



اثر پارامترها بر استحکام اتصال در جوش پیوسته فراصوتی پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف بافته شده شیشه

محمدعلی زمانی^۱، رضوان عابدینی^{۲*}، هادی قربانی^۳

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- فارغ التحصیل دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: rezvanabedini@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴ دی ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۹ دی ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

جوشکاری پیوسته فراصوتی

کامپوزیت پایه پلیمری

استحکام اتصال

اتصال دهی کامپوزیت های گرماترم بوسیله جوشکاری پیوسته فراصوتی منجر به ایجاد اتصال دهی سریع با قابلیت تحمل بار بالا می شود. این روش در دسته جوشکاری ذوبی قرار می گیرد. رفتار ویسکوالاستیک در مواد پلیمری، بصورت رفتار غالب، در دمای بالاتر از دمای گذار شیشه ای آن ها مشاهده می شود. در این شرایط اعمال ارتعاشات فراصوتی، منجر به ایجاد تلفات ویسکوالاستیک درون ماده می شود و حرارت کافی برای ذوب زمینه پلیمری کامپوزیت را فراهم می آورد. در این پژوهش، جوشکاری پیوسته فراصوتی کامپوزیت پایه پلیمری پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف بافته شده شیشه بصورت تجربی بررسی شده است، ابتدا صفحات کامپوزیتی ساخته و به صفحاتی به ابعاد $101.6 \times 140 \times 1.6$ میلیمتر برش داده شدند، سپس با استفاده از روش جوشکاری پیوسته فراصوتی و با در نظر گرفتن پارامترهای جوشکاری نظیر توان، سرعت و فشار جوش، حالت های مختلف جوشکاری بر روی صفحات کامپوزیت بصورت لبه بر روی لبه انجام شد. در ادامه با محاسبه استحکام برشی اتصالات حاصل، براساس استاندارد موجود و بررسی سطح شکست اتصالات در طول خط جوش، اثر حالت های مختلف جوشکاری بر یکنواختی و استحکام برشی جوش، به منظور رسیدن به جوشی مناسب بررسی شد. در نهایت با تنظیم صحیح پارامترهای فرآیند بر روی مقادیر توان ۱۰۰ درصد، سرعت ۳۰ میلیمتر بر ثانیه و فشار ۰.۸۳ مگاپاسکال جوشی یکنواخت با استحکام ۴ مگاپاسکال حاصل شد.

The effect of parameters on joint strength in continuous ultrasonic welding of polypropylene reinforced with woven glass fibers

Mohammad Ali Zamani¹, Rezvan Abedini^{2*}, Hadi Ghorbani³

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

2- Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- PhD Graduate, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: rezvanabedini@iust.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 3 January 2024

Accepted: 18 January 2024

Keywords:

Continuous Ultrasonic Welding

Polymer Matrix Composite

Joint Strength

Abstract

The joining of thermoplastic composites by continuous ultrasonic welding results in the creation of a fast joint with high load-bearing capability. This method falls into the category of fusion welding. The viscoelastic behavior of polymeric materials becomes dominant at temperatures higher than their glass transition temperature. Under these conditions, the application of ultrasonic vibrations induces viscoelastic losses in the material, generating sufficient heat to melt the polymer matrix of the composite. In this study, the continuous ultrasonic welding of polypropylene reinforced with woven glass fibers was investigated experimentally. Composite plates were fabricated and cut into dimensions of 101.6×140 mm. Subsequently, lap joints were welded using the continuous ultrasonic welding method while considering welding parameters such as power, speed, and welding pressure. Various welding modes were applied to the composite plates. The shear strength of the resulting joints was calculated based on existing standards, and the fracture surfaces along the welding line were examined to evaluate the effect of different welding modes on the uniformity and shear strength of the welds. Finally, by properly setting the process parameters—100% power, a speed of 30 mm/s, and a pressure of 0.83 MPa—an uniform weld with 4 MPa lap shear strength was achieved.

Please cite this article using:

Zamani MA, Abedini R, Ghorbani H. The effect of parameters on joint strength in continuous ultrasonic welding of polypropylene reinforced with woven glass fibers. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Dec 21;11(10):56-65. doi: 10.22034/ijme.2025.493895.2039 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

بدون شک توسعه صنایع هوایی و فضایی در سال‌های اخیر مرهون پیشرفت در فرایندهای ساخت و تولید قطعات فوق سبک از جنس کامپوزیت‌های پایه پلیمری می‌باشد. در این نوع از کامپوزیت‌ها الیاف کربن، شیشه یا کولار به صورت رشته‌های تک جهته، یا بافته شده و غیره به صورت لایه لایه در جهت‌های مختلف در بین زمینه پلیمری قرار می‌گیرند. این مجموعه تشکیل یک قطعه با استحکام بالا (در حدود ۱۰۰ الی ۷۰۰ مگاپاسکال در کامپوزیت‌های گرمانرم الیاف شیشه) نسبت به وزن بسیار پایین (چگالی در حدود ۱۴۰۰ الی $1600 \frac{kg}{m^3}$) آن را می‌دهد [۱]. مزایای فناوری کامپوزیت فوق سبک، موجب رسوخ آن از صنایع با فناوری بالاتر (مانند هوا و هوافضا) به سایر حوزه‌های مهندسی (مانند خودرو، ریلی و حتی لوازم خانگی) شده است.

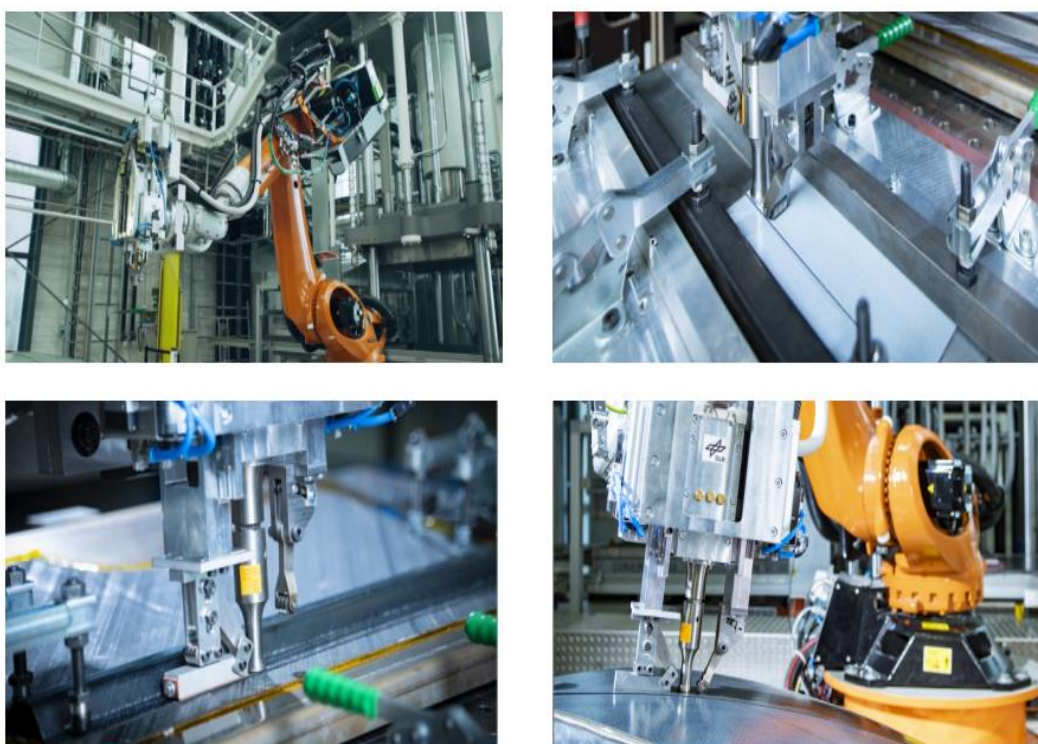
یکی از چالش‌های مهم در این فناوری، فرایند سخت و پیچیده برای ساخت قطعات به ابعاد بزرگتر و شکل‌های پیچیده‌تر می‌باشد. این مساله اغلب موجب افزایش قیمت بسیار بالای قطعات حاصل از این فناوری و یا در برخی موارد عدم امکان فنی ساخت قطعات به روش‌های مرسوم ساخت قطعات کامپوزیت می‌شود. یک راهکار مهم در این رابطه، تغییر طراحی و تبدیل قطعات بزرگ و پیچیده به قطعات کوچکتر می‌باشد. در این صورت اتصال دهی این نوع از کامپوزیت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌شود. به گونه‌ای که استحکام اتصال باید به نحوی باشد که قطعه نهایی کارایی و استحکام مناسبی داشته باشد. به طور معمول از روش‌های مختلف اعم از چسب و حرارت دهی و یا از روش‌های مکانیکی برای اتصال قطعات مختلف به هم استفاده می‌شود [۲]. یک راهکار نوین در سال‌های اخیر برای اتصال قطعات کامپوزیت گرمانرم به یکدیگر، استفاده از فناوری ارتعاشات توان بالای فراصوتی بوده است.

در این فناوری ارتعاشات مکانیکی فراصوتی توان بالا، به ناحیه اتصال دو قطعه کامپوزیت وارد شده و انرژی به صورت حرارت جذب می‌شود. در واقع ابتدا حرارت ناشی از اصطکاک سطحی بین صفحات منجر به افزایش دمای فصل مشترک می‌شود، زمانی که دمای پلیمر کامپوزیت به دمای گذار شیشه‌ای خود رسد، رفتار ویسکوالاستیک بر ماده غالب می‌شود، حرارت ویسکوالاستیک تولیدی در اثر اعمال ارتعاشات فراصوتی بر صفحات، موجب ذوب و اتصال قطعات پلیمری و کامپوزیت‌های گرمانرم به یکدیگر می‌شود [۳-۵]. انجام جوش فراصوتی بصورت پیوسته سبب سرعت بسیار بالا در فرایند مونتاژ قطعات کامپوزیتی و همچنین سبب افزایش تحمل سازه در مقابل بارگذاری خواهد شد. همچنین فرایند جوشکاری پیوسته فراصوتی قابلیت اتوماسیون و پایش برخط را نیز دارا می‌باشد [۶]. در سال‌های اخیر تحقیقات متنوعی در زمینه جوش نقطه‌ای کامپوزیت‌های گرمانرم به یکدیگر، انجام شده است. پالاردی و همکاران [۷] اثر ضخامت در سه لایه هدایت کننده انرژی با ضخامت‌های ۰٫۵، ۰٫۲۵ و ۰٫۰۶ میلی‌متر را در فرایند جوشکاری موضعی فراصوتی بررسی نمودند. با بررسی نمودارهای توان و جابه‌جایی ابزار مشخص شد که در هدایت کننده‌های انرژی با ضخامت بالاتر نمودارهای توان جوشکاری و جابه‌جایی ابزار دچار تاخیر خواهند شد. این پدیده به تحمیل کرنش‌های نوسانی کمتر و به تبع آن کاهش نرخ تولید گرمایش در هدایت کننده انرژی با ضخامت بالاتر نسبت داده شد. درحالی که در هدایت کننده‌های انرژی با ضخامت کمتر به دلیل سرعت انتقال گرمای سریع‌تر و دمای بالاتر، نشانه‌هایی از تخریب زمینه پلیمری کامپوزیت دیده شد که منجر به کاهش کیفیت جوش می‌شود. ژائو و همکاران [۸] بر روی قابلیت حمل بار اتصالات جوش فراصوتی بصورت چند نقطه‌ای و بست‌های مکانیکی پژوهشی انجام دادند؛ نتایج نشان داد که با افزایش تعداد و فاصله جوش‌های فراصوتی نقطه‌ای، اثرات خمش ثانویه این اتصالات بصورت چشمگیری کاهش یافته و قابلیت تحمل بار در این سازه‌ها نسبت به بست‌های مکانیکی بسیار بیشتر خواهد شد.

تسیانگو و همکاران [۹] بر روی میزان حساسیت نیروی جوشکاری و دامنه ارتعاشات فراصوتی بر جوشکاری موضعی فراصوتی کامپوزیت‌های غیر مشابه پلی اتر کتون تقویت شده با الیاف کربن و کربن اپوکسی بوسیله لایه واسط پلیمری از جنس پلی اتر ایمید پژوهشی انجام دادند؛ نتایج نشان داد با کاهش نیروی جوشکاری و دامنه ارتعاشات فراصوتی، زمان گرمایش و بیشینه دمای بین کربن اپوکسی و لایه واسط پلیمری افزایش خواهد یافت. برخی نواحی موضعی کربن اپوکسی دچار آسیب حرارتی شدند که درکل این آسیب بر روی استحکام برشی اتصال تاثیر زیادی نداشت. ژائو و همکاران [۱۰] تاثیر استفاده از ابزار با شکل‌های مختلف و کنترل فرایند به منظور بهبود کیفیت جوشکاری موضعی فراصوتی پلیمرهای گرمانرم تقویت شده با الیاف کربن را بررسی نمودند و نتایج نشان داد که افزایش اندازه هورن (ابزار) تاثیر قابل توجهی بر افزایش کیفیت جوشکاری فراصوتی موضعی خواهد داشت. صادقی و همکاران [۱۱] در پژوهشی تاثیر جریان الکتریکی مصرفی را در حین جوشکاری فراصوتی نقطه‌ای کامپوزیت شیشه/ پلی آمید ۶ همراه با هدایت کننده انرژی، بررسی نمودند؛ صادقی و همکاران در این پژوهش با بررسی نمودارهای جریان مصرفی منبع تغذیه فراصوتی در حین زمان

جوشکاری دریافتند، شرط لازم برای ایجاد جوش با کیفیت ذوب کامل هدایت کننده انرژی همراه با ذوب لایه سطحی نمونه‌های کامپوزیت که در تماس با فصل مشترک هستند و عدم تغییر راستای الیاف می‌باشد. تیربند و همکاران [۱۲] با هدف افزایش چسبندگی سطح اتصال، در جوشکاری نقطه‌ای فراصوتی کامپوزیت‌های گرماسخت، از یک لایه پلیمری گرمانرم از جنس پلی پروپیلن در میان همپوشانی نمونه‌های کامپوزیتی استفاده نمودند. در واقع به علت قابلیت ذوب لایه پلیمری گرمانرم جوش پذیری کامپوزیت‌های گرماسخت حاصل می‌شود. تیربند و همکاران بوسیله اشعه لیزر الگوهای هندسی مختلفی بر روی سطح تماس نمونه‌ها پیش از انجام جوشکاری ایجاد نمودند، این مساله منجر به افزایش قابلیت چسبندگی پلیمر گرمانرم به کامپوزیت گرماسخت شد. صادقی و همکاران [۱۳] با اجرای جوشکاری فراصوتی موضعی بر روی دو نوع چندلایه کامپوزیتی متفاوت، تحت لایه چینی $[0/90/0/0]_s$ و $[0/90/-45/+45/90/0]_s$ دریافتند که وجود لایه صفر درجه در تماس با فصل مشترک در لایه چینی $[0/90/-45/+45/90/0]_s$ منجر به افزایش حدوداً دو برابری استحکام جوش، نسبت به جوشکاری نمونه‌ها با لایه چینی $[90/90/0/0]_s$ می‌شوند. نجفی و همکاران [۱۴] اتصال دهی کامپوزیت شیشه/پلی پروپیلن را بوسیله سه روش جوشکاری فراصوتی موضعی، اتصال پیچی و عملیات پرس گرم، بررسی نمودند، نتایج یافته‌های آن‌ها نشان داد که اتصالات حاصل از روش جوش موضعی فراصوتی و عملیات پرس گرم به ترتیب ۴ و ۱٫۵ برابر استحکام حاصل از اتصال پیچی می‌باشد.

روش جوش نقطه‌ای فراصوتی اگر چه مزایای زیادی دارد اما قابلیت اتوماسیون آن برای لایه نشانی و تولید قطعات بزرگ کامپوزیتی پایین است. امروزه روش‌های متنوعی اعم از لیزر، امواج فرابنفش و اعمال حرارت مستقیم برای جوش پیوسته لایه‌های کامپوزیت پیش آغشته (پریپرگ) در حال توسعه است. جوش پیوسته فراصوتی یکی از فناوری‌های مورد توجه محققان بوده است. در این فناوری، همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، مجموعه توان بالای فراصوتی به یک مکانیزم کنترل کامپیوتری (CNC) و یا ربات متصل شده و با موقعیت دهی و اعمال فشار توسط ربات، انرژی فراصوتی به طور پیوسته به ناحیه تماس دو قطعه کامپوزیت وارد می‌شود.



شکل ۱ جوشکاری پیوسته فراصوتی بوسیله ربات [۱۹]

در این زمینه سندرز و همکاران [۱۵] با استفاده از یک لایه هدایت کننده انرژی به ضخامت ۰٫۰۸ میلی‌متر در جوشکاری پیوسته فراصوتی پلی فنیلن سولفید تقویت شده با الیاف کربن، سبب حذف پدیده جریان ناخواسته مذاب، در حین جوشکاری پیوسته فراصوتی

شدند. جنگ بلود و همکاران [۱۶] با استفاده از یک صفحه مشبک پلیمری به عنوان هدایت کننده انرژی در جوشکاری پیوسته فراصوتی، یکنواختی ذوب هدایت کننده انرژی را در فصل مشترک افزایش دادند که در نهایت جوشی با استحکام و یکنواختی بالاتر حاصل شد. جنگ بلود و همکاران [۱۷] با افزودن یک کفشک اعمال فشار پس از جوشکاری پیوسته فراصوتی کامپوزیت‌ها و بررسی پارامترهایی نظیر ابعاد کفشک، فشار کفشک و فاصله کفشک تا ابزار ارتعاشی سبب افزایش استحکام جوش شدند. در مرجع [۱۸] به تاثیر پارامترهای اصلی فرایند جوشکاری پیوسته فراصوتی یعنی توان، سرعت و فشار جوش، در جوشکاری کامپوزیت الیاف تک جهته شیشه/پلی آمید۶ پرداخته‌ایم، نتایج نشان داد که پارامتر توان جوشکاری بیشترین تاثیر و پارامتر فشار کمترین تاثیر را بر استحکام جوش پیوسته فراصوتی دارد. در این پژوهش هدف بررسی پارامترهای فرایندهای جوشکاری پیوسته فراصوتی مانند توان، سرعت و فشار جوشکاری، بافته شده شیشه می‌باشد؛ در واقع با بررسی پارامترهای فرایندهای جوشکاری پیوسته فراصوتی مانند توان، سرعت و فشار جوشکاری، هدف رسیدن به یک جوش مناسب و یکنواخت در کامپوزیت دارای الیاف بافته شده می‌باشد.

۲- روش تحقیق

نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق از جنس پلیمر پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف بافته شده شیشه به ابعاد ۱۴۰ در ۱۰۱،۶ میلی‌متر و ضخامت ۱،۵ میلی‌متر بوده و دارای هم پوشانی ۱۲،۷ میلی‌متر به منظور جوشکاری می‌باشند. شکل ۲ نشان‌دهنده چیدمان جوشکاری پیوسته فراصوتی و صفحات کامپوزیت قرار گرفته شده در سیستم گیره‌بندی می‌باشد. برای جوش پیوسته فراصوتی، یک چیدمان برای موقعیت‌دهی مجموعه ارتعاشی فراصوتی و قطعه کار و همچنین حرکت خطی ابزار جوش فراصوتی نسبت به قطعه کار توسعه داده شده است. برای اعمال ارتعاشات از ترنسدیوسر و منبع تغذیه فراصوتی با توان نامی ۲ کیلووات و فرکانس رزونانس ۲۰ کیلوهرتز بهره گرفته شده است. قابلیت تنظیم توان از روی پنل منبع تغذیه موجود می‌باشد. همچنین امکان کنترل سرعت خطی از طریق سیستم کنترل موتور استپ، محرک مجموعه فراهم شده است. نیروی جوشکاری توسط یک جک نیوماتیکی با قابلیت تنظیم فشار بین ۰،۵ الی ۶ بار تامین می‌شود. در این پژوهش با انجام چهار حالت جوشکاری مختلف و بررسی سه پارامتر سرعت، توان و فشار جوش در نهایت یک جوش مستحکم با یکنواختی مناسب حاصل شد. جدول ۱ نشان‌دهنده پارامترهای جوشکاری انجام شده می‌باشد.

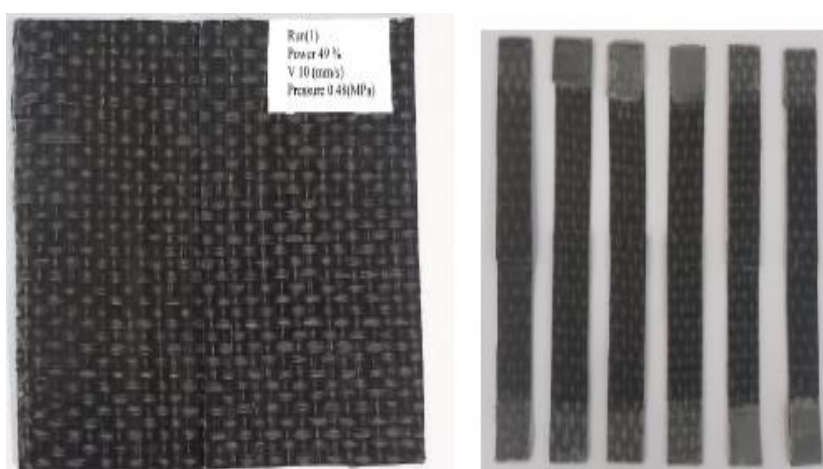


شکل ۲ چیدمان انجام آزمایش جوشکاری پیوسته فراصوتی مواد کامپوزیتی، (الف) کلگی فراصوتی، (ب) گیره بندی صفحات کامپوزیت بوسیله روبنده‌ها و تماس هورن (ابزار جوشکاری) با آن‌ها

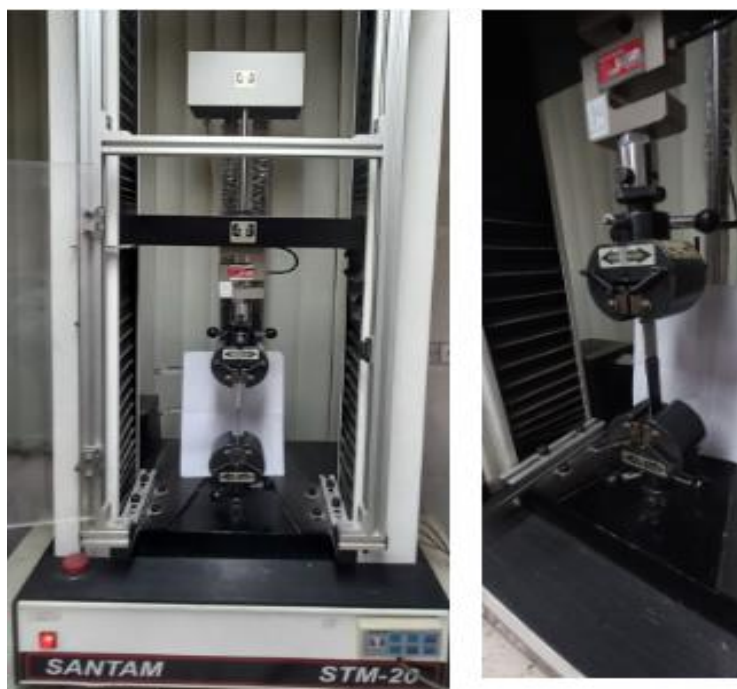
جدول ۱ مقادیر انتخابی پارامترهای موثر فرایند

شماره آزمایش	توان (% Power)	سرعت (mm/sec)	فشار (MPa)
۱	۴۹	۱۰	۰،۴۸
۲	۷۰	۳۰	۰،۵۶
۳	۷۰	۵	۰،۵۶
۴	۱۰۰	۳۰	۰،۸۳

مطابق شکل ۳، پس از انجام حالت‌های مختلف جوشکاری، صفحات کامپوزیتی به نمونه‌های استاندارد با عرض ۲۰ میلی‌متر در راستای عمود بر خط جوش بریده شدند. طبق استاندارد ASTM D1002 آزمون استحکام برشی اتصال لبه بر روی لبه^۱، برای نمونه‌های جوش داده شده با سرعت جابه‌جایی فک ۱،۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد [۲۰]؛ نتایج نیروی کشش و جابجایی فک‌ها توسط سنسورهای دستگاه، ذخیره شده و در نهایت نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون کشش رسم گردید. شکل ۴ نشان دهنده نمونه جوش فراصوتی پیوسته کامپوزیت تحت آزمون برش لبه بر روی لبه در دستگاه کشش می‌باشد. با محاسبه نیرو شکست اتصال در نمونه‌های متشکل از صفحات جوش داده شده برش یافته و تقسیم آن بر مساحت همپوشانی (۷،۱۲mm×۲۰mm) استحکام برشی اتصال در نواحی مختلف خط جوش حاصل می‌شود؛ به منظور محاسبه استحکام برشی لبه بر روی لبه جوش پیوسته فراصوتی، میانگین چهار استحکام بدست آمده در طول خط جوش، به عنوان استحکام جوش پیوسته گزارش می‌شود. در ادامه با بررسی سطح شکست اتصالات و مقایسه استحکام اتصال بدست آمده، در رابطه با کیفیت جوش حاصله، یکنواختی آن و اثر پارامترهای مختلف بر روی آن، بحث خواهد شد.



شکل ۳ نمونه دو صفحه کامپوزیتی جوش داده شده و برش صفحات پس از جوش به ابعاد استاندارد



شکل ۴ آزمون برش لبه بر روی لبه نمونه جوش فراصوتی پیوسته کامپوزیت توسط دستگاه ۲۰ تن سنتام

^۱ Lap Shear Strength Test

۳- نتایج و بحث

با انجام آزمایش استحکام برشی بر روی نمونه‌های جوش داده شده بوسیله دستگاه کشش سنتام (SANTAM-STM 20) نتایج استحکام برشی حالات مختلف جوشکاری، در جدول ۲ بدست آمد.

جدول ۲ استحکام برشی حالات مختلف جوشکاری پیوسته فراصوتی کامپوزیت

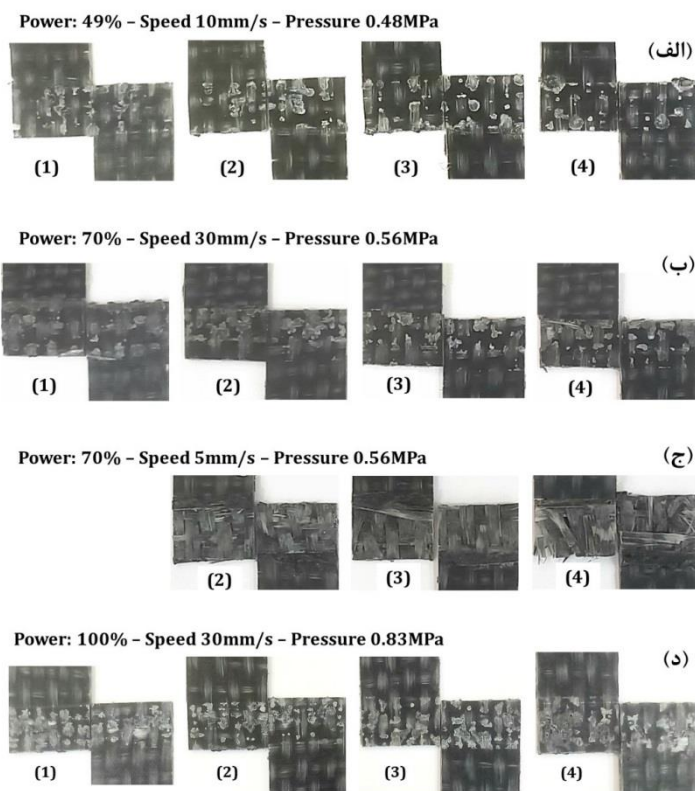
شماره آزمایش	استحکام برشی اتصال (MPa)	انحراف معیار (MPa)
۱	۲,۱۷	۰,۴۴
۲	۱,۹۷	۰,۴۴
۳	۶,۸۶	۳,۰۷
۴	۴,۱۴	۰,۶۹

پس از شکست نمونه‌ها، سطح شکست در محل جوش بررسی شد؛ همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، سطح شکست اتصال در چهار حالت مورد بررسی، هرکدام در چهار قسمت، در طول خط جوش نمایش داده شده است. شکل ۵-الف نمایانگر جوشکاری با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه، توان ۴۹ درصد و فشار جوش ۰,۴۸ مگاپاسکال می‌باشد که در نهایت استحکام برشی میانگین ۲,۱۴ مگاپاسکال را نتیجه داد؛ همانگونه که در شکل ۵-الف نشان داده شده است، در این حالت میزان جوش خوردگی سطوح کم می‌باشد در نتیجه می‌توان با تغییر پارامترهای جوشکاری استحکام حاصله را افزایش داد. شکل ۵-ب نشان دهنده سطوح شکست جوش حاصله با سرعت ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه، توان ۷۰ درصد و فشار جوش ۰,۵۶ مگاپاسکال می‌باشد که در نهایت استحکام میانگین ۱,۹۷ مگاپاسکال را نتیجه داد. در شکل ۵-ب با افزایش سرعت، توان و فشار جوشکاری، میزان یکنواختی جوش نسبت به شکل ۵-الف بهبود یافت و این مساله سبب پراکندگی کمتر استحکام جوش در قسمت‌های مختلف خط جوش شد؛ اما استحکام حاصله با استحکام بدست آمده در شکل ۵-الف تفاوت زیادی ندارد.

در شکل ۵-ج سطوح شکست ناشی از جوشکاری با سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه، توان ۷۰ درصد و فشار جوش ۰,۵۶ مگاپاسکال حاصل شده است که منجر به استحکام میانگین ۶,۸۶ مگاپاسکال شده است؛ در این حالت با ثابت نگه داشتن توان و فشار جوشکاری نسبت به حالت ب و کاهش سرعت جوشکاری از ۳۰ به ۵ میلی‌متر بر ثانیه سبب می‌شود که ابزار، مدت زمان بیشتری بر روی مناطق مختلف در طول خط جوش حضور داشته باشد و انرژی بیشتری به فصل مشترک دو صفحه کامپوزیتی برسد، در نتیجه میزان ذوب پلیمر موجود در زمینه کامپوزیت افزایش می‌یابد. در ادامه امکان ادغام پلیمرهای صفحات کامپوزیتی در بالا و پایین فصل مشترک جوشکاری افزایش می‌یابد، در نهایت جوشی با نفوذ، یکنواختی و استحکام بالا ایجاد می‌شود. این مساله بخوبی در شکل ۵-ج نمایش داده شده است، زیرا جدایی الیاف از زمینه پلیمری خود پس از شکست، در فصل مشترک جوش، حکایت از نفوذ مناسب پلیمر صفحات کامپوزیتی در داخل یکدیگر دارد، در حالی که در حالت‌های الف و ب سطح شکست اتصالات از نفوذ کم پلیمر در بین دو صفحه کامپوزیتی خبر می‌دهد. بالا بودن پراکندگی استحکام در مناطق چهارگانه مختلف حالت ج، می‌تواند به دلیل پایین بودن سرعت جوش باشد، زیرا در این حالت با توجه به رسیدن مقدار زیاد انرژی در فصل مشترک جوشکاری، زمینه پلیمری کامپوزیت در برخی مناطق در امتداد خط جوشکاری، تبخیر می‌شود. این مساله سبب می‌شود در مناطقی که تبخیر موضعی پلیمر در آن‌ها اتفاق افتاده است، استحکام کمتری را نشان دهند و در کل پراکندگی نتایج در این حالت افزایش یابد (انحراف معیار ۳,۰۷ مگاپاسکال). مساله ورود انرژی بیش از حد در حین جوشکاری فراصوتی، تبخیر زمینه پلیمری و کاهش استحکام جوش در اثر آن، در پژوهش‌های عابدینی ندوشن و همکاران نیز مشاهده شده است [۲۱].

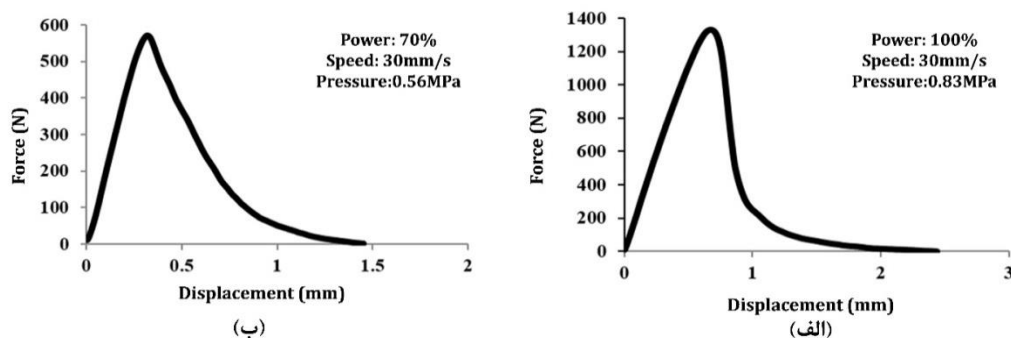
به منظور کاهش پراکندگی داده‌های استحکام در قسمت‌های مختلف خط جوش، حالت د بررسی شد. در این حالت سرعت جوشکاری ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه، توان جوش برابر با ۱۰۰ درصد و فشار جوشکاری ۰,۸۳ مگاپاسکال تنظیم شد، در واقع در حالت د برای جلوگیری از پدیده تبخیر موضعی پلیمر در حین جوشکاری، سرعت جوشکاری از ۵ به ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه افزایش یافت و در مقابل برای جبران کاهش انرژی رسیده شده در فصل مشترک جوشکاری (به دلیل افزایش سرعت جوشکاری)، توان جوشکاری در این حالت افزایش داده شد و بر روی مقدار ۱۰۰ درصد تنظیم شد؛ همچنین برای ایجاد یک تماس مناسب در فصل مشترک جوش، نفوذ

پلیمر کامپوزیت بالایی و پایینی در یکدیگر نیاز می‌باشد، که این مساله با افزایش فشار جوشکاری از مقدار ۰,۵۶ مگاپاسکال در حالت ج به مقدار ۰,۸۳ مگاپاسکال در حالت د لحاظ شده است. با توجه به مطالب بیان شده در رابطه با جوشکاری حالت د، جوش حاصله همانگونه که در شکل ۵-د نمایش داده شده است، یک جوش با یکنواختی و نفوذ مناسب می‌باشد، به گونه‌ای که انرژی ارتعاشات فراصوتی بصورت مناسب و با مقدار کافی در فصل مشترک جوش توزیع شده است و بدون آنکه زمینه پلیمری ماده کامپوزیت در سطح و فصل مشترک جوش تبخیر شود، جوش یکنواخت با پراکندگی کم (انحراف معیار ۰,۶۹ مگاپاسکال) حاصل شده است.

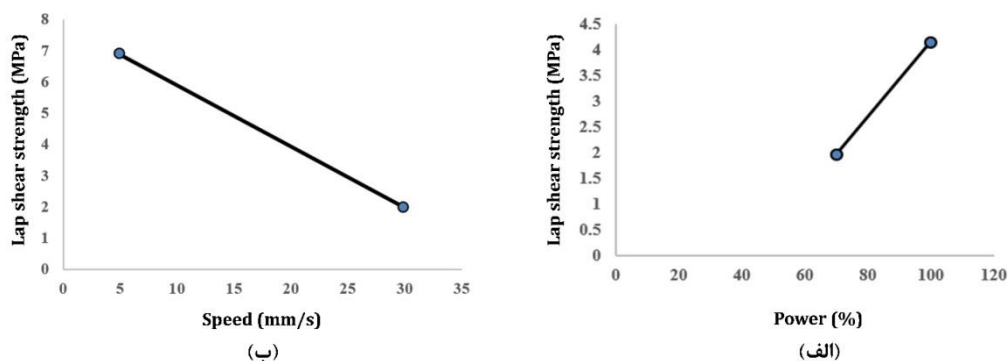


شکل ۵ سطوح شکست اتصالات جوش داده شده در طول خط جوش شکل الف، ب، ج و د) به ترتیب سطوح شکست مرتبط با حالت‌های جوشکاری ۱ تا ۴ بیان شده در جدول ۱

شکل ۶ نمودار نیرو- جابه‌جایی حاصل از تست برش لبه بر روی لبه کامپوزیت‌های جوش داده شده در آزمایش‌های شماره ۲ و ۴ را نمایش می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش توان جوشکاری از ۷۰ درصد به ۱۰۰ درصد مقدار بیشینه باری که اتصال قابلیت تحمل آن را دارد از ۵۶۵ نیوتن به ۱۳۲۳,۴ نیوتن افزایش می‌یابد، در نتیجه می‌توان گفت میانگین استحکام برشی اتصال در این حالت از ۱,۹۷ مگاپاسکال به ۴,۱۴ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. شکل ۷-الف هم نشان دهنده اثر افزایش توان جوشکاری پیوسته بر استحکام برشی اتصال می‌باشد.

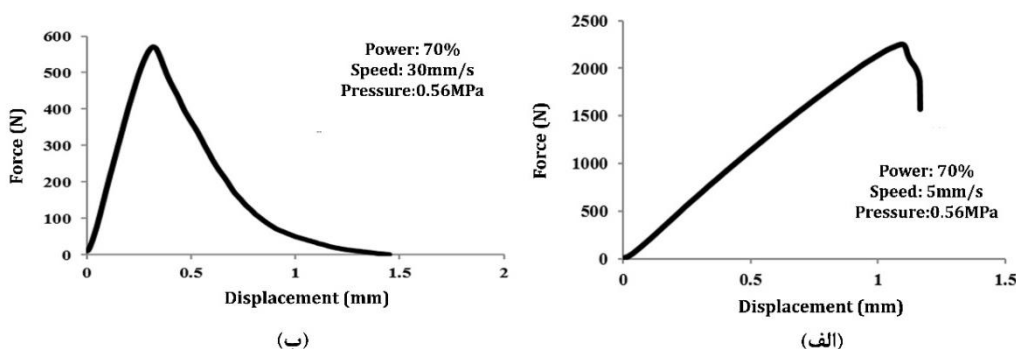


شکل ۶ نمودارهای نیرو-جابه‌جایی حاصل از آزمون استحکام برشی لبه بر روی لبه نمونه‌های جوشکاری پیوسته فراصوتی براساس الف) آزمایش ۴ و ب) آزمایش ۲



شکل ۷ نمودار ارتباط میان پارامترهای توان و سرعت جوشکاری بر استحکام برشی جوش، الف) نمودار استحکام برشی بر حسب توان جوشکاری و ب) نمودار استحکام برشی بر حسب سرعت جوشکاری

همان گونه که شکل ۸ نمایش می دهد با کاهش سرعت جوشکاری، از ۳۰ به ۵ میلی متر بر ثانیه بیشینه نیروی قابل تحمل اتصال از ۵۲۹ نیوتن به ۲۱۹۲ نیوتن افزایش یافته است در نتیجه، با توجه به آنکه هم پوشانی نمونه های برش داده شده برابر با ۷،۱۲mm×۲۰mm می باشد، براساس نمودار شکل ۷-ب می توان گفت که استحکام برشی میانگین جوش پیوسته از ۱،۹۷ مگاپاسکال به ۶،۸۶ مگاپاسکال افزایش یافته است. با بررسی سطوح شکست اتصالات حاصل از جوش پیوسته فراصوتی پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف بافته شده شیشه و تاثیر پارامترهای سرعت و توان جوشکاری بر استحکام جوش در این پژوهش، در انتها می توان بیان داشت که پارامترهای جوشکاری آزمایش شماره ۴ (یعنی توان ۱۰۰ درصد، سرعت ۳۰ میلی متر بر ثانیه و فشار ۰،۸۳ مگاپاسکال) منجر به ایجاد جوش با یکنواختی و نفوذ نسبتا مناسب می شود، که در آن پدیده تبخیر موضعی پلیمر در هم پوشانی صفحات کامپوزیت مشاهده نمی شود و استحکام برشی میانگین برابر با ۴ مگاپاسکال را نتیجه می دهد.



شکل ۸ نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمون استحکام برشی لبه بر روی لبه نمونه های جوشکاری پیوسته فراصوتی براساس الف) آزمایش ۳ و ب) آزمایش

۲

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر اثر توان ارتعاشات فراصوتی و سرعت جوشکاری بر استحکام اتصال، در جوش پیوسته فراصوتی کامپوزیت از جنس پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف بافته شده شیشه، مورد بررسی قرار گرفته است. به طور خلاصه نتایج ذیل حاصل شده است:

- با افزایش ۴۰ درصدی در توان ارتعاشات و به تبع آن انرژی ورودی به ناحیه اتصال، استحکام برشی اتصال حدودا دو برابر، افزایش می یابد.
- با کاهش ۸۰ درصدی در سرعت پیشروی، زمان طولانی تری برای ورود انرژی بیشتر به ناحیه اتصال فراهم می شود، در نتیجه ناحیه اتصال گسترش می یابد و استحکام اتصال حدودا ۳،۵ برابر، افزایش می یابد.
- کاهش بیش از حد در سرعت پیشروی سبب ورود بیش از حد انرژی در فصل مشترک بین دو صفحه می شود و منجر به تبخیر زمینه پلیمری کامپوزیت می شود، در نتیجه پراکندگی داده های استحکام بدست آمده، افزایش می یابد.

تقدیر و تشکر

محققان پژوهش، کمال تشکر و قدردانی خود را از شرکت دانش بنیان فراصوت تجهیز ایرانیان و مهندسی پردیس افق، جهت همکاری در زمینه تجهیزات جوش فراصوتی پلیمرها و تامین مواد اولیه کامپوزیت دارند.

References

- [1] Shah DU. Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts. *Materials & Design* (1980-2015). 2014 Oct 1;62:21-31. doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.002
- [2] Melese KG, Naik TP, Gairola S, Singh I. Joining techniques for polymer matrix composites. In *Joining Processes for Dissimilar and Advanced Materials 2022* Jan 1 (pp. 11-32). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-323-85399-6.00001-1
- [3] Tutunjian S, Eroglu O, Dannemann M, Modler N, Fischer F. A numerical analysis of an energy directing method through friction heating during the ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2020 Nov;33(11):1569-87. doi: 10.1177/0892705719833108
- [4] Yousefpour A, Hojjati M, Immarigeon JP. Fusion bonding/welding of thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic composite materials*. 2004 Jul;17(4):303-41. doi: 10.1177/0892705704045187
- [5] Levy A, Le Corre S, Villegas IF. Modeling of the heating phenomena in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014 Jul 1;214(7):1361-71. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.02.009
- [6] Villegas IF. In situ monitoring of ultrasonic welding of thermoplastic composites through power and displacement data. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2015 Jan;28(1):66-85. doi: 10.1177/0892705712475015
- [7] Palardy G, Villegas IF. On the effect of flat energy directors thickness on heat generation during ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Composite Interfaces*. 2017 Feb 12;24(2):203-14. doi: 10.1080/09276440.2016.1199149
- [8] Zhao T, Tsakoniatis I, Rans C, Villegas IF, Benedictus R. Multi-spot ultrasonic welding of thermoplastic composite single-lap joints: Effect of spot spacing and number of spots on weld strength. In *Proceedings of the 18th European Conference on Composite Materials 2018*.
- [9] Tsiangou E, de Freitas ST, Benedictus R, Villegas IF. 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*. 2021 Jul 1;5:100141. doi: 10.1016/j.jcomc.2021.100141
- [10] Zhao T, Zhao Q, Wu W, Xi L, Li Y, Wan Z, Villegas IF, Benedictus R. Enhancing weld attributes in ultrasonic spot welding of carbon fibre-reinforced thermoplastic composites: Effect of sonotrode configurations and process control. *Composites Part B: Engineering*. 2021 Apr 15;211:108648. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108648
- [11] Sadeghi M, Golzar M, Akbari D, Karafi MR. Ultrasonic welding of composite laminate GF/PA6: Weldability and weld quality by current and strength. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2024 Feb 13:07316844241232188. doi: 10.1177/07316844241232188
- [12] Tirband H, Akbari D, Golzar M. Investigation of the ultrasonic welding strength in glass fiber reinforced thermoset polymers with surface preparation method using laser beam. *Journal of Welding Science and Technology of Iran*. 2021 Aug 10;7(1):97-106. [In Persian]
- [13] Sadeghi M, Golzar M, Akbari D, Karafi MR. Experimental investigation of the effect of ultrasonic welding parameters on the strength and weldability of GF/PA6 thermoplastic composites. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Jul 23;10(5):44-56. doi: 10.22034/ijme.2023.415429.1827 [In Persian]
- [14] Najafi M, Golzar M, Sadeghi M. Experimental evaluation of joint strength in polypropylene-glass fiber reinforced composites under tensile load. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 May 22;6(2):39-46.. [In Persian]
- [15] Senders F, van Beurden M, Palardy G, Villegas IF. Zero-flow: A novel approach to continuous ultrasonic welding of CF/PPS thermoplastic composite plates. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*. 2016 Oct 1;2(3-4):83-92. doi: 10.1080/20550340.2016.1253968
- [16] Jongbloed B, Teuwen J, Palardy G, Fernandez Villegas I, Benedictus R. Continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites: Enhancing the weld uniformity by changing the energy director. *Journal of Composite Materials*. 2020 Jun;54(15):2023-35. doi: 10.1177/0021998319890405
- [17] Jongbloed B, Vinod R, Teuwen J, Benedictus R, Villegas IF. 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*. 2022 Apr 1;155:106808. doi: 10.1016/j.compositesa.2022.106808

- [18] Zamani MA, Abedini R, Ghorbani H. The effect of main parameters on strength in continuous ultrasonic welding of thermoplastic composite polyamide 6 reinforced with continuous glass fibers. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2024;11(2):2490-500. doi: [10.22068/jstc.2024.2035264.1891](https://doi.org/10.22068/jstc.2024.2035264.1891) [In Persian]
- [19] Engelschall M, Larsen LC, Fischer F, Kupke M. Robot-based continuous ultrasonic welding for automated production of aerospace structures. SAMPE Europe Conference 2019, 2019 Sep 17-19; Nantes, Frankreich.
- [20] ASTM D1002. Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal). *Annual Book of ASTM Standards*. 2010.
- [21] Abedini Nodoushan M, Abedini R, Hashemi R. Investigating the strength of the ultrasonic welding of the polyamide 6 continuous fiber glass composite. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2023;10(1):2176-83. doi: [10.22068/jstc.2023.2002326.1836](https://doi.org/10.22068/jstc.2023.2002326.1836) [In Persian]