جلد ٤، شماره ۲، شهریور ۹۶، ص‌ص ۱۸۹- ۱۹٤

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

ارزیابی چسب‌های ترکیبی در اتصالات تک لبه برشی و پوست‌کنی با چسبنده کامپوزتی

سحر شاهرخی‌نسب[۱]، راضی صحرائیان[۲]، سید علی‌رضا ثابت[۳*]

۱- دانشجوی کار شناسی ارشد، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

۲- استادیار، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

۳- دانشیار، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

* تهران، صندوق‌پستی ۱۴۹۷۵/۱۱۲، a.sabet@ippi.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۵/۵/۱۶

پذیرش: ۹۵/۷/۲۷

کلیدواژگان:

چسب ترکیبی

چسبنده کامپوزیتی

اتصال تک لبه برشی

اتصال پوست‌کنی

چکیده

در این تحقیق استفاده از چسب ترکیبی با دو ضریب سفتی (مدول) متفاوت در مقایسه با یک چسب در اتصالات تک لبه برشی در نرخ کشش ۵ و ۱۰۰ mm/min و در دماهای محیط ۱۰۰°C و ۲۰۰°C مطالعه شده است. در این بررسی پنج نوع چسب در اتصال تک لبه برشی مورد بررسی قرار گرفته که شامل چسب اپوکسی تنها، چسب سیلیکون، اپوکسی حاوی لاستیک مایع CTBN، چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون و چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی حاوی لاستیک مایع CTBN می‌باشد. همچنین ارزیابی از عملکرد این اتصالات در آزمون پوست‌کنی نیز انجام شد. نتایج حاکی از استحکام برشی بالاتر در اتصال چسبی حاوی چسب ترکیبی اپوکسی-سیلیکون نسبت دیگر چسب‌ها در آزمون تک لبه برشی است. و در مرتبه پایین‌تری اتصال با چسب اپوکسی تنها و چسب اپوکسی حاوی لاستیک مایع قرار دارد. این موضوع در هردو نرخ کشش صادق بوده است. بررسی استحکام برشی در سه طیف دمایی حاکی از عملکرد موفق چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون نسبت به دیگر رقبای خود به‌خصوص در دمای ۲۰۰°C به میزان افت ۳۱ درصد در مقایسه با اتصال چسبی اپوکسی تنها با افتی درمحدوده ۶۵ درصد دارد. ارزیابی عملکردی در آزمون پوست‌کنی این چسب‌ها نشان از استحکام پوست‌کنی بالاتر به‌ترتیب در نمونه چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی لاستیک مایع، چسب ترکیبی اپوکسی –سیلیکون و چسب اپوکسی تنها دارد. بررسی رفتاری در آزمون‌های پوست‌کنی نشان از رفتار ناپایدار (نوسانی) در همه اتصالات چسبی به غیر از نمونه حاوی چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی لاستیک مایع دارد.

Assessment of mixed adhesive in single lap and peel joint with composite substrate

Sahar Shahrokhinasab, Razi Sahraeeyan, Alireza Sabet*

Composite group, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran
*P.O.B. 14965/115, Tehran, Iran, a.sabet@ippi.ac.ir

Keywords

Mixed adhesive
Single lap shear
Peel test
Composite
Substrate

Abstract

This study investigates the effect of mixed adhesive having different modulus on single lap joint and also under peel test. The study compares these joints with that of corresponding joint containing single adhesive under two loading rate of 5 and 100 mm/min and three temperature range of room, 100°C and 200°C. Five types of adhesives were used in this assessment namely: silicon, epoxy, mixed epoxy-silicon, epoxy toughened with liquid rubber (CTBN), mixed epoxy toughened with liquid rubber (CTBN) –epoxy. Result indicated better shear strength performance by mixed epoxy-silicon adhesive joint in the single lap shear at both loading speed followed by epoxy and liquid rubber modified epoxy joints . Similar assessment under the three temperature range also revealed better retention of shear strength for the mixed epoxy-silicon adhesive joint in particular at 200°C. This result revealed about 65 percent reduction in strength for epoxy adhesive as against 31 percent reduction for the mixed epoxy-silicon adhesive. Peel tests showed unstable peeling behavior in all joints except joint with rubber modified epoxy toughened adhesive joint. Further assessment of peel test results showed both mixed adhesives i.e. mixed epoxy-silicon, epoxy toughened with liquid rubber (CTBN), mixed epoxy toughened with liquid rubber (CTBN)-epoxy had higher peel strength compared to the other adhesive joint tested.

۱- مقدمه

اتصال چسبی یکی از روش‌های پیوند و یا اتصال دائمی ساختارها و ایجاد یک مجموعه‌ی یک‌پارچه است. امروزه این روش اتصال، جایگزین بسیاری از روش‌های اتصال مکانیکی سنتی، از جمله میخ، پیچ، پرچ و غیره شده است. استفاده از چسب در اتصالات روش جدیدی نیست بلکه از زمان‌های بسیار قدیم مورد مصرف بشر بوده است. امروزه کاربرد اتصالات چسبی در صنایع

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Shahrokhinasab, 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, 2017.

هوافضا، حمل‌ونقل، دریایی و زیرساخت‌های شهری رو به افزایش است. استفاده از چسب در اتصالات نسبت به اتصالات مکانیکی موجب سبک‌تر شدن سازه و کاهش هزینه می‌شود. از طرفی تمرکز تنش در ناحیه اتصال دو لبه در زمان تحت بار کششی به وضوح اثبات شده است [۱، ۲]. مهار این تمرکز تنش‌ها در ساختارهای که خواص کششی پائینی در جهت ضخامت دارند همچون مواد کامپوزیت بسیار حیاتی می‌باشد. روش‌های فعلی در رفع این تنش‌ها شامل ایجاد شیب در چسبنده کامپوزیتی است [۳] که البته بدون هزینه در حوزه استحکام نیست. یک روش جدید برای آزاد سازی این تمرکز تنش‌ها استفاده هم زمان از دو چسب با ضریب سفتی (مدول) متفاوت در ناحیه اتصال بعنوان چسب یا اتصال ترکیبی است. در این راستا تحقیقات گسترده‌ای منتشر شده که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

فیتون و همکاران [۴] یک روش برای بهینه‌سازی استحکام اتصال با استفاده از چند چسب دارای مدول متفاوت در اتصال به کار بردند. آن‌ها از مدل‌های المان محدود برای بهینه کردن خواص اتصال و کمک به درک چگونگی توزیع تنش و کرنش، استفاده نمودند. نتایج تجربی اولیه تغییرات قابل توجهی در مد شکست و هم‌چنین افزایش استحکام اتصال چسبی ترکیبی نسبت به اتصالات دارای یک چسب که در همه‌ی آن‌ها از چسبنده پلاستیک تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) استفاده شده بود اتصال بیشتری فراهم می‌شود. پیرس و همکاران [۵] کاربرد دو نوع چسب به‌صورت ترکیبی با سفتی متفاوت را در طول اتصال هم‌پوشانی تک لبه‌ای بررسی کردند. چسب سخت در مرکز ناحیه‌ی هم‌پوشانی و چسب با مدول کمتر در لبه‌های اتصال که مستعد ایجاد تمرکز تنش است، قرار داده شد. نتایج نشان داد که استحکام اتصال در اتصالات دارای دو چسب در مقایسه با اتصالات با یک نوع چسب به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

داسیلوا و همکاران [۶] یک طراحی مناسب اتصال برای استفاده در دماهای بالا و پایین را بررسی کردند که در آن از دو نوع چسب، یکی دارای استحکام در دمای بالا و دیگری دارای استحکام در دمای پایین استفاده شد. داسیلوا و همکاران تحلیل عددی را با استفاده ازمدل‌های المان محدود برای مطالعه‌ی توزیع تنش در اتصال چسبی ترکیبی و یافتن بهترین طراحی ممکن برای اتصالات دولبه‌ای تیتانیم- تیتانیم و تیتانیم- کامپوزیت انجام دادند. نتایج نشان داد که در چسبنده‌های غیرمشابه ترکیب دو چسب در اتصال کارایی بهتری (از لحاظ افزایش ظرفیت تحمل نیرو) در دماهای در نظر گرفته شده برای چسب‌های حرارتی به اتصال می‌دهد. داسیلوا و همکاران در پژوهشی دیگر [۷]، برای بررسی سودمند بودن روش اتصال ترکیبی در آزمون‌های تجربی و تأیید نتایج حاصل از بررسی‌های نظری، به مطالعه‌ی تجربی این اتصالات پرداختند. نمونه‌های مورد آزمون اتصالات دو لبه‌ای تیتانیم- تیتانیم و تیتانیم- کامپوزیت بود. نتایج نشان داد که در اتصالات با دو چسبنده غیرمشابه، استفاده از دو چسب در اتصال، کارایی بهتری (از نظر افزایش ظرفیت تحمل نیرو) در بازه‌ی دمایی، نسبت به چسب‌های حرارتی تنها فراهم می‌آورد. در تحقیق دیگری داسیلوا و همکاران [۸] دریک مطالعه با استفاده از یک نوع چسب سخت و شکننده در مرکز اتصال چسبی و سه نوع چسب متفاوت منعطف در لبه‌های اتصال تأثیر نوع چسب منعطف در استحکام اتصال ترکیبی را بررسی کردند. در این مطالعه اتصال چسبی ترکیبی در همه‌ی نمونه‌ها استحکام بیشتری نسبت به چسب شکننده‌ی تنها نشان داد. برای بهبود استحکام اتصال ترکیبی نسبت به دو چسب به‌طور جداگانه باید نیروی تحمل شده توسط چسب شکننده بیشتر از چسب منعطف باشد.

بانیا و همکاران [۹] در مطالعه‌ای خواص مکانیکی چسب‌های سیلیکون (RTV) در کاربردهای هوافضا را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها کارایی دو نوع چسب سیلیکون لاستیکی را در آزمون‌های اتصالات چسبی مورد مطالعه قراردادند. آزمون برشی چسبنده ضخیم برای اندازه‌گیری خواص برشی چسب‌ها اتصالات هم‌پوشانی تک لبه‌ای ساخته شد. نتایج نشان داد که استحکام برشی تک لب هردو چسب با افزایش دما کاهش می‌یابد. مارکوس و همکاران [۱۰] سه شکل از اتصالات چسبی را مورد بررسی قرار دادند. شامل اتصال چسبی با چسب سیلیکون RTV تنها، با چسب حرارتی اپوکسی تنها و اتصال دیگر با ترکیبی از دو چسب ذکر شده بود. چسبنده‌های مورد استفاده نیز آلومینیوم و سرامیک بود. نمونه‌های تهیه شده در دماهای بالا و پایین تا هنگام شکست مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در دمای محیط چسب اپوکسی بیشترین نیروی شکست را دارد و در دمای بالا خواص مکانیکی آن بسیار بهتر از چسب سیلیکون است. در اتصال با چسب اپوکسی و اتصال ترکیبی مشخص شد که استحکام چسب، محدودکننده‌ی اتصال نیست بلکه عامل محدودکننده‌ی استحکام اتصال چسبنده سرامیکی است. بوده و همکاران [۱۱] به‌صورت تجربی زبری سطح چسبنده‌های مختلفی از جمله آلومینیوم وچوب را در اتصالات چسبی حاوی چسب ترکیبی مورد مطالعه قراردادند. آن‌ها وابستگی مستقیم استحکام در ناحیه اتصال را به زبری سطح و نوع چسب مرتبط دانستند. تامیتز و آدین [۱۲] اخیراً در مقاله‌ای موضوع استفاده از چسب‌های ترکیبی به‌منظور ترمیم و کاهش آسیب از طریق آنالیز تحلیلی به روش اجزای محدود مورد بررسی قرارداده و در نتیجه گیری حضور چسب ترکیبی را عامل افزایش استحکام در اتصال و کاهنده تمرکز تنش در ناحیه اتصال و تاخیرانداز در شکست گزارش داده است. اگرچه تحقیقات گسترده در موضوع چسب‌های ترکیبی منتشر شده ولیکن با توجه به کاربرد گسترده اتصالات چسبی در صنایع هوا فضا و شرایط نرخ کرنشی بالا در این کاربردها و نبود اطلاعاتی در زمینه رفتار این اتصالات در نرخ کرنش‌هایی بالاتر از مقادیر شبهه استاتیک یعنی mm/min ۵-۲، هدف از این مطالعه بررسی رفتاری چسب‌های ترکیبی در نرخ کرنش‌هایی در محدوده mm/min ۱۰۰ و در محدوده دمایی ۱۰۰°C تا ۲۰۰°C و مقایسه آن با نرخ کرنش شبه استاتیک می‌باشد.

۲- روش تهیه و ساخت مواد

برای تهیه‌ی اتصالات چسبی از یک نوع چسبنده کامپوزیت پلیمری استفاده شد که حاوی اپوکسی/ الیاف شیشه بود.

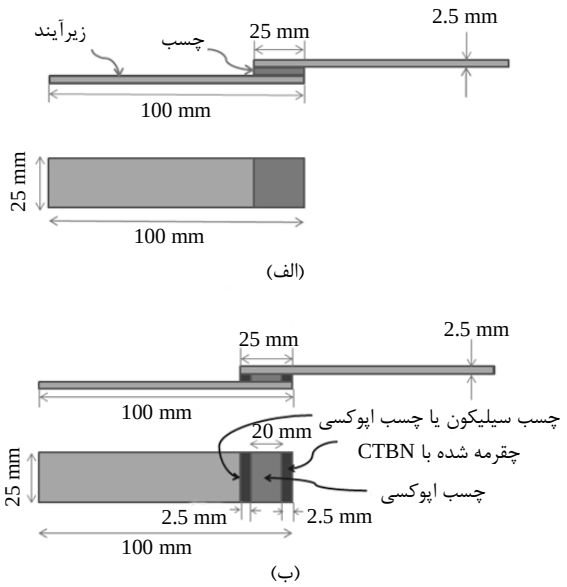
۲-۱- روش تهیه‌ی چسبنده کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی

جهت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش لایه‌چینی دستی استفاده شد. الیاف شیشه از نوع پارچه‌ای با وزن سطحی g/m^2 ۴۰۰ محصول شرکت Camalyf کشور ترکیه در ابعاد cm ۳۰×۳۰ آماده و به‌صورت کامل با رزین اپوکسی با کد ایپون ۸۲۸ محصول شرکت شل و عامل پخت آمینی آلیفاتیک با نام تجاری HA-76 محصول شرکت مکرر ایران آغشته سازی شد. پخت اولیه به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق صورت گرفت. سپس برای رسیدن به مقاومت بالاتر، پخت تکمیلی را با توجه به دستورالعمل استفاده از رزین، به مدت ۴ ساعت در دمای ۹۰°C قرار گرفت. در مرحله بعد با دستگاه برش نمونه‌هایی در ابعاد mm ۲۵×۱۰۰ برای آزمون تک لبه‌ای برشی (براساس استاندارد ASTM D5868) و ابعاد mm ۲۵×۲۰۰ برای آزمون پوست‌کنی (بر اساس استاندارد ASTM D1002) برش داده شد. در اتصالات با چسبنده

کامپوزیتی پنج نوع چسب شامل چسب اپوکسی، سیلیکون، چسب ترکیبی اپوکسی-سیلیکون، چسب اپوکسی چقرمه شده با لاستیک مایع CTBN و چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی چقرمه شده با لاستیک مایع CTBN مورد استفاده قرار گرفت. آزمون تک لبه‌ای برشی با سرعت کشش ۵ mm/min و ۱۰۰ mm/min در دمای محیط روی نمونه‌ها صورت گرفت و هم چنین روی اتصالات حاوی چسب اپوکسی، سیلیکون و اپوکسی- سیلیکون ترکیبی آزمون فوق در دو دمای ۱۰۰°C و ۲۰۰°C با سرعت کشش ۵ mm/min انجام شد. ابعاد اتصالات با چسبنده کامپوزیتی به طول هم پوشانی ۲۵ mm ، عرض اتصال ۲۵ mm، ضخامت چسب ۳ mm، طول چسبنده ۱۰۰ mm و ضخامت چسبنده ۲/۵ mm است.

۲-۲- روش تهیه نمونه چسب ترکیبی برای آزمون تک لبه‌ای برشی

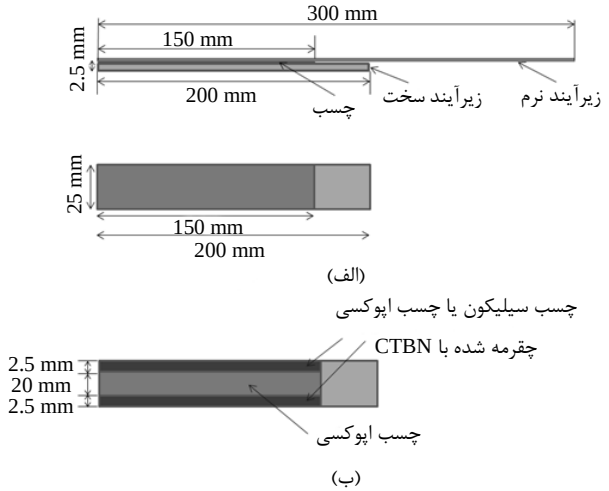
نحوه قرار دهی چسب اعم از نوع تنها و ترکیبی برای آزمون تک لبه‌ای برشی طبق شکل ۱ انجام شد. در چسب ترکیبی، طول هم پوشانی ۲۵ mm شامل طول ۲۰ mm برای چسب اپوکسی تنها و دو ناحیه به طول ۲/۵ mm در لبه و انتها طول هم پوشانی می‌باشد برای جلوگیری از درهم رفتگی دو نوع چسب از فیلم تفلونی استفاده شده است. برای یکسان بودن ضخامت چسب در اتصالات چسبی در همه نمونه‌ها از گلوله‌های شیشه‌ای با ضخامت یکسان استفاده شده است.



شکل ۱ نمونه آزمون تک لبه‌ای برشی (الف) اتصال تک لبه‌ای ساده و (ب) اتصال تک لبه‌ای با چسب ترکیبی

۲-۳- روش تهیه‌ی نمونه برای آزمون پوست‌کنی دراتصال چسبی

در اتصالات چسبی تهیه شده برای آزمون پوست‌کنی[1] از چسبنده کامپوزیتی به عنوان چسبنده سخت استفاده شد. در تمام نمونه‌ها چسبنده منعطف، الیاف پارچه کولار با وزن سطحی ۲۰۰ g/m^2 می‌باشد. پس از آماده‌سازی سطوح چسبنده ، چسب‌های موردنظر روی سطوح اعمال شد و سپس دو سطح روی یکدیگر قرار داده شد و برای پخش یکنواخت چسب و یکسان بودن ضخامت چسب در تمام طول اتصال یک صفحه‌ی کامپوزیتی با ابعاد مشابه چسبنده سخت روی الیاف کولار قرار داده شد (شکل ۲) و در نهایت سطوح با گیره به هم متصل شدند. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند و سپس پخت تکمیلی به مدت ۴ ساعت در آون در دمای ۹۰°C انجام شد و آزمون پس از ۴۸ ساعت روی نمونه‌ها انجام گرفت. سرعت کشش در این آزمون ۱۵۰ mm/min می‌باشد.



شکل ۲ نمونه اتصال چسبی برای آزمون پوست‌کنی (الف) اتصال ساده و (ب) اتصال با چسب ترکیبی

در این مطالعه اتصالات به روش چسب ترکیبی منظور نحوه قرار گیری چسب به‌صورت ترکیبی طبق شکل‌های ۱ و ۲- ب می‌باشد.

در تمام نمونه‌ها استحکام برشی τ با استفاده از معادله (۱) محاسبه شده است.

$$\tau = \frac{P}{bl} \qquad (۱)$$

در معادله (۱)، P نیروی وارد شده به اتصال چسبی در لحظه‌ی شکست، b عرض ناحیه‌ی اتصال و l طول هم پوشانی است.

کد بندی برای نمونه‌های تحت آزمون تک لب برشی و اتصال پوست‌کنی به‌ترتیب چسب اپوکسی (E)، چسب سیلیکون (S)، چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون (M)، چسب اپوکسی چقرمه شده با لاسنیک مایع CTBN (EC) و چسب ترکیبی اپوکسی چقرمه شده با لاسنیک مایع CTBN- اپوکسی (MC) است.

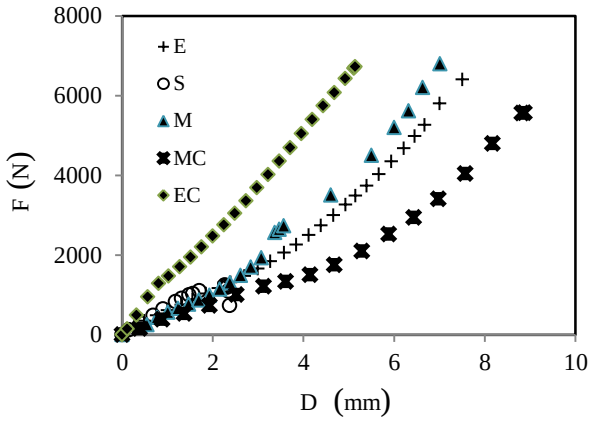
۳- بحث و نتایج

۳-۱- آزمون استحکام تک لبه‌ای برشی

نمودار نیرو (F) - جابجایی (D) در آزمون استحکام تک لبه‌ای برشی روی پنج نمونه چسب که شامل چسبهای اپوکسی، سیلیکون، اپوکسی حاوی لاستیک مایع CTBN، چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون وچسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی حاوی لاستیک مایع CTBN در شکل ۳ آمده است. شکل فوق رفتار تقریباً خطی برای اگثر نمونه‌ها به غیر از نمونه حاوی چسب سیلیکون تنها از خود نشان میدهند، آنچه درخور توجه است رفتار در نمونه دارای اتصال ترکیبی اپوکسی- سیلیکون است که عملاً دارای دو شیب ضریب سفتی است، در شیب اول نمودار برای این نمونه هر دو چسب یعنی اپوکسی و سیلیکون به‌صورت ترکیبی نقش خود را در ضریب سفتی اتصال به‌صورت ترکیبی ایفا می‌کنند ولیکن در شیب دوم که از ضریب سفتی بالاتری برخوردار است تماماً نقش برای بخش چسب اپوکسی است که عمل می‌کند. چنین رفتاری را در

1. Peel

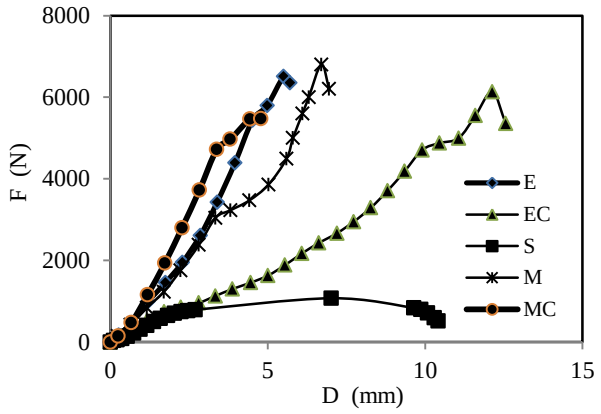
نمونه حاوی چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی حاوی لاستیک مایع CTBN (MC) نیز مشاهده می‌شود شیب پائین در این نمونه (MC) و نزدیکی دوشیب در این چسب ترکیبی می‌تواند به‌دلیل نزدیکی ضریب سفتی این دو چسب که هر دو پایه اپوکسی دارند باشد. نتایجی مشابه توسط دیگر محققین در موضوع ساختار دو شیبی برای اتصالاتی با ضریب سفتی متفاوت گزارش شده است [۸].



شکل ۳ نمودار نیرو- جابجایی در آزمون استحکام تک لبه‌ای برشی (۵ mm/min) روی پنج نمونه چسب نوع E، S، EC، M و MC

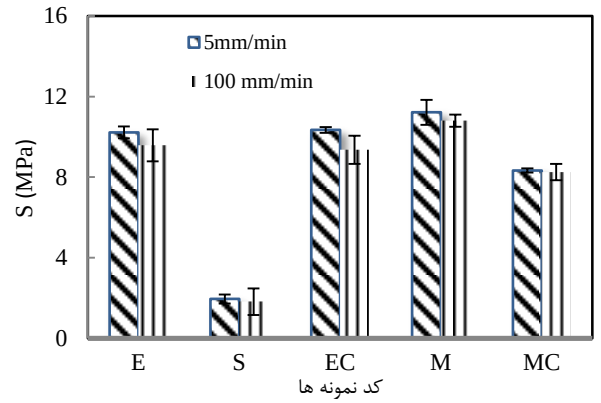
نتایج ارائه شده در شکل ۳ همچنین حاکی از ضریب سفتی بالاتر در نمونه‌های اتصال با چسب اپوکسی حاوی لاستیک مایع (EC) می‌باشد. همچنین در این شکل نمونه چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون .بالاترین میزان حداکثر نیرو در بین پنج نمونه تحت آزمون تک لبه‌ای برشی را به خود اختصاص داده است. به همین ترتیب حداکثر نیرو در دو نمونه چسب اپوکسی و چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی حاوی لاستیک مایع CTBN در مرتبه پائین‌تری قراردارند و تقریباً به یک میزان بوده ولیکن میزان جابجایی که یکی از شاخصه‌های چقرمگی بالاتر و به تبعه آن جذب انرژی بالاتر است در چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی حاوی لاستیک مایع (MC) به مراتب بیشتر است همچنین شکل ۳ نشان می‌دهد نمونه حاوی چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون نیز از جابه‌جایی قابل ملاحظه‌ای نیز برخوردار است. بررسی بیشتر شکل ۳ حاکی از ظرفیت پایین چسب سیلیکون تنها در اتصال چسبی می‌باشد. به‌منظور بررسی اثر نرخ کرنش بالاتر که بعضاً ممکن است در ناحیه اتصال در ساختارهای کامپوزیتی همچون سازه‌های هوایی رخ دهد، آزمون استحکام تک لبه‌ای برشی روی نمونه‌ها حاوی چسب‌های مختلف صورت گرفت و از پنج نمونه چسب ذکر شده در بالا علاوه بر سرعت کششی ۵ mm/min در سرعت کششی ۱۰۰ mm/min نیز انجام شد. نتایج به‌دست آمده در نمودار نیرو- جابه‌جایی در شکل ۴ برای سرعت کششی ۱۰۰mm/min حاکی ضریب سفتی بالاتر برای سه نمونه حاوی چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی با لاستیک مایع و به‌ترتیب در مرتبه پائین تر برای همین کمیت نمونه چسب اپوکسی تنها و نوع ترکیبی اپوکسی- سیلیکون قراردارد. شکل ۴ همچنین بالاترین میزان حداکثر نیرو به‌دست آمده را برای نمونه اتصال حاوی چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون نشان می‌دهد.

همچنین نمودار فوق رفتار نسبتاً خطی در ناحیه اولیه برای این سه نمونه نشان می‌دهد. از طرفی ضریب سفتی کمتر و رفتار کاملاً غیر خطی برای نمونه با چسب اپوکسی حاوی لاستیک مایع (EC) و چسب سیلیکون تنها (S) در پائین‌ترین مقدار نسبت به دیگر نمونه‌ها را بیان می‌کند.



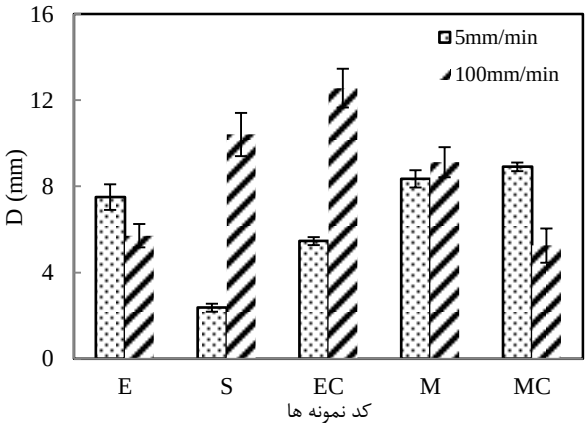
شکل ۴ نمودار نیرو- جابجایی در آزمون استحکام تک لبه‌ای برشی (۱۰۰ mm/min) روی پنج نمونه اتصال چسبی نوع E، S، EC، M و MC

بررسی استحکام برشی(S) در دو سرعت آزمون در شکل ۵ آورده شده است. شکل فوق نشان می‌دهد تقریباً در همه نمونه میزان استحکام برشی به‌دست آمده در سرعت ۱۰۰ mm/min در حد پایین‌تری نسب به سرعت کششی ۵ mm/min قراردارد. این کاهش خواص برشی را می‌توان به موضوع حساسیت به نرخ کرنش در ماده چسب به‌خصوص اپوکسی نسبت داد [۱۳].



شکل ۵ نمودار میله‌ای حداکثر استحکام برشی در دو سرعت کشش برای پنج نمونه اتصال چسبی نوع E، S، EC، M و MC

همچنین نتایج نشان داد میزان تنش برشی در نمونه با چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون کمی بالاتر از دیگر نمونه‌ها می باشد. در شکل ۵ بالاترین مقدار استحکام برشی برای هردو سرعت کشش به‌ترتیب چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون (M)، اپوکسی تنها (E) و نوع ترکیبی اپوکسی- اپوکسی با لاستیک مایع (MC) است. این اختلاف می‌تواند به جهت اختلاف فاحش در ضریب سفتی (مدول) دو ماده چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون یعنی اپوکسی و سیلیکون نسبت به دو ماده استفاده شده در چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی حاوی لاستیک مایع و چسب اپوکسی تنها باشد. بررسی میزان جابه‌جایی در شکل ۳ (۵ mm/min) برای نمونه‌های تحت آزمون تک لبه‌ای برشی و مقایسه آن برای همین کمیت در ۱۰۰ mm/min در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل‌فوق حداکثر میزان جابه‌جایی (D) را برای نمونه‌های حاوی اتصال چسبی با چسب اپوکسی تنها (E)، چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون (M) و چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی حاوی لاستیک مایع (MC) نشان می‌دهد. میزان جابه‌جایی در این سه نمونه با توجه مقادیر انحراف از مقدار متوسط به‌دست آمده تقریباً یکسان می‌باشد.



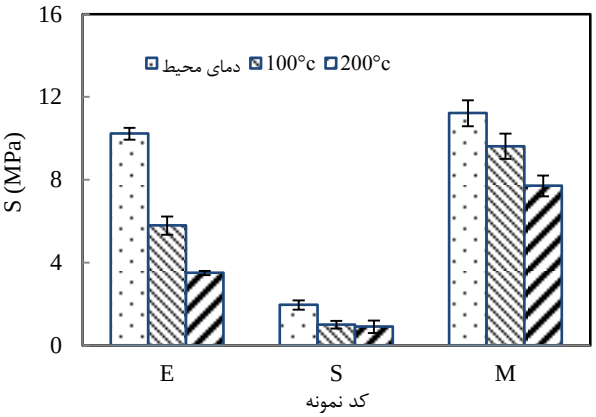
شکل ۶ نمودار میله‌ای میزان جابه‌جایی در آزمون نیرو- جابه‌جایی برای دو سرعت کشش در طیف اتصالات تحت آزمون قرارگرفته

شکل ۶ همچنان جابه‌جایی را برای اتصال با چسب سیلیکون (S) در پائین ترین مقدار نسبت به دیگر چسب‌ها نشان می‌دهد. شکل ۶ وضعیت بسیار متفاوتی را برای میزان جابه‌جایی (D) برای آزمون فوق در mm/min ۱۰۰ نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده برای سرعت mm/min ۱۰۰ کشسانی قابل ملاحظه‌ای را برای نمونه حاوی جسب سیلیکون (S) و چسب اپوکسی حاوی لاستیک مایع (EC) نشان می‌دهد و در مرتبه پائین تر نمونه M قرار گرفته است. نتایج مشابه در موضوع کشسانی توسط مارکوس [۱۰] گزارش شده است. این کشسانی قابل ملاحظه چندان قابل توجیح نیست مگر به‌دلیل حضور فاز منعطف در ساختار چسب که البته باید در سرعت mm/min ۵ نیز خود را نشان می‌داد.

به‌منظور بررسی رفتار اتصالات چسبی تحت دمای بالا، سه نمونه اتصال چسبی تک لبه برشی حاوی چسب‌های اپوکسی تنها، سیلیکون تنها و چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون تحت دو دمای ۱۰۰°C و ۲۰۰°C مورد آزمون استحکام برشی (S) تک لبه در سرعت mm/min ۵ قرار گرفت. نتایج حاصل در شکل ۷ آمده است. نتایج آزمون حاکی از افت قابل ملاحظه در استحکام برشی تک لبه در دمای ۲۰۰°C در مقایسه با دمای ۱۰۰°C و دمای محیط برای اتصال چسبی حاوی چسب اپوکسی تنها می‌باشد، اگرچه این افت دراتصال چسبی با چسب ترکیبی نیز مشاهده می‌شود. این افت فاحش در دمای ۱۰۰°C و به‌خصوص ۲۰۰°C را می‌توان مرتبط با تخریب چسب اپوکسی دانست. شکل ۷ نشان می‌دهد برای اتصال باچسب اپوکسی تنها میزان افت استحکام بررشی از دمای محیط تا ۱۰۰°C نزدیک به ۴۴ درصد می‌باشد و نسبت به دمای ۲۰۰°C افت نزیک به ۶۵ درصد در صورتی‌که میزان افت برای اتصال با چسب ترکیبی در محدوده از دمای محیط تا ۱۰۰°C نزدیک به ۱۴ درصد و نسبت به دمای ۲۰۰°C افت نزیک به ۳۱ درصد قرار دارد. این بارزترین ویژگی کاربردی در چسب ترکیبی با دو ضریب سفتی کاملاً متفاوت به شمار می‌رود.

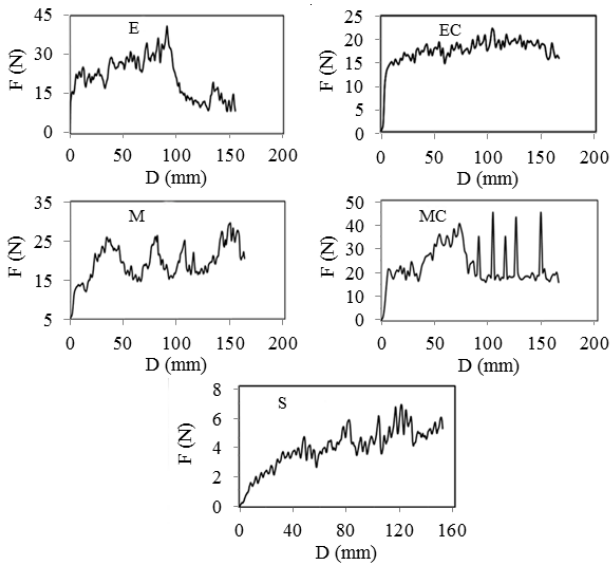
۳-۲- آزمون پوست‌کنی

به‌منظور بررسی استحکام ناحیه اتصال و همچنین و یا به عبارتی بررسی چسبندگی و مقاومت به جدایش چسب آزمون پوست‌کنی روی پنج نوع اتصال چسبی شامل: چسب اپوکسی، سیلیکون، اپوکسی چقرمه شده با لاستیک مایع، چسب ترکیبی سیلیکون اپوکسی و چسب ترکیبی اپوکسی چقرمه‌شده با لاستیک مایع- اپوکسی صورت گرفت. نمونه‌ها طبق شکل ۲ درسرعت کشش mm/min ۱۵۰ تحت آزمون پوست‌کنی قرارگرفت. نتایج این آزمون در شکل ۸ نشان داده شده است. نمودار پوست‌کنی به‌صورت نوسانی است که به‌دلیل چسبیدن و جداشدن یا لغزش متوالی چسبنده منعطف از چسبنده سخت می‌باشد.



شکل ۷ نمودار میله‌ای حداکثر استحکام برشی در سه دمای محیط، ۱۰۰°C و ۲۰۰°C و سرعت mm/min ۵ برای سه نمونه اتصال چسبی شامل نوع E، S و M

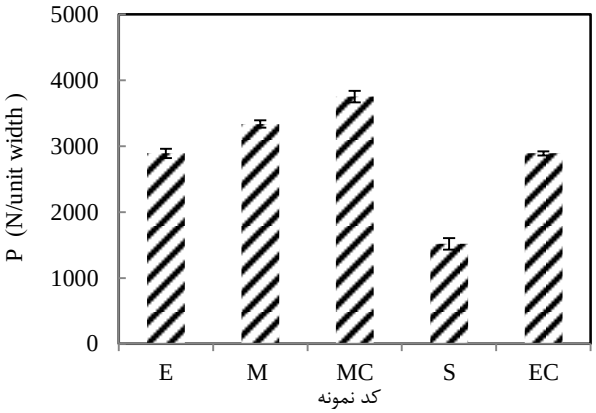
بررسی شکل ۸ نشان از پایداری بهتر در رفتار در نمونه اتصال با چسب اپوکسی حاوی لاستیک مایع می‌باشد و نمونه با چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون در مرتبه بعدی از نظر پایداری یا نوسان کمتر قرار دارد. میانگین نقاط پیک نیروها در نمودار نیرو جابه‌جایی در آزمون فوق اندازه گیری و به عنوان نیروی متوسط پوست‌کنی گزارش شد و استحکام پوست‌کنی از طریق تقسیم این نیروی پوست‌کنی بر ۲/۵ cm (عرض ناحیه‌ی اتصال) محاسبه شد. نتایج این آزمون در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸ آزمون پوست‌کنی روی پنج نوع اتصال چسبی نوع E، M، MC، S و EC

شکل ۹ نشان از استحکام پوست‌کنی (P) بالاتر در نمونه با اتصال چسبی ترکیبی حاوی اپوکسی چقرمه شده با لاستیک مایع- اپوکسی و سپس چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون است. نرملایز نتایج براساس استحکام پوست‌کنی

اتصال چسبی حاوی چسب اپوکسی تنها (E) افزایش ۱۵/۴، ۲۹/۸ درصد برای به‌ترتیب دو اتصال با چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون و چسب حاوی اپوکسی چقرمه شده با لاستیک مایع- اپوکسی می‌باشد. همچنین نتیجه نرملایز استحکام پوست‌کنی برای دو اتصال دیگر یعنی اتصال با چسب سیلیکون تنها و اتصال با چسب اپوکسی چقرمه شده با لاستیک مایع به‌ترتیب ۴۷/۵ و ۶/۹ درصد کاهش نشان می‌دهد.



شکل ۹ نمودار میله‌ای استحکام متوسط پوست‌کنی برای پنج نمونه اتصال چسبی نوع E، S، EC، M و MC

۴- نتیجه گیری

بررسی استفاده از چسب ترکیبی با دو ضریب سفتی (مدول) متفاوت درمقایسه با یک چسب در اتصالات تک لبه برشی در نرخ کشش ۵ و ۱۰۰ mm/min و در دمای محیط، ۱۰۰°C و ۲۰۰°C به‌صورت موفقیت آمیزی صورت گرفت. در این بررسی پنج نوع چسب در اتصال تک لبه برشی مورد مطالعه قرار گرفت که شامل چسب اپوکسی تنها، سیلیکون، اپوکسی حاوی لاستیک مایع CTBN، چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون و چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی حاوی لاستیک مایع CTBN می‌باشد. همچنین ارزیابی از عملکرد این اتصالات در آزمون پوست‌کنی نیز بررسی شد. نتایج حاکی از استحکام برشی نسبتاً بالاتر در اتصال چسبی حاوی چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون نسبت دیگر چسب‌ها است. و مرتبه پائینتری اتصال با چسب اپوکسی تنها و چسب اپوکسی حاوی لاستیک مایع قرار دارد. این موضوع در هردو نرخ کشش صادق بوده است. بررسی استحکام برشی در سه طیف دمایی ذکر شده بالاحاکی از عملکرد موفق چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون نسبت به دیگر رقبای خود به‌خصوص در دمای ۲۰۰°C با افت ۳۱ درصد در مقایسه با اتصال چسبی اپوکسی تنها با افتی درمحدوده ۶۵ درصد و افت ۱۴ درصدی در دمای ۱۰۰°C برای چسب ترکیبی در مقایسه با ۴۴ درصدی برای نمونه حاوی چسب اپوکسی تنها دارد. ارزیابی عملکردی در آزمون پوست‌کنی این چسب‌ها نشان از استحکام برشی بالاتر به‌ترتیب در نمونه چسب ترکیبی اپوکسی- اپوکسی لاستیک مایع، چسب ترکیبی اپوکسی- سیلیکون و چسب اپوکسی تنها دارد.

۵- مراجع

[1] Goland, M. and Reissner, E.W., "The Stresses in Cemented Joints" Applied Mechanic Journal, ASME, Vol. 66, pp. 17-27, 1944.
[2] Adams, R.D. Comyn, J. and Wake, W.C., "Structural Adhesive Joints in Engineering," 2nd ed., Chapman & Hall, London, 1997.
[3] Banea, M.D. and Da Silva, L.F.M., "Adhesively Bonded Joints in Composite Materials: An Overview," Journal of Materials Design and Applications, SAGE, Vol. 223, No. 1, 2009.
[4] Fitton, M.D. and Broughton, J.G., "Variable Modulus Adhesives: an Approach to Optimized Joint Performance", International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 25, pp. 329–336, 2005.
[5] Pires, I. Quintino, L. Durodolab, J.F. and Beevers, A., "Performance Of Bi-Adhesive Bonded Aluminium Lap Joints", International Journal of Adhesion & Adhesives, Elsevier, Vol. 23, pp. 215–223, 2003.
[6] 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, Elsevier, Vol. 27, pp. 362–379, 2007.
[7] Da Silva, L.F.M. and Adams, R.D., "Adhesive Joints at High And Low Temperatures Using Similar And Dissimilar Adherents And Dual Adhesives," International Journal of Adhesion & Adhesives, Elsevier, Vol. 27, pp. 216–226, 2007.
[8] Da Silva, L.F.M. and Lopes, M.J.C.Q., "Joint Strength Optimization By The Mixed- Adhesive Technique", International Journal of Adhesion & Adhesives, Elsevier, Vol. 29, pp. 509–514, 2009.
[9] Banea, M.D. Da Silva, L.F.M. and Campilho, R.D.S.G., "Temperature Dependence of the Fracture Toughness of Adhesively Bonded Joints", Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 24, pp. 2011–2026, 2010.
[10] Marques, E.A.S. Magalh, D.N.M. and Da Silva, L.F.M., "Experimental Study Of Silicone-Epoxy Dual Adhesive Joints for High Temperature Aerospace Applications", Mat-wiss U, Werkstofftech, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Vol. 42, No. 5, pp. 471-477, 2011.
[11] Budhe, S. Ghumatkar, A. Birajdar, N. and Banea, M.D., "Effect of Surface Roughness Using Different Adherent Materials on The Adhesive Bond Strength" Applied Adhesion Science, Applied Adhesion Science, Vol. 3, pp. 1-10, 2015.
[12] Temiz, S. and Adin, H., "Behavior of Bi-Adhesive in Double Strap Joint With Embedded Patch Subjected To Bending," Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Sofia, Vol. 45, No. 3, pp. 83–96, 2015.
[13] Gilat, A. Goldberg, R.K. and Roberts, G.D., "Strain Rate Sensitivity Of Epoxy Resin In Tensile And Shear Loading," Journal of Aerospace Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 75-89, 2007.