



نشریه علمی پژوهشی
کامپوزیت علوم و فناوری
<http://jstc.iust.ac.ir>



بررسی استحکام اتصال جوش فراصوتی کامپوزیت الیاف ممتد شیشه پلی آمید 6

مجتبی عابدینی ندوشن¹، رضوان عابدینی^{2*}، رامین هاشمی³

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

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

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

چکیده	اطلاعات مقاله
کامپوزیت‌های الیاف ممتد نسبت به کامپوزیت‌های الیاف کوتاه عملکرد مکانیکی بالاتری دارند به همین سبب به‌طور قابل توجهی در صنایع هوایی تولید و استفاده می‌شوند. یکی از روش‌های نوین اتصال کامپوزیت‌ها جوش فراصوتی (التراسونیک) می‌باشد. در این فرآیند با اعمال ارتعاشات توان بالا (100 الی 2000 وات) و فرکانس بالا (15 تا 100 کیلوهرتز) به محل اتصال دو قطعه، حرارت در محل اتصال ایجاد و باعث چسبیدن دو قطعه به هم می‌شود. در این تحقیق به بررسی پارامترهای اتصال جوش فراصوتی کامپوزیت شیشه پلی آمید 6، تأثیر فیلم لایه واسط و جهت الیاف در استحکام اتصال پرداخته شده است و در انتها اتصال جوش فراصوتی با اتصال چسبی مقایسه شده است. در بررسی اتصال به‌صورت اتصال لبه روی هم، نمونه‌ها با توجه به استاندارد ASTM D5868 برش خوردند و پس از جوشکاری فراصوتی تحت آزمون کشش-برش قرار گرفتند. با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی متوسط برای زمان، فشار و توان مشاهده شد استفاده از یک‌لایه فیلم پلیمر خالص به‌عنوان فیلم لایه واسط استحکام جوش را افزایش می‌دهد. با تغییر جهت الیاف تمامی لایه‌ها به‌اندازه 90 درجه، استحکام جوش مقداری کاهش و مقدار بیرون‌زدگی پلیمر و الیاف بیشتر شد و کیفیت ظاهری کاهش یافت. در مقایسه اتصال جوش با اتصال چسب، مقدار استحکام جوش بالاتر از استحکام اتصال چسب بود و همچنین زمان صرف شده در اتصال جوش بسیار کمتر از زمان صرف شده در اتصال چسبی بوده است.	دریافت: 1402/03/01 پذیرش: 1402/05/02 کلیدواژه‌ها: جوش فراصوتی کامپوزیت شیشه پلی آمید 6 کامپوزیت ترموپلاست جوش التراسونیک اتصال دهی کامپوزیت ترموپلاست اتصال لبه روی هم کامپوزیت الیاف ممتد (پیوسته)

Investigating the strength of the ultrasonic welding of the polyamide 6 continuous fiber glass composite

Mojtaba Abedini Nodoushan, Rezvan Abedini*, Ramin Hashemi

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

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

Keywords

Ultrasonic welding,
Composites,
Polyamide 6 glass fiber,
Lap shear joint,
Continuous fiber glass composite

Abstract

Composites of continuous fibers have higher mechanical performance than short fibers, which is why they are produced and used significantly in the aviation industry. One of the new methods of joining composites is ultrasonic welding. In this process, by applying high power (100 to 2000 watts) and high frequency (15 to 100 kHz) vibrations to the joint of two parts, heat is generated in the joint and causes the two parts to stick together. In this research, the parameters of the ultrasonic welding of polyamide 6 glass composite, the effect of the interlayer film, and the direction of the fibers on the strength of the connection have been investigated. Ultimately, the ultrasonic welding connection has been compared with the adhesive bond. In examining the connection as an edge-to-edge connection, the samples were cut according to ASTM D5868 standard and subjected to a tensile-shear test after ultrasonic welding. Considering the average input parameters for time, pressure, and power, it was observed that using a pure polymer film layer as the interlayer film increases the welding strength. By changing the direction of the fibers of all layers by 90 degrees, the welding strength decreased a little. The amount of polymer and fiber protrusion increased, and the appearance quality decreased. In comparing the welding connection with the adhesive bond, the value of the welding strength was higher than the strength of the adhesive connection. Also, the time spent on the welding connection was much less than on the adhesive bonding.

Please cite this article using:

Abedini Nodoushan, M., Abedini R. A., 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.
<https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2002326.1836>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1- مقدمه

1-1- کامپوزیت‌ها و روش‌های اتصال‌دهی کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها به دلیل خواص ویژه و کاربرد فراوان آن‌ها مواد شگفت‌انگیز صنعت برشمرده می‌شوند. از ویژگی کامپوزیت‌های پایه پلیمری می‌توان به وزن کم، استحکام زیاد، مقاومت در برابر خوردگی و پوسیدگی، عمر خستگی بالا، سهولت ساخت و هزینه پایین، اشاره کرد، که به همین دلایل به سرعت در حال گسترش هستند. کامپوزیت‌های ترموپلاست¹ به هنگام گرم شدن نرم شده و پس از سرد شدن ویژگی‌های خود را بازمی‌یابند، از این رو قابلیت بازیافت، اصلاح و جوش پذیری را دارند.

متداول‌ترین روش‌های اتصال قطعات پلاستیکی (پلیمری) و کامپوزیت‌های پایه پلیمری، روش‌های مکانیکی²، چسب³ و جوش⁴ هستند. هر کدام مزایا و معایب مربوط به خود را دارا هستند.

در روش‌های مکانیکی (پیچ و مهره، پرچ‌ها و اتصال‌دهنده‌ها و...) به راحتی مونتاژ می‌شوند، باز کردن آن‌ها (به جز پرچ) به آسانی صورت می‌گیرد، نیاز به آماده‌سازی سطح ندارند و بسیار فراوان یافت می‌شوند. در این روش وزن اعمالی به سازه بسیار است و همچنین تمرکز تنش ناشی از حفره‌های موجود باعث ترک و اشکال در سازه می‌شود.

در روش چسب، با پیشرفت‌های به دست آمده عملکردهای خوبی از چسب در اتصالات مشاهده می‌شود. امکان اتصال مواد غیرمشابه به یکدیگر و توزیع تنش یکنواخت و ناچیزی دارند. در این روش نیاز به آماده‌سازی سطح و در مواردی پخت سطح نیاز است. همچنین چسبندگی به اندازه روش مکانیکی نیست و باز کردن آن‌ها از هم مشکل است.

روش اتصال دیگر جوش است. در جوشکاری پلیمرها رابط اتصالی موجود است که با روش‌های مختلفی ذوب شده و پخش می‌شود و پس از سرد شدن مشاهده می‌شود دو قطعه را به هم متصل کرده است. چندین روش برای اتصال جوش کاربرد دارد، از جمله جوشکاری القایی⁵، لیزر⁶، اصطکاکی⁷، مقاومتی⁸ و فراصوتی (التراسونیک)⁹ [1-3].

قطعات نایلونی (پلی آمیدی) قالب‌گیری شده از بسیاری از ترموپلاستیک‌ها در برابر خستگی، خزش و ضربه‌های مکرر مقاوم‌تر هستند. تقاضا برای محصولات نایلونی تقویت‌شده با الیاف شیشه در صنایع خودروسازی زیاد است. در صنعت خودروسازی، فلزات در قطعاتی مانند منیفرولدهای ورودی هوا، محفظه فیلتر هوا، رزوناتورها، چرخ‌دنده‌های زمان‌بندی، فن‌های رادیاتور و مخازن رادیاتور با نایلون‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه جایگزین شده‌اند. کامپوزیت‌های الیاف ممتد نایلونی به دلیل خواص مکانیکی بهتر نسبت به کامپوزیت‌های الیاف کوتاه به طور گسترده در صنایع هوایی و موارد مورد نیاز به استحکام بالاتر استفاده می‌گردد. از آنجایی که اکثر قطعات را نمی‌توان به صورت یک‌تکه تولید کرد، استفاده از جوش برای افزودن قطعات فرعی به قطعات اصلی لازم و ضروری است [4].

2-1- فناوری فراصوت توان بالا

امواج فراصوتی امواج الاستیک با فرکانس بالاست که قادر هستند از درون ماده فیزیکی عبور کرده و انرژی را منتقل نمایند. طیف فرکانس امواج فراصوت بالاتر از حد شنوایی انسان (20 کیلوهرتز) است. اجزای اصلی سیستم فراصوتی توان بالا (شکل 1) شامل یک ترانسدایسر (مبدل) فراصوت و منبع تغذیه الکتریکی

برای تحریک آن است. میدان آکوستیک خروجی از ترانسدایسر توسط یک محیط واسط جامد و یا مایع به ماده نهایی تحت عملیات یا ابزار منتقل می‌شود. از نظر محدوده تأثیرگذاری، ارتعاشات فراصوت را می‌توان در سه بخش تأثیرات میکروسکوپی و میکروساختاری، تأثیرات ماکروسکوپی و تأثیرات سطحی طبقه‌بندی کرد [5, 6].

فناوری فراصوت توان بالا در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی علمی و صنعتی از جمله فرآیندهای ساخت از قبیل ماشین‌کاری [7]، شکل‌دهی [6, 8]، متالورژی پودر (سرد و گرم [9]) و ساخت افزایشی [10] کاربرد دارند. استفاده از این فناوری در بسیاری از موارد مانند اتصال‌دهی فلزات [11]، اتصال‌دهی پلیمرها [12]، تا کاربردهای سونوشیمیایی نظیر همگن‌سازی و کاربردهای زیست‌محیطی به کاربردهای صنعتی انجامیده است.

جوشکاری فراصوتی یکی از محبوب‌ترین روش‌های جوشکاری در صنعت می‌باشد. از ویژگی‌های جوشکاری فراصوتی، سرعت بالا، اقتصادی بودن، قابلیت اتوماسیون بالا و به دلیل نرخ تولید بالا مناسب برای تولید انبوه است. با تجهیزات جمع‌وجور، اتصالاتی با مقاومت بالا تولید می‌کند. زمان جوشکاری در این روش کوتاه‌تر از هر روش دیگر جوشکاری است. برای حذف بخار جوش یا گرمای جوش نیازی به سیستم تهویه مجز ندارد. این فرآیند بازدهی بالایی دارد انرژی کمی مصرف می‌شود و نتیجه خوبی می‌دهد و از بسیاری از روش‌های اتصال دیگر ارزان‌تر است. این فناوری، یکی از پرکاربردترین روش‌های جوشکاری برای اتصال ترموپلاستیک‌ها است که از انرژی فراصوت در فرکانس‌های بالا (15 تا 100 کیلوهرتز) برای تولید ارتعاشات مکانیکی با دامنه کم (10 تا 100 میکرومتر) استفاده می‌کند.

هنگامی که یک ماده ترموپلاستیک تحت ارتعاشات فراصوت قرار می‌گیرد، امواج ایستای سینوسی در ماده ایجاد می‌شود. بخشی از این انرژی در اثر اصطکاک بین مولکولی تلف می‌شود و گرمای زیادی در توده ماده تولید می‌کند. بخشی از این گرما به محل اتصال منتقل می‌شود، همان‌جایی که اصطکاک موضعی، گرما ایجاد می‌کند. این گرما، افزایش حرارت لازم برای اتصال‌دهی را فراهم می‌کند. مواد پلیمری ذوب می‌شوند. در اثر سرد شدن، جوش تشکیل می‌شود.

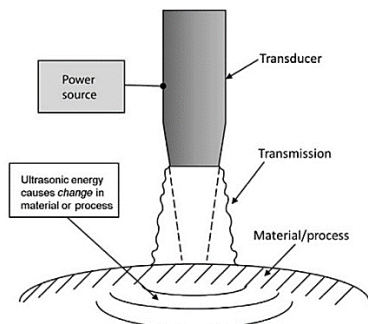


Fig. 1 The main components of the high power ultrasound system [5]

شکل 1 اجزای اصلی سیستم فراصوتی توان بالا [5]

مکانیزم عملکرد در جوش فراصوتی پلیمرها به ترتیب زیر است: پس از آماده‌سازی قطعات، قطعات داخل نگهدارنده گذاشته می‌شوند. منبع ارتعاشات

⁶ Laser welding
⁷ Frictional welding
⁸ Resistance welding
⁹ Ultrasonic welding

¹ Thermoplastic
² Mechanical fastening
³ Adhesive bonding
⁴ Fusion bonding
⁵ Induction

شبهه فنر هستند و بخش زیادی از ارتعاشات را خودشان جذب می کنند [1].

[2].
 آوراهام بناتار و همکاران [14] در سال 1989 جوشکاری زمینه نزدیک را این گونه تعریف کردند که فاصله هورن تا محل اتصال حدود 6 میلی متر و کمتر باشد (شکل 3 الف). در این مطالعه جوشکاری فراصوتی زمینه نزدیک را برای مواد آمورف (اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) و پلی استایرن) و پلیمرهای نیمه کریستالی (پلی اتیلن و پلی پروپیلن)⁵ انجام دادند. نتایج تجربی نشان داد که تغییرات فشار جوشکاری تأثیر کمی بر اتلاف انرژی یا مقاومت اتصال مشترک دارد. افزایش دامنه ارتعاشات باعث افزایش اتلاف انرژی و افزایش مقاومت جوش می شود. برای پلیمرهای نیمه کریستالی، افزایش زمان جوشکاری باعث افزایش مقاومت جوش تا زمان جوشکاری زمینه نزدیک به 1.5 ثانیه می شود و بیشتر از آن مقاومت جوش را کاهش می دهد. برای پلیمرهای آمورف، مقاومت جوش با افزایش زمان جوشکاری تا زمان 0.8 ثانیه افزایش یافت. برای مدت زمان جوشکاری بیشتر، قدرت بسیار زیاد نیاز بود و باعث فشار بیش از حد روی دستگاه می شد که انجام نپذیرفت. آن ها دریافتند اعمال فشار در هنگام جوشکاری فراصوتی دو وظیفه مهم را اجرا می کند:

1. تماس خوبی بین هورن و قطعات ایجاد می کند تا انتقال انرژی به خوبی صورت پذیرد.
2. باعث ذوب هدایت کننده انرژی و جریان یافتن آن و جوش خوردن با قطعات می شود.

آوراهام بناتار و ژانگ چنگی [15] در سال 1989 جوشکاری زمینه دور را این گونه تعریف کردند که فاصله هورن تا محل اتصال از 6 میلی متر بیشتر باشد (شکل 3 ب). در این مطالعه جوشکاری فراصوتی زمینه دور را برای مواد آمورف (اکریلو بوتادین استایرن (ABS) و پلی استایرن) و پلیمرهای نیمه کریستاله (پلی اتیلن و پلی پروپیلن) انجام دادند و دریافتند که جوشکاری زمینه دور برای پلیمرهای آمورف به خوبی عمل کرده است و مقاومت جوش با افزایش دامنه ارتعاشات، افزایش فشار و افزایش زمان جوشکاری بالاتر رفته است؛ اما برای مواد نیمه کریستالی جوشکاری زمینه دور موفق نبوده است و با این روش قسمتی از محل اتصال ذوب شده یا اصلاً ذوب نشده است.

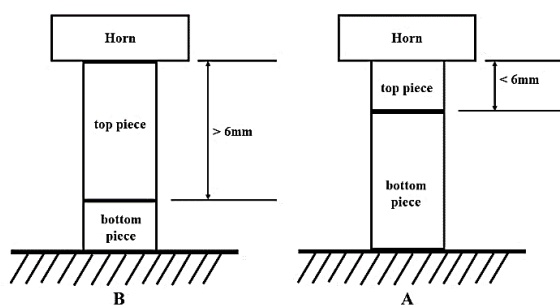


Fig. 3 a) Near field welding and b) Far field welding

شکل 3 الف) جوشکاری زمینه نزدیک و ب) جوشکاری زمینه دور

در اتصال دهی کامپوزیت ترموپلاست، ژانگلی و چانگ [16] در سال 2001 عوامل مؤثر بر استحکام اتصال جوش فراصوتی کامپوزیت های پلی پروپیلن (PP)

روشن و با قطعه بالایی تماس پیدا می کند. ارتعاشات در محل اتصال دو قطعه اصطکاک را افزایش می دهد و به دمای مورد نیاز برای جوشکاری می رساند. سپس با فشار اعمال شده سطح های مشترک دو قطعه بیشتر بهم تماس می یابند و مقدار مذاب بیشتر می شود. وقتی ضخامت لایه ذوب و توزیع دما ثابت شود بعد از مدتی مشخص یا انرژی مشخصی که جوش به استحکام لازم یا فاصله مناسب برسد، منبع خاموش می شود و انرژی فراصوت شروع به کاهش می کند. فشار همچنان حفظ می شود، سپس یک پیوند مولکولی ایجاد می کند و در پایان سرد می شود [1، 2].

3-1- تجهیزات جوشکاری فراصوتی

تجهیزات جوشکاری فراصوتی عموماً شامل منبع تغذیه¹ (ژنراتور) برای ایجاد فرکانس مطلوب، ترانسدوسر² یا میدل برای ایجاد ارتعاشات مکانیکی از انرژی الکتریکی، بوستر³ برای تقویت یا تضعیف دامنه، هورن⁴ برای انتقال و تقویت یا تضعیف ارتعاشات، فیکسچر⁵ برای گرفتن قطعه، عملگر⁶ برای اعمال فشار و کنترل کننده⁷ برای کنترل عملیات جوشکاری و تکرار پذیری آن می باشد. نمونه یک دستگاه جوش فراصوتی و اجزا در شکل 2 نشان داده شده است.

4-1- پیشینه تحقیق

جوشکاری فراصوتی را می توان به دو روش جوشکاری زمینه نزدیک و زمینه دور (وابسته به نزدیکی منبع ارتعاشات به محل اتصال) تقسیم کرد (شکل 3). جوشکاری زمینه نزدیک برای مواد پلیمر نیمه کریستاله و نرم استفاده می شود و جوشکاری زمینه دور برای مواد سخت و آمورف استفاده می شود؛ دلیل این امر مقدار جذب ارتعاشات در ماده است. پلاستیک های آمورف ساختار مولکولی تصادفی دارند و در دامنه وسیعی از دما به تدریج نرم می شوند. آمورف ها در حالت گذار شیشه ای می شوند و در حالت مذاب مایع جامد شدن آن ها هم تدریجی است به صورتی که از انجماد زودرس جلوگیری می کند.

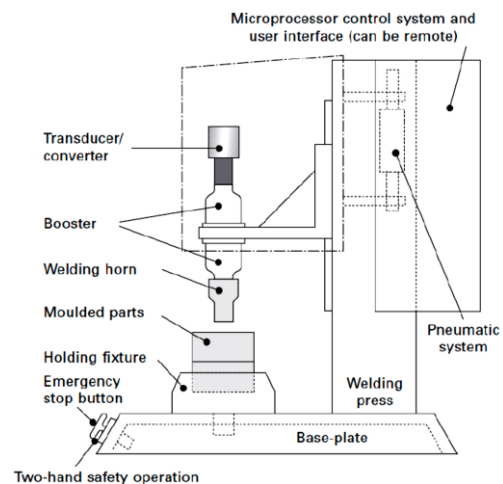


Fig. 2 Schematic of ultrasonic welding equipment [13]

شکل 2 نمای تجهیزات جوشکاری فراصوتی [13]

پلیمرهای آمورف ارتعاشات فراصوتی را به خوبی منتقل می کنند و می توانند با شرایط متنوعی جوشکاری شوند. پلاستیک های نیمه کریستالی توسط مناطق منظم ساختار مولکولی شان مشخص می شوند و گرمای زیادی لازم است تا این نظم را خراب کرد. وقتی در حالت جامد هستند مولکول های نیمه کریستالی

⁵ Fixture
⁶ Actuator
⁷ Controler
⁸ Polypropylene

¹ Power Supply/Generator
² Transducer
³ Booster
⁴ Horn

می‌شود. با افزایش زمان میزان فروروی هورن افزایش می‌یابد و انرژی جوش زیاد می‌شود و مقاومت محل اتصال افزایش می‌یابد تا مقدار بهینه (2.5 ثانیه و 0.18 مگاپاسکال) و پس‌از آن موجب کاهش مقاومت محل اتصال می‌شود. باینکه داده‌ها پراکنده بود ولی برای به دست آوردن حداکثر مقاومت محل اتصال می‌توان از زمان جوش 2.1 ثانیه و فشار 0.15 مگاپاسکال استفاده کرد. ویژگی‌های کامپوزیت پلی آمید 6 شیشه با الیاف ممتد و خلأ تحقیق در اتصال‌دهی این نوع کامپوزیت محرک اصلی در انجام تحقیق حاضر بوده است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای زمان، توان و فشار جوشکاری بر استحکام اتصال جوش فراصوت کامپوزیت الیاف پیوسته شیشه پلی آمید 6 بررسی شد. همچنین تأثیر فیلم لایه واسط، تغییر 90 درجه جهت الیاف در لایه‌ها بر استحکام به‌صورت موردی بررسی شد. در انتها مقایسه بین اتصال چسب و اتصال جوش فراصوت انجام گرفت. با استفاده از آزمون کشش-برش استحکام اتصال‌ها بررسی شد.

2- روش تحقیق

پلی آمید 6 (نایلون 6) از پرکاربردترین پلیمر در صنعت خودروسازی می‌باشد که استحکام فوق‌العاده‌ی کامپوزیت شیشه و کربن این پلیمر باعث شده در صنایع هوایی و هوافضا بسیار بکار رود. خواص مکانیکی بالا این کامپوزیت را برای استفاده در قسمت‌هایی که در طی دوره‌های طولانی در شرایط دمایی بالا در معرض بارهای ایستا قرار دارند، به پیشنهادی مناسب تبدیل کرده است. پلی آمید 6 یک پلیمر نیمه کریستاله دارای خواص غیر سمی و چگالی پایین است. این ماده همچنین دارای مقاومت مکانیکی عالی، مقاومت در برابر سایش و مقاومت به خوردگی خوب است. سفتی بالاتر، مقاومت در برابر حرارت و ضربه نتیجه اضافه کردن الیاف به این پلیمر است. مشخصات ورق کامپوزیت و فیلم واسط استفاده‌شده در این تحقیق در جدول 1 بیان شده است.

جدول 1 ویژگی مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق

Table 1 Characteristics of raw materials used in this research

ویژگی	واحد	PA6	PA6/GF
چگالی	g/cm ³	1.3	1.7
استحکام کششی	MPa	35	265
درصد الیاف	%	0	60
جهت الیاف	degree	-	0/90/0/90/0/90/0
ضخامت	mm	0.3	2

کامپوزیت ترموپلاست استفاده‌شده در این تحقیق از ورق‌های پیش‌آغشته⁴ پلی آمید 6 شیشه تهیه‌شده‌اند که ورق‌های پیش‌آغشته با روش پالتروژن⁵ تولید شدند [21, 22]. برای تولید کامپوزیت ترموپلاست الیاف ممتد (پیوسته) از پیش‌آغشته‌ها، ابتدا ورق‌های پیش‌آغشته به‌اندازه قالب بریده‌شده است. سپس با استفاده از روش پرس گرم در دمای 235 درجه سانتی‌گراد و تحت فشار 20 بار ورق‌های پیش‌آغشته به کامپوزیت شیشه پلی آمید تبدیل شدند.

ورق کامپوزیت با استفاده از واترجت به‌اندازه استاندارد ASTM D5868 نمونه‌های لبه روی هم⁶ مطابق شکل 4 بریده شدند. برای بررسی 90 درجه

را بررسی کردند. در این تحقیق روی سه ماده پلی‌پروپیلن خالص¹، پلی‌پروپیلن با 10 درصد الیاف شیشه² و پلی‌پروپیلن با 30 درصد الیاف شیشه³ انجام شد. مقاومت اتصال کامپوزیت‌ها پس از جوشکاری توسط آزمون کشش-برش تعیین شد. فاکتورهای انتخاب‌شده در این آزمایش، زمان جوشکاری، هندسه هدایت‌کننده انرژی و دامنه ارتعاشات بود. در این تحقیق نشان داده شد که کامپوزیت‌های الیاف شیشه (GF) نسبت به پلیمرهای خالص به انرژی کمتری برای یک جوش خوب نیازمند هستند و وقتی الیاف در محل اتصال افزایش می‌یابد استحکام محل اتصال بیشتر می‌شود.

دبیری و همکاران در سال 2016 [17] تأثیر پارامترهای جوشکاری فراصوتی مانند زمان جوش، فشار هوا، زمان نگهداری و مقدار الیاف شیشه در کامپوزیت را بر استحکام کششی اتصالات جوش فراصوتی بررسی نمودند. کامپوزیت مورد تحقیق آن‌ها از گرانول‌های اکستروژده پلی آمید 6 و الیاف شیشه با روش پرس داغ تولید شده است. نمونه‌ها با هندسه جوش T و مقادیر پارامترهای تعیین‌شده از طریق طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ جوش داده شدند و استحکام آن‌ها با استفاده از آزمون کشش بررسی شد. با تجزیه و تحلیل آماری، حداکثر استحکام اتصال را در دامنه 30-33 میکرون، 41 درصد الیاف شیشه، فشار 3.65 بار، زمان جوش 1.84 ثانیه و زمان نگهداری 0.9 ثانیه به دست آوردند. محققان دریافتند در میان پارامترها درصد الیاف شیشه مهم‌ترین عامل مؤثر بر استحکام جوش است و به دنبال آن فشار هوا، زمان جوش و زمان نگهداری قرار می‌گیرند.

در سال 2017 نیکویی و همکاران [18] به بررسی استحکام اتصال جوش فراصوتی کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداختند. محققان تأثیر پارامترهای زمان، فشار، دامنه و درصد الیاف موجود در کامپوزیت را در استحکام کشش-برش اتصال جوش فراصوتی مورد بررسی قراردادند. آن‌ها دریافتند دامنه ارتعاش تأثیر بیشتری از عوامل دیگر بر استحکام جوش داشته است. سپس زمان و بعد درصد الیاف شیشه تأثیرگذار بودند. کمترین تأثیر در بین پارامترها را هم فشار نگهداری داشته است.

وانگ و همکاران [19] در سال 2017 روی زمان و دمای پیش‌گرمایش جوش فراصوتی کامپوزیت پلی آمید (نایلون) کربن 30 درصد الیاف بدون هدایت‌کننده انرژی پرداختند. پیش‌گرمایش باعث تمرکز انرژی جوش می‌شود و فشار جوشکاری را محلی سازی می‌کند، منطقه جوش متمرکزتر می‌شود و لبه‌های جوش کاهش یابند. کیفیت اتصال با افزایش دمای پیش‌گرم کاهش می‌یابد. با افزایش زمان پیش‌گرمایش حداکثر بار برشی افزایش می‌یابد و سپس به دلیل تخلخل‌های ایجادشده در لایه جوش، زمانی که اتصالات بیش‌ازحد گرم می‌شوند، حداکثر بار برشی کاهش می‌یابد.

یوهائو گائو و همکاران [20] در سال 2018 اتصال جوش الیاف کربن تقویت‌شده (با ضخامت 4 میلی‌متر) به نایلون 66 (پلی آمید 66) را بررسی نمودند و سعی کردند این اتصال را بدون استفاده از هدایت‌کننده انرژی انجام دهند. هنگامی که زمان جوشکاری به مقدار از پیش تعیین‌شده رسید، نوسان موج فراصوت متوقف شده و نمونه‌ها برای 3.0 ثانیه در زیر هورن نگه‌داشته شدند تا مرحله جامد شدن انجام پذیرد. با افزایش زمان جوشکاری مقاومت نایلون 66 افزایش می‌یابد. افزایش فشار هورن از 0.13 تا 0.17 مگاپاسکال نه تنها منجر به افزایش مقاومت محل اتصال در زمان جوش ثابت می‌شود، بلکه باعث کوتاه شدن زمان جوشکاری لازم برای به دست آوردن حداکثر مقاومت محل اتصال

¹ virgin polypropylene

² 10% glass-fiber filled polypropylene composites

³ 30% glass-fiber filled polypropylene composites

⁴ Prepreg

⁵ Pultrusion

⁶ Lap sheare joint

2-2- آزمون کشش-برش

برای بررسی استحکام محل اتصال نمونه‌های جوش داده‌شده از آزمون کشش-برش استفاده شد. طبق استاندارد ASTM D 5868 نمونه‌ها داخل فک دستگاه کشش قرار گرفتند و با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه کشیده شدند. در این پژوهش از دستگاه آزمون کشش استاندارد SANTAM ASTM_50 استفاده شد. حین اجرای آزمون به تمهیدات برای اعمال نیروی محوری به نمونه‌ها و جلوگیری از سرخوردن نمونه‌ها از روی فک‌ها توجه شد.

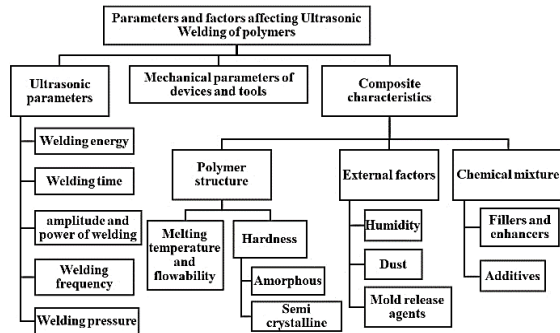


Fig. 5 Parameters and factors affecting ultrasonic welding of polymers and polymer based composites

شکل 5 پارامترها و عوامل موثر بر جوشکاری فراصوتی پلیمرها و کامپوزیت‌های پایه پلیمری

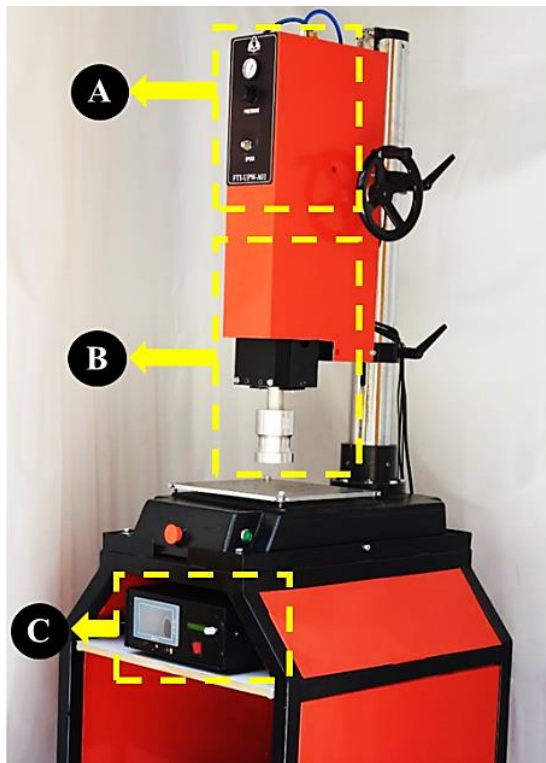


Fig. 6 The polymer ultrasonic welding device and polymer base composites used in this research, A) pneumatic actuator, B) vibration set including transducer, booster and horn, C) power source and controller

شکل 6 دستگاه جوش فراصوتی پلیمر و کامپوزیت‌های پایه پلیمری استفاده شده در این تحقیق، الف) عملگر پنوماتیک، ب) مجموعه ارتعاشی شامل ترانسدوسر، بوستر و هورن، ج) منبع تغذیه و کنترلر

چرخش جهت الیاف کامپوزیت در استحکام اتصال جوش، تعدادی نمونه با 90 درجه تغییر جهت نسبت به جهت چینش اصلی برش داده شدند. بدین‌صورت جهت الیاف در این نمونه‌ها به‌صورت 90/0/90/90/0/90 از جهت طول نمونه‌ها بوده است.

پس از برش نمونه‌ها به دلیل جذب رطوبت پلی آمید 6، نمونه‌ها داخل اتوکلاو قرار داده شدند تا رطوبت حاصل از برش با واثرجت روی استحکام جوش تأثیر نداشته باشند. سپس نمونه‌ها شماره‌گذاری و برای جوش آماده شدند.

1-2- انتخاب پارامترهای جوشکاری و مقادیر آن‌ها

همانطور که در شکل 5 نشان داده‌شده است پارامترهای تأثیرگذار زیادی در استحکام جوش فراصوتی تأثیر دارند، اما سه پارامتر زمان جوشکاری، فشار جوشکاری و توان از پارامترهای اصلی و قابل تنظیم روی دستگاه‌های جوشکاری فراصوتی هستند. به همین دلایل به تعیین بازه‌ی جوش برای این سه پارامتر با استفاده از دستگاه 2000 وات و 20 کیلوهرتز (شکل 6) پرداخته شد. ابتدا سه نمونه برای به دست آوردن بازه مقادیر پارامترها، به اصطلاح پیش تست، جوش داده شد. مقدار 2 ثانیه زمان جوش و فشار 2 بار و توان 100 درصد، جوش بیش‌ازحد، له شده و سوخته‌ای را حاصل کرد. در مقدار 0.3 ثانیه و 0.9 بار و توان 30 درصد، کم جوش خورده، در 2 ثانیه و 1 بار و توان 100 درصد، جوش خوب مشاهده شد. پس بازه زمان جوش از 0.3 ثانیه تا 2 ثانیه، بازه فشار جوشکاری از 0.9 بار تا 2 بار و بازه توان از 30 تا 100 درصد تعیین شد. نمونه‌ها با مقادیر بین این بازه‌ها جوشکاری شدند و پس از جوش مورد آزمون قرار گرفتند.

برای بررسی تأثیر فیلم واسط تعدادی نمونه با یک لایه فیلم پلیمر خالص پلی آمید 6 با ضخامت 0.3 میلی‌متر در بین محل اتصال چند نمونه به هم جوش داده شدند (شکل 7) و استحکام آن‌ها با نمونه‌های اصلی مقایسه شد. در انجام جوشکاری نمونه‌های فیلم دار، تعدادی فیلم در اثر ارتعاشات فراصوت از بین دو قطعه سر خوردند و به‌صورت یکنواخت محل اتصال غنی از پلیمر نشد. این نمونه‌ها به علت خطا در انجام صحیح جوش کنار گذاشته شدند و نمونه‌هایی که فیلم واسط به‌طور یکنواخت در بین محل اتصال ذوب شدند بررسی شدند.

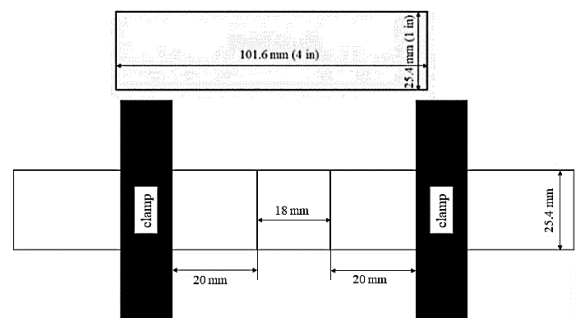


Fig. 4 Schematic size of cut standard samples and welding site schematic

شکل 4 نمای اندازه نمونه‌های استاندارد بریده‌شده و نمای محل جوشکاری

در بررسی تأثیر تغییر جهت 90 درجه الیاف، تعدادی نمونه که 90 درجه برش داده‌شده بودند به هم جوش داده شدند و استحکام آن‌ها با نمونه‌های اصلی مقایسه شد. یک نمونه هم با استفاده از چسب، چسبانده شد و استحکام آن با نمونه‌های جوش مقایسه شد.

در زمان بالا و توان بالا انرژی جوش بالا می‌رود (در نمونه 11 حدود 2316 ژول)، این انرژی بالا باعث بالا رفتن دما در محل اتصال و سیالیت بیش‌ازحد مذاب می‌شود. سیالیت بیش‌ازحد مذاب غیریکنواختی پلیمر و الیاف را به هم زده و باعث مشاهده نقاط تجمع پلیمر و نقاط فقدان پلیمر می‌شود.

3-1- تأثیر فیلم واسط

در جدول 3 نتایج استحکام نمونه‌های 8، 9، 10 و 11 جوشکاری شده با فیلم و بدون فیلم بیان شده است. مشاهده می‌شود استفاده از فیلم واسط در نمونه‌ها باعث افزایش استحکام جوش می‌شود. کیفیت ظاهری نمونه‌های با فیلم تفاوت زیادی با نمونه‌های بدون فیلم ندارد فقط در محل اتصال نمونه‌های جوش داده شده با فیلم، مقداری پلیمر اضافه، یا فیلم ذوب نشده مشاهده می‌شود (شکل 7 شماره 1). با دقت بیشتر روی جدول 3 می‌توان فهمید استفاده از فیلم واسط در جوشکاری فراصوتی شیشه پلی آمید 6 به‌طور میانگین حدود 9.75 درصد استحکام جوش را افزایش داده است. نمونه 8 در حالت بدون فیلم مقدار 1373 ژول و در حالت با فیلم 1249.7 ژول انرژی جوش داشته است. همچنین نمونه 9 در حالت بدون فیلم مقدار 2394 ژول و در حالت با فیلم 2012 ژول انرژی جوش داشته است. در حالت بدون فیلم نمونه 10، 2416 ژول و نمونه 11، 2647 ژول و در حالت با فیلم نمونه 10، 2146 ژول و نمونه 11، 2253 ژول بوده است. با مقایسه انرژی‌های جوش می‌توان فهمید استفاده از فیلم واسط انرژی جوش موردنیاز را کاهش می‌دهد. در این چند نمونه به‌طور میانگین حدود 12.5 درصد انرژی جوش کاهش یافته است.

در بررسی محل شکست نمونه‌های جوش داده شده دارای فیلم واسط با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شد، در ناحیه جوش الیاف غنی از پلیمر و به‌صورت دسته‌جمعی به هم چسبیده‌اند (شکل 8). یکنواختی پخش پلیمر در بین الیاف باعث افزایش استحکام جوش شده است.

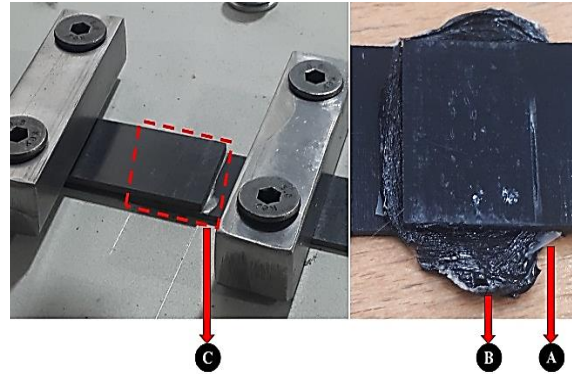


Fig. 7 The view of the welding area and sample 2F before and after welding, A) a part of the interface film after welding, B) polymer and fiber protrusion, C) the welding area of sample 2F before welding

شکل 7 نمای محل جوش و نمونه 2F قبل و بعد از جوشکاری، الف) قسمتی از فیلم واسط پس از جوش داده شدن، ب) بیرون زدگی پلیمر و الیاف، ج) محل جوش نمونه 2F قبل از جوشکاری

3-2- بررسی میکروساختار

پس از آزمون کشش-برش، سطح مقطع شکست برخی نمونه‌ها در زیر میکروسکوپ نوری¹ (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی² (SEM) مشاهده شد.

3- نتایج و بحث

در جدول 2 مشاهده شد در بررسی اثر زمان بر استحکام جوش با افزایش زمان تا مقدار بهینه استحکام جوش افزایش یافته و بیشتر از آن استحکام اتصال کاهش یافته است. همچنین با افزایش توان استحکام جوش افزایش یافته است. فشار برای انجام جوشکاری فراصوتی یک پارامتر مهم است و برای یک جوش عامل فشار لازم است. با افزایش فشار استحکام جوش هم افزایش پیدا کرده است. مشاهده شد افزایش زمان جوش بیشتر از 2 ثانیه باعث کاهش استحکام اتصال جوش شده است. با بررسی محل اتصال مشاهده شد در برخی نقاط تجمع پلیمر و در برخی نقاط فقدان پلیمر وجود دارد.

جدول 2 نتایج استحکام نمونه‌های اصلی و بدون فیلم

Table 2 Strength results of original samples without film

نام نمونه	پارامترهای جوشکاری فراصوتی			استحکام کششی (MPa)
	زمان جوشکاری (s)	فشار جوشکاری (bar)	توان (%)	
1	1	1.35	65	13.23
2	1	1.35	30	4.76
3	1	1.35	100	21.82
4	1	1.8	65	17.65
5	1	0.9	65	13.1
6	0.5	1	40	2.64
7	1.8	1.35	65	15.38
8	1.77	1.05	74	15.3
9	1.8	1.8	100	26.3
10	2	1.8	100	27.2
11	2.3	1.8	100	23.4

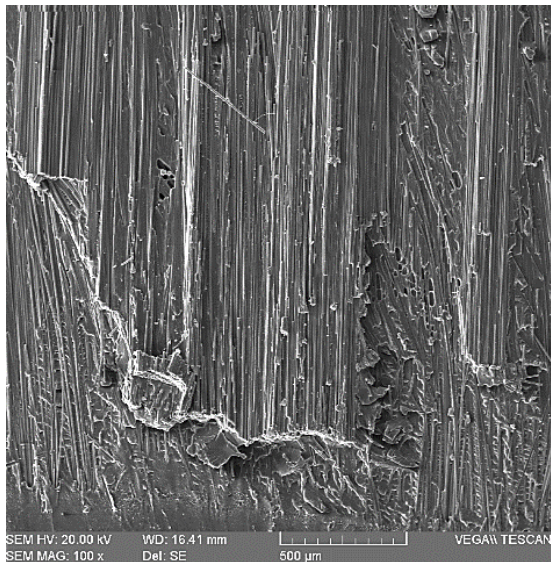


Fig. 8 SEM image of the failure point of sample 8F

شکل 8 تصویر SEM از محل شکست اتصال نمونه 8F

استفاده از یک‌لایه فیلم واسط در ابتدای جوشکاری باعث تمرکز ارتعاشات در محل اتصال و شروع ذوب از پلیمر موجود در فیلم می‌شود و کم‌کم منطقه مذاب گسترش می‌یابد. همچنین استفاده از فیلم همانند استفاده از سپر

² Scanning Electron Microscopy (SEM)

¹ Optical Microscope (OM)

مقایسه آزمون کشش-برش اتصال چسبی و نمونه‌های جوش فراصوتی بدون فیلم (9) و با فیلم (9F) در شکل 10 بیان شده است. با مشاهده نتیجه می‌توان فهمید استحکام جوش فراصوتی بیشتر از استحکام اتصال چسبی است. برای مثال استحکام نمونه 9 که بدون فیلم جوش داده شده است 26.3 مگاپاسکال است، اما اتصال چسب 6.2 مگاپاسکال دارد. در این مقایسه، اتصال جوش به جز استحکام بالاتر (حدود 4 برابر)، زمان بسیار کمی مصرف می‌کند. در نمونه 9 کمتر از 2 ثانیه زمان اتصال دهی جوش بود و برای اتصال چسبی 72 ساعت صرف شد. این نشان‌دهنده بازدهی بالای جوش فراصوتی است. همچنین رفتار مکانیکی و استحکام اتصال چسبی به عوامل مختلف و محیطی وابسته است [23, 24]، اما در جوش فراصوتی به دلیل عدم استفاده از چسب و ماده واسط در محل اتصال به نظر می‌رسد ناحیه اتصال حساسیت کمتری نسبت به عوامل بیرونی و محیطی داشته باشد.

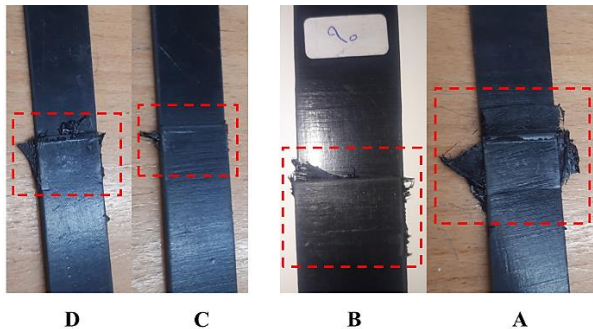


Fig. 9 Pictures A are sample 9.90, B is sample 8.90, C is sample 8, and D is sample 9.

شکل 9 تصاویر الف نمونه 9.90، ب نمونه 8.90، ج نمونه 8 و د نمونه 9

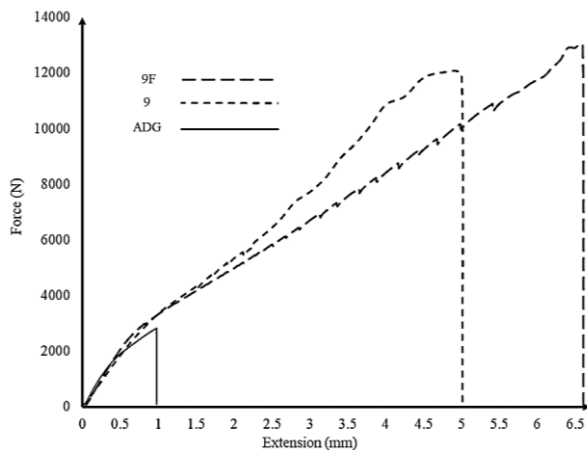


Fig. 10 Tensile-shear diagrams of adhesive joint (ADG) samples, ultrasonic welding joint without film (9) and with film (9F)

شکل 10 نمودارهای کشش-برش نمونه‌های اتصال چسبی (ADG)، اتصال جوش فراصوتی بدون فیلم (9) و با فیلم (9F)

4- نتیجه‌گیری

در بررسی استحکام اتصال جوشکاری فراصوتی کامپوزیت شیشه پلی آمید 6، مشاهده شد:

حرارتی اثرات سوء دمای بالا را کاهش می‌دهد و در محل اتصال حرارت را در پلیمر بیشتری نسبت به حالت بدون فیلم پخش می‌کند.

جدول 3 نتایج استحکام نمونه‌های جوش داده‌شده با فیلم واسط

Table 3 Strength results of welded samples with interlayer film

زمان جوشکاری (s)	فشار جوشکاری (bar)	توان (%)	استحکام کششی (MPa)	
			بدون فیلم	نام نمونه
1.77	1.05	74	15.3	8F
1.8	1.8	100	26.3	9F
2	1.8	100	27.2	10F
2.3	1.8	100	23.4	11F

2-3- تأثیر تغییر 90 درجه جهت الیاف

در جدول 4 مشاهده می‌شود استفاده از نمونه‌هایی با 90 درجه اختلاف جهت الیاف با نمونه‌های اصلی استحکام جوش را کاهش دادند.

جدول 4 نتایج استحکام نمونه‌های 90 درجه جوش داده‌شده

Table 4 Strength results of 90° welded samples

زمان جوشکاری (s)	فشار جوشکاری (bar)	توان (%)	استحکام کششی (MPa)	
			صفر درجه	نام نمونه
1.77	1.05	74	15.3	8F
1.8	1.8	100	26.3	9F

در شکل 9 مشاهده می‌شود نمونه‌های 90 درجه (تصاویر الف و ب) مقدار بیرون‌زدگی¹ پلیمر و الیاف بیشتری نسبت به نمونه‌های اصلی (تصاویر ج و د) داشتند. امواج فراصوت باعث بیرون راندن پلیمر مذاب و الیاف 90 درجه شدند و بیرون‌زدگی بیشتر شد. در نمونه‌های اصلی چون لایه اول 0 درجه بوده و الیاف در امتداد طول کل نمونه بوده، مقدار بیرون‌زدگی کمتر بوده و قسمت ذوب نشده پلیمر و الیاف، الیاف و پلیمر محل اتصال را نگه‌داشته‌اند. نمونه‌های 90 درجه در محل اتصال دو قطعه، لایه‌های 90 درجه دارند که هنگام ذوب پلیمر به صورت آزاد و شناور در پلیمر درمی‌آیند و با فشار هنگام جوشکاری به راحتی از محل اتصال به بیرون رانده می‌شوند. در نمونه‌ها مشاهده شد با افزایش فشار در نمونه‌های 90 درجه بیرون‌زدگی پلیمر و الیاف بسیار بیشتر از نمونه‌های اصلی است. این مورد به‌وضوح در مقایسه نمونه‌های 9.90 و 8.90 شکل 9 (الف و ب) مشخص است.

3-3- مقایسه اتصال جوش فراصوتی و اتصال چسب

یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در اتصال دهی کامپوزیت‌ها، اتصال چسبی است. برای مقایسه بین استحکام جوش فراصوتی با اتصال چسب، چسب معتبر تهیه شد. سپس یک نمونه استاندارد لبه روی هم به هم چسبانده شدند. به دلیل تأثیر حرارت روی پلیمر کامپوزیت، چسب‌ها پخته نشدند و از چسب‌هایی استفاده شد که نیاز به پخت داخل کوره نداشته باشند. نمونه کامپوزیت شیشه پلی آمید 6 با چسب اهو² 300 کیلوگرم آلمان چسبانده شد و سه روز (72 ساعت) تحت فشار 1 بار به آن‌ها فرصت خشک شدن کامل داده شد. سپس با آزمون کشش-برش استحکام اتصال چسبی بررسی شد. نتیجه آزمون کشش-برش برای اتصال چسبی در 6.2 مگاپاسکال بوده است. نمودار

² UHU

¹ Squeeze out

- [12] Unnikrishnan, T. G. and Kavan, P., "A Review Study in Ultrasonic-Welding of Similar and Dissimilar Thermoplastic Polymers and Its Composites" *Materials Today: Proceedings*, Vol. 56, pp. 3294-3300, 2022.
- [13] Micus, S., Rostami, S. G., Haupt, M., Gresser, G. T., Meghraz, M. A. and Eskandarian, L., "Integrating Electronics to Textiles by Ultrasonic Welding for Cable-Driven Applications for Smart Textiles" *Materials*, Vol. 14, No. 19, pp. 573.2021, 5
- [14] Benatar, A., Eswaran, R. V. and Nayar, S. K., "Ultrasonic Welding of Thermoplastics in the near-Field" *Polymer Engineering & Science*, Vol. 29, No. 23, pp. 1689-1698, 1989.
- [15] Benatar, A. and Cheng, Z., "Ultrasonic Welding of Thermoplastics in the Far-Field" *Polymer Engineering & Science*, Vol. 29, No. 23, pp. 1699-1704, 1989.
- [16] Liu, S.-J., Chang, I.-T. and Hung, S.-W., "Factors Affecting the Joint Strength of Ultrasonically Welded Polypropylene Composites" *Polymer Composites*, Vol. 22, No. 1, pp. 132-141, 2001.
- [17] Dabiry, Y., Sheikhi, M. and Nikoi, R., "An Experimental Study on the Tensile Behaviors of Ultrasonic Welded T-Joints for Polyamide Composite" *International Journal of Engineering*, Vol. 29, pp. 1783-1790, 2016.
- [18] Nikoi R, Sheikhi MM, Arab NBM. "Experimental analysis of effects of ultrasonic welding on weld strength of polypropylene composite samples". In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, 28(3):447-53, 2015.
- [19] Wang, K., Li, Y., Banu, M., Li, J., Guo, W. and Khan, H., "Effect of Interfacial Preheating on Welded Joints During Ultrasonic Composite Welding" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 246, pp. 116-122, 2017.
- [20] Gao, Y.-H., Zhi, Q., Lu, L., Liu, Z.-X. and Wang, P.-C., "Ultrasonic Welding of Carbon Fiber Reinforced Nylon 66 Composite without Energy Director" *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 140, No. 5, 2018.
- [21] Tutunchi, M., Golzar, M. and Behraves, A. H., "Investigation of Thermoplastic Pultrusion for Tubular Product Production Using Prepregs" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 1, pp. 23-32, 2015.
- [22] najafi, m., Golzar, M. and sadeghi, m., "Experimental Evaluation of Joint Strength in Polypropylene-Glass Fiber Reinforced Composites under Tensile Load" *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 39-46, 2019.
- [23] 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" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 353-358, 2018.
- [24] Shamsaei, Z. and Khoramshad, H., "Deleterious Effects of Seawater, Acidic Water and Alkali Water on Mechanical Properties of Nanocomposite Adhesives" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No. 1, pp. 1936-1927, 2022.

- پارامتر زمان، توان و فشار تأثیر مثبت روی استحکام دارند و با افزایش این پارامترها تا مقدار بهینه، استحکام افزایش پیدا می‌کند. افزایش زمان بیشتر از 2 ثانیه باعث افزایش سیالیت بیش از حد مذاب پلیمر و پیدایش مناطقی فاقد پلیمر در اتصال شده است که استحکام اتصال را کاهش داده است.
- با اضافه کردن یک لایه فیلم واسط در محل اتصال استحکام جوش بالا می‌رود و انرژی جوش مورد نیاز کاهش پیدا می‌کند. استفاده از یک لایه فیلم لایه واسط در ابتدای جوشکاری باعث تمرکز ارتعاشات در محل اتصال می‌شود. همچنین استفاده از فیلم همانند استفاده از سپر حرارتی اثرات سوء دمای بالا را کاهش می‌دهد.
- با تغییر جهت الیاف در تمامی لایه‌های کامپوزیت به اندازه 90 درجه، کاهش استحکام و کاهش کیفیت ظاهری جوش مشاهده شد. بیرون زدگی پلیمر و الیاف بیشتر شد. همچنین با افزایش فشار مشاهده شد بیرون زدگی پلیمر بیشتر و کیفیت ظاهری کاهش پیدا می‌کند.
- در مقایسه اتصال جوش فراصوتی با اتصال چسبی، مشاهده شد استحکام جوش بسیار بالاتر از استحکام چسب بوده (در حدود 4 برابر) و همچنین زمان جوش بسیار ناچیز در مقایسه با زمان اتصال چسب بوده است.

5- مراجع

- [1] Benatar, A., "Ultrasonic Welding of Plastics and Polymeric Composites" in: *Power Ultrasonics*, Eds., pp. 295-312, 2015.
- [2] "Chapter 2 - Ultrasonic Welding" in: M. J. Troughton, *Handbook of Plastics Joining (Second Edition)*, Eds., pp. 15-35, Boston : William Andrew Publishing, 2009.
- [3] 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, pp. 1284, 2020.
- [4] Troughton, M., "Handbook of Plastics Joining a Practical Guide, Second Edition", 2008 .
- [5] Gallego-Juárez, J. and Graff, K., "Introduction to Power Ultrasonics" in: *Power Ultrasonics*, Eds., pp. 1-6: Elsevier, 2015.
- [6] Abedini, R., Abdullah, A., Alizadeh, Y. and Fartashvand, V., "A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic Vibrations in Metal Forming" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 323-334, 2017.
- [7] Abdullah, A., Sotoodezadeh, M., Abedini, R. and Fartashvand, V., "Experimental Study on Ultrasonic Use in Dry Creep-Feed up-Grinding of Aluminum 7075 and Steel X210cr12" *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 2, pp. 191-198, 2013.
- [8] Fartashvand, V., Abedini, R. and Abdullah, A., "Influence of Ultrasonic Vibrations on the Properties of Press-and-Sintered Titanium" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 236, No. 11, pp. 1518-1525, 2022.
- [9] Abedini, R., Abdullah, A. and Alizadeh, Y., "Ultrasonic Assisted Hot Metal Powder Compaction" *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 38, pp. 704-710, 2017.
- [10] Gujba, A. K. and Medraj, M., "Power Ultrasonic Additive Manufacturing: Process Parameters, Microstructure, and Mechanical Properties" *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2020, pp. 1064870, 2020.
- [11] Cheng, X. M., Yang, K., Wang, J., Xiao, W. T. and Huang, S. S., "Ultrasonic System and Ultrasonic Metal Welding Performance: A Status Review" *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 84, pp. 1196-1216, 2022.