



بهبود استحکام اتصال لبه‌ای کامپوزیت- فولاد با درجه‌بندی ناحیه اتصال به‌وسیله الیاف کربن و شیشه و همچنین ایجاد درگیری مکانیکی به‌روش پله معکوس

علیرضا دادیان^{1*}، سعید رهنما²، عباس ذوالفقاری³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

* بیرجند، صندوق پستی 615-97175، dadian.alireza@birjand.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/7/7

پذیرش: 97/10/14

کلیدواژگان:

اتصال مدرج هدفمند

روش پخت و اتصال همزمان

اتصال لبه‌ای

درگیری مکانیکی

پله معکوس

با توجه به ترکیبات فیزیکی و خواص مکانیکی متفاوت فلزات و کامپوزیت‌ها، اتصال کارآمد آن‌ها یکی از چالش‌های مهم در صنایع مختلف به‌شمار می‌رود. شکست در اتصالات چسبی معمولاً نتیجه‌ی توزیع غیریکنواخت تنش و کرنش است که با مقادیر بیشینه نزدیک دو انتهای هم‌پوشانی مشاهده می‌شود. در این مطالعه از الیاف کربن به‌عنوان المان تقویتی در لایه چسب استفاده شده و جهت بهبود توزیع تنش از درجه‌بندی خواص در طول هم‌پوشانی به‌صورت متقارن و به‌وسیله الیاف کربن و شیشه استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از یک روش جدید، تاثیر وجود پله معکوس در استحکام اتصال بررسی شده است. علاوه بر این، مدل‌سازی المان محدود برای بیان نحوه توزیع تنش برشی و پوسته‌کنی در لایه چسب و همچنین تحلیل دلایل افزایش استحکام اتصال در نمونه‌های پله‌دار به‌کار گرفته می‌شود. استفاده از کربن در سطح مشترک اتصال، درجه‌بندی ناحیه پیوند با استفاده از کربن و همچنین ایجاد درگیری مکانیکی به‌وسیله پله معکوس، تاثیرات مثبتی بر استحکام اتصال دارند. به‌طوری‌که با درجه‌بندی ناحیه هم‌پوشانی به‌وسیله کربن و شیشه، توزیع تنش برشی و پوسته‌کنی یکنواخت‌تر شده و بار و جابجایی شکست نسبت به نمونه مرجع که دارای استحکام برشی 1.92 کیلو نیوتن است، 34% افزایش یافته است. ایجاد پله معکوس در چسبندگی‌ها موجب تغییر مود شکست می‌شود. به‌طوری‌که وجود یک پله، 40% و قرارگیری کربن در فصل مشترک آن، 112% استحکام را افزایش داده است. اما بیشترین افزایش استحکام و جابجایی شکست با استفاده از دو پله معکوس و همچنین الیاف کربن در فصل مشترک دو چسبندگی، به میزان قابل توجه 172% به‌دست آمده است.

Strength improvement of composite-steel lap joint by grading the joint area with carbon and glass fiber and also mechanical interference by reverse step

Alireza Dadian^{1*}, Saeed Rahnama¹, Abbas Zolfaghari²

1- Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of technology, Babol, Iran

* P.O.B. 615-97175, Birjand, Iran, dadian.alireza@birjand.ac.ir

Keywords

Functionally graded joint
Co-cured method
Lap joint
Mechanical interference
Reverse step

Abstract

Effectively joining metals and composites in an efficient manner is challenging due to their dissimilar physical compositions and mechanical properties. Failure of bonded joints is generally strongly influenced by the non-uniform distribution of stresses and strains that usually with the maximum value, commonly located near the ends of the overlaps. In this study, carbon is used as a reinforcing element in the adhesive layer and to improve the distribution of stress, properties are graded by fibers along the overlap. Also, using a new method, the effect of the reverse step on joint strength has been investigated. In addition, finite element modeling is used to express the distribution of shear and peel stresses in the adhesive layer and also to analyze the reasons for increasing joint strength in stepped specimens. Use of carbon at the joint surface, grading of the joint area and mechanical interference through reverse steps, have positive effects on strength. By grading the overlap by carbon and glass, the distribution of shear and peel stress have become more uniform and load and displacement of failure compared to the base specimen, which has a shear strength of 1.92 kN, increased by 34%. Creating the reverse step changes the failure mode. The presence of one step 40%, and the placement of carbon at the joint interface of that, has increased 112% of strength. But the greatest increase in strength and displacement failure is achieved using two reverse steps and carbon in the joint surface, by a significant amount of 172%.

1- مقدمه

دریایی، نظامی، خودروسازی و حمل و نقل است. روش‌های اتصال قطعات به دو گروه کلی اتصالات مکانیکی و اتصالات چسبی، تقسیم می‌شوند. قابلیت اصلی چسب، انتقال بار میان زیرلایه‌ها است که به‌طور عمده به‌سبب بار برشی به‌وجود می‌آید [1].

طراحی اتصالات با درجه اطمینان بالا، یکی از چالش‌های مهم در استفاده از کامپوزیت‌ها و توسعه سازه‌های کارآمد در صنایع مختلف مانند صنایع هوایی،

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Dadian, A.R. Rahnama, S. and Zolfaghari, A., "Strength improvement of composite-steel lap joint by grading the joint area with carbon and glass fiber and also mechanical interference by reverse step", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No.3, pp. 393-400, 2019.

برخی مطالعات نظری و تجربی از اتصالات دو چسبه⁶ نشان داده است که چسب با مدول متغیر در طول هم‌پوشانی، باعث کاهش تمرکز تنش و افزایش استحکام اتصال می‌شود.

شاهرخی‌نسب و همکارانش [19]، به ارزیابی چسب‌های ترکیبی در اتصالات تک لبه برشی و پوسته‌کنی پرداختند. در این مطالعه، پنج نوع چسب شامل چسب اپوکسی تنها، چسب سیلیکون، اپوکسی حاوی لاستیک مایع CTBN⁷، چسب ترکیبی اپوکسی-سیلیکون و چسب ترکیبی اپوکسی-اپوکسی حاوی لاستیک مایع CTBN جهت اتصال چسبده‌ها استفاده شد. نتایج حاکی از استحکام برشی بالاتر در اتصال چسبی حاوی چسب ترکیبی اپوکسی-سیلیکون نسبت به دیگر چسب‌ها است و در مرتبه پایین‌تری اتصال با چسب اپوکسی تنها و چسب اپوکسی حاوی لاستیک مایع قرار دارد. همچنین استحکام پوسته‌کنی در نمونه با چسب ترکیبی اپوکسی-اپوکسی حاوی لاستیک مایع، از بقیه نمونه‌ها بیشتر بود.

مارکوس و همکاران [20]، به مطالعه اتصالات دو چسبه اپوکسی-سیلیکون برای دماهای بالا در کاربردهای هوافضا پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از چسب ترکیبی موجب افزایش استحکام و جذب انرژی بیشتر در اتصالات فلز-فلز می‌شود.

نتایج مشابهی در مطالعه‌هایی که توسط داسیلوا و همکارانش [21] که از یک چسب ترد در وسط ناحیه اتصال و سه چسب نرم مختلف در لبه‌های اتصال تک لبه‌ای فلز-فلز استفاده کردند، به دست آمده است.

همچنین در تحقیقی، کومار و پاندی [22] نشان دادند که استفاده از چسب با مدول کمتر در دو انتهای اتصال موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش شده و بار شکست را در اتصالات لبه‌ای فلز-کامپوزیت بهبود می‌دهد.

در این مقاله، از الیاف کربن به‌عنوان المان تقویتی در لایه چسب استفاده شده و جهت بهبود توزیع تنش، از درجه‌بندی خواص در طول هم‌پوشانی به‌صورت متقارن و به‌وسیله الیاف کربن و شیشه استفاده می‌شود. زیرا اتصالات مدرج هدفمند⁸، قابلیت بیشتری برای کاهش تمرکز تنش و یکنواختی توزیع آن دارند. همچنین با استفاده از یک روش جدید، تاثیر وجود پله معکوس در افزایش استحکام اتصال بررسی شده است.

1-1- هندسه اتصال

اتصالات لبه‌ای به‌دلیل آنکه چسب‌ها معمولاً در بارگذاری برشی مورد استفاده قرار می‌گیرند، از دیگر انواع اتصالات بیشتر مورد توجه هستند. این اتصالات به‌خاطر سادگی، کارآمدی و همچنین وجود استانداردهای آزمایشگاهی، در مقالات و آزمایش‌ها بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [23]. شکل 1 هندسه نمونه‌های اتصال تک لبه‌ای ساده مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

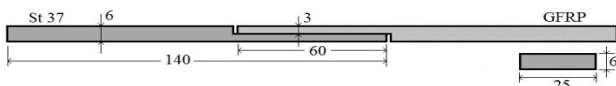


Fig. 1 Schematic of simple single lap specimens geometry (dimensions in millimeters)

شکل 1 شماتیک هندسه نمونه‌های تک لبه‌ای ساده (ابعاد به میلی‌متر)

یکی از چالش‌های بسیار مهم در اتصالات چسبی، وجود تمرکز تنش در لایه چسب و در دو انتهای اتصال است که منجر به شکست ناگهانی و زودرس در انتهای هم‌پوشانی می‌شود. اگر چسب شکننده باشد و یا از کامپوزیت با استحکام عرضی کم و یا از چسبده‌هایی با استحکام پایین استفاده شود، احتمال شکست بیشتر خواهد بود. به‌همین دلیل یکی از زمینه‌های اصلی تحقیق در زمینه اتصالات چسبی، ارائه راه‌کارهایی برای کاهش تمرکز تنش جهت افزایش استحکام اتصال است [2].

روش‌های بسیاری جهت کاهش تمرکز تنش و افزایش در استحکام اتصال وجود دارد. اصلاح هندسه انتهای اتصال مانند گرد کردن لبه‌ها، استفاده از شکل‌های مختلفی از گرد کردن لبه‌های چسب² و استفاده از دمای‌های پخت مختلف در طول هم‌پوشانی، می‌تواند استحکام اتصال را افزایش دهد. گرد کردن لبه‌های چسب باعث کاهش تمرکز تنش در چسب شده و موجب می‌شود تا انتقال بار به‌صورت یکنواخت‌تر صورت گیرد [3-7]. همچنین، گرد کردن گوشه‌های چسبده، تنش‌های تکین³ را حذف کرده و به‌طور قابل توجهی باعث کاهش تمرکز تنش‌های برشی و پوسته‌کنی می‌شود [8-11]. شکل‌دهی چسبده⁴ یکی دیگر از راه‌های موثر برای کاهش تمرکز تنش در انتهای هم‌پوشانی است. در اتصالاتی که لبه‌های چسبده، شیب‌دار یا مخروطی شده‌اند، انتقال بار در انتهای هم‌پوشانی یکنواخت‌تر توزیع می‌شود، زیرا سفتی موضعی اتصال کاهش می‌یابد [12-14].

جانسن و همکارانش [15]، از ذرات اپوکسی لاستیکی ترموست⁵ در داخل چسب اپوکسی برای بهبود چقرمگی اتصال استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزودن این ذرات به اپوکسی، علاوه بر افزایش چقرمگی، رشد ترک نیز کاهش می‌یابد.

کاجی و همکارانش [16]، به بررسی اثر تعداد و قطر سیم بر استحکام اتصالات چسبی تقویت شده در کامپوزیت‌ها پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از 20 سیم به‌عنوان المان تقویتی در چسب می‌تواند 32 تا 90 درصد سبب بهبود استحکام شود. همچنین افزایش تعداد، قطر و مدول یانگ سیم می‌تواند استحکام اتصال را افزایش دهد.

خلیلی و همکارانش [17]، به مطالعه تجربی تأثیر افزودن المان‌های تقویتی بر خواص مکانیکی اتصال تک لبه‌ای چسبده‌های کامپوزیتی پرداختند. آن‌ها از الیاف شیشه، خرده‌های کوچک شیشه و پودر میکرو شیشه با درصد حجمی متفاوت به‌عنوان المان تقویتی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از المان‌های تقویتی شیشه سبب بهبود خواص مکانیکی می‌شود. استفاده از المان تقویتی پودر میکرو شیشه تا 30% کسر حجمی اتصال، بهترین نتایج را به‌همراه داشت. در این حالت عمر خستگی 125% افزایش داشته، استحکام برشی اتصال 72% بهبود یافته، استحکام نهایی خمشی 112% و مقاومت به ضربه تا 63% افزایش یافته بود.

پارکر و بوتلر [18]، در محل اتصال کامپوزیت‌های زمینه فلزی از المان‌های تقویتی پینی شکل استفاده نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وجود پین‌ها در محل اتصال، سبب تأخیر در رشد ترک‌ها شده، استحکام اتصال را تا 6.5 برابر نسبت به حالت بدون پین افزایش داده و همچنین انرژی جذب شده را 80% بهبود می‌بخشد.

⁶ Bi-adhesive

⁷ Carboxyl-Terminated Butadiene-Acrylonitrile

⁸ Functionally Graded Adhesive Joint (FGAJ)

¹ Rounding edges

² Different shapes of adhesive fillet

³ Singular stress

⁴ Adherend shaping

⁵ Thermoset rubbery epoxy particles

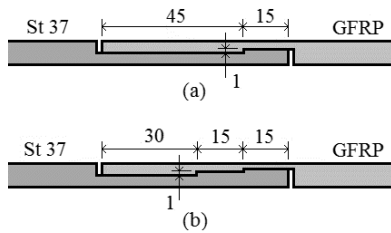


Fig. 2 Schematic of the stepped specimens geometry, a) with one reverse step, b) with two reverse steps (dimensions in millimeters)

شکل 2 شماتیک هندسه نمونه‌های پله‌دار، الف) با یک پله معکوس، ب) با دو پله معکوس (ابعاد به میلی‌متر)

در جدول 2، 8 نمونه مختلف مورد آزمایش شرح داده شده و سطح مشترک بین کامپوزیت و فلز به صورت شماتیک نشان داده شده است. همچنین شکل‌های 3 و 4 نمونه‌های نهایی جهت آزمون برش را نشان می‌دهند.

جدول 2 توضیح نمونه‌های مورد آزمایش و شماتیک سطح مشترک دو چسبنده

Table 2 Explanation of the test specimens and schematic of the two adherents joint surface

نمونه	توضیح	شماتیک سطح مشترک چسبنده‌ها
1	لایه چینی یکنواخت الیاف شیشه در ناحیه هم‌پوشانی	
2	لایه چینی مدرج با 20 میلی‌متر الیاف کربن در وسط هم‌پوشانی و شیشه در لبه‌ها	
3	لایه چینی مدرج با 20 میلی‌متر الیاف کربن در لبه‌های هم‌پوشانی و شیشه در وسط	
4	لایه چینی یکنواخت الیاف کربن در تمام ناحیه هم‌پوشانی	
5	یک پله معکوس و لایه چینی یکنواخت الیاف شیشه در ناحیه هم‌پوشانی	
6	یک پله معکوس و لایه چینی یکنواخت الیاف کربن در ناحیه هم‌پوشانی	
7	دو پله معکوس و لایه چینی یکنواخت الیاف شیشه در ناحیه هم‌پوشانی	
8	دو پله معکوس و لایه چینی یکنواخت الیاف کربن در ناحیه هم‌پوشانی	

نمونه 1 به عنوان نمونه مرجع در نظر گرفته شده که دارای هندسه تک لبه‌ای ساده می‌باشد و در ناحیه اتصال آن الیاف شیشه به صورت یکنواخت قرار گرفته است. در جدول 2، نواحی روشن نشان‌دهنده الیاف شیشه در سطح مشترک چسبنده‌ها می‌باشد و الیاف کربن به وسیله نواحی تیره مشخص شده است. در کلیه نمونه‌هایی که الیاف کربن در سطح مشترک دو چسبنده وجود دارد، از دو لایه الیاف کربن استفاده شده است.

در این آزمایش، استحکام کششی دو نمونه‌ی اتصال همگن و اتصال مدرج کامپوزیت-فولاد مقایسه می‌شود. جهت اتصال چسبنده‌ها، از روشی که در آن، فرآیند پخت کامپوزیت و اتصال چسبنده‌ها به طور هم‌زمان¹ انجام می‌شود، استفاده شده است. به همین دلیل رزین به کار رفته جهت ساخت چسبنده کامپوزیتی، به عنوان چسب نیز عمل می‌کند.

در این تحقیق، محدودیت‌های زیر برای مطالعه تجربی وجود دارد: آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ها با اندازه محدود طبق استاندارد صورت می‌گیرند، آزمایش‌ها در شرایط رطوبتی و دمایی اتاق انجام می‌شوند و همچنین مطالعه حاضر شامل پارامترهای محیطی نخواهد بود.

2-1- مواد

چسبنده کامپوزیتی با استفاده از الیاف شیشه [24]، الیاف کربن تک جهت [25] و رزین اپوکسی Epon 828 [26] به صورت لایه‌چینی دستی (سه لایه الیاف در هر یک میلی‌متر و در جهت راستای طولی نمونه) و همچنین چسبنده فولادی با ماشین کاری مطابق استاندارد ASTM D 5868-01 [27] ساخته شده‌اند.

قبل از لایه‌چینی و اتصال، چسبنده‌های فلزی تحت عملیات سطحی قرار می‌گیرند تا چسبندگی سطوح آن‌ها به چسب بهبود یابد. برای این منظور چسبنده‌ها سندبلاست² شده و به وسیله استون³ چربی‌زدایی شده‌اند [28]. همچنین چون اتصال چسبنده‌ها، هم‌زمان با لایه‌چینی چسبنده کامپوزیتی انجام می‌شود، آماده‌سازی سطح کامپوزیت در محل اتصال امکان‌پذیر نیست. در واقع بعد از ساخت نمونه‌ها، چسب و چسبنده کامپوزیتی به صورت یکپارچه می‌باشند. جدول 1، مواد به کار رفته در ساخت و شبیه‌سازی نمونه‌ها و خواص مربوط به هر یک را نشان می‌دهد.

جدول 1 خواص مربوط به مواد مورد استفاده در نمونه‌ها جهت انجام آزمایش

Table 1 Properties of the materials used in the specimens for testing

ماده	نوع	ضخامت (mm)	چگالی (g/cm ³)	مدول (GPa)
الیاف شیشه	E Glass	0.2±15%	2.12	80
الیاف کربن	UD 300	0.17	1.77	230
رزین اپوکسی	Epon 828	-	1.16	2.75
ورق فولادی	St 37	6	7.85	210

2- روش آزمایش

این آزمون شامل 8 نمونه متفاوت است که از هر کدام از آن‌ها 3 نمونه یکسان مورد آزمایش قرار گرفته است. در 4 نمونه اول که هندسه این نمونه‌ها در شکل 1 نشان داده شد، از اتصال تک لبه‌ای ساده استفاده شده و در 4 نمونه بعدی با تغییراتی در چسبنده فلزی، تاثیر وجود پله معکوس در استحکام اتصال بررسی شده و با نمونه‌های ساده مقایسه می‌شود. شماتیک هندسه نمونه‌های پله‌دار در شکل 2 نشان داده شده است.

³ Acetone

¹ Co-cured method

² Sandblast

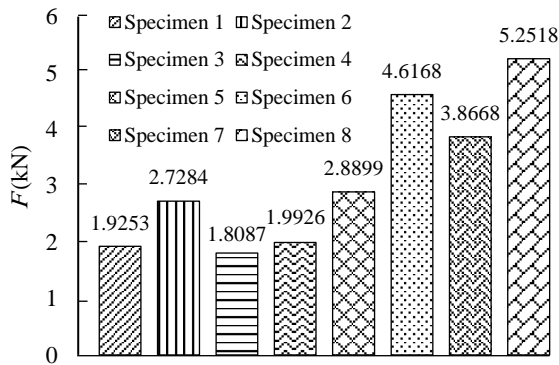


Fig. 6 Shear strength of the specimens (average of three specimens)

شکل 6 نمودار ستونی استحکام برشی نمونه‌ها (میانگین سه نمونه)

همان‌طور که در شکل‌های 5 و 6 دیده می‌شود، بار و جابجایی شکست در نمونه مرجع (نمونه 1) به ترتیب 1.925 kN و 1.338 mm می‌باشد. با استفاده از کربن به‌عنوان المان تقویتی و همچنین درجه‌بندی ناحیه هم‌پوشانی (قرارگیری کربن در وسط ناحیه اتصال) مطابق نمونه 2، 34% افزایش در بار و جابجایی شکست نسبت به نمونه مرجع به‌وجود آمده است.

افزایش مدول در لبه‌های اتصال با الیاف کربن (نمونه 3)، همان‌طور که انتظار می‌رود مخالف مفهوم درجه‌بندی است و تاثیر مثبتی در استحکام اتصال ندارد. اما استفاده یکنواخت الیاف کربن در تمام طول اتصال طبق نمونه 4، 9% افزایش استحکام در بار شکست نسبت به نمونه مرجع ایجاد کرده است.

در نمونه 5، با وجود یک پله معکوس بدون استفاده از الیاف کربن، 40% افزایش استحکام نسبت به نمونه 1 حاصل شده است. استفاده هم‌زمان از کربن به‌عنوان المان تقویتی در فصل مشترک دو چسبنده و یک پله معکوس (نمونه 6)، باعث افزایش استحکام به اندازه 112% و ایجاد پله اضافی طبق نمونه 7 (دو پله معکوس) نیز استحکام اتصال را به میزان 85% افزایش داده است. اما بیشترین افزایش استحکام و جابجایی شکست مربوط به نمونه 8 می‌باشد که در آن از دو پله معکوس و همچنین کربن به‌عنوان المان تقویتی در فصل مشترک دو چسبنده استفاده شده است. این افزایش به میزان قابل توجه 172% می‌باشد.

4- شبیه‌سازی

با توجه به آن‌که در هر یک میلی‌متر از ضخامت کامپوزیت، 3 لایه وجود دارد و چسب به‌عنوان یک کامپوزیت با دو لایه الیاف در نظر گرفته شده است، ضخامت چسب در شبیه‌سازی 0.66 mm می‌باشد. بعد از جداسازی الیاف و ماتریس از 1 gr کامپوزیت، مشخص شد که این کامپوزیت از 40% الیاف و 60% رزین تشکیل شده است. جدول 3 خواص مربوط به اجزای نمونه‌ها را نشان می‌دهد که با استفاده از روابط زیر و داده‌های جدول 1 به‌دست آمده و در مدل‌سازی به‌کار رفته است.

$$V_c' = V_f' + V_m' \quad (1)$$

$$V_f' = W_f' / \rho_f \quad (2)$$

$$V_m' = W_m' / \rho_m \quad (3)$$

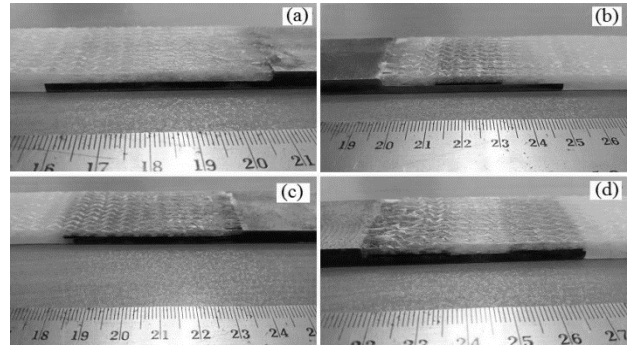


Fig. 3 Simple single lap specimens, a) specimen 1, b) specimen 2, c) specimen 3, d) specimen 4

شکل 3 نمونه‌های لبه‌ای ساده، (a) نمونه 1، (b) نمونه 2، (c) نمونه 3، (d) نمونه 4

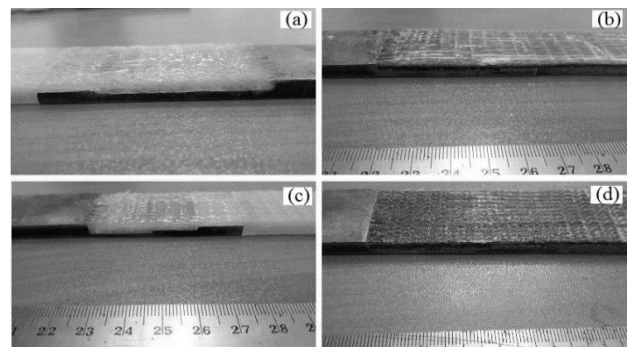


Fig. 4 Stepped specimens, a) specimen 5, b) specimen 6, c) specimen 7, d) specimen 8

شکل 4 نمونه‌های پله‌دار، (a) نمونه 5، (b) نمونه 6، (c) نمونه 7، (d) نمونه 8

3- نتایج

این 3×8 نمونه تحت آزمون برشی با دستگاه سن‌تام¹ با حسگر 15 تُنی و سرعت جابجایی 1 mm/min قرار گرفتند [29]. نتایج مربوط به میانگین مقادیر هر سه نمونه به‌صورت نمودار نیرو-جابجایی و نمودار ستونی در شکل‌های 5 و 6 ارائه شده است.

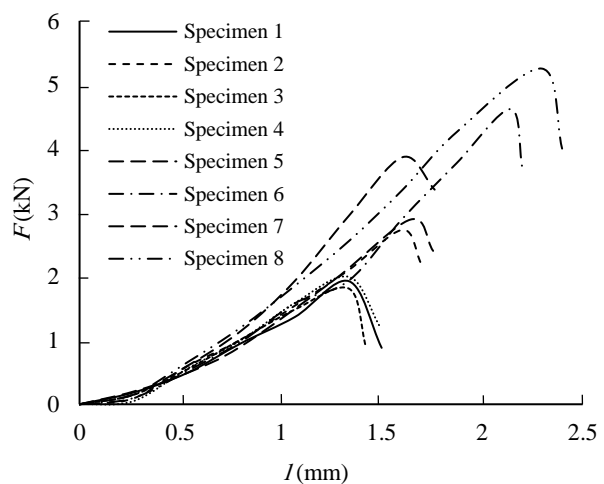


Fig. 5 Load-displacement diagram of specimens (average of three specimens)

شکل 5 نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها (میانگین سه نمونه)

¹ Santam

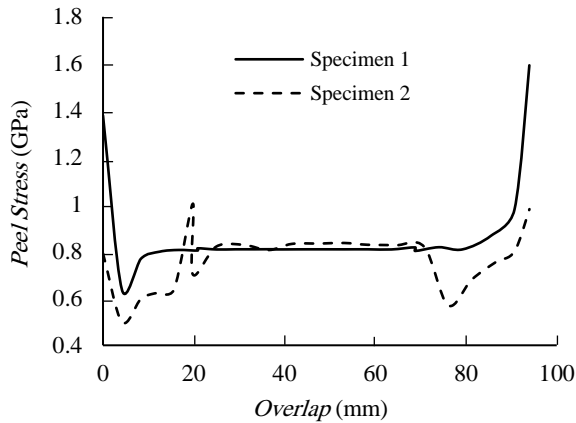


Fig. 9 Peel stress distribution diagram along the overlap

شکل 9 نمودار توزیع تنش پوسته‌کنی در طول هم‌پوشانی

در کلیه شبیه‌سازی‌ها سرعت اعمال بار به دو انتهای نمونه مطابق آزمایش، 1 mm/min است. همان‌طور که انتظار می‌رود مطابق شکل‌های 8 و 9، برای چسبنده‌های ناهمسان (در این آزمون اتصال فولاد-کامپوزیت)، میدان‌های تنش نیز تحت تاثیر عدم تقارن مواد قرار می‌گیرند. به همین دلیل این توزیع تنش‌ها متقارن نیستند. تمرکز تنش در سمت چسبنده با مدول کمتر (چسبنده کامپوزیتی) بیشتر است. در حالیکه برای دو چسبنده مشابه، میدان‌های تنش کاملاً متقارن خواهند بود.

در منحنی‌های پیوسته که مربوط به نمونه 1 است، تمرکز تنش برشی و پوسته‌کنی در هر دو انتهای هم‌پوشانی دیده می‌شود. ولی با درجه‌بندی ناحیه اتصال مطابق منحنی‌های خط‌چین (نمونه 2)، توزیع تنش یکنواخت‌تری به دست می‌آید که نتیجه‌ی آن افزایش در استحکام اتصال است. شکل 10، شبیه‌سازی المان محدود مربوط به درگیری مکانیکی نمونه‌های پله‌دار و شکل 11، توزیع تنش این نمونه‌ها را با اعمال جابجایی یکسان نشان می‌دهد.

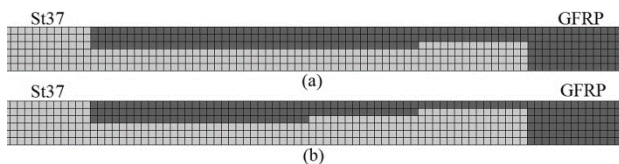


Fig. 10 Finite element simulation of specimens with step, a) one step, b) two steps

شکل 10 شبیه‌سازی المان محدود نمونه‌های پله‌دار، الف) یک پله، ب) دو پله

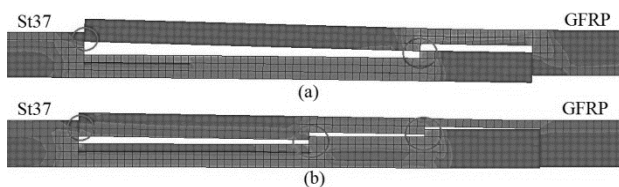


Fig. 11 The stress in the adherents and the main points of the mechanical interference, a) one step, b) two steps

شکل 11 تنش‌های موجود در چسبنده‌ها و نقاط اصلی درگیری مکانیکی، الف) یک پله، ب) دو پله

$$V_f = V_f' / V_c' \quad (4)$$

$$V_m = 1 - V_f \quad (5)$$

$$\rho_c = W_c' / V_c' \quad (6)$$

$$E_c = E_m + (E_f - E_m) V_f \quad (7)$$

متغیرهای V_f' ، W' ، ρ و E به ترتیب حجم، وزن، چگالی و مدول الاستیسیته اجزاء کامپوزیت را نشان می‌دهند و اندیس‌های f ، m و c مربوط به الیاف، ماتریس و کامپوزیت می‌باشند. همچنین V_f و V_m به ترتیب کسر حجمی الیاف و ماتریس را نشان می‌دهند.

جدول 3 خواص مربوط به اجزای نمونه‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی

Table 3 Properties for the components of the used specimens for simulation

چگالی (g/cm ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	
7.7	210	چسبنده فلزی
1.49	20.24	چسبنده کامپوزیتی با الیاف شیشه
1.49	20.24	چسب با الیاف شیشه
0.67	115.92	چسب با الیاف کربن

شبیه‌سازی المان محدود دو بعدی به وسیله نرم افزار آباکوس برای مشاهده توزیع تنش برشی و پوسته‌کنی در ناحیه هم‌پوشانی به کار گرفته می‌شود. در این مدل، کل نمونه به صورت یک پوسته دو بعدی یکپارچه و تغییر شکل‌پذیر مطابق شکل 7 مدل شده است. سپس چسبنده‌های فولادی، کامپوزیتی و همچنین چسب، از طریق پارتیشن‌بندی از یکدیگر مجزا شده و خواص هر یک به آن‌ها اختصاص یافته است. همچنین چسب مورد نظر مطابق ابعاد نمونه آزمایشگاهی پارتیشن‌بندی شده و خواص هر قسمت مطابق محل قرارگیری الیاف کربن و شیشه در نظر گرفته شده‌اند. شکل‌های 8 و 9، توزیع تنش برشی و پوسته‌کنی در لایه چسب را نشان می‌دهند.

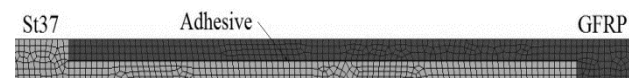


Fig. 7 Finite element simulation of simple single lap specimens

شکل 7 شبیه‌سازی المان محدود نمونه‌های تک لبه‌ای ساده

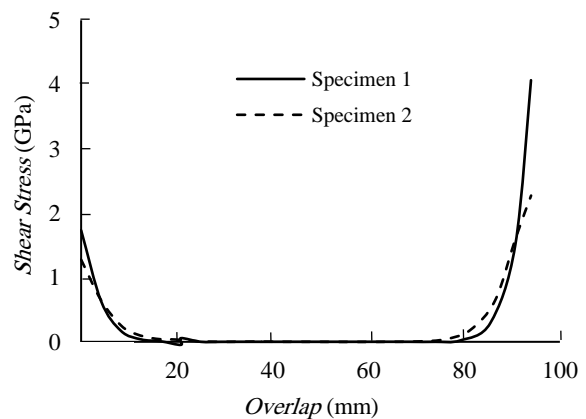


Fig. 8 Shear stress distribution diagram along the overlap

شکل 8 نمودار توزیع تنش برشی در طول هم‌پوشانی

در نمونه‌های تک لبه‌ای ساده (نمونه‌های 1 تا 4)، بعد از شکست چسب، نمونه کاملاً گسیخته می‌شود. اما در نمونه‌های پله‌دار 5 تا 8 بعد از شکست چسب، درگیری مکانیکی که به سبب پله معکوس ایجاد شده، سبب تداخل لبه‌های پله‌های دو چسبیده شده و مود شکست را تغییر می‌دهد. در واقع وجود پله‌ها سبب می‌شود تا علاوه بر چسب، نیروی مکانیکی موجود نیز در مقابل بار مقاومت کند. مطابق شکل‌های 11 و 12، این مقاومت تا جایی ادامه پیدا می‌کند که چسبیده کامپوزیتی دچار انحنای شده و از ناحیه اتصال خارج شود و یا خود دچار شکست شود.

با توجه به ناهمسان بودن چسبیده‌ها و در نتیجه عدم تقارن توزیع تنش برشی و پوسته‌کنی، درجه‌بندی بهینه ناحیه اتصال، متقارن نخواهد بود. بنابراین با درجه‌بندی بهینه ناحیه هم‌پوشانی استحکام اتصال افزایش می‌یابد. اینکار با نزدیک کردن الیاف کربن به چسبیده فولادی (چسبیده با مدول بیشتر) امکان‌پذیر خواهد بود.

در این مطالعه، در تمام نمونه‌های دارای پله معکوس از توزیع یکنواخت الیاف استفاده شده است. بنابراین با درجه‌بندی هر پله در این نمونه‌ها، استحکام اتصال افزایش بیشتری خواهد داشت. علاوه بر این، با ایجاد پله‌های اضافی می‌توان بار شکست را بهبود داد.

از آنجایی که در نمونه‌های پله‌دار با اعمال جابجایی بیشتر، دو چسبیده در نقاط درگیر جدا می‌شوند، با استفاده از پیچ که مانع انحنای کامپوزیت و خارج شدن آن از ناحیه درگیر خواهد شد، می‌توان نیروی شکست را به‌طور قابل توجهی نسبت به نمونه‌های ساده پیچ‌دار افزایش داد.

6- مراجع

- [1] Cruz, P. L., "Experimental and Numerical Study on Bolted/Bonded Composite Joints for Aircraft," Ph.D. Thesis, Carleton University, Canada, 2016.
- [2] Da Silva, L. F. M., Ochsner, A. and Adams, R. D., "Handbook of Adhesion Technology," Heidelberg, Springer, 2011.
- [3] Lang, T. P. and Mallick, P. K., "Effect of Spew Geometry on Stresses in Single Lap Adhesive Joints," International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 18, pp. 167-177, 1998.
- [4] Frostig, Y., Thomsen, O. T. and Mortensen, F., "Analysis of Adhesive-Bonded Joints Squareend and Spew-Fillet-High-Order Theory Approach," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 125, pp. 1289-1307, 1999.
- [5] Belingardi, G., Goglio, L. and Tarditi, A., "Investigating the Effect of Spew and Chamfer Size on the Stresses in Metal/Plastics Adhesive Joints," International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 22, pp. 273-282, 2002.
- [6] Da Silva, L. F. M. and Adams, R. D., "Adhesive Joints at High and Low Temperatures Using Similar and Dissimilar Adherends and Dual Adhesives," International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 27, pp. 216-226, 2007.
- [7] Da Silva, L. F. M. and Adams, R. D., "Joint Strength Predictions for Adhesive Joints to be Used Over a Wide Temperature Range," International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 27, pp. 362-379, 2007.
- [8] Adams, R. D. and Harris, J. A., "The Influence of Local Geometry on the Strength of Adhesive Joints," International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 7, pp. 69-80, 1987.
- [9] Adams, R. D., Comyn, J. and Wake, W. C., "Structural Adhesive Joints in Engineering," Chapman & Hall, London, 2nd edition, 1997.

در نمونه با دو پله معکوس، سه ناحیه درگیر وجود دارد و در مقایسه با نمونه با یک پله که دارای نواحی درگیر کمتری است، با اعمال جابجایی یکسان به دو انتهای نمونه، چسبیده کامپوزیتی کمتر دچار انحنای و در نتیجه خروج از نواحی درگیر شده و منجر به تحمل بار بیشتری می‌شود. همچنین افزایش پله سبب می‌شود تا تنش‌های کوچکتری به نواحی کم ضخامت چسبیده کامپوزیتی اعمال شود. در شکل 12 سطوح شکست نمونه‌ها نشان داده شده است.

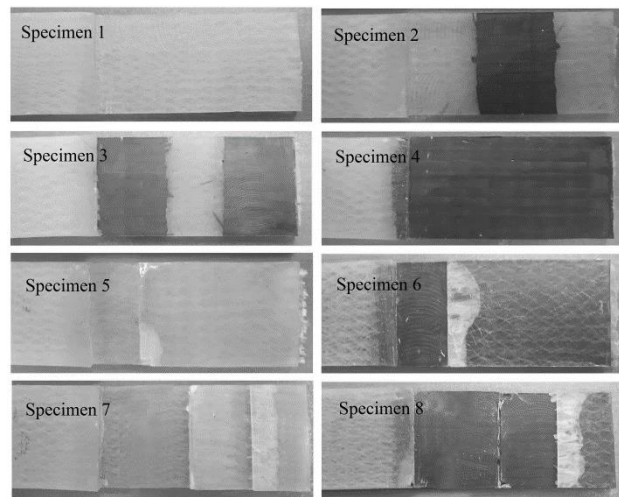


Fig. 12 Failure surfaces of specimens

شکل 12 سطوح شکست نمونه‌ها

همانطور که در شکل 12 مشاهده می‌شود، در نمونه‌های 1 تا 4 مود شکست به‌طور کلی مود شکست چسب¹ است و چسبیده‌های فلزی کاملاً از سطح چسب جدا می‌شوند [30]. به همین دلیل این نمونه‌ها دارای استحکام برشی پایین‌تری نسبت به نمونه‌های پله‌دار هستند.

در نمونه‌های 5 تا 8 به دلیل ایجاد درگیری مکانیکی، علاوه بر مود شکست چسب، شکست در چسبیده کامپوزیتی² (نواحی روشن‌تر در لبه‌های پله‌ها) نیز دیده می‌شود [30]. در واقع، تداخل لبه‌های پله‌های دو چسبیده، مانع شکست زود هنگام شده و استحکام برشی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد.

5- نتیجه‌گیری

همان‌طور که مشاهده شد، استفاده از المان تقویتی کربن در سطح مشترک اتصال، درجه‌بندی ناحیه پیوند با استفاده از الیاف کربن (استفاده از کربن در وسط ناحیه اتصال و شیشه در لبه‌ها) و همچنین ایجاد درگیری مکانیکی به‌وسیله پله معکوس، تأثیرات مثبتی بر روی استحکام اتصال دارند. درجه‌بندی اتصال موجب یکنواخت‌تر شدن توزیع تنش برشی و پوسته‌کنی و کاهش تمرکز تنش در دو انتهای اتصال شده و شکست را به تاخیر می‌اندازد. به این ترتیب نواحی میانی اتصال بخوبی عمل می‌کنند و استحکام بهبود می‌یابد.

² Fiber-Tear Failure (FT)

¹ Adhesive Failure (ADH)

- [28] R. J. C. Carbas, L. F. M. Da Silva, and L. F. S. Andrés, "Functionally Graded Adhesive Joints by Graded Mixing of Nanoparticles", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 76, pp. 30-37, 2017.
- [29] R. Breto, A. Chiminelli, E. Duvivier, M. Lizaranzu, and M. A. Jimenez, "Finite Element Analysis of Functionally Graded Bond-Lines for Metal/Composite Joints", *The Journal of Adhesion*, Vol. 91, pp. 920-936, 2015.
- [30] Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints, Annual Book of ASTM Standard, D 5573 - 99, 2005.
- [10] Zhao, X., Adams, R. D. and Da Silva, L. F. M., "Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Predictions," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 25, pp. 837-856, 2011.
- [11] Zhao, X., Adams, R. D. and Da Silva, L. F. M., "Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Stress and Strain Analysis," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 25, pp. 819-836, 2011
- [12] Rispler, A. R., Tong, L., Steven, G. P. and Wisnom, M. R., "Shape Optimisation of Adhesive Fillets," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 20, pp. 221-231, 2000.
- [13] Da Silva, L. F. M. and Adams, R. D., "Techniques to Reduce the Peel Stresses in Adhesive Joints with Composites," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 27, pp. 227-35, 2000.
- [14] Marques, E. A. S. and Da Silva, L. F. M., "Joint Strength Optimization of Adhesively Bonded Patches," *The Journal of Adhesion*, Vol. 84, pp. 917-936, 2008.
- [15] Jansen, B. J. P., Tamminga, K.Y., Meijer, H.E.H. and Lemstra, P.J., "Preparation of Thermoset Rubbery Epoxy Particles as Novel Toughening Modifiers for Glassy Epoxy Resins," *Polymer*, Vol. 40, pp. 5601-5607, 1999.
- [16] Kaji, M. R., Farahani, M. R. and Ansari, M., "Investigation on the Effects of the Number and Diameter of the Wires on the Strength of the Reinforced Adhesive Joint of Composites," In Persian, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 28-35, 2015.
- [17] Khalili, S. M. R., Shokuhfar, A., Hoseini, S. D., Bidkhorri, M. and Mittal, R. K., "Experimental Study of the Influence of Adhesive Reinforcement in Lap Joints for Composite Structures Subjected to Mechanical Loads," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 28, pp. 436-444, 2008.
- [18] Parkes, P. N., Butler, R., Meyer, J. and De Oliveira, A., "Static Strength of Metal-Composite Joints with Penetrative Reinforcement," *Composite Structures*, Vol. 118, pp. 250-256, 2014.
- [19] Shahrohkhasab, S., Sahraeeyan, R. and Sabet, A., "Assessment of Mixed Adhesive in Single lap and Peel Joint with Composite Substrate," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 2, pp. 189-194, 2014.
- [20] Marques, E. A. S., Magalhães D. N. M. and Da Silva, L. F. M., "Experimental Study of Silicone Epoxy Dual Adhesive Joints for High Temperature Aerospace Applications," *Mater-Wiss Werkstofftech*, Vol. 42, pp. 471-477, 2011.
- [21] Da Silva, L. F. M. and Lopes, M. J. C. Q., "Joint Strength Optimization by the Mixed-Adhesive Technique," *International Journal of Adhesion & Adhesion*, Vol. 29, pp. 509-514, 2009.
- [22] Kumar, S. and Pandey, P.C., "Behaviour of Bi-Adhesive Joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 24, pp. 1251-1281, 2010.
- [23] Carbas, R. J. C., Da Silva, L. F. M. and Andrés, L. F. S., "Functionally Graded Adhesive Joints by Graded Mixing of Nanoparticles", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 76, pp. 30-37, 2017.
- [24] E Glass Woven Roving 200, Technical Data Sheet, AMP Composites, 2009.
- [25] CWU™ 300, Carbon Wrap Unidirectional, Technical Data Sheet, AFZIR Composites, 2008.
- [26] EPON™ Resin 828, Technical Data Sheet, Hexion, 2005.
- [27] Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding, Annual Book of ASTM Standard, D 5868 - 01, 2001.

