



بررسی تجربی تاثیر پارامترهای جوش آلتراسونیک در استحکام و جوش پذیری اتصال کامپوزیت‌های گرمانرم GF/PA6

محمد صادقی^۱، محمد گلزار^{۲*}، داود اکبری^۳، محمد رضا کرفی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m.golzar@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۹ شهریور ۱۴۰۲

پذیرش: ۶ آذر ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

جوش آلتراسونیک

کامپوزیت‌های گرمانرم

جهت الیاف

حداکثر توان مصرف شده

در این مقاله، جوشکاری آلتراسونیک کامپوزیت‌های گرمانرم با تأکید بر جوش‌پذیری و ارزیابی کیفیت اتصال، تولید گرما و شکل‌گیری اتصال مطالعه شده و تاثیر نیروی جوشکاری، دامنه ارتعاش، جهت الیاف، جایابی هورن بررسی شده است. در این پژوهش قطعات کامپوزیتی شامل مواد پلی‌آمید ۶ و الیاف شیشه پیش‌آغشته تک‌جهته، در دو نوع لایه چینی S (۹۰/۹۰/۰/۰) و S (۰/۹۰/۴۵/۴۵/۹۰/۰) با هدایت‌کننده انرژی به شکل تخت با ضخامت ۰.۱۴ میلی‌متر آماده شدند. سه دامنه ارتعاش ۵۱.۸، ۷۴.۵ و ۸۶.۲ میکرومتر و نیروی جوشکاری ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ نیوتن با سه زمان جوشکاری ۳۰۰، ۵۰۰ و ۹۰۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد بیش‌ترین استحکام جوش ۲۵.۵ مگاپاسکال بدست آمد که در دامنه ارتعاشات ۸۶.۲ میکرومتر و نیروی جوشکاری ۵۰۰ نیوتن و زمان جوشکاری ۵۰۰ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار حداکثر توان مصرفی تحت تاثیر دامنه ارتعاشات و نیروی جوشکاری است و با تغییر جهت الیاف لایه اول کامپوزیت از ۹۰ درجه به ۰ درجه استحکام جوش بیش از دو برابر افزایش می‌یابد.

Experimental investigation of the effect of ultrasonic welding parameters on the strength and weldability of GF/PA6 thermoplastic composites

Mohammad Sadeghi¹, Mohammad Golzar^{2*}, Davood Akbari³, Mohammad Reza Karafi³

1- PhD Student, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: m.golzar@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 10 September 2023

Accepted: 27 November 2023

Keywords:

Ultrasonic Welding

Thermoplastic Composites

Fiber Orientation

Maximum Power Consumption

Abstract

In this article, ultrasonic welding of thermoplastic composites has been studied with an emphasis on weldability and joint quality evaluation, heat generation and joint formation, and the effect of welding force, vibration amplitude, fiber direction, horn displacement has been investigated. In this research, composites including PA6 and unidirectional pre-impregnated glass fibers, in two types of lay-outs (90/90/0/0)s and (0/90/-45/45/90/0)s with an energy director of flat shape with a thickness of 0.14 mm. Three vibration amplitudes of 51.8, 74.5 and 86.2 μm and welding force of 300, 500 and 1000 N with three welding times of 300, 500 and 900 ms are considered. The results of the test show that the highest welding strength of 25.5 MPa was obtained, which occurs in the vibration amplitude of 86.2 μm and the welding force of 500 N and the welding time of 500 ms. It can also be seen that the amount of maximum power consumption is affected by vibration amplitude and welding force, and by changing the direction of the fibers of the first layer of the composite from 90 degrees to 0 degrees, the welding strength increases more than twice.

Please cite this article using:

Sadeghi M, Golzar M, Akbari D, Karafi M R. 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 July 23;10(5):44-56. doi: 10.22034/IJME.2023.415429.1827 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از مواد کامپوزیت به دلیل استحکام و سفتی ویژه آن‌ها نسبت به وزن، گسترش چشم‌گیری در صنعت داشته است. کامپوزیت گرمانرم تقویت شده با الیاف^۱ شامل دو جزء الیاف و ماتریس است که به طور گسترده در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. الیاف مورد استفاده اکثراً الیاف کربن^۲ و الیاف شیشه^۳ هستند و ماتریس‌ها معمولاً شامل پلی‌اتریمید^۴، پلی‌پروپیلن^۵، پلی‌فنیلن‌سولفید^۶، پلی‌آمید^۷ و غیره می‌باشند [۱-۳].

پلی‌آمید یکی از پلاستیک‌های مهندسی با ویژگی‌های منحصر به فرد از جهت استحکام و چقرمگی می‌باشد. افزودن الیاف شیشه به پلی‌آمید باعث افزایش خواص استحکامی و مقاومت حرارتی و سایشی آن می‌گردد. پلی‌آمید تقویت شده امروزه جایگزین چدن و سایر فلزات در برخی کاربردها نظیر هوا و فضا و خودرو شده است [۴، ۵].

وجود خواص ذاتی کامپوزیت‌های گرمانرم از جمله، قابلیت بازیافت، تعمیر، اصلاح و شکل‌دهی، می‌تواند ساخت آسان و بهره‌وری خوبی را فراهم کنند. با کامپوزیت‌های گرمانرم می‌توان اشکال پیچیده را فرم دهی کرد و زمان ساخت آن‌ها نسبت به کامپوزیت‌های گرماسخت^۸ با زمان سفت شدن رزین زیاد، کم‌تر می‌باشد. در کامپوزیت‌های گرمانرم دما و فشار بالا باعث می‌شود که یکپارچگی قطعات ساخته شده، محدود گردیده و قیمت آن‌ها افزایش یابد.

محققان ساخت قطعات بزرگ و پیچیده کامپوزیتی را با مونتاژ کردن قطعات کوچک و ساده بر روی هم فراهم می‌کنند. بنابراین برای تحقق کاربردهای موفقیت آمیز کامپوزیت‌های گرمانرم به عنوان جایگزینی برای مواد معمولی و سنتی، مونتاژ و سوار کردن این قطعات با یک روش اتصال مناسب بسیار مهم است. مونتاژ و اتصال کامپوزیت‌های گرمانرم در صنعت به صورت مکانیکی، چسبی و جوشکاری انجام می‌گیرد.

فرآیند جوشکاری ذوبی شامل حرارت دادن ماتریس پلیمری در سطح مشترک به حالت چسبناک است که از نظر فیزیکی باعث پخش شدن زنجیره‌های پلیمری و خنک کردن پلیمر برای یکپارچگی ناحیه مشترک می‌شود [۶]. جوش ذوبی انواع مختلفی دارد که از بین آن‌ها جوش مقاومتی، القایی و آلتراسونیک اهمیت ویژه‌ای دارند [۷].

حضور انرژی آلتراسونیک در فرآیندهای مختلف ساخت هم‌چون جوشکاری، شکل‌دهی، ماشین‌کاری و ساخت افزایشی مزایای قابل توجهی از جمله نرم‌شوندگی آکوستیکی و نرم‌شوندگی گرمایی موضعی را به ارمغان آورده است [۸، ۹]. بنابراین جوش آلتراسونیک^۹ مزایای زیادی در اتصال اجزای کامپوزیت گرمانرم از جمله زمان جوش کم‌تر، تمیزی و قابلیت اطمینان، بی‌ضرر بودن برای محیط زیست و انسان ارائه می‌دهد [۱۰].

شکل ۱ نمونه‌ای از کامپوزیت‌های گرمانرم که به وسیله‌ی جوش آلتراسونیک در ساخت بدنه هواپیما استفاده شده است را نشان می‌دهد [۱۱].

نجفی و همکارانش [۱۲] جوش آلتراسونیک را با اتصال پیچی و پرس گرم در کامپوزیت‌های گرمانرم به طور تجربی بررسی کردند و نشان دادند که جوش آلتراسونیک نسبت به دیگر روش‌های اتصال استحکام بیشتری دارد. ژائو و همکارانش [۱۳] در یک پژوهش کامپوزیت‌های گرمانرم را با جوش آلتراسونیک و به صورت مکانیکی به هم متصل کردند و نشان دادند که اتصال جوش آلتراسونیک سفتی بیشتری نسبت به اتصال مکانیکی دارد و مکانیزم شکست در جوش آلتراسونیک به ناحیه جوشکاری محدود می‌شود اما در اتصال پیچ و مهره فراتر از منطقه اتصال است.

1 Fiber Reinforced Thermoplastic Composite

2 Carbon Fibers

3 Glass Fiber

4 Polyetherimide

5 Polypropylene

6 Polyphenylene Sulfide

7 Poly Amid

8 Thermoset Composites

9 Ultrasonic Welding



شکل ۱ استفاده از جوش آلتراسونیک در اتصال کامپوزیت گرمانرم در بدنه هواپیما [۱۱]

برای درک مکانیزم‌های تولید حرارت در جوش آلتراسونیک روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی زیادی پیشنهاد و بررسی شده است [۱۴-۱۶]. نتایج این روش‌ها نشان می‌دهد که دو مکانیزم اصلی، یعنی اصطکاک و تلفات ویسکوالاستیک در تولید حرارت جوش آلتراسونیک نقش دارند. در فاز اولیه، تولید گرما تحت تأثیر اصطکاک بین صفحات است که در واقع گرمای ناشی از حرکت بین دو سطح در تماس با یکدیگر است، در حالی که اتلاف ویسکوالاستیک به دلیل وجود اثر میرایی در ماده به صورت موضعی در حجم پلیمر رخ می‌دهد. هنگامی که دما در سطح مشترک به دمای انتقال شیشه‌ای ماتریس می‌رسد، اصطکاک به تدریج ناپدید شده و تولید گرما تحت تأثیر تلفات ویسکوالاستیک ایجاد می‌شود که برای جوشکاری آلتراسونیک کامپوزیت‌های گرمانرم بسیار مهم است [۱۵، ۱۷-۱۹]. در جوشکاری آلتراسونیک وجود هدایت‌کننده انرژی^۱ در ناحیه بین صفحه‌ای، برای جوش‌پذیری کامپوزیت گرمانرم مهم است، که به تمرکز انرژی آلتراسونیک در سطح جوش کمک می‌کند و فرآیند جوشکاری را سریع‌تر و کارآمدتر می‌کند [۲۰]. هندسه‌های مختلف از هدایت‌کننده‌های انرژی مانند تخت، نیم دایره و مثلث برای جوشکاری آلتراسونیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. اشکال هدایت‌کننده‌ی انرژی شرایط تماس بین صفحه‌ای را تعیین می‌کند، که بر تولید گرما بین قطعات کامپوزیت و هدایت‌کننده‌ی انرژی و در نتیجه بر شکل‌گیری اتصال تأثیر می‌گذارد. ویلی‌گاس و همکاران [۲۱] تأثیر جهت و اندازه و تعداد هدایت‌کننده‌های انرژی مختلف مثلی شکل را بر استحکام و کیفیت جوش بررسی کردند. نتایج آنان نشان می‌دهد زمانی که هدایت‌کننده‌های انرژی عمود بر جهت کشش‌اند نسبت به حالت موازی، ناحیه جوش بزرگ‌تر بوده و در نتیجه استحکام بیش‌تری دارند. مشکل هدایت‌کننده‌های انرژی سنتی (مثلی، نیم دایره و ...) این است که ساخت و نصب آن‌ها در ناحیه بین صفحه‌ای سخت و چالش‌آور است. استفاده از هدایت‌کننده‌های انرژی به شکل تخت این مشکل را حل کرده است. ویلی‌گاس و همکارانش [۲۲] یک ارزیابی مقایسه‌ای بین هدایت‌کننده‌های انرژی تخت و سنتی با جوشکاری آلتراسونیک در کامپوزیت‌های گرمانرم CF/PPS انجام دادند. سپس استحکام هر یک از آن‌ها را تحت آزمایش LSS^۲ قرار داده و متوجه شدند که تغییر محسوسی از نظر استحکام بین هدایت‌کننده‌های انرژی تخت و سنتی وجود ندارد. پالاردی و همکارانش [۲۳] با استفاده از سه ضخامت ED، تأثیر هدایت‌کننده‌های انرژی تخت در تولید حرارت در جوشکاری آلتراسونیک کامپوزیت‌های گرمانرم را بررسی کردند و نشان دادند که حرارت تولید شده به ضخامت هدایت‌کننده‌های انرژی بستگی دارد و در هدایت‌کننده‌های انرژی ضخیم سطح اتصال صاف‌تر و درخشان‌تر و عدم حفره می‌باشد. جوش‌پذیری کامپوزیت‌های گرمانرم با استفاده از جوش آلتراسونیک در پارامترهای فرایند جوش و خواص ساختاری مواد خلاصه می‌شود. انتخاب پارامتر فرآیند از جمله فرکانس و دامنه ارتعاشات، فشار جوشکاری و فشار نگهداری، زمان جوشکاری و زمان نگهداری و نوع هدایت‌کننده‌های انرژی برای کیفیت جوش مهم است. جوش‌پذیری مواد عمدتاً به عوامل مختلفی بستگی دارد از جمله توانایی انتقال ارتعاشات مافوق صوت به سطح مشترک و اتلاف ویسکوالاستیک انرژی، ویژگی‌های مواد مانند دمای ذوب، سفتی و ساختار پلیمری می‌توان اشاره کرد [۲۴]. معیارهای ارزیابی کیفیت جوش بر اساس عملکرد و کارایی مکانیکی است.

¹ Energy Director

² Lap Shear Strength

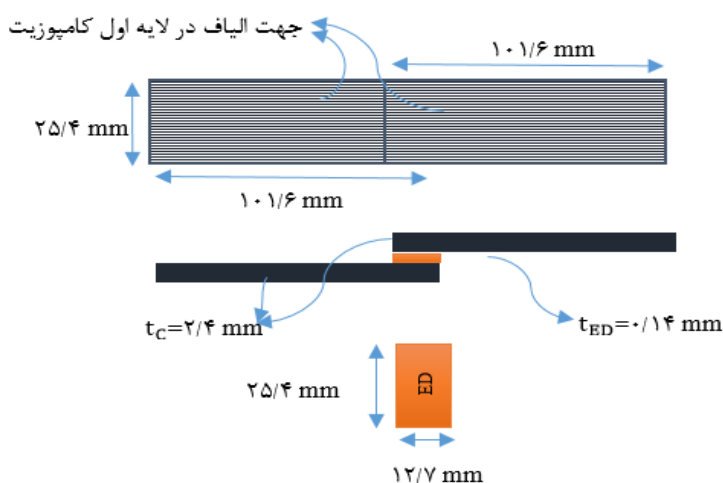
در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی برای درک فرآیند، ساختار، ارزیابی و عملکرد اتصال کامپوزیت‌های گرمانرم با جوش آلتراسونیک انجام شده است. با این حال، با توجه به چند فیزیکی و پیچیده بودن این فرآیند، درک بهتر مکانیزم‌های اساسی و بهبود عملکرد فرآیند با چالش‌هایی همراه است. همچنین همان‌طوری که اشاره شد، استحکام و کیفیت جوش معمولاً تحت تأثیر عوامل مربوط به خواص مواد و پارامترهای فرایند قرار می‌گیرد. در نتیجه، درک ارتباط بین عوامل تأثیرگذار و کیفیت جوش برای تعیین پارامترهای عملیاتی مناسب برای جوش آلتراسونیک کامپوزیت‌های گرمانرم مهم است.

در این پژوهش با استفاده از جوش آلتراسونیک به اتصال کامپوزیت‌های گرمانرم پلی‌امید ۶ و الیاف شیشه، به صورت پیش‌آغشته تک‌جهته با دو نوع لایه چینی S (۹۰/۹۰/۰/۰) و S (۰/۹۰/۴۵/۴۵/۹۰/۰) پرداخته می‌شود. هدایت‌کننده انرژی به شکل تخت در بین قطعات کامپوزیتی برای تمرکز انرژی به کار گرفته شده است. تأثیر تغییرات پارامترهای جوش و کامپوزیت؛ شامل دامنه ارتعاشات، نیروی جوشکاری، زمان جوشکاری، جهت الیاف و جابجایی هورن در مقدار حداکثر توان مصرفی، استحکام و کیفیت جوش مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش تهیه و ساخت مواد

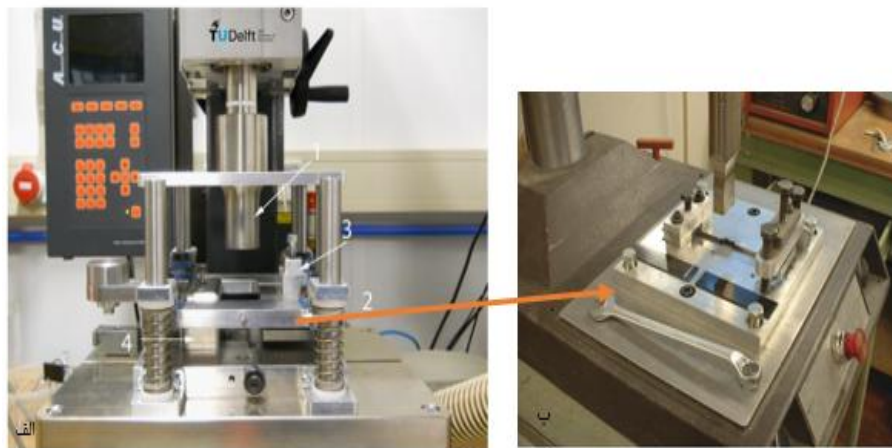
در این پژوهش از پلیمر گرمانرم بنام پلی‌امید (PA6) با الیاف شیشه به صورت پیش‌آغشته، استفاده شده است. پیش‌آغشته‌ها در جهات مختلف بر روی هم لایه چینی شده که ترتیب لایه‌گذاری نمونه‌های کامپوزیتی در دو نوع انجام می‌گیرد. نوع ۱: لایه چینی S (۹۰/۹۰/۰/۰) با ۸ لایه به ضخامت ۱.۶ میلی‌متر، نوع ۲: لایه چینی S (۰/۹۰/۴۵/۴۵/۹۰/۰) با ضخامت ۲.۴ میلی‌متر است. نمونه‌های کامپوزیتی برای یک‌دست و یک‌نواخت شدن، یکجا در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵ بار به مدت ۳۰ دقیقه با پرس گرم ساخته شده‌اند. نمونه‌ها در اندازه‌های ۱۰.۶*۲۵.۴ میلی‌متر با واترجت برش داده شدند به طوری که در لایه چینی نوع ۱ جهت الیاف لایه اول کامپوزیت، در راستای عمود بر طول نمونه و در لایه چینی نوع ۲ جهت الیاف لایه اول کامپوزیت، در راستای طول نمونه است. نمونه‌های کامپوزیتی برای جوشکاری و آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM D 1002 با هم‌پوشانی ۲۵.۴*۱۲.۷ میلی‌متر انجام گرفته است. بین کامپوزیت‌ها از یک فیلم نازک پلی‌امید خالص به شکل تخت به ضخامت ۰/۱۴ میلی‌متر به عنوان هدایت‌کننده انرژی استفاده شده است. هدایت‌کننده انرژی نیز در یک قالب در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه تحت فشار ۲ بار توسط پرس گرم ساخته شده است و سپس برای قرارگیری در ناحیه هم‌پوشانی برش داده شده‌اند. (شکل ۲).



شکل ۲ شماتیکی از نمونه کامپوزیتی آماده سازی شده

۲-۲- جوش آلتراسونیک

در این پژوهش اتصال نمونه‌های کامپوزیتی توسط دستگاه جوش آلتراسونیک Rinco Dynamic با ماکزیمم توان خروجی ۳۰۰۰ وات موجود در دانشگاه دلفت هلند انجام گرفته است. هورن دستگاه به شکل استوانه‌ای و به قطر ۴۰ میلی‌متر از جنس تیتانیوم می‌باشد. دستگاه مجهز به سامانه نمایش داده‌هاست که نمودارهای توان-زمان، جابجایی- زمان و توان-انرژی را در هنگام جوشکاری ترسیم می‌کند. همچنین دامنه ارتعاشات در این دستگاه قابل تغییر می‌باشد که در این تحقیق از دامنه ارتعاش ۵۱/۸، ۷۴/۵ و ۸۶/۲ میکرومتر استفاده شده است و نیروی جوش کاری ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ نیوتن با سه زمان جوشکاری ۳۰۰، ۵۰۰ و ۹۰۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل ۳ الف نمایی از دستگاه جوش آلتراسونیک را نشان می‌دهد.



شکل ۳ الف) دستگاه جوش آلتراسونیک (ب) فیکسچر مخصوص [۲۰]

۲-۳- فیکسچر مخصوص

برای جلوگیری از حرکت نمونه‌های کامپوزیتی در حین جوشکاری و خمش کامپوزیت‌ها در حین فشار و ذوب هدایت‌کننده‌های انرژی از یک فیکسچر مخصوص استفاده می‌شود (شکل ۳ ب). این فیکسچر فقط اجازه حرکت نمونه در جهت عمودی برای انجام فرایند جوشکاری را فراهم می‌کند تا اطمینان حاصل شود که قطعات در یک راستا از نوک هورن قرار گرفته و با فشار یکنواخت در طول جوشکاری نگه داشته شود.

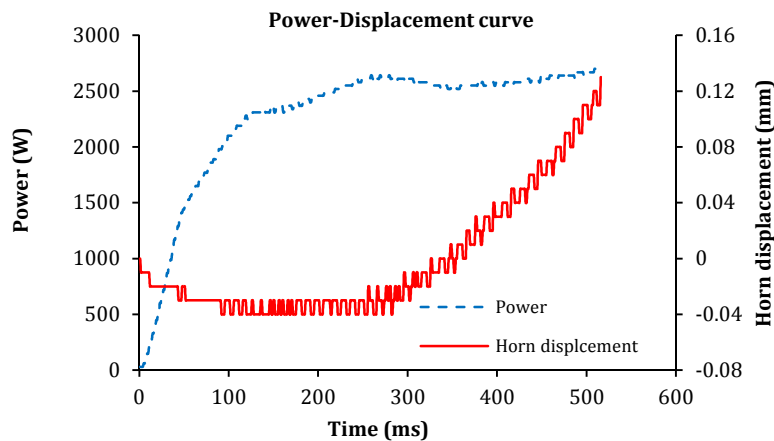
۲-۴- طراحی آزمایش

در این مقاله، آزمایشی بر اساس طرح سه عاملی در سه سطح طراحی شد. ایجاد ماتریس طراحی و تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی از نرم افزار آماری مینی‌تب استفاده شد. پارامترهای فرآیند، شامل دامنه ارتعاش (A) در سه سطح ۵۱/۸، ۷۴/۵ و ۸۶/۲ میکرومتر، زمان جوشکاری (T) در سه سطح ۳۰۰، ۵۰۰ و ۹۰۰ میلی ثانیه و نیروی جوشکاری (F) با سه سطح ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ نیوتن بوده که به عنوان متغیرهای ورودی مستقل و قابل کنترل برای انجام آزمایش با محدوده و سطوح مختلف می‌باشد. معیارهای انتخاب حدود عملی پارامترها بر اساس دستیابی به جوش‌های تاحدی با نفوذ خوب و بدون گرمای بیش از حد بود. در آزمایش‌های فوق از کامپوزیت‌های گرمانرم با لایه چینی S (۰/۹۰/-۴۵/۴۵/۹۰/۰) استفاده شده است و برای بررسی تأثیر نوع لایه چینی و جابجایی هورن در استحکام اتصال آزمایش‌های مجزا انجام شده است. از هر نمونه ۲ تکرار آزمایش شده است.

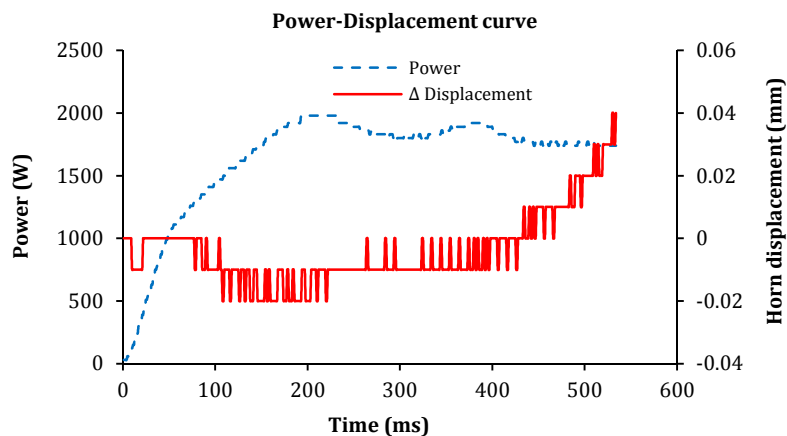
۳- بحث و نتایج

۳-۱- نمودار توان - جابجایی

مقدار توانی که در هنگام جوشکاری مصرف می‌شود با پدیده‌های فیزیکی که در ناحیه بین صفحه‌ای جوش اتفاق می‌افتد، رابطه مستقیم دارد [۲۵]. همان طوری قبلاً اشاره شده دستگاه جوش آلتراسونیک مجهز به سامانه نمایش و ارائه داده‌ها در حین جوشکاری است که شکل‌های ۴ و ۵ نمودار توان - جابجایی بر حسب زمان برای کامپوزیت S(۰/۹۰/-۴۵/۴۵/۹۰/۰) با جابجایی ۰/۱۲ و ۰/۰۴ میلی‌متر نشان داده شده است. با بررسی نمودار توان در دو شکل مشاهده می‌شود که منحنی توان در ابتدا به صورت پیوسته بالا می‌رود و بعد از اینکه به اوج رسید کاهش می‌یابد و سپس دوباره افزایش یافته و بعد از هموار شدن باز هم کاهش می‌یابد. ویلگاس [۲۶] منحنی توان را بخش‌های مختلف تقسیم‌بندی کرده است. در شکل‌های ۴ و ۵، بخش‌های ۲ و ۳ منحنی توان از تقسیم‌بندی ویلگاس وجود ندارد. یعنی منحنی توان به طور پیوسته صعودی و سپس تقریباً هموار می‌باشد علت این امر، این است که هدایت کننده‌ی انرژی استفاده شده در این نوع جوشکاری، ضخامت کم‌تری دارد و به هنگام جوشکاری، لایه اول کامپوزیت به طور همزمان با هدایت کننده‌ی انرژی ذوب می‌شود و منحنی توان در طول جوشکاری به این صورت می‌باشد. همچنین در این شکل‌ها منحنی جابجایی هم بر حسب زمان رسم شده است (منظور از جابجایی، مقدار حرکت هورن، از لحظه تماس با کامپوزیت و شروع جوشکاری به سمت پایین است). با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ مقدار منحنی جابجایی هم بعد از مدت زمانی شروع به افزایش می‌کند یعنی هدایت کننده‌ی انرژی در اثر حرارت ایجاد شده ذوب می‌شود و تحت فشار، حرکت هورن به سمت پایین اتفاق می‌افتد.



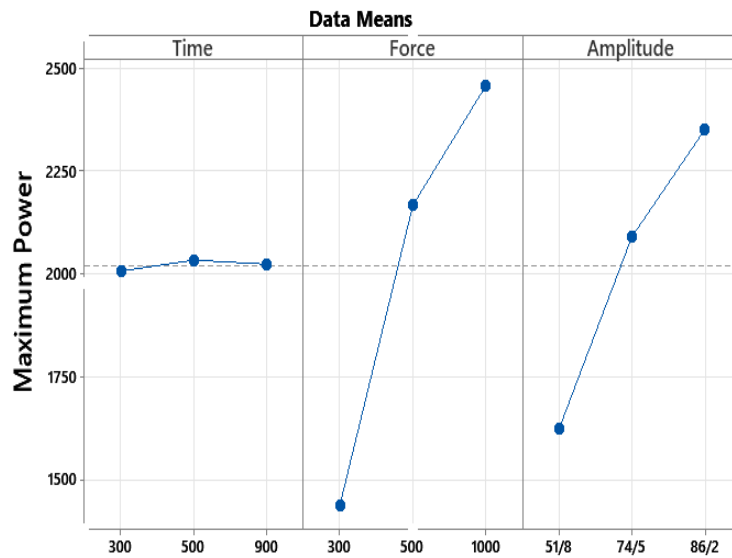
شکل ۴ نمودار توان-جابجایی با جابجایی ۰/۱۲ میلی‌متر



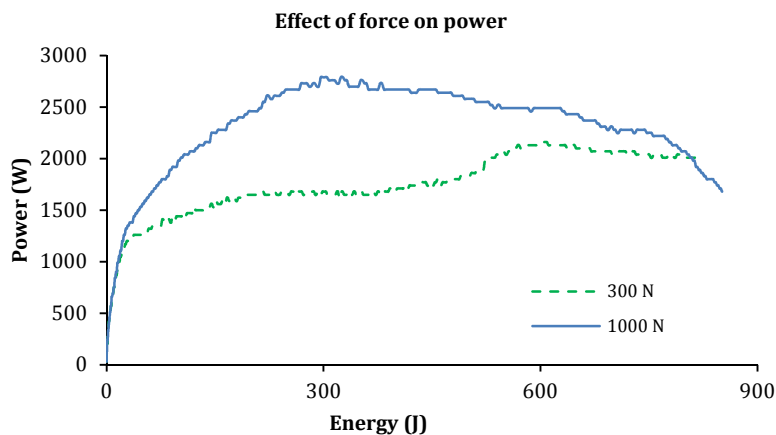
شکل ۵ نمودار توان-جابجایی با جابجایی ۰/۰۴ میلی‌متر

۳-۲- اثر دامنه ارتعاشات، زمان جوشکاری و نیروی جوشکاری در حداکثر توان مصرفی

دامنه ارتعاشات و نیروی جوشکاری تأثیر قابل توجهی در مقدار حداکثر توان مصرفی دارند. در شکل ۶ مقدار توان مصرفی در دامنه ارتعاش، نیروی و زمان جوشکاری مختلف را نشان می‌دهد که با افزایش دامنه ارتعاشات، پیک توان در مقادیر بالا اتفاق می‌افتد. همان طوری که قبلاً گفته شده حرارت تولید شده در جوش آلتراسونیک ناشی از اصطکاک و تلفات ویسکوالاستیک است و از طرفی در جوش آلتراسونیک در ناحیه بین صفحه‌ای جابجایی نسبی بین هدایت‌کننده‌ی انرژی و کامپوزیت‌ها توسط ارتعاشات انجام می‌گیرد که ارتعاشات مکانیکی به حرکت نسبی در ناحیه بین صفحه‌ای تبدیل می‌شوند با افزایش دامنه ارتعاشات میزان جابجایی نسبی افزایش می‌یابد و مقدار حداکثر توان لازم برای غلبه بر اصطکاک و حرکت نسبی بیشتر می‌شود. با افزایش نیروی جوشکاری ناحیه تماس بین هدایت‌کننده‌ی انرژی و کامپوزیت بیشتر شده و در نتیجه مقدار توان بیشتری نیاز است. [۲۶]. همچنین در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش نیروی جوشکاری منحنی توان زودتر به پیک خود می‌رسد چون اندازه و مقدار هسته زایی و رشد هسته‌ها افزایش یافته و حرارت تولید شده بیشتر می‌شود [۲۷]. بدیهی است که مقدار حداکثر توان مصرفی به نوع حرارت تولید شده در بین صفحات بستگی دارد و با توجه به اینکه زمان جوشکاری مستقل از نحوه تولید گرما است، با بیشتر شدن زمان جوشکاری تغییر محسوسی در حداکثر توان مصرفی مشاهده نمی‌شود.



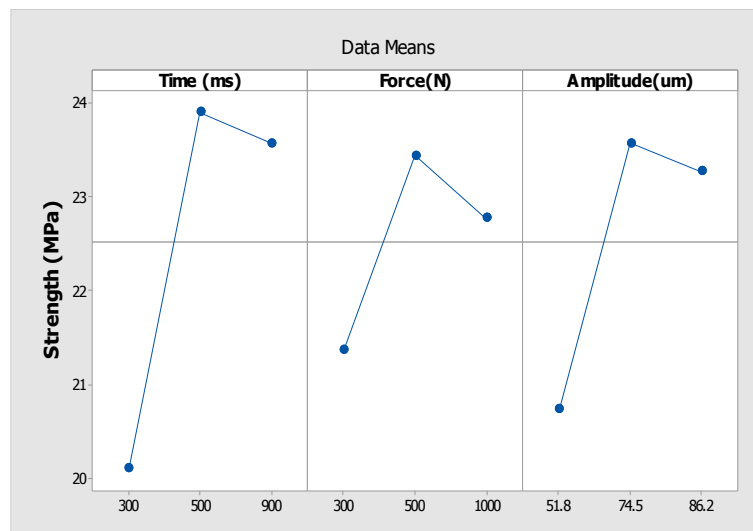
شکل ۶ اثر دامنه ارتعاشات، زمان جوشکاری و نیروی جوشکاری بر حداکثر توان مصرفی



شکل ۷ اثر نیرو بر حداکثر توان مصرفی

۳-۳- اثر دامنه ارتعاشات، زمان جوشکاری و نیروی جوشکاری در استحکام اتصال

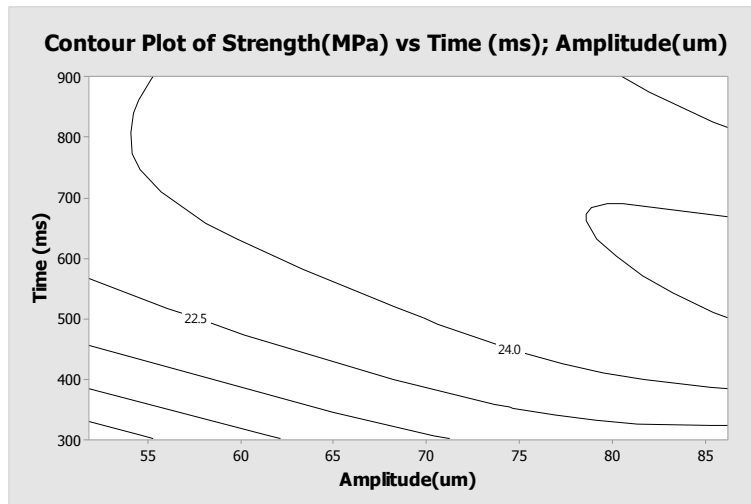
همان‌طوری که گفته شد زمان، نیروی جوشکاری و دامنه ارتعاش از پارامترهای اساسی تأثیرگذار در استحکام جوش آلتراسونیک است. در شکل ۸ تأثیر هر کدام از پارامترهای فوق بر استحکام اتصال بدون در نظر گرفتن اثر و شرایط پارامترهای دیگر بر روی هم مشاهده می‌شود. با افزایش دامنه ارتعاش ابتدا استحکام جوش ابتدا بیش‌تر شده و سپس کاهش می‌یابد. علت آن است که با افزایش دامنه ارتعاش، گرمای تولید شده در بین صفحات بیش‌تر شده و نفوذ رزین در عمق بیش‌تری در لایه‌های کامپوزیتی انجام شده که باعث افزایش استحکام و کیفیت جوش، می‌شود. اما افزایش دامنه ارتعاش زیاد، منجر به تخریب ماده و ایجاد فلش در بین صفحات می‌شود و در نتیجه استحکام اتصال کاهش می‌یابد. همچنین افزایش نیروی جوشکاری تأثیر مثبتی در استحکام اتصال دارد. زمانی که نیروی جوش افزایش می‌یابد تماس هدایت‌کننده انرژی بیش‌تر شده و باعث گرم شدن سریع هدایت‌کننده انرژی می‌شود و باعث نفوذ مولکول‌ها مواد به داخل یکدیگر می‌شود. اما نیروی بیش از حد باعث بیرون زدن مواد و بهم ریختن الیاف در ناحیه بین صفحات می‌شود. با افزایش زمان جوشکاری گرمای ورودی به ناحیه بین صفحات بیش‌تر شده و باعث می‌شود مواد بیش‌تری را ذوب کند و در نتیجه استحکام اتصال افزایش می‌یابد. زمان جوشکاری زیاد مواد را تخریب کرده و منجر به کاهش استحکام می‌شود.



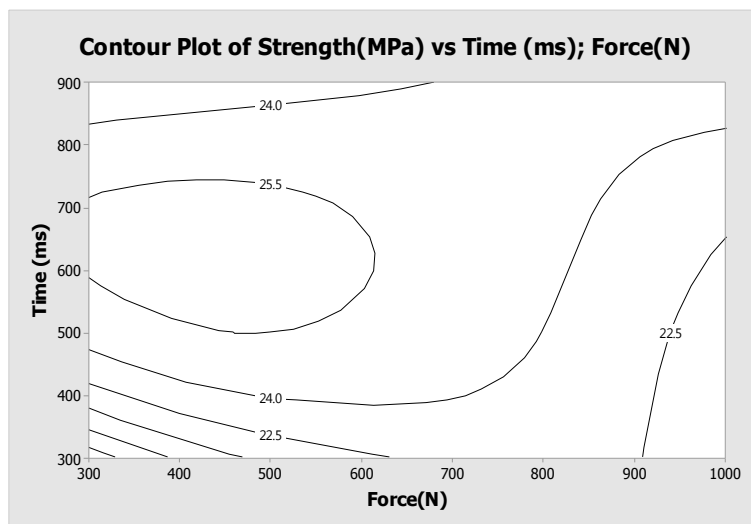
شکل ۸ اثر دامنه ارتعاشات، زمان جوشکاری و نیروی جوشکاری در استحکام جوش

با توجه به اثر بخشی تأثیرات متقابل پارامترهای فوق بر استحکام اتصال، از شکل‌های سه بعدی برای پیدا کردن نقطه مناسب پارامترها استفاده شده است.

بررسی شکل ۹ حاکی از آن است که افزایش دامنه ارتعاش تا به میزان معینی باعث افزایش استحکام می‌شود زیرا حرارت تولید شده بیش‌تر شده و ماده پلیمری زودتر ذوب می‌شود [۲۶]. بنابراین مقدار زمان مورد نیاز برای ذوب شدن ماده پلیمری کاهش می‌یابد. مناسب‌ترین مقدار دامنه ارتعاش در محدوده ۸۵-۸۰ میکرومتر در زمان ۷۰۰-۶۰۰ میلی ثانیه اتفاق می‌افتد که بیش‌ترین استحکام اتصال برابر ۲۵/۵ مگاپاسکال را دارد. همچنین نیروی جوشکاری بیش‌تر منجر به ایجاد گرمایی بیش‌تر می‌شود. یعنی با توجه به اینکه در ابتدای فرایند جوش، عامل اصطکاک در حرارت تولید شده نقش بسزایی دارد با بیش‌تر شدن نیرو، حرارت تولید شده در بین صفحات سریع‌تر افزایش می‌یابد و باعث می‌شود استحکام اتصال بیش‌تر شود. این پارامتر همانند دامنه ارتعاش وابسته به زمان جوشکاری است که بیش‌ترین مقدار استحکام در نیروی ۶۰۰-۴۰۰ نیوتن و زمان ۷۰۰-۶۰۰ میلی ثانیه اتفاق می‌افتد (شکل ۱۰).



شکل ۹ تأثیر دامنه ارتعاشات و زمان جوشکاری در استحکام جوش



شکل ۱۰ تأثیر دامنه ارتعاشات و زمان جوشکاری در استحکام جوش

۳-۴- جابجایی هورن

مقدار حرکت هورن، که در تماس با سطح بالایی کامپوزیت است، از لحظه شروع جوشکاری به سمت پایین، را جابجایی هورن گفته می‌شود که اثر مهمی در کیفیت و استحکام جوش دارد. مطالعات نشان می‌دهد برای جوش‌پذیری مناسب و استحکام بالای اتصال باید مقدار جابجایی کمتر از ضخامت هدایت کننده‌ی انرژی باشد [۲۵].

جدول ۱ برای کامپوزیت S (۰/۹۰/-۴۵/۴۵/۹۰/۰) میزان جابجایی مختلف (با ثابت بودن بقیه پارامترها) را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود با افزایش جابجایی از ۰/۰۴ به ۰/۰۹ میلیمتر استحکام اتصال از ۲۰/۱۰ به ۲۵/۵۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. اما با پایین آمدن بیش‌تر هورن، افزایش جابجایی، استحکام کاهش پیدا می‌کند. این ارتباط جابجایی با استحکام به پدیده‌های فیزیکی که در ناحیه بین صفحه اتفاق می‌افتد مرتبط می‌شود. به نظر می‌رسد با افزایش جابجایی مقدار بهم ریختگی الیاف در بین صفحات بیش‌تر شده و باعث کاهش استحکام اتصال در آزمون کشش می‌شود.

جدول ۱ مقادیر استحکام در جابجایی‌های مختلف هورن

استحکام (MPa)	میزان جابجایی (mm)	نوع لایه چینی کامپوزیت
20.10	0.04	[0,90,+45,-45,90,0]s
23.20	0.05	[0,90,+45,-45,90,0]s
25.50	0.09	[0,90,+45,-45,90,0]s
17.20	0.12	[0,90,+45,-45,90,0]s

بدیهی است که برای افزایش جابجایی هورن در دامنه ثابت به زمان بیش‌تری نیاز است. مقدار جابجایی هورن رابطه مستقیمی با زمان جوشکاری دارد. یعنی با افزایش میزان جابجایی هورن مدت زمان جوشکاری بیش‌تر شده و در نتیجه حرارت تولید شده در بین صفحات افزایش می‌یابد. تحقیقات نشان می‌دهد که این افزایش دمای بیش از حد باعث تخریب شدن پلیمر و در نتیجه کاهش کیفیت و استحکام جوش می‌گردد [۲۷].

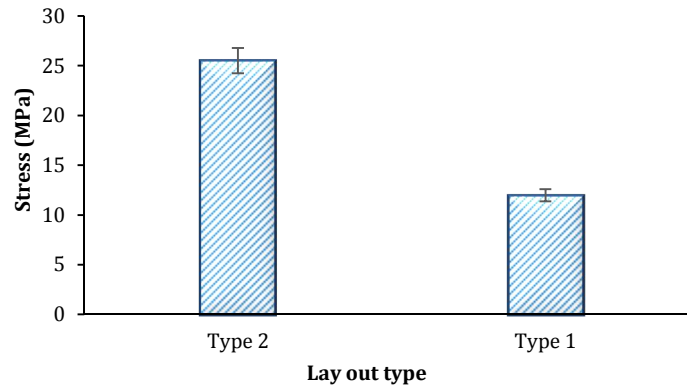
همان‌طوری که گفته شد مقدار جابجایی هرن از لحظه شروع تا پایان جوشکاری بر استحکام و کیفیت جوش تأثیر می‌گذارد. با توجه به اینکه جابجایی هورن مستقل از ضخامت قطعه و ... است استفاده از نمودار توان مصرفی بر حسب جابجایی مناسب می‌باشد. با دقیق شدن در نمودارهای جابجایی شکل‌های ۴ و ۵، مشاهده می‌شود در شروع جوشکاری جابجایی هورن منفی می‌باشد یعنی هورن به سمت بالا جابجایی دارد چون وقتی هدایت‌کننده‌ی انرژی ناحیه هم‌پوشانی در اثر ارتعاش گرم می‌شود منبسط شده و هورن را به سمت بالا حرکت می‌دهد و باعث منفی شدن جابجایی در شروع جوشکاری می‌شود که در ادامه با ذوب شدن هدایت‌کننده‌ی انرژی به سمت پایین حرکت می‌کند. بنابراین استفاده از نمودار توان-جابجایی در مواقعی که اندازه هورن بیش‌تر یا هم اندازه‌ی ناحیه هم‌پوشانی است مناسب می‌باشد. زمانی که اندازه هورن کوچک‌تر از ناحیه هم‌پوشانی باشد، یعنی قسمت جوشکاری شده به اندازه هورن است، فقط هدایت‌کننده‌ی انرژی زیر هورن گرم شده و منبسط می‌شود و هورن بالا می‌رود چون بقیه قسمت‌ها (به غیر از زیر هورن) جامد باقی می‌مانند بنابراین هورن نمی‌تواند به سمت پایین حرکت کند.

۳-۵- لایه چینی و جهت الیاف

برای بررسی اثر لایه چینی و جهت الیاف از دو نوع لایه چینی، نوع ۱ (۹۰/۹۰/۰/۰)S و نوع ۲ (۴۵/۴۵/۹۰/۰)S، با دامنه ارتعاش ثابت ۸۶/۲ میکرومتر و ضخامت هدایت‌کننده‌ی انرژی ۰/۱۴ میلی‌متر و مقدار جابجایی ۰/۰۹ میلی‌متر استفاده شده است.

نتایج حاصل از داده‌های آزمایش کشش نشان داده شده در شکل ۱۱ بیان می‌کند که استحکام در جهتی که الیاف لایه اول کامپوزیت هم راستا با جهت کشش است یعنی در نوع ۲ بیش‌تر از نوع ۱ است که در آن الیاف عمود بر جهت کشش است. به نظر می‌رسد بعد از ذوب هدایت‌کننده‌ی انرژی و شکل‌گیری اتصال، الیافی که در ناحیه بین صفحه‌ای قرار می‌گیرند، تنش وارده بر این ناحیه جوش را تحمل می‌کنند و استحکام اتصال را تحت تأثیر قرار داده و نهایتاً استحکام جوش زمانی که جهت لایه اول کامپوزیت هم جهت با راستای کشش است نسبت به حالت عمود بیش‌تر می‌باشد.

بررسی سطح جوش نمونه کامپوزیتی بعد از آزمایش در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که سطح شکست نمونه‌های نوع ۱ که زاویه ۹۰ درجه نسبت به راستای کشش دارند، به صورت خشک است. همچنین کنده شدن الیاف در سطح شکست موید به اشتراک گذاشته شدن الیاف کامپوزیت در ناحیه بین صفحه‌ای است [۱۰].



شکل ۲ نمودار استحکام جوش در دو نوع لایه چینی



شکل ۱۲ سطح شکست جوش نمونه کامپوزیتی بعد از آزمایش کشش

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر تاثیر پارامترهای جوش آلتراسونیک و پارامترهای کامپوزیت در استحکام و کیفیت اتصال و جوش‌پذیری کامپوزیت‌های گرمانرم پلی‌امید-۶ شیشه بررسی شد. کامپوزیت‌های گرمانرم پلی‌امید-۶ شیشه در دو نوع لایه چینی S (۹۰/۹۰/۰/۰) و (-/۹۰/۰)S (۴۵/۴۵/۹۰/۰) با پرس گرم ساخته شدند. از هدایت‌کننده‌ی انرژی به شکل تخت با ضخامت ۰/۱۴ میلی‌متر و دامنه ارتعاش ۵۱/۸، ۷۴/۵ و ۸۶/۲ میکرومتر و نیروی جوشکاری ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ نیوتن و از زمان‌های جوشکاری ۳۰۰، ۵۰۰ و ۹۰۰ میلی‌ثانیه استفاده شده است. نمونه‌های کامپوزیتی به وسیله دستگاه جوش آلتراسونیک مجهز به سامانه نمایش داده‌ها اتصال داده شدند و سپس تحت آزمایش کشش (LSS) استحکام آن‌ها بدست آورده شدند. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

- با افزایش دامنه ارتعاشات از ۵۱/۸ به ۸۶/۲ میکرومتر حداکثر توان مصرفی از ۱۶۲۳ به ۲۳۵۰ وات و با افزایش نیروی جوشکاری از ۳۰۰ به ۱۰۰۰ نیوتن مقدار حداکثر توان مصرفی ۱۴۴۰ به ۲۴۵۷ وات افزایش می‌یابد و زمان رسیدن به این نقطه کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش دامنه ارتعاشات، نیروی جوشکاری و زمان جوشکاری تا مقدار معینی استحکام جوش افزایش می‌یابد به طوری که دامنه ارتعاش تا ۷۴/۵ میکرومتر، نیروی جوشکاری تا ۵۰۰ نیوتن و زمان جوشکاری تا ۵۰۰ میلی‌ثانیه، استحکام جوش افزایش یافته و فراتر از آن مقادیر استحکام جوش کاهش می‌یابد.
- کنترل جابجایی در جوش‌پذیری کامپوزیت‌ها تاثیر می‌گذارد. با بیش‌تر شدن جابجایی از ۰/۰۴ به ۰/۰۹ میلی‌متر استحکام اتصال از ۲۰/۱ به ۲۵/۵ مگاپاسکال افزایش پیدا می‌کند اما جابجایی بیش از حد هورن، مدت زمان جوشکاری را افزایش داده و دما در بین صفحه‌ای بالا رفته و در نتیجه الیاف در بین صفحات بهم ریخته و رزین تخریب شده و نهایتاً استحکام جوش کاهش می‌یابد.

- با تغییر جهت الیاف لایه اول کامپوزیت نسبت به راستای کشش از صفر درجه به ۹۰ درجه، استحکام اتصال از ۲۵/۵ مگاپاسکال به ۱۱/۹۸ مگاپاسکال کاهش یافته و کیفیت جوش در حالت ۹۰ درجه به صورت شکست خشک اتفاق افتاده است.
- نهایتاً مناسب‌ترین نقطه برای اتصال کامپوزیت S(۰/۹۰/-۴۵/۴۵/۹۰/۰)، در محدوده دامنه ارتعاش ۸۵-۸۰ میکرومتر و نیروی ۴۰۰-۶۰۰ نیوتن در زمان جوشکاری ۶۰۰-۷۰۰ میلی ثانیه اتفاق می‌افتد که بیش‌ترین استحکام اتصال برابر ۲۵/۵ مگاپاسکال را دارد.

References

- [1] Mallick PK. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. CRC press; 2007 Nov 19.
- [2] Sadeghi M, Pol MH. Experimental investigation of the effect of the addition of carbon nanotubes on the quasi-static punch shear penetration of the laminated glass/epoxy composite. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Feb 10;15(12):416-24. doi: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.44.2 [In Persian]
- [3] Wang Y, Rao Z, Liao S, Wang F. Ultrasonic welding of fiber reinforced thermoplastic composites: Current understanding and challenges. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021 Oct 1; 149:106578. doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106578
- [4] Piao H, Chen L, Kiryu Y, Ohsawa I, Takahashi J. Influence of water absorption and temperature on the mechanical properties of discontinuous carbon fiber reinforced polyamide 6. *Fibers and Polymers*. 2019 Mar; 20:611-9. doi: 10.1007/s12221-019-8767-5
- [5] Soygun K, Bolayir G, Boztug A. Mechanical and thermal properties of polyamide versus reinforced PMMA denture base materials. *The journal of advanced prosthodontics*. 2013 May 1;5(2):153-60. doi: 10.4047/jap.2013.5.2.153
- [6] Zhao T, Rans C, Villegas IF, Benedictus R. On sequential ultrasonic spot welding as an alternative to mechanical fastening in thermoplastic composite assemblies: A study on single-column multi-row single-lap shear joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019 May 1; 120:1-1. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.02.013
- [7] 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
- [8] Guo H, Gingerich MB, Headings LM, Hahnen R, Dapino MJ. Joining of carbon fiber and aluminum using ultrasonic additive manufacturing (UAM). *Composite Structures*. 2019 Jan 15; 208:180-8. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.10.004
- [9] Malekipour E, Heidary H, Majd NS, Mazdak S, Sharifi E. Effect of resonant frequency variation on the ultrasonically assisted deep drawing process: numerical and experimental study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 Jan; 106:2243-64. doi: 10.1007/s00170-019-04545-w
- [10] Kumar S, Wu CS, Padhy GK, Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review. *Journal of manufacturing processes*. 2017 Apr 1; 26:295-322. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.02.027
- [11] *Compositesworld Journal*, 'Welding thermoplastic composites', Updated 2/21/2023 | Published 9/1/2018.
- [12] 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.
- [13] Zhao T, Palardy G, Villegas IF, Rans C, Martinez M, Benedictus R. Mechanical behaviour of thermoplastic composites spot-welded and mechanically fastened joints: A preliminary comparison. *Composites Part B: Engineering*. 2017 Mar 1;112:224-34. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.12.028
- [14] Goto K, Imai K, Arai M, Ishikawa T. Shear and tensile joint strengths of carbon fiber-reinforced thermoplastics using ultrasonic welding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019 Jan 1;116:126-37. doi: 10.1016/j.compositesa.2018.10.032
- [15] Levy A, Le Corre S, Poitou A. Ultrasonic welding of thermoplastic composites: a numerical analysis at the mesoscopic scale relating processing parameters, flow of polymer and quality of adhesion. *International Journal of Material Forming*. 2014 Mar;7:39-51. doi: 10.1007/s12289-012-1107-6
- [16] Tao W, Su X, Wang H, Zhang Z, Li H, Chen J. Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding. *Journal of manufacturing processes*. 2019 Jan 1;37:196-202. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.11.002
- [17] Suresh KS, Rani MR, Prakasan K, Rudramoorthy R. Modeling of temperature distribution in ultrasonic welding of thermoplastics for various joint designs. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007 May 7;186(1-3):138-46. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.028

- [18] Wang X, Yan J, Li R, Yang S. FEM investigation of the temperature field of energy director during ultrasonic welding of PEEK composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2006 Sep;19(5):593-607. doi: [10.1177/0892705706067479](https://doi.org/10.1177/0892705706067479)
- [19] Zhang Z, Wang X, Luo Y, Zhang Z, Wang L. Study on heating process of ultrasonic welding for thermoplastics. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2010 Sep;23(5):647-64. doi: [10.1177/0892705709356493](https://doi.org/10.1177/0892705709356493)
- [20] Ageorges C, Ye L, Hou M. Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. *Composites Part A: applied science and manufacturing*. 2001 Jun 1;32(6):839-57. doi: [10.1016/S1359-835X\(00\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00166-4)
- [21] Villegas IF, Bersee HE. Ultrasonic welding of advanced thermoplastic composites: An investigation on energy-directing surfaces. *Advances in Polymer Technology*. 2010 Jun;29(2):112-21. doi: [10.1002/adv.20178](https://doi.org/10.1002/adv.20178)
- [22] Fernandez Villegas I, Valle Grande B, Bersee HE, Benedictus R. A comparative evaluation between flat and traditional energy directors for ultrasonic welding of CF/PPS thermoplastic composites. *Composite Interfaces*. 2015 Oct 13;22(8):717-29. doi: [10.1080/09276440.2015.1053753](https://doi.org/10.1080/09276440.2015.1053753)
- [23] 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](https://doi.org/10.1080/09276440.2016.1199149)
- [24] Palardy G, Shi H, Levy A, Le Corre S, Villegas IF. A study on amplitude transmission in ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018 Oct 1; 113:339-49. doi: [10.1016/j.compositesa.2018.07.033](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.07.033)
- [25] Villegas IF. Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014 Oct 1; 65:27-37. doi: [10.1016/j.compositesa.2014.05.019](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.05.019)
- [26] 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](https://doi.org/10.1177/0892705712475015)
- [27] Dabiry Y, Nikoi R, Dabiry Y. An experimental study on the tensile behaviors of ultrasonic welded t-joints for polyamide composite. *International Journal of Engineering*. 2016 Dec 1;29(12):1783-90. doi: [72853_9713b8c3716ad5b34c14a4674207bb47](https://doi.org/10.1080/09276440.2016.1199149)