتر در مدت زمان بسیار کوتاه، مزیت اصلی جوش پیوسته فراصوتی در مقایسه با جوش نقطه‌ای فراصوتی می‌باشد. در جوش پیوسته فراصوتی توان مصرفی و حرارت تولیدی بیشتر از جوش موضعی می‌باشد و حرارت تولیدی در جوش پیوسته بصورت یکسان میان صفحات کامپوزیت بالا و پایین توزیع نمی‌شود [17,18]. عدم باقی‌ماندن مواد ناخالصی در فصل مشترک قطعات کامپوزیت و استحکام بالاتر جوش حاصل، از مزایای دیگر جوشکاری فراصوتی نسبت به سایر روش‌های جوشکاری بیان شده، می‌باشد. همچنین فرآیند جوشکاری پیوسته دارای قابلیت اتوماسیون، پایش برخط فرآیند و قابلیت استفاده از فناوری‌های رباتیک را دارا می‌باشد [19,20]. شکل 1-الف) نمای کلی ربات جوشکار فراصوتی را نمایش می‌دهد. شکل‌های 1-ب) و 1-ج) ربات جوشکار را در حین اتصال‌دهی استیفرهای هت¹⁴ شکل به بدنه هواپیما¹⁵ نمایش می‌دهد. درسال‌های اخیر، پژوهش‌هایی در ارتباط با جوش نقطه‌ای و پیوسته فراصوتی انجام شده است که در ادامه به بخشی از این تحقیقات اشاره می‌شود.

ویلگاس و همکاران [22] در سال 2015 با هدف جلوگیری از تخریب حرارتی رزین اپوکسی در جوشکاری ذوبی کامپوزیت‌های کربن اپوکسی¹⁶ و کربن‌پلی‌اتر اتراکتون¹⁷ پژوهشی انجام دادند؛ در نهایت، مشخص شد که کاهش زمان جوشکاری به زمان‌های کمتر از یک ثانیه نقش قابل توجهی در جلوگیری از تخریب حرارتی رزین گرماسخت دارد که دستیابی به این زمان جوشکاری تنها با استفاده از جوشکاری فراصوتی مهیا شده؛ در این روش استفاده از یک لایه پلیمری کوپلینگ¹⁸ از جنس پلی‌اتر اتراکتون علاوه بر امکان‌پذیری اتصال کامپوزیت گرماسخت به گرمانرم، نقش محافظ حرارتی برای جلوگیری از تخریب حرارتی رزین گرماسخت را در جوش نقطه‌ای فراصوتی نیز برعهده دارد.

و گرماسخت تقسیم بندی می‌شوند. ویژگی‌های برتری مانند مقاومت به ضربه و آسیب‌شکشی¹ بالاتر، قابلیت ذوب و بازیافت در کامپوزیت‌های گرمانرم نسبت به کامپوزیت‌های گرماسخت، تمایل به استفاده از کامپوزیت‌های گرمانرم در کاربردهای صنعتی را افزایش داده است [3,4]. در این میان استفاده از الیاف پیوسته در کامپوزیت‌های پلیمری منجر به افزایش خواص کششی و مقاومت به ضربه بالاتر می‌شود [5].

تولید سازه‌ها و قطعات کامپوزیت پلیمری پیچیده در ابعاد بزرگ، با چالش‌هایی همراه است؛ به گونه‌ای که پیچیدگی‌های موجود، ساخت این قطعات را بصورت یکپارچه از لحاظ فنی و اقتصادی ناممکن می‌سازد؛ لذا می‌توان با ساخت اجزا مختلف و بهره‌گیری از روش‌های اتصال‌دهی بر مشکلات فنی و اقتصادی غلبه نمود؛ بی‌تردید، ایجاد اتصال مستحکم در مدت زمان کوتاه یکی از نیازهای اساسی در تولید سازه‌های کامپوزیتی می‌باشد.

روش‌های اتصال‌دهی گوناگونی برای اتصال کامپوزیت‌های پلیمری به یکدیگر وجود دارد؛ از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از بست‌های مکانیکی، انواع چسب و استفاده از روش‌های ذوبی اشاره نمود [6,7]. متداول‌ترین شیوه اتصال‌دهی استفاده از بست‌های مکانیکی مانند پیچ و پرچ سبب افزایش چشمگیر وزن سازه‌ها و ایجاد تمرکز تنش در قطعات کامپوزیتی می‌شود. چسب‌ها به منظور ایجاد اتصال قوی بسیار گران قیمت‌اند و مدت زمان لازم برای اتصال‌دهی که شامل مراحل آماده‌سازی سطح، کار نیروی انسانی و عملیات پخت² چسب می‌باشد، بسیار زمان‌بر است. همچنین به دلیل حساسیت و تأثیر پذیری از عوامل محیطی مانند دما و رطوبت کاربرد این روش را محدود می‌نماید [8]. بهره‌گیری از روش‌های جوشکاری ذوبی یکی از روش‌های جالب در اتصال‌دهی کامپوزیت‌های گرمانرم می‌باشد که پرکاربردترین این روش‌ها در صنعت شامل جوشکاری مقاومتی³، القایی⁴، لیزر⁵ و فراصوتی⁶ می‌باشد. جدول 1 مقایسه انواع روش‌های جوشکاری پر کاربرد در صنعت برای اتصال‌دهی کامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول 1 بیان شده است، باقی‌ماندن عناصر رسانا در فصل مشترک جوش مقاومتی، توزیع غیریکنواخت حرارت در فصل مشترک و محدودیت ضخامت در جوش القایی، وابستگی نوع و راستای الیاف در جوش لیزر، محدودیت‌های موجود در انواع روش‌های جوشکاری ذوبی کامپوزیت‌های گرمانرم می‌باشند.

جوشکاری فراصوتی یکی از روش‌های اتصال‌دهی نوین در کامپوزیت‌های گرمانرم می‌باشد که در آن با تولید امواج فراصوتی توان بالا با فرکانس 20kHz توسط مبدل⁷ و افزایش دامنه ارتعاشات بوسیله اجزایی مانند بوستر⁸ و هورن⁹ ارتعاشات فراصوتی به درون مواد کامپوزیتی و فصل مشترک صفحات منتقل می‌شود و از طریق ایجاد حرارت ویسکوالاستیک، پلیمر موجود در زمینه مواد کامپوزیت ذوب می‌شود. در این شرایط همزمان با اعمال فشار بر روی هم‌پوشانی صفحات کامپوزیت، جوش فراصوتی در کسری از ثانیه، شکل می‌گیرد [9,10]. استفاده از امواج فراصوتی در جوشکاری کامپوزیت‌های گرمانرم، حرارت تولید شده و اثرات حاصل از آن را تا حد امکان در فصل مشترک صفحات کامپوزیت محدود می‌نماید و منطقه متأثر از حرارت¹⁰ در این

¹⁰ Heat affected zone (HAZ)

¹¹ Hot pressing of metal powders

¹² Polymerization

¹³ Sonochemistry

¹⁴ Hat stiffener

¹⁵ Fuselage

¹⁶ CF/Epoxy

¹⁷ CF/PEEK

¹⁸ Polymer Coupling layer

¹ Damage Tolerance

² Curing

³ Resistance welding

⁴ Induction welding

⁵ Laser welding

⁶ Ultrasonic Welding

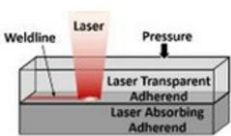
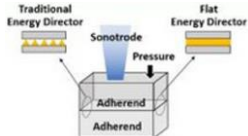
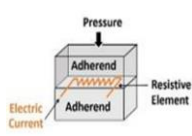
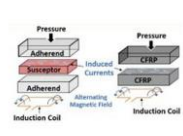
⁷ Transducer

⁸ Booster

⁹ Horn

جدول 1 مقایسه روش‌های جوشکاری ذوبی پرکاربرد در صنعت به منظور اتصال‌دهی کامپوزیت‌های گرمانرم [21].

Table 1 Comparison of fusion welding commonly used in the industry for joining thermoplastic composites [21].

جوشکاری لیزر	جوشکاری فراصوتی	جوشکاری مقاومتی	جوشکاری القایی	روش جوشکاری
				
سرعت بسیار بالا	فرآیند پرسرعت بخصوص در جوشکاری پیوسته.	تمرکز حرارت تولیدی تنها در فصل مشترک. استقلال زمان فرآیند از طول جوشکاری.	جوشکاری مناسب در کامپوزیت‌های بافته شده.	مزایا
جوشکاری متأثر از نوع تقویت‌کننده و نحوه لایه‌چینی بوده.	جوشکاری پیوسته هم اکنون درحال توسعه.	باقی ماندن المان‌های مقاومتی (فلز یا الیاف کربن) در فصل مشترک.	مشکل تمرکز حرارت در خط جوش. چالش جوشکاری در چندلایه‌های دارای الیاف تک جهت و پارچه بدون کریمپ ¹	چالش‌ها
24	4-6	1	0.5	سرعت جوشکاری (m/min)
2.4	بزرگ‌تر از شش برای پلیمرهای آمورف ² کوچک‌تر از شش برای پلیمرهای نیمه کریستالی ³ [9]	بدون محدودیت	کوچک‌تر از 5	ضخامت قطعات (mm)

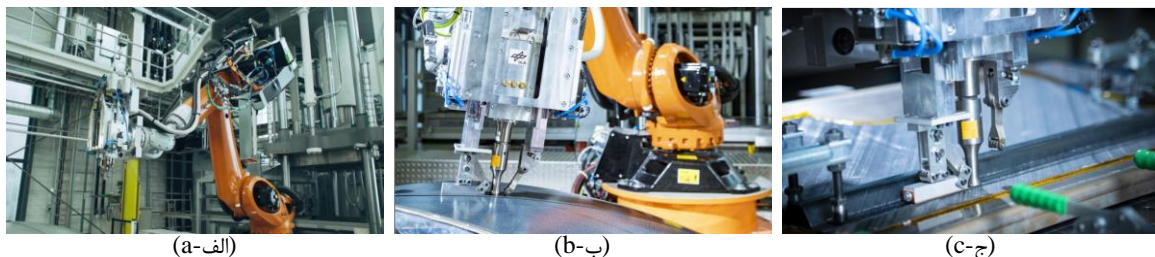


Fig. 1. Continuous ultrasonic welding of composite hat stiffeners to aircraft fuselage by robot welder. (a): Overview of the welding robot. (b): The robot performing welding. (c): Close-up of the ultrasonic system assembly and weld consolidator. [20].

شکل 1 جوشکاری پیوسته فراصوتی استیفرهای هت شکل کامپوزیتی به بدنه هواپیما توسط ربات جوشکار (a): نمای کلی ربات جوشکار. (b): ربات در حال جوشکاری. (c): نمای نزدیک از مجموعه سیستم فراصوتی و تثبیت‌کننده جوش [20].

هدایت‌کننده انرژی با ضخامت 0.06mm نمودارهای متناظر با آن‌ها کمی تأخیر داشته است. همچنین در جوشکاری صفحات بوسیله هدایت‌کننده انرژی با ضخامت 0.06mm ذوب هدایت‌کننده انرژی و صفحات کامپوزیت، همزمان با یکدیگر انجام می‌شود؛ درحالی که در جوشکاری با هدایت‌کننده‌های 0.25 و 0.5mm ابتدا هدایت‌کننده انرژی ذوب شده و سپس، صفحات کامپوزیت ذوب خواهند شد.

سندرز و همکاران [11] در سال 2016 به منظور حذف جریان پلیمر مذاب از اطراف هم‌پوشانی صفحات کامپوزیت کربن پلی‌فنیل‌سولفید⁶ در

پالاردی و همکاران [23] در سال 2016 اثر ضخامت هدایت‌کننده‌های انرژی⁴ بر حرارت تولیدی در فصل مشترک صفحات کامپوزیت کربن پلی‌اترایمید⁵ در جوش نقطه‌ای فراصوتی را بررسی نمودند؛ آن‌ها با بررسی نمودارهای توان مصرفی و جابه‌جایی انتهای هورن (ابزار جوشکاری) در حین جوشکاری نقطه‌ای با استفاده از سه هدایت‌کننده انرژی به ضخامت‌های 0.06، 0.25 و 0.5mm دریافتند که نمودارهای توان و جابه‌جایی هورن برای هدایت‌کننده‌های انرژی به ضخامت 0.25 و 0.5mm رفتار مشابهی داشته و به دلیل کرنش‌های چرخه‌ای کمتر و به تبع آن نرخ گرمایش پایین‌تر نسبت به

¹ Non crimp fabric

² Amorphous

³ Semi-crystal

⁴ Energy Director (ED)

⁵ CF/PEI

⁶ CF/PPS

تیسانگو و همکاران [28] در سال 2021 بر روی اثر دامنه ارتعاش و نیروی جوش در جوشکاری نقطه‌ای فراصوتی کربن اپوکسی به کربن‌پلی‌اترکتون بوسیله لایه پلیمری گرمانرم واسط از جنس پلی‌اترایمید، پژوهشی انجام دادند. نتایج نشان داد که با کاهش نیروی جوشکاری و با کاهش دامنه ارتعاش، مدت زمان لازم برای ایجاد حرارت و حداکثر دمای میان لایه پلیمری واسط و کامپوزیت کربن اپوکسی افزایش می‌یابد. همچنین در شرایطی که بیشترین استحکام برشی حاصل شد، نشانه‌هایی از تخریب حرارتی در کامپوزیت کربن اپوکسی مشاهده شد که البته تأثیر زیادی بر استحکام برشی نداشته است. جنگل‌بود و همکاران [29] در سال 2022 برای کاهش حضور حفره‌های متعدد در جوش پیوسته فراصوتی کامپوزیت کربن پلی‌فنیل‌سولفید از یک کفشک فشار برای اعمال فشار پس از جوشکاری پیوسته استفاده نمودند و پارامترهایی مانند ابعاد کفشک، فشار کفشک و فاصله کفشک تا هورن را به منظور کاهش حفره‌های موجود در فصل مشترک و به تبع آن افزایش استحکام برشی جوش بررسی نمودند. نتایج نشان داد در صورتی که فشار کفشک، طول کفشک و فاصله کفشک تا هورن به ترتیب 1.6MPa، 40mm و 86.4mm تنظیم شود، بیشترین استحکام برشی که برابر با 39.6MPa است، بدست خواهد آمد. این در حالی است که جوشکاری پیوسته بدون کفشک فشار در این پژوهش، استحکام برشی 15.1MPa را نتیجه داده است. آهن‌بنجه و همکاران [30] در سال 2023 بر روی تأثیر پارامترهای جوشکاری پیوسته فراصوتی بر انحراف‌های هندسی ربات جوشکار، پژوهشی انجام دادند. نتایج نشان داد که نیروی جوشکاری به عنوان بزرگترین عامل در کاهش دقت جوش شناخته شد و برهم‌کنش میان کفشک فشار، هورن (ابزار جوشکاری) و غلتک جوشکاری تأثیر زیادی بر انحراف‌های هندسی ربات خواهد داشت. عابدینی ندوشن و همکاران [31] در سال 2023 اثر استفاده از هدایت‌کننده انرژی مسطح و لایه‌چینی کامپوزیت را بر استحکام برشی جوش نقطه‌ای فراصوتی در اتصال‌دهی کامپوزیت شیشه پلی‌آمید⁶ بررسی نمودند؛ نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد افزودن یک لایه پلیمری از جنس پلی‌آمید⁶ به ضخامت 0.3mm به عنوان هدایت‌کننده انرژی، منجر به کاهش انرژی مصرفی جوش، کاهش تخریب حرارتی و افزایش استحکام برشی جوش خواهد شد. همچنین با انجام جوش نقطه‌ای فراصوتی بر روی نمونه‌هایی با لایه‌چینی S_{0/90/0/90} میزان بیرون‌زدگی الیاف همراه با پلیمر از اطراف هم‌پوشانی بسیار کمتر از جوشکاری کامپوزیت با لایه‌چینی S_{90/0/90/0} می‌باشد. این مسأله در شرایطی که لایه‌چینی بصورت S_{90/0/90/0} می‌باشد، سبب کاهش استحکام برشی جوش فراصوتی می‌شود.

بارکلی و همکاران [32] در سال 2023 به منظور تمرکز انرژی در فصل مشترک صفحات کامپوزیت در جوش نقطه‌ای فراصوتی به جای استفاده از هدایت‌کننده انرژی از روش جوشکاری فراصوتی نقطه‌ای تفاضلی⁴ استفاده نمودند که در آن قطر هورن جوشکاری (ابزار جوشکاری) و سندان زیر نمونه کامپوزیتی با یکدیگر متفاوت می‌باشد. در این شرایط با اعمال ارتعاشات فراصوتی به مواد کامپوزیت، به دلیل اختلاف قطر هورن و سندان، صفحات کامپوزیت تحت خمش‌های متناوب قرار خواهند گرفت و منجر به لغزش صفحات، نسبت به یکدیگر خواهد شد. لغزش صفحات نسبت به یکدیگر سبب افزایش اصطکاک بین دو صفحه کامپوزیت شده و حرارت بیشتری در فصل مشترک ایجاد خواهد شد در این شرایط، ناحیه جوش داده شده از سطح مقطع

جوشکاری پیوسته فراصوتی با استفاده از یک لایه هدایت‌کننده انرژی از جنس پلی‌فنیل‌سولفید به ضخامت 0.08mm، موفق به حذف جریان پلیمر از اطراف ناحیه هم‌پوشانی شدند. لینتو و همکاران [24] در سال 2017 بر روی جوشکاری ذوبی صفحات کامپوزیت گرماسخت کربن اپوکسی بوسیله لایه واسط گرمانرم (لایه کوپلینگ) از جنس پلی‌وینیل‌بوتیرال¹ (PVB) پژوهشی انجام دادند؛ آن‌ها با استفاده از دو لایه کوپلینگ (PVB) به ضخامت 0.25 و 0.075mm و با استفاده از دو روش جوشکاری فراصوتی نقطه‌ای و جوشکاری القایی، آزمایش‌های جوشکاری را انجام دادند. نتایج نشان داد که به دلیل درهم‌تنیدگی میان لایه کوپلینگ و کامپوزیت کربن اپوکسی، مکانیزم اصلی شکست، جداسازی الیاف از پلیمر (PVB) بوده است. همچنین در جوش نقطه‌ای فراصوتی نسبت به جوش القایی، میزان جریان پلیمر مذاب از اطراف هم‌پوشانی صفحات، بیشتر بوده است؛ در نتیجه، خط جوش در جوش القایی، ضخامت بالاتری داشته و این امر منجر به شکست زود هنگام اتصال و استحکام پایین‌تر در جوش القایی نسبت به جوش فراصوتی می‌شود. تائو و همکاران [25] در سال 2018 با بررسی حضور هدایت‌کننده انرژی در جوش موضعی فراصوتی دریافتند که هدایت‌کننده انرژی منجر به افزایش استحکام، افزایش زمان جوشکاری و کاهش نفیصه‌های جوش ناشی از حرارت می‌شود. جنگل‌بود و همکاران [26] در سال 2018 به منظور افزایش یکنواختی در جوش پیوسته فراصوتی کامپوزیت کربن پلی‌فنیل‌سولفید از یک هدایت‌کننده انرژی مشبک بافته شده² از جنس پلی‌فنیل‌سولفید به ضخامت 0.2mm استفاده نمودند. آن‌ها با بررسی تصاویر میکروسکوپی از سطح مقطع هم‌پوشانی متناظر با زمان‌های مختلف در طول جوشکاری فراصوتی نقطه‌ای دریافتند که در ابتدای فرآیند جوشکاری به دلیل وجود نواحی خالی در میان فیلامنت‌های بافته شده، فیلامنت‌ها در میان فضای خالی پهن شده و تمامی سطح هم‌پوشانی توسط هدایت‌کننده انرژی ذوب شده دربرگرفته می‌شود و منجر به افزایش یکنواختی و استحکام جوش پیوسته فراصوتی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که جوشکاری پیوسته فراصوتی با هدایت‌کننده انرژی مسطح با ضخامت 0.08mm استحکام برشی 18.8MPa و در جوشکاری با هدایت‌کننده انرژی مشبک بافته‌شده به ضخامت 0.2mm استحکام برشی 33.7MPa حاصل شد. جنگل‌بود و همکاران [27] در سال 2019 به منظور برقراری ارتباط میان زمان بهینه جوشکاری در جوش نقطه‌ای فراصوتی و سرعت جوشکاری در جوش پیوسته فراصوتی کامپوزیت کربن پلی‌فنیل‌سولفید پژوهشی انجام دادند. در این پژوهش که از یک هدایت‌کننده انرژی مشبک از جنس پلی‌فنیل‌سولفید در جوشکاری فراصوتی نقطه‌ای و پیوسته استفاده شد، آن‌ها جوشکاری فراصوتی را به دو مرحله زمانی تقسیم نمودند. در مرحله نخست فرآیند، هدایت‌کننده مشبک انرژی در میان فضای خالی پهن شده و شکل مسطح به خود می‌گیرد. مرحله دوم فرآیند، شامل ذوب هم‌زمان هدایت‌کننده انرژی و صفحات کامپوزیت با یکدیگر می‌شود. همچنین براساس تحلیل سطح شکست اتصالات و ثبت زمان جوشکاری در میان فواصل مختلف جوش نقطه‌ای و پیوسته، به مقایسه میان مدت زمان لازم، برای دو مرحله بیان شده در جوش نقطه‌ای و پیوسته پرداختند. در نهایت مشخص شد که مدت زمان مرحله اول در جوش نقطه‌ای و پیوسته فراصوتی یکسان بوده؛ ولی زمان مرحله دوم برای جوش پیوسته طولانی‌تر می‌باشد؛ لذا برقراری ارتباط صریح میان مدت زمان جوشکاری نقطه‌ای و سرعت جوشکاری در جوش پیوسته، امری غیرصحيح می‌باشد.

³GF/PA6⁴ differential ultrasonic spot welding (DUS)¹ Polyvinyl butyral (PVB)² Woven mesh energy director

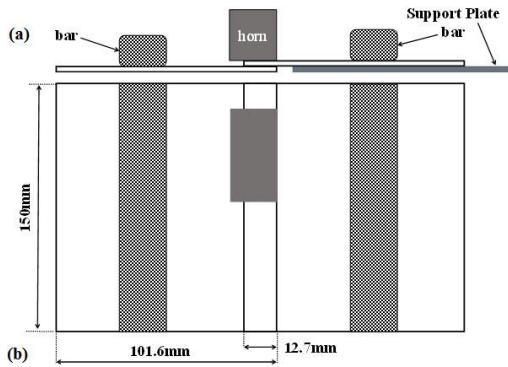


Fig. 2 Schematic of placement composite plates in fixture. (a): Front view and (b): Top view.

شکل 2 نمای قرارگیری صفحات کامپوزیت در سیستم گیره بندی. (a): نمای روبه رو و (b): نمای بالا.

جدول 2 پارامترهای مورد بررسی و سطح بندی آن‌ها در جوشکاری پیوسته فراصوتی کامپوزیت (GF/PA6).

Table 2 The investigated parameters and their leveling in continuous ultrasonic welding of composites (GF/PA6).

سطح سه	سطح دو	سطح یک	پارامتر جوشکاری
1200	900	600	توان (W)
30	20	10	سرعت (mm/s)
3	2	1	فشار (bar)

جدول 3 پارامترهای جوشکاری در آزمایش‌های جوش پیوسته فراصوتی صفحات کامپوزیتی (GF/PA6).

Table 3 The welding parameters in continuous ultrasonic welding of composite plates (GF/PA6).

شماره آزمایش	توان (W)	سرعت (mm/s)	فشار (bar)
1	600	20	2
2	1200	20	2
3	900	10	2
4	900	30	2
5	900	20	1
6	900	20	3

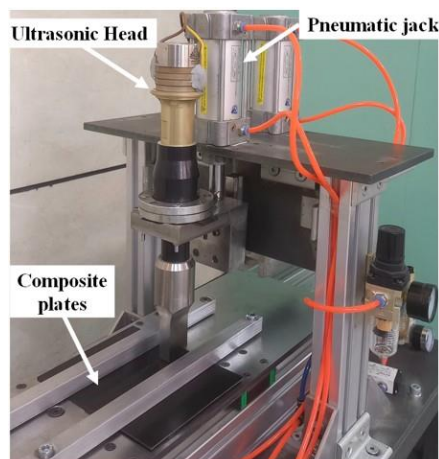


Fig. 3 Continuous ultrasonic welding machine and placement composite plates in the fixture.

شکل 3 دستگاه جوشکاری پیوسته فراصوتی و قرارگیری صفحات کامپوزیت در سیستم گیره بندی.

هورن در تماس با هم پوشانی صفحات، بیشتر می‌باشد و استحکام بالاتری نسبت به جوشکاری نقطه‌ای معمول ایجاد شده است.

جنگل‌بود و همکاران در سال 2023 امکان‌پذیری جوشکاری پیوسته فراصوتی را با استفاده از یک هورن گرد شده بررسی نمودند. نتایج نشان داد این روش منجر به جوش پیوسته با سرعت کمتر شده درحالی که یک روش مناسب در جوشکاری صفحات کامپوزیت دارای انحنا می‌باشد [33].

باتوجه به مرور اجمالی پژوهش‌های انجام شده در حوزه جوشکاری فراصوتی خصوصاً جوش پیوسته فراصوتی، اهمیت موضوع بیش از پیش مشخص می‌شود. در پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با جوشکاری پیوسته فراصوتی کامپوزیت‌های گرماترم، تا کنون اثر پارامترهای اصلی بر روی استحکام برشی جوش بررسی نشده است. در این پژوهش اثر پارامترهایی مانند توان فراصوتی، سرعت حرکت و فشار ابزار بر استحکام برشی جوش در فرآیند جوشکاری پیوسته فراصوتی صفحات کامپوزیت شیشه پلی آمید6¹ (GF/PA6) از طریق آزمایش‌های تجربی و بررسی سطح شکست نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با برقراری ارتباط میان پارامترهای اصلی فرآیند استحکام برشی حاصل و بررسی سطح شکست اتصالات جوش پیوسته اثر هر کدام از پارامترهای اصلی بر استحکام برشی جوش مشخص می‌شود.

2- روش تحقیق

به منظور بررسی اثر پارامترهای اصلی بر جوش پیوسته فراصوتی کامپوزیت (GF/PA6) ابتدا صفحات کامپوزیت ساخته و به ابعاد موردنظر، بریده شدند. سپس با اجرای فرآیند جوشکاری بر روی آن‌ها، براساس استاندارد موجود، استحکام جوش پیوسته فراصوتی با انجام آزمون کشش اتصال لبه بر روی لبه بدست آمد.

2-1- کامپوزیت مورد بررسی

ماده مورد استفاده در این پژوهش کامپوزیت (GF/PA6) با 60 درصد وزنی الیاف می‌باشد که بصورت $[0/90/0/90]_s$ لایه‌چینی شده است و دارای ضخامت 1.75mm می‌باشد. ابتدا صفحات کامپوزیت به ابعاد 300 در 410mm بوسیله عملیات پرس داغ² ساخته شدند. سپس بوسیله تیغه الماس همراه با آب به صفحاتی با ابعاد 101.6 در 150mm بریده شدند. شکل‌های 2-الف (a) و 2-ب (b) به ترتیب نمای روبه‌رو و بالا از شماتیک قرارگیری صفحات کامپوزیت را در سیستم گیره بندی نمایش می‌دهد که در آن صفحات کامپوزیت با هم پوشانی 12.7 mm توسط روبنده‌ها گیره بندی می‌شوند.

2-2- اجرای آزمایش‌های جوشکاری پیوسته فراصوتی

در این پژوهش اثر سه پارامتر اصلی در فرآیند جوشکاری پیوسته فراصوتی صفحات کامپوزیت (GF/PA6) یعنی توان جوشکاری، سرعت پیشروی و فشار بر استحکام برشی جوش پیوسته بررسی شده است. هر کدام از پارامترها همان‌گونه که جدول 2 نمایش می‌دهد، در سه سطح تنظیم می‌شوند. لازم به ذکر است که منظور از فشار در جدول 2، فشار جک پنوماتیک متصل به کلتگی فراصوتی می‌باشد. در ادامه با هدف بررسی پارامترهای فرآیند مطابق جدول 3، شش عدد آزمایش جوش پیوسته فراصوتی تحت پارامترهای مختلف جوشکاری انجام شدند. به منظور اجرای جوش پیوسته فراصوتی، مطابق با شکل 3 صفحات کامپوزیت (GF/PA6) درون سیستم گیره بندی دستگاه جوشکاری پیوسته فراصوتی قرار داده شده و آزمایش‌های طرح‌ریزی شده، انجام شدند.

² Hot press

¹Polyamid6 reinforced with continuous glass fiber (GF/PA6)

3- نتایج و بحث

جدول 4، نتایج حاصل از آزمون کشش اتصالات لبه بر روی لبه را در قالب میانگین استحکام برشی جوش‌های پیوسته فراصوتی نمایش می‌دهد؛ در ادامه، با استفاده از نتایج حاصله به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر استحکام برشی جوش پرداخته می‌شود.

جدول 4 نتایج استحکام برشی حاصله در آزمایش‌های جوش پیوسته فراصوتی.

Table 4 Results of lap shear strength obtained in continuous ultrasonic welding tests.

شماره آزمایش	استحکام برشی (MPa)	انحراف معیار (MPa)	ضریب تغییرات ^۲
1	2.37	0.37	0.17
2	14.69	2.07	0.14
3	15.37	2.16	0.14
4	3.65	0.95	0.26
5	8.72	3.93	0.45
6	11.03	2.93	0.26

1) اثر توان بر استحکام برشی

به منظور بررسی اثر توان بر استحکام برشی جوش پیوسته فراصوتی صفحات کامپوزیت (GF/PA6) با تنظیم پارامترهای سرعت و فشار بر روی مقادیر 20mm/sec و 2bar و تغییر مقدار توان در دو سطح 600 و 1200 W براساس آزمایش‌های شماره یک و دو موجود در جدول 3، استحکام برشی از 2.37 به 14.69 MPa افزایش می‌یابد. این مسأله بخوبی در نمودار شکل 6 مشاهده می‌شود. شکل 7-الف) خط جوش حاصل از جوشکاری پیوسته فراصوتی صفحات کامپوزیتی (GF/PA6) تحت پارامترهای توان 600W، سرعت 20mm/sec و فشار 2bar را همراه با نمونه‌ای از سطح شکست نمایش می‌دهد.

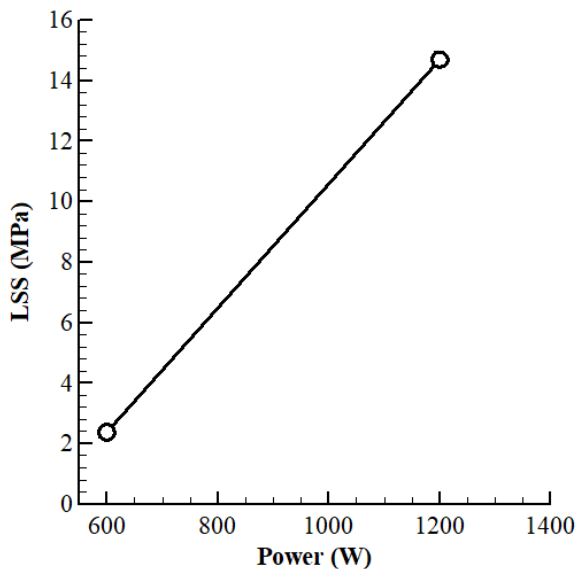


Fig. 6 Diagram of the power effect on the lap shear strength in continuous ultrasonic welding of composite plates (GF/PA6) under 2bar pressure and 20mm/sec speed.

شکل 6 نمودار اثر توان بر استحکام برشی اتصال لبه روی هم در جوش پیوسته فراصوتی صفحات کامپوزیت (GF/PA6) تحت فشار 2bar و سرعت 20mm/sec.

2-2- آزمون استحکام برشی اتصال لبه روی هم (لب)^۱

به منظور بدست آوردن استحکام برشی اتصالات جوش پیوسته فراصوتی، مطابق با شکل 4، صفحات کامپوزیتی جوش داده شده در جهت عمود بر خط جوش به نمونه‌هایی به عرض 20mm بوسیله تیغه الماس همراه با آب برش داده شدند. در مجموع چهار نمونه با عرض 20mm و دو نمونه حدوداً 30mm که به ترتیب در ابتدا و انتها خط جوش قرار داشته، حاصل می‌شود. به دلیل عدم یکنواختی شرایط جوشکاری در نمونه‌های ابتدا و انتها، این نمونه‌ها در بررسی استحکام جوش پیوسته فراصوتی در نظر گرفته نمی‌شوند. نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D1002 بوسیله دستگاه کشش سنتام دو تن، با نرخ جابه‌جایی 1.3mm/min مطابق با شکل 5، تحت آزمون کشش اتصال لبه بر روی لبه قرار گرفتند. خروجی مورد نیاز در این آزمون، بیشینه نیروی برشی شکست اتصال در هریک از چهار نمونه برش داده شده، در طول خط جوش می‌باشد. در ادامه با تقسیم بیشینه نیروی برشی شکست هریک از نمونه‌ها بر سطح اتصال (20mm در 12.7mm) استحکام برشی چهار نمونه تشکیل دهنده خط جوش در جوش پیوسته فراصوتی محاسبه می‌شود و میانگین استحکام این چهار نمونه به عنوان استحکام برشی جوش پیوسته فراصوتی گزارش می‌شود.

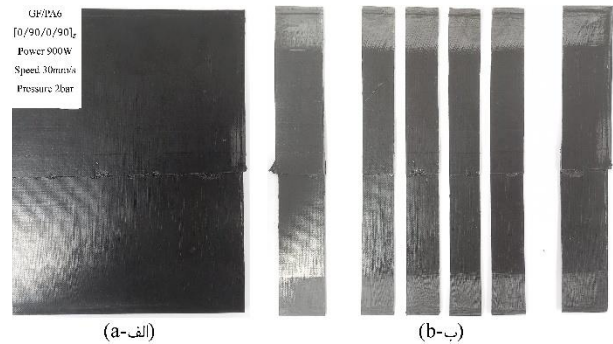


Fig. 4 (a): Welded (GF/PA6) composite plates. (b): Cutting the welded plates perpendicular to the weld line.

شکل 4 الف): صفحات کامپوزیت (GF/PA6) جوش داده شده. ب): برش صفحات جوش داده شده در راستای عمود بر خط جوش.



Fig. 5 Lap Shear Strength test with universal testing machine STM-20 on the continuous ultrasonic welding samples.

شکل 5 اجرای آزمون استحکام برشی اتصال لبه بر روی نمونه‌های جوش پیوسته فراصوتی بوسیله دستگاه کشش سنتام 2 تن.

¹ Lap joint

² منظور از ضریب تغییرات نسبت انحراف معیار داده‌ها به میانگین داده‌ها می‌باشد.

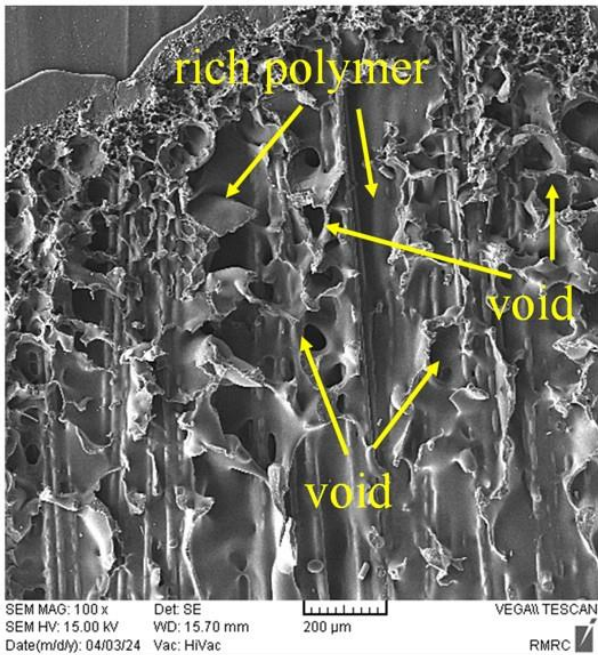


Fig. 8 The SEM image of part (a) in fracture surface of the standard sample in Fig.7-a.

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی قسمت (a) در سطح شکست نمونه استاندارد نمایش داده شده در شکل 7-الف-ا).

2 اثر فشار بر استحکام برشی

شکل 9 نمودار استحکام برشی جوش بر حسب فشار را نمایش می دهد. هنگامی که توان و سرعت به ترتیب بر روی مقادیر 900W و 20mm/sec تنظیم شوند، با افزایش فشار از 1 به 3bar استحکام برشی از 11 به 8.7MPa کاهش می یابد.

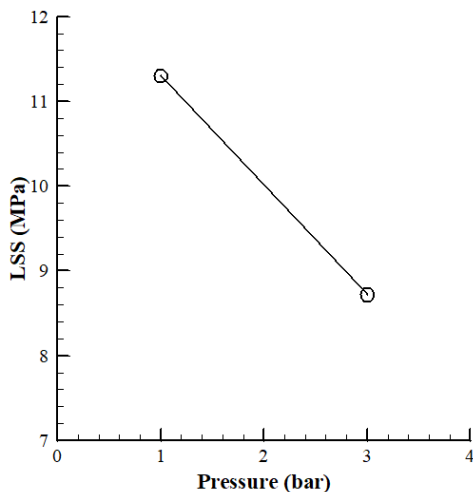


Fig. 9 Diagram of the pressure effect on the lap shear strength in continuous ultrasonic welding of composite plates (GF/PA6) under 900W power and 20mm/sec speed.

شکل 9 نمودار اثر فشار بر استحکام برشی اتصال لپ در جوش پیوسته فراصوتی صفحات کامپوزیت (GF/PA6) تحت توان 900W و سرعت 20mm/sec.

شکل های 10-الف-ا) و 10-ب-ب) به ترتیب خط جوش و سطح شکست بخشی از آن در آزمایش های جوش پیوسته شماره پنج و شش را نمایش می دهند. سطح شکست موجود در شکل 10-الف-ا) (آزمایش پنج) نسبت به سطح شکست شکل 10-ب-ب) (آزمایش شش) دارای نواحی جوش نخورده

همان گونه که شکل 7-الف-ا) نمایش می دهد، وجود نواحی جوش نخورده زیاد که بوسیله فلش نمایش داده شده است، منجر به کاهش یکنواختی جوش در آزمایش جوشکاری شماره یک می شود. عدم یکنواختی جوش شکل گرفته در فصل مشترک صفحات کامپوزیت یکی از دلایل اصلی در پایین بودن استحکام برشی جوش پیوسته در این حالت می باشد. شکل 8، تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از قسمت (a) که در شکل 7-الف-ا) مشخص شده است، را نمایش می دهد؛ همان گونه که شکل 8 نمایش می دهد، عواملی مانند حفره های متعدد در سطح شکست اتصال، وجود نواحی غنی از پلیمر و عدم حضور الیاف در فصل مشترک صفحات کامپوزیت، موجب استحکام پایین در جوش پیوسته فراصوتی شماره یک می شود.

شکل 7-ب-ب) خط جوش حاصل از جوشکاری پیوسته فراصوتی آزمایش شماره دو تحت پارامترهای توان 1200W، سرعت 20mm/sec و فشار 2bar همراه با نمونه ای از سطح شکست در آن را نمایش می دهد؛ در شکل 7-ب-ب) با افزایش توان از 600 به 1200W سطح شکست نمونه حاصل، شامل الیاف خالص بوده و نشانی از وجود حفره و مناطق غنی از پلیمر نمی باشد. در این حالت می توان گفت که با افزایش توان جوشکاری میزان حرارت تولیدی در فصل مشترک صفحات کامپوزیت افزایش یافته و شرایط برای ایجاد جوش با نفوذ بالا فراهم می شود و الیاف در اتصال حاصله، نقش مؤثری ایفا می نمایند؛ در نتیجه استحکام برشی اتصال، افزایش می یابد.

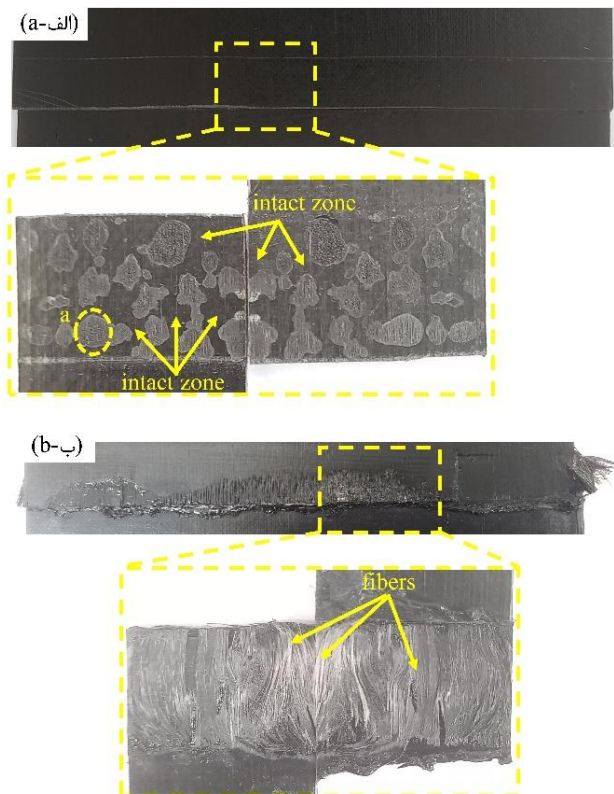


Fig. 7 Weld line and a sample of its fracture surface. (a): Test number one, power 600W, pressure 2bar and speed 20mm/s. (b): Test number two power 1200W, pressure 2bar and speed 20mm/sec.

شکل 7 خط جوش و نمونه ای از سطح شکست آن: (الف) آزمایش شماره یک توان 600W، فشار 2bar و سرعت 20mm/s و (ب) آزمایش شماره دو توان 1200W، فشار 2bar و سرعت 20mm/sec.

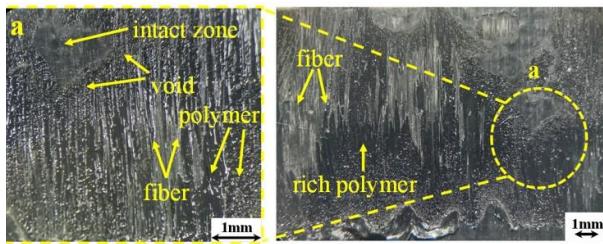


Fig. 11 The optical microscope image of the fracture surface in Fig.10-b.

شکل 11 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح شکست موجود در شکل 10-(ب-ب).

3) اثر سرعت بر استحکام برشی

شکل 12، نمودار استحکام برشی جوش پیوسته فراصوتی برحسب سرعت پیشروی جوشکاری را نمایش می‌دهد. هنگامی که توان و فشار جوشکاری به ترتیب بر روی 900W و 2bar تنظیم شوند، با افزایش سرعت پیشروی از 10 به 30mm/sec استحکام برشی جوش از 15.37 به 3.65MPa کاهش می‌یابد.

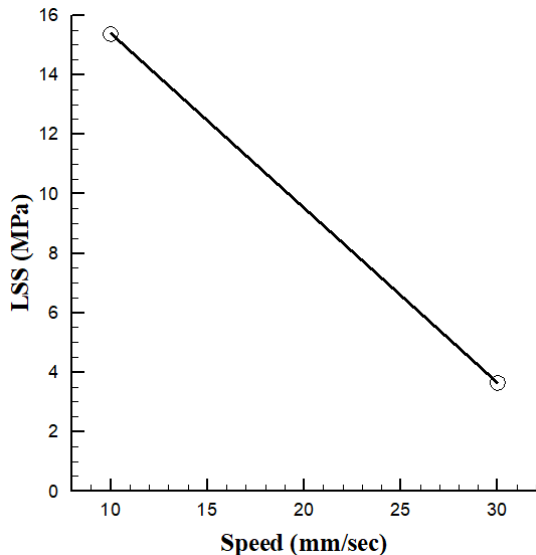


Fig. 12 Diagram of the speed effect on the lap shear strength in continuous ultrasonic welding of composite plates (GF/PA6) under 900W power and 2bar pressure.

شکل 12 نمودار اثر سرعت جوشکاری بر استحکام برشی اتصال لپ در جوش پیوسته فراصوتی صفحات کامپوزیت (GF/PA6) تحت توان 900W و فشار 2bar.

شکل‌های 13-(الف) و 13-(ب) به ترتیب خط جوش همراه با نمونه‌ای از سطح شکست مرتبط با آزمایش‌های شماره سه و چهار را نمایش می‌دهند؛ همان‌گونه شکل 13-(الف) نمایش می‌دهد، پدیده‌هایی مانند وجود الیاف خالص در سطح شکست و جدایش موضعی قسمتی از لایه صفر درجه در فصل مشترک، نشان‌دهنده میزان نفوذ و یکنواختی بالا در جوش پیوسته فراصوتی آزمایش جوش شماره سه می‌باشد. این مسأله بصورت دقیق‌تری در شکل 14-(ب) که تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ناحیه (a) موجود در شکل 13-(الف) را به تصویر می‌کشد، قابل مشاهده است. در شکل 14-(ب) به دلیل نفوذ بالای جوش و ذوب مناسب پلیمر موجود در کامپوزیت، شرایط برای درهم تنیدگی الیاف و زمینه پلیمری در فصل مشترک صفحات فراهم شده، در نتیجه با حضور الیاف در تحمل بار مکانیکی سبب حضور الیاف در سطح شکست اتصال شده و پدیده‌هایی مانند شکست الیاف و جدایی الیاف از زمینه پلیمری کامپوزیت مشاهده می‌شود.

بیشتر می‌باشد. درحالی که مقدار استحکام برشی در آزمایش شماره پنج در حدود 11MPa و در آزمایش شماره شش برابر 8.7MPa حاصل شده است؛ آنچه که در هر دو شکل 10-(الف) و 10-(ب) یکسان می‌باشد، وجود الیاف همراه با پلیمر در سطح شکست اتصال می‌باشد؛ اما وجود درصد بیشتر الیاف در سطح شکست شکل 10-(الف) (آزمایش پنج) نشان‌دهنده نفوذ بالاتر جوش در این حالت از جوشکاری می‌باشد که این امر، منجر به استحکام برشی بالاتر در آزمایش شماره پنج می‌شود. شکل 11، تصویر میکروسکوپ نوری از سطح شکست موجود در شکل 10-(ب-ب) (آزمایش شش) را نمایش می‌دهد. در شکل 11 وجود نواحی غنی از رزین (پلیمر) و حضور کمتر الیاف در سطح شکست حاکی از عدم ایجاد حرارت کافی در فصل مشترک و ذوب کم عمق پلیمر نسبت به فصل مشترک صفحات می‌باشد. در واقع می‌توان گفت با افزایش فشار جوشکاری از 1 تا 3bar فشار بر کنگی فراصوتی افزایش می‌یابد و ارتعاشات هورن (ابزار جوشکاری) تضعیف می‌شود؛ در نتیجه ارتعاش انتقالی به فصل مشترک صفحات کامپوزیت برای تولید حرارت، کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه، تغییر کمتر مقدار استحکام برشی جوش پیوسته در اثر تغییر فشار می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که با سه برابر شدن فشار جوشکاری استحکام برشی جوش پیوسته حدوداً 21% کاهش می‌یابد؛ این درحالی است که با توجه به نمودار شکل 6 با دو برابر شدن مقدار توان، استحکام برشی حدوداً شش برابر افزایش می‌یابد؛ این مسأله تأثیر گذاری کمتر تغییر فشار نسبت به تغییر توان بر روی استحکام برشی جوش پیوسته را نشان می‌دهد.

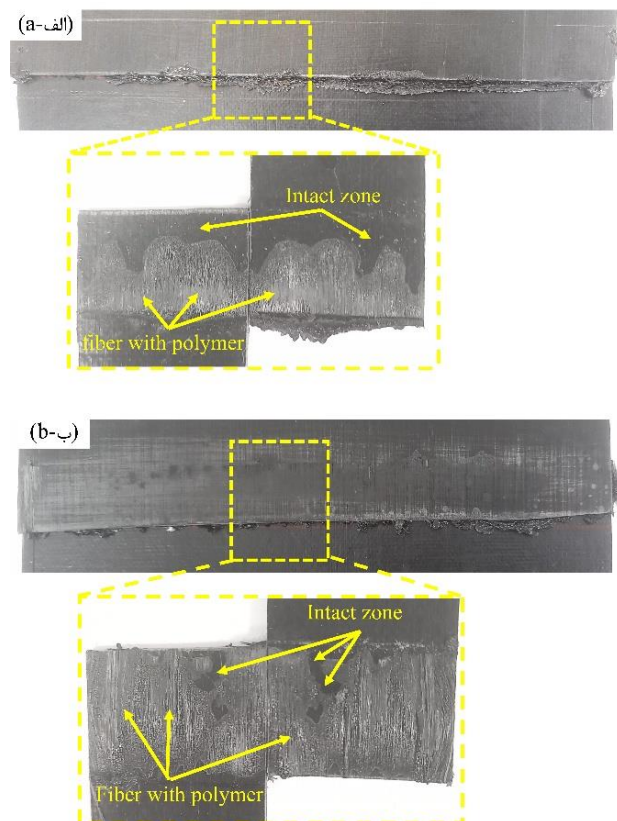


Fig. 10 Weld line and a sample of its fracture surface. (a): Test number five, power 900W, pressure 1bar and speed 20mm/s. (b): Test number six power 900W, pressure 3bar and speed 20mm/sec.

شکل 10 خط جوش و نمونه‌ای از سطح شکست آن: (الف) آزمایش شماره پنج توان 900W، فشار 1bar و سرعت 20mm/s و (ب) آزمایش شماره شش توان 900W، فشار 3bar و سرعت 20mm/sec.

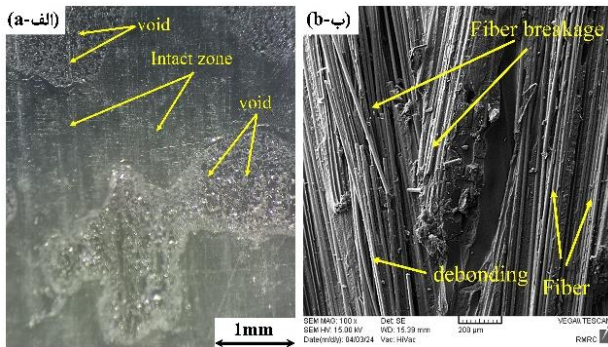


Fig. 14 (a): Optical microscope image of area (b) in figure 13-b. (b): Scanning electron microscope image of area (a) in figure 13-a.

شکل 14 (الف): تصویر میکروسکوپ نوری ناحیه (b) موجود در شکل 13-ب. (ب): تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی ناحیه (a) موجود در شکل 13-الف. (ب): تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی ناحیه (a) موجود در شکل 13-الف.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش با بررسی سه پارامتر اصلی توان، سرعت و فشار در جوش پیوسته فراصوتی کامپوزیت گرمانرم (GF/PA6) تأثیر هر یک از پارامترها بر استحکام برشی جوش، مشخص شد و با استفاده از بررسی سطح شکست اتصالات و تصاویر میکروسکوپی، پدیده‌های مشاهده شده توجیه شدند. در نهایت می‌توان خلاصه نتایج این پژوهش را بصورت ذیل بیان نمود.

- با افزایش توان جوشکاری از 600 به 1200W در شرایطی که سرعت و فشار به ترتیب بر روی 20mm/sec و 2bar تنظیم شوند استحکام برشی جوش از حدود 2 به 14MPa افزایش می‌یابد.
- افزایش توان جوشکاری تا حد بهینه خود، منجر به افزایش حرارت تولیدی در فصل مشترک صفحات کامپوزیت می‌شود؛ در نتیجه با ذوب بیشتر پلیمر، جوشی با نفوذ و استحکام بالاتر ایجاد می‌شود.
- با افزایش سرعت جوشکاری از 10 به 30mm/sec در شرایطی که توان و فشار به ترتیب بر روی 900W و 2bar تنظیم شده‌اند، استحکام برشی جوش پیوسته از حدود 15 به 3.5MPa کاهش می‌یابد.
- افزایش سرعت جوشکاری فرصت انتقال ارتعاشات فراصوتی به داخل مواد کامپوزیت و فصل مشترک صفحات را محدود می‌نماید؛ در نتیجه با افزایش سرعت جوشکاری حرارت کافی به منظور ذوب پلیمر موجود در کامپوزیت، ایجاد نمی‌شود و جوش با نفوذ و استحکام پایین شکل می‌گیرد.
- با افزایش فشار جوشکاری از 1 به 3bar در شرایطی که پارامترهای توان و سرعت بر روی 900W و 20mm/sec تنظیم شده باشند، استحکام برشی جوش پیوسته از حدوداً 11 به 9MPa کاهش می‌یابد.
- افزایش فشار جوشکاری (از 1 تا 3bar) سبب تضعیف ارتعاشات فراصوتی هورن (ابزار جوشکاری) در حین جوشکاری فراصوتی می‌شود. در نتیجه حرارت تولیدی در فصل مشترک صفحات کاهش می‌یابد. در نهایت نفوذ و استحکام جوش پیوسته فراصوتی کاهش می‌یابد.
- در رابطه با میزان اثرگذاری پارامترهای فرآیند در این پژوهش می‌توان گفت توان بیشترین اثرگذاری و فشار کمترین اثرگذاری را داشته است.

در شکل 13-ب (b) وجود مناطق جوش نخورده بسیار زیاد، منجر به عدم یکنواختی جوش پیوسته شماره چهار می‌شود؛ همچنین با توجه به شکل 14-الف (a) که تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه (b) موجود در شکل 13-ب (b) را نمایش می‌دهد، نواحی جوش خورده نیز دارای حفره‌های متعدد می‌باشند که در نهایت منجر به کاهش استحکام برشی در جوش شماره چهار می‌شود. در نتیجه، می‌توان بیان داشت افزایش سرعت پیشروی جوشکاری از 10 به 30mm/sec زمان کافی برای انتقال ارتعاشات فراصوتی به داخل مواد کامپوزیت و فصل مشترک میان آن‌ها را محدود می‌نماید؛ در نتیجه با افزایش سرعت جوشکاری حرارت تولیدی در فصل مشترک، کاهش می‌یابد و همان‌گونه که در شکل‌های 13 و 14 بحث شد، نفوذ و یکنواختی جوش کاهش می‌یابد. در این شرایط الیاف و زمینه پلیمری بخوبی در یکدیگر ادغام نمی‌شوند و استحکام برشی اتصال کاهش می‌یابد. میزان اثرگذاری پارامتر سرعت جوشکاری بر استحکام برشی جوش نسبت به اثرگذاری پارامترهای فشار و توان به ترتیب بیشتر و کمتر می‌باشد؛ به گونه‌ای که با افزایش سه برابری سرعت جوشکاری استحکام برشی جوش حدوداً به یک چهارم مقدار اولیه خود می‌رسد.

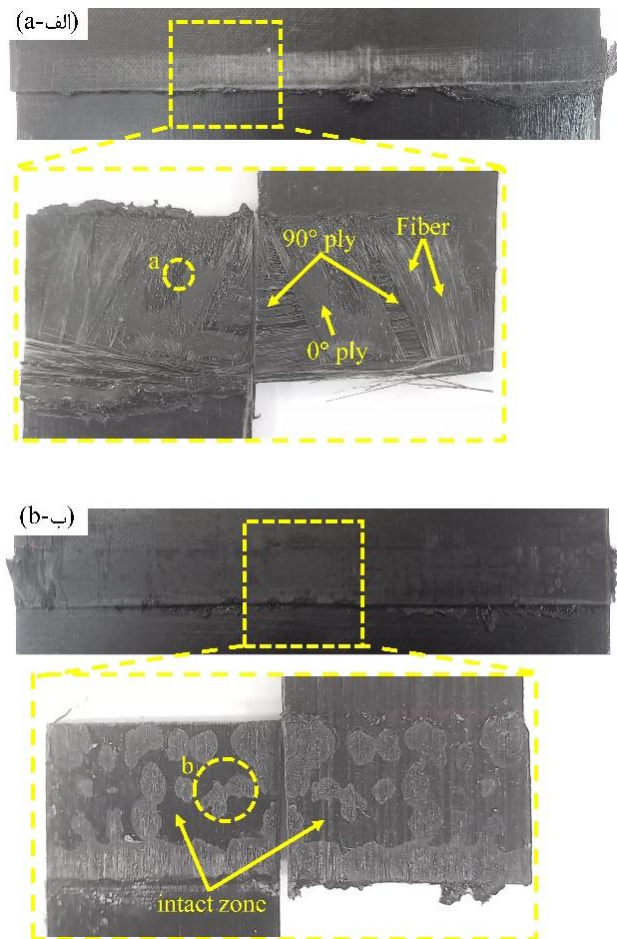


Fig. 13 Weld line and a sample of its fracture surface. (a): Test number three, power 900W, pressure 2bar and speed 10mm/s. (b): Test number four power 900W, pressure 2bar and speed 30mm/sec.

شکل 13 خط جوش و نمونه‌ای از سطح شکست آن. (الف): آزمایش شماره سه توان 900W، فشار 2bar و سرعت 10mm/s. (ب): آزمایش شماره چهار توان 900W، فشار 2bar و سرعت 30mm/sec.

5- تشکر و قدردانی

نویسندگان این پژوهش از مرکز رشد زنده یاد دکتر اردشیرحسن پور، شرکت دانش‌بنیان فراصوت تجهیز ایرانیان (ایران التراسونیک) و شرکت دانش‌بنیان مهندسی پردیس افق برای تأمین سیستم فراصوتی، مواد و تجهیزات ساخت کامپوزیت و همچنین از جناب آقای دکتر محمدرضا کرفی عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت مدرس بابت تأمین منبع تغذیه فراصوتی کمال تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌نمایند.

6- مراجع

- [15] Abedini, R. and SaberJahromi, M., "A review of applications of high power ultrasound technology in medical surgery," In Persian, Journal of Vibration and Sound, Vol. 10, No. 20, pp. 157–173, 2022.
- [16] chen, D. Sharma, S. K and Mudhoo, A., "Handbook on Applications of Ultrasound: Sonochemistry for Sustainability," 1st Edition, Boca Raton, 2011.
- [17] Jongbloed, B. Teuwen, J. Benedictus, R. and Villegas, I. F. "On differences and similarities between static and continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites," Composites Part B: Engineering, Vol. 203, p. 108466, 2020.
- [18] Jongbloed, B. C. P. Teuwen, J. J. E. Benedictus, R. and Villegas, I. F., "A Study on Through-the-Thickness Heating in Continuous Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites," Materials, Vol. 14, No. 21, 2021.
- [19] Villegas, I. F., "In situ monitoring of ultrasonic welding of thermoplastic composites through power and displacement data," Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 28, No. 1, pp. 66–85, 2015.
- [20] Engelschall, M. Larsen, L. Fischer, F. J. C. and Kupke, M. "Robot-based Continuous Ultrasonic Welding for Automated Production of Aerospace Structures _DLR," in SAMPE Europe Conference 2019 Nantes, Nantes, France, Vol. 1 of 2, pp. 273–280, 2021.
- [21] "Welding thermoplastic composites." <https://www.compositesworld.com/articles/welding-thermoplastic-composites>, available May 13, 2024.
- [22] Villegas, I. F. and Rubio, P. V., "On avoiding thermal degradation during welding of high-performance thermoplastic composites to thermoset composites," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 77, pp. 172–180, 2015.
- [23] Palardy, G. and Villegas, I. F., "On the effect of flat energy directors thickness on heat generation during ultrasonic welding of thermoplastic composites." Composite Interfaces, Vol. 24, No.2 pp. 203–214, 2017.
- [24] Lionetto, F. Morillas, M. N. Pappadà, S. Buccoliero, G. Villegas, I. F. and Maffezzoli, A., "Hybrid welding of carbon-fiber reinforced epoxy based composites," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 104, pp. 32–40, 2018.
- [25] Tao, W. Su, X. Wang, H. Zhang, Z. Li, H. and Chen, J., "Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding," Journal of Manufacturing Processes, Vol. 37, pp. 196–202, 2019.
- [26] Jongbloed, B. Teuwen, J. Palardy, G. Villegas, I. F. and Benedictus, R. "Improving weld uniformity in continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites," ECCM 2018 - 18th European Conference on Composite Materials, Vol. 1 of 8, pp. 181–188, 2018.
- [27] Jongbloed, B. Teuwen, J. Villegas, I. F. and Benedictus, R., "Investigation on the melting of the weld interface in continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites," 22th ICCM International Conferences on Composite Materials, 2019.
- [28] Tsiangou, E. de Freitas, S. T. Benedictus, R. and Villegas, I. F., "On the sensitivity of the ultrasonic welding process of epoxy-to polyetheretherketone (PEEK)-based composites to the welding force and amplitude of vibrations," Composites Part C: Open Access, Vol. 5, p. 100141, 2021.
- [29] Jongbloed, B. Vinod, R. Teuwen, J. Benedictus, R. and Villegas, I. F., "Improving the quality of continuous ultrasonically welded thermoplastic composite joints by adding a consolidator to the welding setup," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 155, p. 106808, 2022.
- [30] Ahanpanjeh, M. Fette, M. and Wulfsberg, J. P., "Contribution of Process Parameters to Geometric Deviations of the Robot for Continuous Ultrasonic Welding Process of Thermoplastic Composites," 28th International Conference on Automation and Computing (ICAC), Birmingham, United Kingdom, pp. 1–7. 2023.
- [31] Abedini Nodoushan, M. Abedini, R. and Hashemi, R. "Investigating the strength of the ultrasonic welding of the polyamide 6 continuous fiber glass composite," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 1, pp. 2176–2183, 2023.
- [32] Barkley, K. M. Arner, J. S. Pike, T. A. Diwakar, P. and Birrenkott, C. M. "Correlation of surface and interfacial temperature during
- [1] Yousefpour, A. Hojjati, M. and Immarigeon, J.-P., "Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites," Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 17, No. 4, pp. 303–341, 2004.
- [2] Hosseinkhani, M. Haghighi-Yazdi, M. Mousavi-Mashhadi, M. and Safarabadi, M., "Finite element modeling and experimental investigation of the effect of fiber orientation on viscoelastic behavior of composite laminates reinforced with long fibers," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 248–254, 2019.
- [3] Ozturk, F. Cobanoglu, M. and Ece, R. E., "Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry," Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 0, No. 0, pp. 1–33, 2023.
- [4] Ghorbani, H. Golzar, M. and Behraves, A. H., "Modeling of Impregnation in the Pultrusion of Thermoplastic Composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, vol. 3, no. 1, pp. 31–42, 2016.
- [5] Tutunchi, M. Golzar, M. and Behraves, A. H., "Investigation of thermoplastic pultrusion for tubular product production using prepregs," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 1, pp. 23–32, 2015.
- [6] Bahrami, B. Ayatollahi, M. R. and Beigrezaee, M. J., "Strength improvement by mean of adherend notching and adherend taper in the adhesive single lap joints," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 2, pp. 941–948, 2020.
- [7] Najafi, M. Golzar, M. and Sadeghi, M. "Experimental evaluation of joint strength in polypropylene-glass fiber reinforced composites under tensile load," In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 39–46, 2019.
- [8] Ashofteh, R. S. Pourang, H. Mobasheri, M. and Khoramshad, H., "The Effects of Temperature Level and Stress-to-Strength Ratio on Creep Behavior of Aluminum-Aluminum Single Lap Adhesive Joints," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 353–358, 2018.
- [9] Bhudolia, S. K. Gohel, G. Leong, K. F. and Islam, A., "Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review," Materials, Vol. 13, No. 6, 2020.
- [10] Abedini, R., "A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic in Plastic and Metal Welding," In Persian, Journal of Vibration and Sound, Vol. 10, No. 20, pp. 35–55, 2022.
- [11] Senders, van Beurden, M. Palardy, G. and Villegas, I. F. "Zero-flow: a novel approach to continuous ultrasonic welding of CF/PPS thermoplastic composite plates," Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, Vol. 2, No. 3–4, pp. 83–92, 2016.
- [12] Bose, S. Chelladurai, H. and Ponappa, K. "A review on recent developments in ultrasonic welding of polymers and polymeric composites," Welding in the World, Vol. 68, No. 7, pp. 1881–1903, 2024.
- [13] Abedini, R. Fartashvand, V. Abdullah, A. and Alizadeh, Y. "Evaluation of process parameters and ultrasonic vibration in hot pressing of metal powders," Materials Science and Engineering: B, Vol. 281, p. 115731, 2022.
- [14] Abedini, R. Abdullah, A. Alizadeh, Y. and Fartashvand, V., "A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic Vibrations in Metal Forming," In Persian, Vol. 16, pp. 323–334, 2019.

differential ultrasonic spot welding,” Journal of Advanced Joining Processes, Vol. 7, p. 100142, 2023.

- [33] Jongbloed, B. Teuwen, J. and Villegas, I. F. “On the use of a rounded sonotrode for the welding of thermoplastic composites,” Journal of Advanced Joining Processes, Vol. 7, p. 100144, 2023.