



ارزیابی تجربی استحکام اتصال در کامپوزیت‌های تک جهته پلی‌پروپیلن-شیشه تحت بار کششی

محمد نجفی¹، محمد گلزار^{2*}، محمد صادقی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-116، m.golzar@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

کامپوزیت‌های گرمانرم به دلیل خواص ذاتی، در صنایع مختلف به طور وسیع استفاده می‌شوند. اتصال قطعات کامپوزیتی از پارامترهای مهم در صنعت کامپوزیت است. در این پژوهش استحکام اتصالات کامپوزیت‌های تک جهته گرمانرم به صورت تجربی بررسی شده است. نمونه‌های کامپوزیتی از الیاف کامینگلد، از جنس شیشه-پلی پروپیلن و با استفاده از فرایند پالتروژن و به صورت پروفیل‌های تسمه‌ای شکل تولید شده‌اند. برای اتصال نمونه‌ها از سه روش پیچی، جوش آلتراسونیک و گرمایی- فشاری استفاده شده است. بر اساس نتایج تجربی، مکانیزم عملکرد و شکست مکانیکی اتصالات جوشی و پرسی با اتصال‌دهنده‌های مکانیکی مقایسه شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که نمونه‌های متصل شده به روش آلتراسونیک نسبت به روش پرس گرم و پیچی استحکام بهتری دارند. در جوش آلتراسونیک بهترین استحکام مربوط به بیش‌ترین زمان جوش کاری 1/8s است و برای اتصال پرس گرم مربوط به بیش‌ترین دما 200°C و فشار 1/5bar است. بیشینه نیروی قابل تحمل برای اتصال پیچی، متعلق به نمونه با نسبت قطر به عرض تسمه 0/2 و نسبت فاصله سوراخ به عرض تسمه 1/25 است. همچنین نتایج آزمایش کشش نشان می‌دهد که استحکام اتصال با آلتراسونیک و پرس گرم به ترتیب تقریباً 4 و 1/5 برابر نسبت به اتصال پیچی افزایش یافته است.

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 شهریور 1397

پذیرش: 12 دی 1397

ارائه در سایت: خرداد 1398

کلیدواژگان:

کامپوزیت ترموپلاست

پالتروژن

اتصالات پیچی

جوش آلتراسونیک

اتصال پرس گرم

Experimental evaluation of joint strength in polypropylene-glass fiber reinforced composites under tensile load

Mohammad Najafi, Mohammad Golzar*, Mohammad Sadeghi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-116 Tehran, Iran, m.golzar@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 16 September 2018
Accepted 2 January 2019
Available Online June 2019

Keywords:

Thermoplastic composites
Pultrusion
Bolted joint
Ultrasonic welding
Hot-press joint

Abstract

Thermoplastic composites are widely used in various industries due to its inherent properties. One of the most important parameters in the composite industry is the junction of composite components. In this research, the strength of joints of thermoplastic composites has been investigated empirically. Composite specimens are made of Commingled fibers which consist of glass/polypropylene, using a pultrusion process and as rectangular cross section profiles. For junction of the samples three methods are used including, bolted joint, ultrasonic weld and hot press. Based on the experimental results, the mechanical performance and failure of the ultrasonic weld and hot press methods were compared with the mechanical couplers. The results show that the ultrasonic bonded samples are better than the hot press method. In ultrasonic welding, the best strength is obtained for highest welding time of 1.8s, and for hot pressing the best result related to the maximum temperature of 200 °C and the maximum pressure of 1.5 bar. The maximum force for bolted joint belongs to the specimens with a diameter to width ratio of 0.2 and a hole to width ratio of 1.25. Also, the results of the tensile test show that the junction strength for ultrasonic and hot pressing methods compared to the bolted joint increased by approximately 4 and 1.5 times, respectively.

1- مقدمه

مختلفی هستند که نیاز به اتصال دارند و یکی از چالش‌های اصلی برای طراحان سازه‌های کامپوزیتی، استحکام و مقاومت این اتصالات است. به‌طور کلی آسیب در یک ساختار بزرگ از جایی که قطعات مختلف به هم متصل شده‌اند شروع می‌شود. بنابراین کاهش تعداد اتصال و طراحی اتصال مؤثر، امری مهم

امروزه مواد کامپوزیتی به ویژه کامپوزیت‌های گرمانرم به طور گسترده در صنایع مختلف بخصوص هوا و فضا، موشک‌سازی، خودروسازی و غیره استفاده می‌شود. با وجود این حقیقت که مواد کامپوزیتی را می‌توان به صورت یکپارچه ساخت، اما قطعات

Please cite this article using:

M. Najafi, M. Golzar, M. Sadeghi, 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 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.SID.ir

مورد بررسی قرار داده است. همچنین تاثیر پارامتر عرض نمونه را بر استحکام اتصال مورد بررسی قرار داده است [5]. کونلیو و همکاران رفتار و آنالیز اتصالات پیچی در پلیمرهای تقویت شده با الیاف پالترود را بررسی نمودند و به بررسی روش تجربی و تحلیلی در صنعت ساخت برای طراحی اتصالات مکانیکی در FRP پالترود پرداختند [6]. شهریاری فرد و همکاران، ظرفیت بارگذاری تک محوره دو لوله فولادی کواکسیال با پلاستر تقویت شده با شیشه (GFRP) را مورد بررسی قرار داده‌اند. یک تئوری کارآمد ساده برای برآورد ظرفیت بار انتخاب شده و برای تعیین پارامترهای جدید در ظرفیت بار و شکست، آزمون کششی بر روی چند نمونه انجام شده است. بر اساس مشاهدات تجربی سه نوع حالت شکست از جمله شکست GFRP، شکست چسبندگی و حالت مخلوط رخ داده است. برای بررسی اثر تعداد ورق‌های مورد استفاده، از پارچه‌های شیشه‌ای بافته شده متخلخل استفاده شد. یکی از پارامترهای جدیدی که به نام انقباض لمینیت برای کشف پارگی GFRP معرفی شد، معرفی شد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد بلورها موجب افزایش بار کششی محوری مجاز می‌شود [7]. آزمایش تجربی میستچانگ در مورد استفاده از جوش نقطه‌ای در اتصال به فلزات و کامپوزیت‌های گرمانرم انجام شد. برای اتصال فلز / کامپوزیت پلیمری از جوش موضعی استفاده شد و عملکرد مکانیکی اتصالات جوش با آزمایش تک لبه مشخص شد [8]. ژائو بر اساس نتایج آزمایشی، مکانیزم عملکرد مکانیکی و شکست مکانیکی اتصالات جوش داده‌شده به‌وسیله آلتراسونیک را در مقایسه با اتصال‌دهنده‌های مکانیکی مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله، یک سری از مطالعات تجربی، از جمله دو نوع مختلف آزمون‌های مکانیکی (آزمون‌های DLS و PT) و تجزیه فراکتروپیک بر روی نمونه‌های CF / PEEK انجام شده است. رفتار مکانیکی، حالت‌های شکست و DAZ مشخص شده، در مقایسه با اتصالات جوش داده شده و اتصالات مکانیکی مشخص شد. [9]. به‌طور مشابه با اتصالات چسبی، خط اتصال پیوسته جوش داده‌شده در ساختارهای کامپوزیتی گرمانرم، نیازی به حفاری سوراخ در اتصال آن‌ها نیست. جوش کاری التراسونیک نیز به‌عنوان یک روش کاربردی برای اتصال گرمانرم شناخته شده است. از جمله مزایای روش جوش کاری التراسونیک در برابر جوش کاری القایی و مقاومتی زمان جوش کاری بسیار کوتاه، مصرف انرژی بسیار کم و تولید گرمای بسیار متمرکز است [10].

هدف این پژوهش بررسی استحکام اتصالات کامپوزیت‌ها و یافتن پارامترهای موثر بر اتصالات می‌باشد. برای به دست آوردن

تلقی می‌شود. روش‌های اتصال زیادی اغلب از اتصال مکانیکی مانند اتصال پیچی، پینی، خال جوش در مواد کامپوزیتی و فلزی استفاده می‌شود. اتصال مکانیکی در جاهایی که امکان مجزا کردن نیاز است، کاملاً ساده و مناسب هستند. باوجوداین، سوراخ‌های محل اتصال مکانیکی، باعث ایجاد آسیب‌های موضعی و ریز، در لایه‌های کامپوزیت در حین فرایند تولید می‌شود و به دنبال آن، کاهش استحکام در ساختار اتفاق می‌افتد.

اتصال چسبی یکی دیگر از روش‌های اتصال است که به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت اصلی اتصال چسبی این است که سوراخ‌های اتصال و اتصال‌دهنده‌ها، جایی که منبع تمرکز تنش و افزایش وزن هستند، لازم نیست. در نتیجه توزیع تنش در اتصال چسبی نسبتاً در مقایسه با اتصال مکانیکی یکنواخت‌تر است. از سوی دیگر اتصال چسبی چندین عیب عمده دارد، اول اینکه جدا کردن قطعات بدون ایجاد آسیب، کاری مشکل است. دوم اینکه استحکام اتصال به فاکتورهای محیطی مانند دما و رطوبت خیلی حساس است. به‌علاوه، آماده‌سازی سطوح به دلیل مصرف زمان زیاد، گران تمام می‌شود. طراحی اتصال چسبی با چسبندگی کامپوزیتی به علت نبود معیار گسیختگی مناسب برای اندازه‌گیری استحکام بین لایه‌ای کاری سخت و پیچیده است. بنابراین، مطالعات بیشتری روی اتصال چسبی برای اتصال قابل اطمینان لازم است [1]. در خصوص تأثیر عوامل هندسی و مادی در یک اتصال چسبی که بر روی استحکام اتصال و توزیع تنش لایه چسب اثر می‌گذارند، محققین مختلفی کار کرده‌اند. به‌منظور درک اثر برخی از پارامترهای هندسی و ساختی، استحکام برشی اتصالات چسبی تک لبه‌ای را به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. کاهش زبری سطح و افزایش ضخامت چسبندگی و طول ناحیه اتصال باعث افزایش استحکام برشی اتصال می‌گردد [2]. در دهه‌های اخیر، استفاده از کامپوزیت‌های ترموپلاستیک در ساختارهای هواپیما افزایش یافته است، زیرا از نظر استحکام و سفتی، نسبت به وزن، در مقایسه با فلزات برتری دارد و فرایند تولید نسبت به کامپوزیت‌های گرماسخت مقرون به‌صرفه است [۳،۴].

پژوهش‌هایی در زمینه استفاده از اتصالات پیچی در کامپوزیت‌ها صورت گرفته است. مارشال و همکاران در مورد آنالیز المان محدود پین بارگذاری شده و سوراخ پیچ شده در لایه‌های (0/90)s و (90/0)s پرداخته‌اند [4]. راماکریشنا و همکاران به روش تخمین اتصال پیچی و مود شکست پرداخته است. ایشان اتصالات کششی کامپوزیت‌های ساندویچ پالترود را

مانند فایبر، راجرز، تفلون و ... ساخته شده که روی آن یک لایه نازک مس کشیده شده و با ضخامت‌های 0/2 تا 3/2 میلی‌متر عرضه می‌گردند. این تب‌ها بر روی قطعات چسبانده شدند و برای این که قطعه از فک دستگاه کشش سر نخورد، خراش‌هایی روی قسمت مسی تب‌ها داده شد.

به منظور بررسی کردن پارامترهای موثر بر استحکام کششی اتصالات پیچی سه قطر مختلف برای سوراخ کردن نمونه‌ها انتخاب شد. سه سوراخ به قطرهای 4، 6 و 8 میلی‌متر ایجاد شد. همچنین فاصله سوراخ از لبه برای نمونه‌ها با قطرهای مذکور به اندازه 15، 20 و 25 میلی‌متر انتخاب گردید. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، به منظور بررسی استحکام کششی، این اتصالات در دستگاه تست کشش قرار داده شد. شکل 1 نمونه‌ای از اتصال پیچی تحت کشش در دستگاه تست کشش را نشان می‌دهد.

2-3- اتصال پرس گرم

اتصال به‌وسیله گرما و فشار روش دیگری است که برای اتصال نمونه‌ها به یکدیگر استفاده شد. بدین منظور ابتدا لبه‌های متصل شونده به‌صورت موضعی با استفاده از سشوار صنعتی و کنترلر دما تا دمای مشخص گرم شد و سپس بلافاصله در زمان مشخصی تحت فشار قرار گرفتند. ابعاد نمونه براساس استاندارد [12] انتخاب گردید. شکل 2 شماتیک نمونه متصل شده را نشان می‌دهد.

نمونه‌ها در دمای 180°C با زمان 60 ثانیه و در دمای 200°C با زمان 30 ثانیه در معرض هوای داغ قرار گرفتند.



Fig. 1 Bolted sample under load on tensile test

شکل 1 نمونه پیچی تحت بار در دستگاه تست کشش

درک بهتر رفتار اتصالات کامپوزیتی GFRP از پیوسته‌های در برنامه‌های کاربردی، تحقیقات بنیادی مربوط به رفتار شبه استاتیک اتصالات لبه پیوندی انجام شد این مقاله به عنوان مبنایی برای تحقیق و توسعه بیشتر در این موضوع و تمرکز بر رفتار استاتیکی اتصالات جوش داده شده نسبت به مفاصل با یک اتصال‌دهنده مکانیکی می‌باشد. با توجه به این که مقاطع پالتروژنی در صورت استفاده، نیاز به اتصال‌های کارآمد و موثر دارند، راه‌های مختلف اتصال مقاطع باید بررسی شود. در این مقاله نحوه اتصال پروفیل پالتروژن شده پلی‌پروپیلن با الیاف تقویت‌کننده شیشه با استفاده از سه روش اتصال پیچی، پرس گرم و جوش آلتراسونیک مطالعه و در ادامه استحکام اتصال این سه روش با استفاده از آزمایش بار کششی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

2- مواد و روش آزمایش

2-1- مواد آزمایش

در این آزمایش از الیاف کامینگلد¹ از جنس شیشه-پلی پروپیلن استفاده شده است. در نخ هیبریدی کامینگلد الیاف تقویت‌کننده و ماتریس به کمک جت هوا با همدیگر مخلوط شده و در هم پیچیده می‌شود. در این روش الیاف نخ تقویتی و الیاف نخ ترموپلاستیک اختلاط بیشتری پیدا می‌کنند. در واقع در نخ هیبرید کامینگلد، الیاف ترموپلاستیک و تقویتی به‌صورت تک‌به‌تک باهم تماس دارند. ماده خام استفاده شده دارای تکس الیاف 1870 gr/km بوده که از شرکت جوشی² چین تهیه گردیده است.

نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از پالتروژن به صورت تسمه، در آزمایشگاه کامپوزیت دانشگاه تربیت مدرس ساخته شد.

2-2- اتصال پیچی

در این‌جا هدف اتصال نمونه‌ها به صورت تک لبه با استفاده از پیچ به یکدیگر است. ابعاد مربوط به نمونه‌های این نوع اتصال با توجه به مقالات استخراج گردید [11]. به دلیل این‌که اتصال نمونه‌ها به‌صورت تک لبه است و نمونه‌ها جهت آزمون کشش به صورت هم محور قرار نمی‌گیرند و همچنین برای جلوگیری از سر خوردن نمونه‌ها از فک‌های دستگاه آزمون کشش، تب‌هایی به دو طرف نمونه‌ها چسبانده شد. از برد مدار چاپی به عنوان تب استفاده شد. ماده خام تشکیل دهنده این بردها از مواد مختلفی

¹ Commingled

² Jushi

نگه‌داشتن پلیمر در زمان بیش‌تر از 60 ثانیه برای دمای 180°C

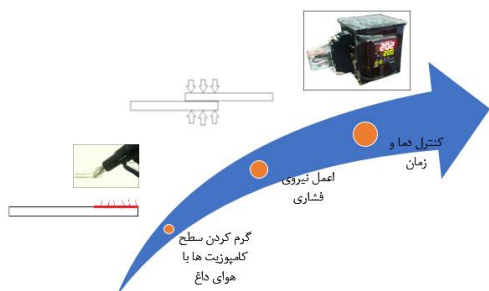


Fig. 3 Hot pressing process

شکل 3 فرایند اتصال پرس گرم



Fig. 4 Ultrasonic welding machine setup

شکل 4 تنظیم دستگاه جوش التراسونیک

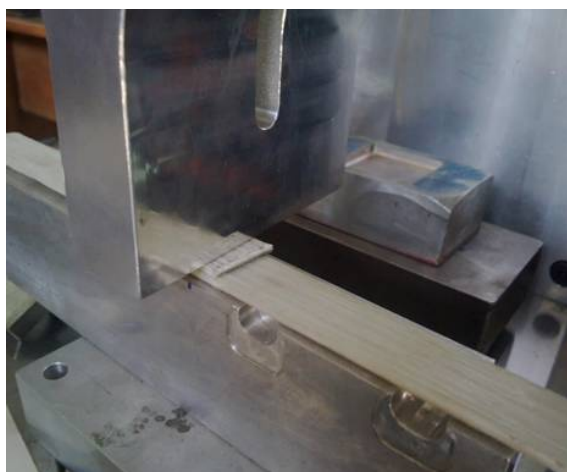


Fig. 5 The placement of samples between the span of the ultrasonic welding machine

شکل 5 قرار گرفتن نمونه‌ها بین دو فک دستگاه جوش التراسونیک

همچنین زمان 2 ثانیه نیز به عنوان زمان جوش کاری برای نمونه‌ها امتحان شد که بر اثر آن نمونه‌ها در محل اتصال در زیر دستگاه جوش شکسته شدند که نتیجه گرفته شد با توجه به پارامترهای انتخابی این زمان برای اتصال مناسب نمی‌باشد.

2-5- دستگاه کشش و میکروسکوپ

برای بررسی استحکام اتصالات از دستگاه کشش آزمایشگاه کامپوزیت دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. این دستگاه سن

و بیشتر از 30 ثانیه برای دمای 200°C ، باعث نفوذ حرارت در راستای ضخامت تسمه شده که موجب تغییر شکل ناخواسته سطح مقطع پروفیل تسمه‌ای می‌شود؛ از اینرو زمان گرمایش 60 ثانیه و 30 ثانیه برای دماهای مذکور در نظر گرفته شد.

پس از این که محل اتصال نمونه‌ها در زمان‌های مذکور در معرض هوای داغ با دماهای ذکر شده قرار گرفتند، بلافاصله آن‌ها بر روی یکدیگر قرار گرفتند و مقادیر فشار به صورت 1 bar، 1/25 bar، 1/5 bar اعمال شد.

شکل 3 فرایند اتصال پرس گرم را نشان می‌دهد. با استفاده از کنترلر دما، دمای محدوده‌ای که در معرض هوای داغ قرار گرفته، کنترل شد. با استفاده از سشوار صنعتی، نمونه‌ها در معرض هوای داغ با دبی 500L/min قرار گرفتند. آزمایش در دو دمای 180°C و 200°C انجام شد. افزایش دما بیش تر از 200°C باعث سوختگی و تخریب پلیمری شد. بنابراین حداکثر دما 200°C انتخاب شد تا بیش‌ترین نفوذ و اختلاط بین پلیمر دو تسمه صورت پذیرد.

2-4- اتصال جوش آلتراسونیک

از جوش آلتراسونیک به عنوان یکی از روش‌های چسباندن قطعات روی هم به صورت تک لبه استفاده شد. بدین منظور ابعاد قطعات بر اساس استاندارد انتخاب گردید [12] (شکل 2). پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها در دستگاه جوش آلتراسونیک برای اتصال قرار داده شد. ابتدا مقادیر دامنه ارتعاش، زمان جوش کاری، زمان نگهداری و فشار نگهداری بر روی دستگاه تنظیم شد (شکل 4). سپس نمونه‌ها با طول مشخص به صورت تک لبه بین دو فک دستگاه روی هم قرار می‌گیرند. نکته قابل ذکر این است که دو سر قطعه باید محکم نگه داشته شود و همچنین مستقیم بودن قطعه با استفاده از لبه‌های فک کنترل شود (شکل 5).

برای جوش کاری نمونه‌ها، فشار نگهداری به اندازه 2bar، دامنه ارتعاشی $90\ \mu\text{m}$ و زمان نگهداری 0/4s تعیین گردید. زمان جوش کاری به عنوان پارامتر متغیر به اندازه 1/4، 1/2 و 1/8 ثانیه و انتخاب شد.

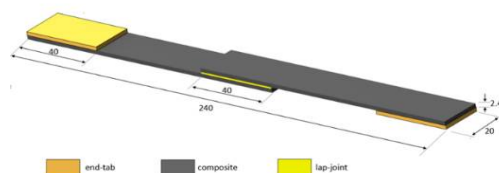


Fig. 2 Dimensional schematic of the jointed sample (mm)

شکل 2 شماتیک ابعادی نمونه متصل شده (mm)

شکل 7 نحوه شکستن نمونه‌های پیچی را نشان می‌دهد، که شکست در همه نمونه‌های پیچی به صورت شکست برشی خارجی² رخ داده است.

برای محاسبه بیشینه استحکام برشی، با توجه به نوع شکست نمونه‌های پیچ شده، از معادله (1) استفاده می‌گردد.

$$\sigma_{shear} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

سطح مقطع A عبارت است از 2 برابر ضخامت در فاصله برش‌خورده.

برای هر کدام از اتصالات پیچی، استحکام برشی با استفاده از معادله (1) محاسبه گردید که این مقادیر در نمودار شکل 8 نشان داده شده است.

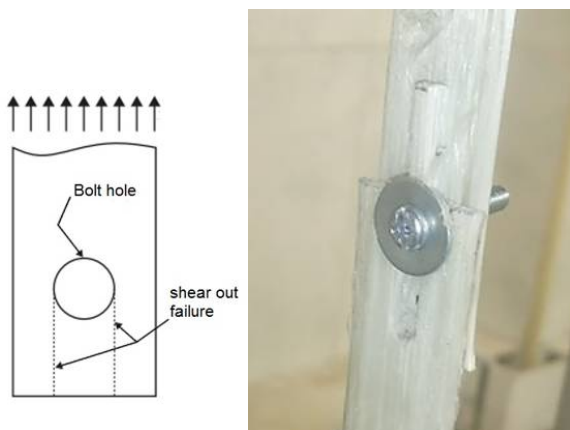


Fig. 7 Bolted specimens failure mode

شکل 7 نحوه شکست نمونه‌های پیچی

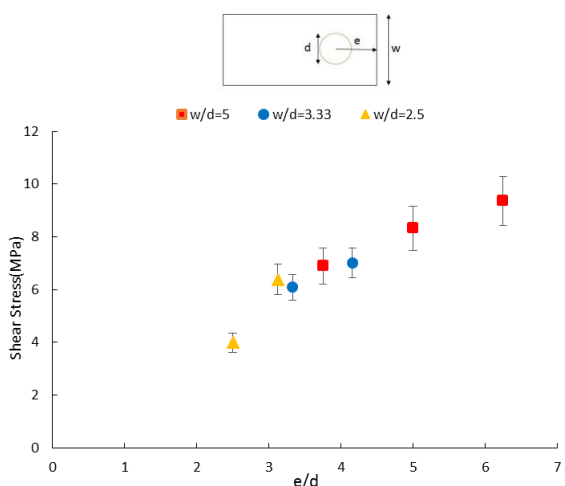


Fig. 8 Shear stress against the ratio of the hole center distance from the edge to the hole diameter (e/d) in the bolt joint

شکل 8 تنش برشی بر حسب نسبت فاصله مرکز سوراخ از لبه بر قطر سوراخ (e/d) در اتصال پیچی

تام¹ ساخت ایران بوده و آزمایش‌های کششی با سرعت بارگذاری 5mm/min انجام گرفت [12]. در این آزمایش همچنین برای مشاهده سطح اتصال جوش کاری از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 200 برابر استفاده گردید.

3- نتایج و بحث

به منظور ارزیابی و مقایسه استحکام اتصالات به دست آمده در هر یک از روش‌های پیچی، جوش التراسونیک و پرس گرم، نمونه‌های متصل شده تحت آزمون کشش تک‌محور قرار گرفتند. با توجه به آزمون کشش، بیشینه نیروی کششی برای هر کدام از اتصالات مشخص شد.

شکل 6 نمودار بیشینه نیروی کششی وارده به نمونه‌هایی را که دارای قطر سوراخ 4، 6 و 8 میلی‌متری هستند و در آن‌ها فاصله مرکز سوراخ از لبه برابر با 15، 20 و 25 میلی‌متر است، نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار شکل 6، در نمونه‌های پیچی مشاهده می‌شود که در صورتی که قطر نمونه‌ها ثابت باشند، هرچه فاصله سوراخ از لبه بیشتر شود مقدار نیرویی که اتصال، تحمل می‌کند بیشتر است و نیز این روند برای همه قطرهای صادق است. اما بیشترین مقدار نیروی مربوط به فاصله 25 میلی‌متر است. اما بیشینه نیروی کششی وارده به نمونه‌ها، با افزایش قطر سوراخ از 4 میلی‌متر به 8 میلی‌متر در تمامی فواصل مرکز سوراخ از لبه، مثلاً در فاصله 20 میلی‌متر از لبه، از 624N به 398N کاهش می‌یابد، این ناشی از آن است با افزایش قطر سوراخ میزان تمرکز تنش افزایش یافته و در نتیجه مقدار نیروی تحمل کاهش می‌یابد.

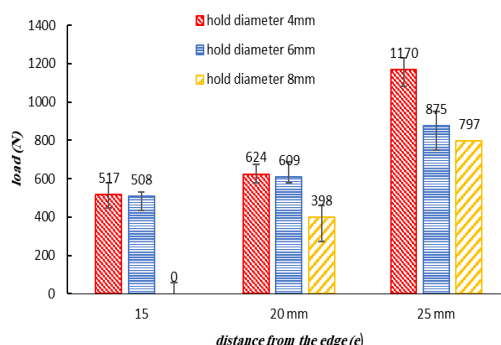


Fig. 6 Maximum tensile stress of samples with various diameters, for different distances from the edge

شکل 6 بیشینه نیروی کششی نمونه‌ها با قطرهای گوناگون، برای فواصل مختلف از لبه

² Shear Out Failure

¹ Santam

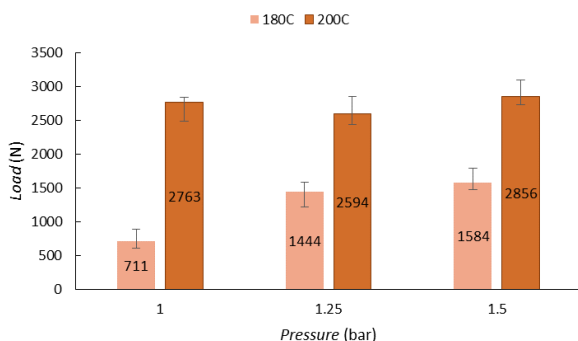


Fig. 9 Maximum tensile strength for hot-pressed samples

شکل 9 بیشینه نیروی کششی برای نمونه‌های تحت اتصال پرس گرم

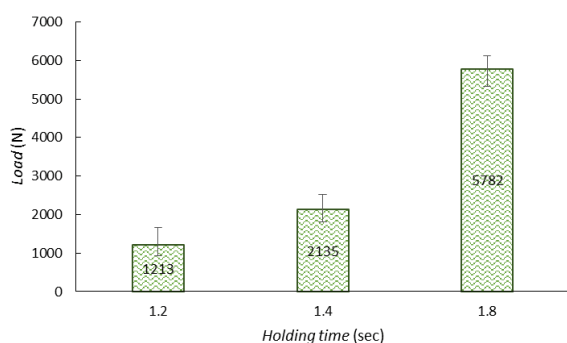


Fig. 10 Maximum tensile strength for ultrasonic samples.

شکل 10 بیشینه نیروی کششی برای نمونه‌های تحت اتصال التراسونیک

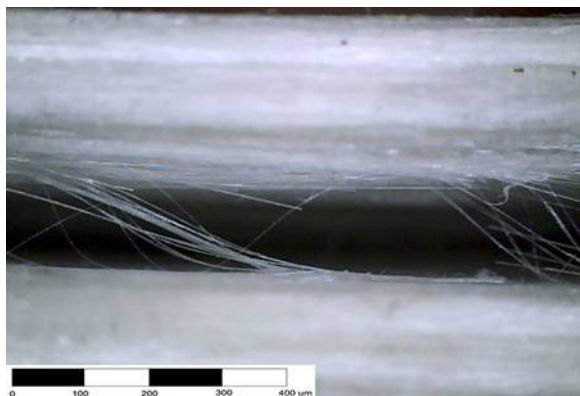


Fig. 11 Connection position after failure in the sample with welding time of 1.2s

شکل 11 موضع اتصال بعد از شکست در نمونه با زمان جوش کاری 1/2s

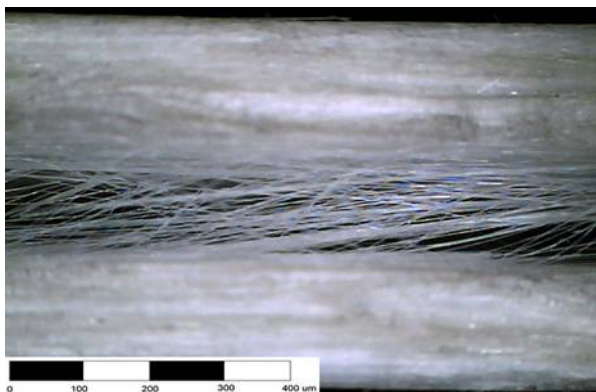


Fig. 12 Connection position after failure in the sample with welding time of 1.4s

شکل 12 موضع اتصال بعد از شکست در نمونه با زمان جوش کاری 1/4s

به طور کلی، با به دست آوردن نسبت فاصله مرکز سوراخ از لبه بر قطر سوراخ (e/d)، مشاهده می‌گردد که با افزایش نسبت e/d استحکام اتصال روند افزایشی دارد و در نتیجه این نسبت، می‌تواند معیاری مناسب برای طراحی اتصالات پیچی باشد. به منظور بررسی نتایج نمونه‌های تحت اتصال پرس گرم، شکل 9 نمودار بیشینه نیروی کششی وارده به نمونه‌ها را با توجه به متغیرهای دما و فشار نشان می‌دهد.

همان‌طور که در نمودار شکل 9 مشاهده می‌شود در دمای ثابت (180°C یا 200°C) با افزایش فشار پرس، بیشینه نیروی کششی افزایش می‌یابد. در هنگام اتصال نمونه‌ها، وقتی که نمونه‌ها در معرض هوای داغ قرار می‌گیرند، پلیمر سطح اتصال، نرم شده و در هم فرو می‌روند و هرچه که فشار روی آن بیش‌تر شود مولکول‌های پلیمر بیش‌تر به هم نزدیک شده و پیوندهای واندروالسی قوی‌تری را برقرار می‌کنند. پس در نتیجه با افزایش فشار استحکام اتصال افزایش خواهد داشت.

همچنین با توجه به نمودار شکل 9، در فشار ثابت، هرچه دمای هوای داغ جهت اتصال نمونه‌ها بیش‌تر باشد، استحکام اتصال بالاتر خواهد بود. این امر نیز به دلیل افزایش نرم‌شدگی پلیمر است که مولکول‌های سطحی راحت‌تر می‌توانند در کنار یکدیگر قرار گیرند و پیوند پلیمری تشکیل دهند. در مجموع با افزایش دما و فشار جهت اتصال نمونه‌ها، استحکام اتصال افزایش می‌یابد که این روند افزایشی، در نمودار مشاهده می‌شود.

نمودار شکل 10 نتایج حاصل از آزمون کشش بر روی نمونه‌های جوش آلتراسونیک را نشان داده است. همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود با افزایش زمان جوش کاری بیشینه نیروی وارد بر نمونه‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش زمان جوش کاری، استحکام حاصل از اتصال افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در آزمون‌های تجربی انتخاب زمان 2 ثانیه باعث شکست پروفیل می‌شود. بنابراین با توجه به سایر پارامترهای در نظر گرفته شده (نظیر فرکانس و فشار نگهداری) که در بخش مواد و روش‌ها بیان شد، در زمان $1/8$ ثانیه استحکام موضع اتصال، بیشینه بوده و مقدار آن 5782N یا $7/3\text{MPa}$ است. چون با افزایش مدت زمان جوش کاری، حرارت تولید شده در بین صفحه‌های بیشتر شده و رزین بیشتری را ذوب می‌کند.

پس از شکست اتصال، از ناحیه جدا شده تصویر میکروسکوپی با مقیاس $100\mu\text{m}$ گرفته شد. شکل‌های 11 تا 13 به ترتیب تصویر موضع اتصال بعد از شکست نمونه را برای نمونه‌های جوش آلتراسونیک در زمان‌های $1/2$ ، $1/4$ و $1/8$ ثانیه نشان می‌دهد.

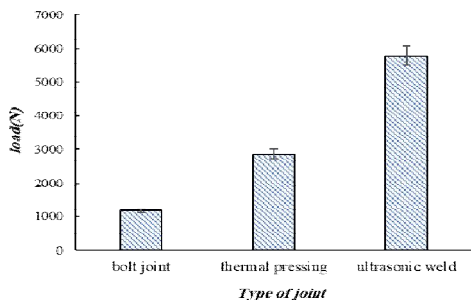


Fig. 14 Force-displacement diagram for the best examples of bolt joint, hot press and ultrasonic method.

شکل 14 نمودار نیرو-جابجایی برای بهترین نمونه‌های اتصال پیچی، پرس گرم و التراسونیک.

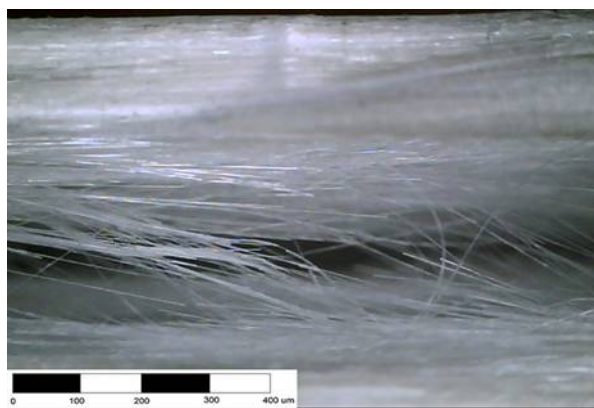


Fig. 13 Connection position after failure in the sample with welding time of 1.8s.

شکل 13 موضع اتصال بعد از شکست در نمونه با زمان جوش کاری 1/8s.

درهم‌تنیدگی و درگیری بین الیاف همانند یک قفل مکانیکی¹ عمل کرده و موجب افزایش استحکام اتصال می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق استحکام اتصالات کامپوزیت‌های تک جهت ترموپلاست به صورت تجربی بررسی شد. نمونه‌های کامپوزیتی با جنس الیاف کامینگلد از شیشه-پلی پروپیلن که با استفاده از فرایند پالتروژن و به صورت پروفیل‌های تسمه‌ای شکل تولید شده، مورد استفاده قرار گرفت. از سه روش برای اتصال نمونه‌ها به صورت پیچی، جوش آلتراسونیک و گرمایی- فشاری استفاده شده است. برای بررسی استحکام هر کدام از نمونه‌ها آزمون کششی انجام گرفته شد که نتایج آن به شرح زیر است:

- بیشترین تحمل نیرو برای اتصال پیچی مقدار 1170N، برای اتصال جوش آلتراسونیک 5782N و برای اتصال پرس گرم 2856N گزارش شد.

- در روش اتصال با پرس گرم پارامترهای زمان، دما و فشار موثر می‌باشد. در این پژوهش بیشینه تحمل نیرو از طرف اتصال، مربوط به دمای 200°C در زمان 30s و فشار 1/5 bar است.

- زمان جوش، پارامتر موثر در روش جوش آلتراسونیک است. بیشینه استحکام اتصال، برای زمان 1/8s، 5782N ثبت شد.

- نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپی در اتصال جوش آلتروسونیک نشان می‌دهد با افزایش زمان جوش کاری درهم‌تنیدگی و درگیری بین الیاف در موضع اتصال بیشتر شده و در نتیجه موجب افزایش استحکام اتصال می‌شود.

5- مراجع

[1] L. Da, L. Yi-Bing, Y. Bing-Zhang, Damage

¹ Mechanical interlocking

با توجه به مواضع اتصال بعد از شکست، مشاهده می‌شود که الیاف شیشه در موضع شکست در هم تنیده شده‌اند. نکته قابل توجه این است که هرچه درهم‌تنیدگی الیاف بیشتر باشد، نیروی کششی بالاتر و در نتیجه اتصال، قوی‌تر خواهد شد. این امر به وضوح برای نمونه با زمان جوش 1/8s دیده می‌شود. علت این پدیده می‌تواند این‌گونه باشد که علاوه بر پیوند بین زنجیره‌های پلیمری، درهم‌تنیدگی و درگیری بین الیاف باعث افزایش استحکام اتصال می‌گردد.

شکل 14 نمودار مقایسه نیروی بهترین نمونه اتصال پیچی، پرس گرم و روش آلتراسونیک را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 14، بیشینه نیرو در نمونه التراسونیک بیشتر از نمونه‌های پیچی و گرمایی-فشاری است. علت این پدیده را می‌توان با توجه به تفاوت موجود در مکانیزم جوش تسمه‌ها در سه روش مورد آزمایش توجیه کرد. در روش پیچی به دلیل تمرکز تنش و همچنین نیرو بر پیچ وارد شده و در نتیجه بر یک بخشی از محل همپوشانی نمونه کامپوزیتی وارد می‌شود و در نتیجه مقدار نیروی تحمل نسبت به روش‌های دیگر که نیرو بر کل ناحیه‌ی همپوشانی وارد می‌شود کمتر است. در روش فشاری-گرمایی، پلیمر سطح پروفیل‌ها دچار ذوب سطحی شده و با یکدیگر اختلاط پیدا می‌کنند و یک‌لایه نازک پلیمر در بین تسمه‌ها تشکیل شده و باعث اتصال آن‌ها به یکدیگر می‌شود. در حقیقت، استحکام برشی بین تسمه‌ها ناشی از پیوند واندروالسی بین زنجیره‌های مولکولی پلیمر است. این در حالی است که در روش التراسونیک، ارتعاشات فراصوتی علاوه بر ایجاد گرما و اختلاط پلیمر در سطح تسمه‌ها، موجب نفوذ و درهم‌تنیدگی الیاف موجود در تسمه‌ها نیز می‌شود؛

- steel tubes jointed by wrapped GFRP sleeve, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 82, April 2018, Pages 79-89
- [8] P. Mitschang, R. Velthuis, M. Didi, Induction spot welding of metal/CFRPC hybrid joints, *Advanced engineering materials* 15(9) (2013) 804-813.
- [9] T. Zhao, G. Palardy, I.F. Villegas, C. Rans, M. Martinez, R. Benedictus, Mechanical behaviour of thermoplastic composites spot-welded and mechanically fastened joints: A preliminary comparison, *Composites Part B: Engineering* 112 (2017) 224-234.
- [10] Villegas, I.F., "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* 65, 27-37, (2014).
- [11] A. Standard, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, ASTM D3039/D 3039M (2008).
- [12] E.M. Moya-Sanz, I. Ivañez, S.K. Garcia-Castillo, Effect of the geometry in the strength of single-lap adhesive joints of composite laminates under uniaxial tensile load, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 72 (2017) 23-29.
- detection and damage mechanisms analyses in CFRP laminate bolted joints, *Composite Structures* 5, Springer 1989, pp. 591-601.
- [2] Pereira, A., et al., "Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints", *Journal of Materials Processing Technology* 610-617, (2010).
- [3] Shi, H., I.F. Villegas, and H. Bersee, "Strength and failure modes in resistance welded thermo-plastic composite joints: effect of fibre-matrix adhesion and fibre orientation", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 55: 1-10, (2013).
- [4] Yousefpour, A., M. Hojjati, and J.-P. Immarigeon, "Fusion bonding/welding of thermoplastic composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 17(4), 303-341, (2004).
- [5] S. Ramakrishna, H. Hamada, M. Nishiwaki, Bolted joints of pultruded sandwich composite laminates, *Composite structures* 32(1-4) (1995) 227-235.
- [6] A.M.G. Coelho, J.T. Mottram, A review of the behaviour and analysis of bolted connections and joints in pultruded fibre reinforced polymers, *Materials & Design* 74 (2015) 86-107.
- [7] M.M. Shahryarifard, M. Golzar, M. Safarabadi, Novel parameters in load capacity and failure of coaxial