



اثرات سطح دما و نسبت تنش به استحکام بر رفتار خزشی اتصالات چسبی تک لبه آلومینیم-آلومینیم

رویاالسادات آشفته¹، حسن پورنگ²، مرصاد مباشری²، هادی خرمی شاد^{3*}

1- دانشجوی دکتری طراحی کاربردی، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- کارشناس ارشد هوافضا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی 1684613114، khoramishad@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>دریافت: 96/4/21 پذیرش: 96/9/28</p> <p>کلیدواژگان: چسب خزش استحکام برشی اتصال چسبی تک لبه</p>	<p>چسب‌های پلیمری به سبب ماهیت ویسکوالاستیک خود با گذر زمان و تحت یک بار ثابت دچار تغییر شکل خزشی می‌شوند. هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر سطح دما و نسبت تنش-به- استحکام بر رفتار خزشی اتصالات چسبی ساده تکه لبه ساخته شده با چسب آرالدایت 2011 است. ابتدا آزمایش کشش استاتیکی در دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد صورت گرفته و سپس با اعمال نسبت‌های تنش-به- استحکام نهایی معادل 0.25 و 0.35، آزمایش خزش کششی انجام گرفته است. با افزایش نسبت تنش-به- استحکام نهایی از 0.25 و 0.35 در دمای 40 درجه سانتی‌گراد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش به ترتیب 24 و 96.7 درصد افزایش پیدا می‌کنند. در دمای 50 درجه این میزان افزایش برابر 14.3 و 79.9 درصد است. همچنین با افزایش دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش در نسبت تنش-به- استحکام نهایی معادل 0.25، به ترتیب 20.6 و 49.5 درصد و در نسبت تنش-به- استحکام نهایی معادل 0.35، به ترتیب 11.1 و 36.6 درصد افزایش پیدا می‌کنند.</p>

The Effects of Temperature Level and Stress-to-Strength Ratio on Creep Behavior of Aluminum-Aluminum Single Lap Adhesive Joints

Roya Sadat Ashofteh, Hassan Pourang, Mersad Mobasheri, Hadi Khoramishad*

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology of Iran, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, khoramishad@iust.ac.ir

Keywords	Abstract
<p>Adhesive Creep Shear Strength Single Lap Joint</p>	<p>Polymer-based adhesives undergo creep deformation under constant loading due to their viscoelastic nature. The aim of this study was investigation of the effects of temperature level and stress- to-strength ratio on creep behavior of single lap joints (SLJs) manufactured with adhesive Araldite 2011. Static tensile tests were done on the samples at 40 and 50°C. Then, the tensile creep tests were done at 40 and 50°C and at stress-to-strength ratios of 0.25 and 0.35. With increasing the stress-to-strength ratio from 0.25 to 0.35 at 40°C, the creep displacement and the slope of the second creep stage were increased by 24% and 96.7%, while at 50°C such increase reached to 14.3% and 79.9%, respectively. With increasing the temperature from 40 to 50°C, at the stress-to-strength ratio of 0.25, the creep displacement was increased by 20.6% and the slope of second creep stage increased by 49.5%. Whereas, at the stress-to-strength ratio of 0.35, changing the temperature from 40 to 50°C resulted an increase in the creep displacement by 11.1% and the slope of second creep stage by 36.6%.</p>

1-مقدمه

اتصالات چسبی در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم اتصال قطعات همچون جوش، پیچ و پرچ دارای ویژگی‌هایی همچون توزیع یکنواخت‌تر تنش، نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت اتصال مواد غیر هم‌جنس، مقاومت بالا در برابر بارگذاری خستگی، کاهش هزینه‌های تولید و حذف خوردگی گالوانیک است. وجود ویژگی‌های مثبت باعث شده این نوع اتصال در صنایع هوافضا، دریایی و اتومبیل‌سازی مورد توجه قرار بگیرد. در کنار مزایای آن، اتصالات چسبی دارای معایبی هستند و عواملی مثل بازرسی مخرب برای سلامت اتصال، حساسیت و تأثیرپذیری آن‌ها از عوامل محیطی همچون دما و رطوبت استفاده از این اتصالات را محدود ساخته است.

خزش تغییر شکل وابسته به زمان است که به‌عنوان نقص در رفتار بلند مدت مواد پلیمری به حساب می‌آید. تحت اثر یک بار ثابت که به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از استحکام نهایی ماده است، زنجیره‌های بستر پلیمری کشیده شده و دچار چرخش و لغزش روی یکدیگر می‌شوند. این امر منجر به بهم خوردن توازن ابعادی¹ شده و نهایتاً شکست ماده را در پی خواهد داشت. در پلیمرهای خطی با زنجیره‌های مولکولی کوتاه، این پدیده سریع‌تر و در صورت وجود پیوندهای عرضی، کندتر رخ خواهد داد. خزش در مواد به عوامل مختلفی از جمله دما و سطح تنش وابسته است. با گذشت زمان

¹ Dimensional Mismatch
برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:
Ashofteh, R. S. Pourang, H. Mobasheri, M. and Khoramishad, H., "The Effects of Temperature Level and Stress-to-Strength Ratio on Creep Behavior of Aluminum-Aluminum Single Lap Adhesive Joints", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 353-358, 2018.

Please cite this article using:

بیان داشتند که برای تخمین دقیق تر رفتار خزشی می‌بایست با تغییر دما، نوع چسب، آماده‌سازی سطح و ضخامت چسب، اثر پارامترهای متفاوت دیده شود. وجود رطوبت در کنار سطح تنش اعمالی و دما، عامل دیگری است که باید در آزمایش خزش کششی چسب‌های پلیمری در نظر گرفته شود. کاستا و باروس¹⁰ [5] به انجام آزمایش‌های خزشی استاندارد روی یک نمونه چسب اپوکسی در سه سطح تنش مختلف به منظور درک رفتار خزشی آن پرداختند. آزمایش‌های صورت گرفته نشان داد که اگر سطح تنش اعمالی کمتر از 50 درصد استحکام نهایی ماده باشد، خواص آنی و وابسته به زمان چسب تحت دما و رطوبت ثابت، تقریباً ثابت می‌ماند.

کروکمب و همکارانش [6] رفتار خزشی اتصال ساده تک لبه تحت بار طولانی مدت و در معرض رطوبت را مورد بررسی قرار دادند. پیش از انجام مدل‌سازی، به منظور اندازه‌گیری وابستگی نرمی خزشی¹¹ به رطوبت در نمونه حجمی اتصالات چسبی تک لبه، آزمون‌های آزمایشگاهی صورت گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های شبه استاتیک در دمای اتاق روی نمونه حجمی نشان داد که وجود رطوبت در چسب اثر قابل توجهی در تنزل خواص چسب دارد به گونه‌ای که مدول یانگ و استحکام شکست به ترتیب 9.5 و 5.3 درصد نسبت به حالت بدون رطوبت کاهش دارند. همچنین نتایج حاصل از نمودار خزشی در دمای 50 درجه سانتی‌گراد و تحت بار 25 درصد استحکام واماندگی استاتیکی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی بر پایه مدل قانون توانی از تطابق خوبی برخوردار است.

این گروه تحقیقاتی در گزارشی دیگر تکنیک‌های مدل‌سازی عددی جهت شبیه‌سازی اثر رطوبت، دماهای بالا و بار اعمالی را بر اتصال ساده تک لبه، مورد ارزیابی قرار دادند [7]. در کنار این آزمایش‌های تجربی، اتصال ساده تک لبه به صورت غوطه‌ور در آب، در دمای 50 درجه سانتی‌گراد و به مدت 6 ماه تحت دو سطح تنش 12 و 17.5 درصد استحکام شکست استاتیکی¹² قرار گرفته است. بر این اساس مدول یانگ چسب اف-ام 73 در حالت مرطوب 15 درصد نسبت به حالت خشک کاهش نشان داد. همچنین برای نمونه‌ی تحت نیرویی معادل 12 درصد استحکام شکست، کرنش خزشی در سه ماهه‌ی ابتدای آزمایش با سرعت بیشتری نسبت به سه ماهه‌ی دوم افزایش پیدا کرد. پس از گذشت سه ماه، ایجاد کرنش خزشی در تمامی لایه‌ها با یک نرخ ثابت همراه بود. بررسی سازوکارهای مولکولی موثر در بهبود یا تضعیف مقاومت خزشی تحت دما و سطوح تنش متفاوت موضوع دیگری است که از اهمیت فراوانی در شناخت رفتار خزشی مواد پلیمری برخوردار است.

در تحقیقی، آلن و شاناهان¹³ [8] رفتار خزشی اتصال ساده تک لبه را در دما و بارگذاری‌های مختلف و ارتباط آن با سازوکارهای مولکولی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند که در دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه چسب، رفتار خزشی به رفتار لاستیک شبیه است زیرا رفتار خزشی تحت تأثیر حرکت بخش‌های مولکولی¹⁴ قرار خواهد گرفت.

عمده تحقیقات صورت گرفته، بررسی رفتار خزشی نمونه‌های حجمی چسب‌های اپوکسی جهت استخراج کرنش‌های خزشی بوده است و آنها عموماً در سطح دمای ثابت یا سطح تنش ثابت انجام شده است. با توجه به کاربرد وسیع اتصالات چسبی آلومینیم-آلومینیم در صنایع مختلف از جمله صنعت هوایی و اهمیت دوام سازه‌ها که به صورت همزمان در معرض تنش و دماهای

حرکت اتم‌ها، مولکول‌ها و نابجایی‌ها¹ در یک ماده جامد اتفاق می‌افتد و با افزایش دما این حرکات سرعت پیدا می‌کنند. تأثیرات خزش در دماهای زیر دمای انتقال شیشه‌ای پلیمرها نسبتاً کوچک است ولی با گذر از این دما، خزش روند رو به رشدی را نشان می‌دهد.

در دهه‌های اخیر تلاش‌های فراوانی جهت شناخت رفتار خزشی چسب‌های پایه پلیمری گرم‌انرم و گرم‌سخت از سوی محققان صورت گرفته است. زهساز² و همکارانش [1] در سال 2014، اثر ضخامت و پیخ‌زنی³ چسب را بر تغییر شکل و عمر خزشی اتصال چسبی دو لبه مورد آزمایش قرار دادند. چسب مورد استفاده در این تحقیق، آرالدایت⁴ 2015 از نوع پایه اپوکسی است. آزمایش خزش تک‌محوره در دمای 63 درجه سانتی‌گراد جهت به دست آوردن ویژگی‌های خزشی در این دما صورت گرفته است. نتایج نشان داد که وجود فیلت در اتصال منجر به افزایش عمر خزشی و کاهش تغییر شکل خزشی اتصال شده و این در حالی است که افزایش ضخامت چسب اثر اندکی بر عمر خزشی اتصال داشته است.

در تحقیقی دیگر خلیلی⁵ و همکارانش [2] اثر تقویت ناحیه چسب بر خواص خزشی اتصال ساده تک لبه متشکل از چسب‌های آلومینیمی چسبیده شده با چسب آرالدایت 2015 را به صورت تجربی بررسی کردند. تقویت لایه چسب به کمک الیاف آرامید، کربن و شیشه بوده و آزمایش در دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه چسب صورت گرفت. زمان واماندگی⁶ و کرنش اولیه در دو حالت چسب خالص و چسب تقویت‌شده اندازه‌گیری و مقایسه شدند. با توجه به نتایج حاصله، افزودن الیاف به ناحیه اتصال موجب کاهش قابل توجه کرنش اولیه شد و این در حالی است که زاویه قرارگیری الیاف اثر چندانی بر کرنش اولیه نداشت. همچنین افزودن الیاف به ناحیه اتصال اثر تضعیف‌کنندگی در دماهای بالا بر خواص مکانیکی و رفتار خزشی اتصال ساده تک لبه را جبران کرد.

تحقیقاتی نیز به منظور درک رفتار چسب‌ها تحت اثرات ترکیبی دما و سطوح تنش انجام شده است. به عنوان مثال پرتز و ویسمن⁷ [3] به انجام آزمایش خزشی بر روی نمونه حجمی چسب اف-ام 73⁸ به منظور تعیین خواص ویسکوالاستیک آن پرداختند. آزمایش‌های خزش و بازیابی خزش در سطوح تنش 10 و 30 مگاپاسکال و در سه دمای 40، 50 و 60 درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دما استحکام نهایی چسب کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دما موجب افزایش نرخ خزش و جابه‌جایی خزشی خواهد شد.

در تحقیقی دیگر کوئیزوز و همکارانش⁹ [4] به بررسی عمر خزشی اتصالات ساده تک لبه ساخته شده با چسب‌های فلزی و چسب‌های اپوکسی و پلی‌یورتان تحت سطوح تنش مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش تنش از 11.4 به 8.5 مگاپاسکال، عمر خزشی اپوکسی از 8 ساعت به 3000 ساعت افزایش پیدا می‌کند. شرایط مشابهی نیز برای پلی‌یورتان مشاهده شد به گونه‌ای که با کاهش تنش به 6.4 مگاپاسکال، عمر خزشی به حدود 700 ساعت می‌رسد. به طور میانگین، اتصالات تحت بار بیش از 60 درصد از استحکام نهایی، عمر خزشی حدود یک ماه داشتند. آن‌ها همچنین

¹ Dislocation

² Zehsaz

³ Fillet

⁴ Araldite

⁵ Khalili

⁶ Failure

⁷ Peretz and Weitsman

⁸ FM73

⁹ Queiroz

¹⁰ Costa and Barros

¹¹ Creep compliance

¹² Static failure

¹³ Allen and Shanahan

¹⁴ molecular segments

متشکل از اسیدسولفوریک غلیظ، دی کرومات سدیم و آب مقطر صورت گرفته است. بدین منظور با قرار دادن ظرف حاوی محلول اسیدی روی گرم کن برقی، دمای آن به 60 درجه سانتی گراد رسانده شده و با قرار دادن چسبندها درون محلول به مدت 30 دقیقه فرآیند اسیدشویی کامل می شود. سپس جهت اتصال بهتر چسب و چسبندها نیاز است تا سطح آلومینیمها آندایز شوند.

آندایز آلومینیم یک فرآیند الکتروشیمیایی است که منجر به تشکیل لایه ی اکسیدی متخلخل روی سطح فلز می گردد. در این تحقیق از استاندارد ASTM D 2651 [11] جهت انجام فرآیند آندایز چسبندهای آلومینیمی استفاده شده است. سپس سطح چسبندها به چسب آشفته شده و نمونه ها درون قید و بست⁶ قرار داده می شوند. ضخامت لایه چسب توسط ورق هایی⁷ با ضخامت یکسان کنترل می شود. فرآیند پخت نمونه ها با توجه به کاتالوگ چسب، به مدت 16 ساعت و تحت دمای 40 درجه سانتی گراد در کوره صورت گرفت.

2-3- آزمون کشش

جهت به دست آوردن استحکام برشی اتصال ساده تک لبه در دماهای 40 و 50 درجه سانتی گراد از دستگاه کشش چندمنظوره سنتام⁸ بهره گرفته شده است. پیش از اعمال نیرو، دمای موردنظر تنظیم شده و 15 دقیقه به نمونه فرصت داده می شود تا به شرایط دمایی پایا برسد. روند آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM D 1002 [12] انجام شده و نرخ جابه جایی وارد شده به اتصالات توسط دستگاه برابر با 0.5 میلی متر بر دقیقه است.

2-4- آزمون خزش

دستگاه خزش مورد استفاده در این تحقیق مطابق شکل 2 از نوع پنوماتیکی است. دستگاه با تنظیم شیر رگلاتور، هوای کمپرسور را به داخل سه سیلندر متصل به نمونه ها می فرستد. فشار هوا درون پیستون موجب کشش قطعه شده و میزان بار وارده توسط لودسل متصل به نمونه اندازه گیری و بر روی نشانگر نیرو نشان داده می شود. میزان جابه جایی نمونه ها به کمک ساعت های اندیکاتور متصل به میله ی واسط بین سیلندر و نمونه قرائت می شود. دقت ساعت ها برابر 0.01 میلی متر است.

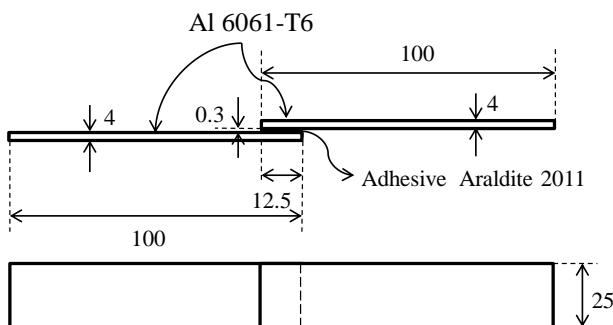


Fig. 1 Geometrical specifications of single lap joints (dimensions in mm)

شکل 1 مشخصات هندسی اتصال تک لبه (ابعاد به میلی متر)

بالا قرار دارند و با توجه به حساسیت چسب به دماهای بالا، لزوم بررسی گسترده تری بر تاثیر توامان این دو عامل بر رفتار خزشی اتصالات چسبی آلومینیمی احساس می شود. هدف از انجام این تحقیق، بررسی رفتار خزشی اتصال چسبی تک لبه ساخته شده با چسب آرالدایت 2011 تحت اثرات ترکیبی دما و تنش است که با تمرکز بر تعیین درصد تخریب استحکام کششی بر اثر افزایش دما و میزان تحمل بارپذیری اتصالات چسبی و نیز تاثیر اعمال بار بر نمونه ها با نسبت "تنش به استحکام نهایی" ثابت بر رفتار خزشی اتصالات در دو سطح دما می باشد.

در این تحقیق بررسی می شود که اعمال بار بصورت نسبت های "تنش به استحکام نهایی" ثابت معادل 0.25 و 0.35 در دو سطح دمای 40 و 50 درجه سانتی گراد، چه تاثیری بر استحکام خزشی اتصالات چسبی آلومینیم-آلومینیم خواهد داشت. به عبارتی، خزش در نسبت "تنش به استحکام نهایی" ثابت هر دما بررسی شده است و به جای در نظر گرفتن یک مقدار تنش ثابت در هر دو دمای 40 و 50 درجه سانتی گراد، ضریب "تنش به استحکام" هر دما به عنوان بار خزشی ماده لحاظ شده است. نتایج در قالب نمودارهای جابه جایی خزشی- زمان ترسیم شده است. لازم به ذکر است که سطوح دمای انتخاب شده برای انجام آزمون ها، دماهای کمتر از دمای انتقال شیشه ای است. بدین جهت که اثر ایجاد تغییرات ساختاری چسب از حالت شیشه ای به حالت لاستیکی¹ حذف شود.

2-مراحل آزمایشگاهی

2-1- مواد مورد استفاده

در این تحقیق از چسب آرالدایت 2011 استفاده شده که محدوده ی دمای کاری بین 40- تا 80+ درجه سانتی گراد دارد. رزین بر پایه اپوکسی و سخت کننده² از نوع پلی آمینی است. به منظور تعیین دمای انتقال شیشه ای چسب آرالدایت 2011، دو نمونه چسب در اندازه مشخص طبق استاندارد ASTM D 3418 [9] به پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران ارسال شد. نتایج آزمون ها نشان داد که دمای انتقال شیشه ای این چسب برابر 60.2 درجه سانتی گراد است. چسبده ی³ استفاده شده در ساخت اتصالات، آلومینیم 6061-T6 دارای تنش تسلیم 276 مگاپاسکال و استحکام نهایی 310 مگاپاسکال است. برای برش آلومینیم با ابعاد 100×25×4 میلی متر از دستگاه واترجت⁴ به دلیل بالا بودن دقت و جلوگیری از به وجود آمدن اعوجاج اعوجاج و انحنای در سطح آلومینیم استفاده شده است. در این تحقیق برای تعیین خواص خزش برشی چسب تحت بار کششی، از شرایط آزمون استاندارد ASTM D 2294-96 [10] استفاده شده است. همان طور که در شکل 1 مشاهده می شود طول نمونه آزمایش برابر 187.5 میلی متر است. در این تحقیق چسبندها دارای ابعاد 100×25 میلی متر هستند و ضخامت چسب 0.3 میلی متر در نظر گرفته شده است.

2-2- ساخت اتصالات

مهم ترین عامل در دستیابی به حداکثر میزان استحکام اتصالات چسبی، آماده سازی سطح مناسب است. در این تحقیق از فرآیند اسید شویی قطعات و سپس آندایز کردن⁵ استفاده شده است. فرآیند اسیدشویی به کمک محلولی

¹ Rubbery
² Hardener
³ Substrate
⁴ Water jet
⁵ Anodize

⁶ Fixture
⁷ Shim
⁸ SANTAM

جدول 1 نتایج آزمون کشش اتصال تک لبه

Table 1 Tensile test results of single lap adhesive joints

استحکام برشی (MPa)	دما (°C)
15.3 ± 0.4	40
11.8 ± 0.4	50

طبق شکل 3 تعداد زیادی حفره در سطوح شکست اتصالات چسبی در هر دو دمای آزمون مشاهده شد. با افزایش دما و جنبش مولکولی زنجیره‌های پلیمری، چسب رفتار نرم دارد. تصاویر SEM به کمک نرم‌افزار آنالیز تصویر Image J پردازش شده و نشان داده است که با افزایش دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد، تعداد حفره‌ها از 23 به 27 و میانگین مساحت حفره‌ها از 685 به 588 میکرو متر مربع افزایش پیدا می‌کنند. افزایش حفره‌ها موجب کاهش استحکام نهایی می‌شود. کاهش استحکام ناشی از افزایش حفره‌ها قبلاً توسط محققین [14,13] گزارش شده بود. بنابراین افزایش دما سبب کاهش استحکام می‌شود. همانطور که نتایج آزمون‌های کشش در جدول 1 نیز گویای صحت همین نتیجه است.

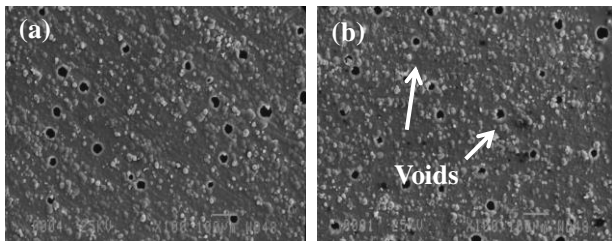


Fig. 3 Fracture surfaces of the neat adhesive at temperatures of (a) 40°C and (b) 50°C

شکل 3 سطوح شکست چسب خالص در الف) دمای 40 درجه سانتی‌گراد و ب) دمای 50 درجه سانتی‌گراد

3-2- نتایج آزمون خزش

به‌منظور درک اثر دما و سطح تنش بر رفتار خزشی، اتصالات چسبی در دو دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد و تحت نیرویی معادل با 25 و 35 درصد استحکام برشی نهایی مربوطه قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب چهار حالت ترکیبی دما و سطح تنش پدید می‌آید که به شناخت بهتر رفتار خزشی کمک خواهد کرد. برای حصول از دقت نتایج برای هر حالت، هر آزمون حداقل سه مرتبه تکرار شد و نتایج به‌صورت میانگین در جدول 2 گزارش گردیده است.

جدول 2 نتایج آزمون خزش اتصال تک لبه

Table 2 Creep test results of single lap adhesive joints

دما (°C)	تنش (٪ استحکام)	جابه‌جایی خزشی (mm)	شیب حالت پایدار (mm/min) ($\times 10^{-6}$)
40	25%	0.145	0.93
	35%	0.18	1.83
50	25%	0.175	1.39
	35%	0.2	2.5



Fig. 2 Pneumatic creep test apparatus

شکل 2 دستگاه آزمون خزش پنوماتیکی

آزمون خزش بر مبنای استاندارد ASTM D 2294 [10] صورت گرفته است. پس از قرارگیری نمونه‌ها در محفظه، دما تا مقدار موردنظر بالا برده می‌شود و به نمونه‌ها 20 دقیقه فرصت داده می‌شود تا به شرایط دمایی پایا برسد؛ همچنین زمان انجام آزمایش از لحظه‌ی ثابت شدن نیرو، 4 ساعت است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که پس از 4 ساعت نرخ کرنش روند ثابتی دارد. بنابراین آزمون‌ها پس از 4 ساعت متوقف شدند.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج آزمون کشش

استحکام نهایی برشی اتصالات چسبی ساده تک لبه حاصل از انجام آزمایش کشش در دو دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد در جدول 1 نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است با افزایش دما، استحکام برشی نهایی چسب در دمای 50 درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای 40 درجه سانتی‌گراد 22.8 درصد کاهش پیدا می‌کند. زیرا در دمای 50 درجه سانتی‌گراد، قسمت‌های بی‌نظم¹ بستر چسب قابلیت حرکت پیدا کرده و لذا استحکام نهایی چسب به شدت افت پیدا می‌کند. به‌منظور ارزیابی سطوح شکست اتصالات آزمون، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی² گرفته شد.

برای تصویربرداری از دستگاه SEM مدل JEOL JSM موجود در پژوهشکده دانشگاه صنعتی شریف استفاده شد. تصاویر SEM سطح شکست اتصال تک لبه در دو دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد در شکل 3 نشان داده شده است.

¹ Amorphous

² Scanning Electron Microscope

است. تاثیر دما بر خواص خزشی در بارگذاری برشی نیز توسط واسرمن و همکارانش [18] گزارش شده بود که نشان می‌داد دما تاثیر زیادی بر خزش چسب دارد. در اثر اعمال کشش محوری به نمونه آزمایش، زنجیره‌های مولکولی چسب نسبت به حالت اولیه کشیده شده و با جهت اعمال نیرو همراه می‌شوند. با افزایش دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد، با کاهش سفتی زنجیره‌های پلیمری و افزایش نرم‌شدگی بستر چسب، تحرک زنجیره‌های پلیمری افزایش پیدا می‌کند. این رفتار با افزایش سطح تنش اعمالی شتاب بیشتری پیدا می‌کند.

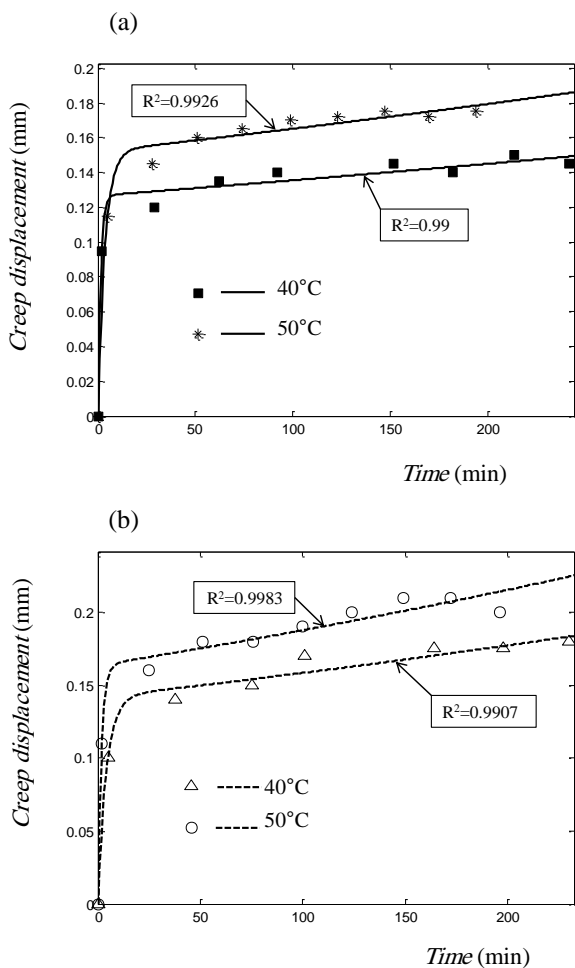


Fig. 5 Effect of increasing temperature on creep behavior of adhesive at (a) 25% of strength and (b) 35% of strength

شکل 5 اثر افزایش دما بر رفتار خزشی چسب در تنش الف) 25 درصد استحکام و ب) 35 درصد استحکام

همانگونه که در شکل 4 نشان داده شده است، با افزایش سطح تنش از 25 به 35 درصد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش در دمای 40 درجه سانتی‌گراد، 24 و 96.7 درصد افزایش پیدا می‌کنند. همچنین در دمای 50 درجه میزان افزایش جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش به ترتیب برابر 14.3 و 79.9 درصد است.

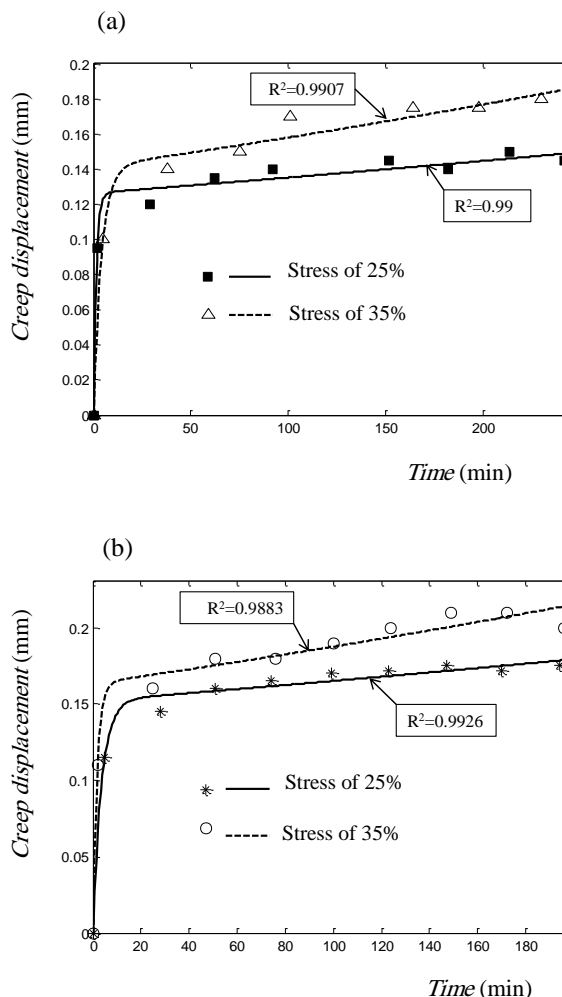


Fig. 4 Effect of stress on creep behavior of adhesive at temperatures of (a) 40°C and (b) 50°C

شکل 4 اثر تنش بر رفتار خزشی چسب در الف) 40 درجه سانتی‌گراد و ب) 50 درجه سانتی‌گراد

در شکل 5 اثر افزایش دما بر رفتار خزشی اتصال تک لبه‌ای در سطوح تنش ثابت نشان داده شده است. با افزایش سطح دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش در سطح تنش 25 درصد به ترتیب 20.6 و 49.5 درصد افزایش می‌یابد. برای سطح تنش 35 درصد این مقادیر به ترتیب 11.1 و 36.6 درصد بوده است. با مقایسه افزایش مقادیر مربوط به پارامترهای خزشی، با توجه به سطوح در نظر گرفته شده برای تنش و دما، مشاهده می‌شود که اثر افزایش دما بر شتاب‌گیری رفتار خزشی در سطح تنش ثابت به مراتب قوی‌تر از اثر افزایش سطح تنش در دمای ثابت است. دلیل اثر قوی افزایش دما بر رفتار خزشی چسب را باید در سازوکارهای مولکولی مرتبط با افزایش دما جستجو کرد. افت خواص مکانیکی چسب تحت تاثیر افزایش دما توسط محققان بسیاری [15-17] گزارش شده

$$\Delta(t) = Ae^{bt} + Ce^{dt} \quad (1)$$

که در آن Δ جابجایی خزشی، t زمان و A, C, b و d ثابت‌های خزش هستند که با استفاده از برازش منحنی‌های خزشی بدست می‌آیند.

¹ Curve Fitting

Sustained Load", The Journal of Adhesion, Vol. 90, No. 5-6, pp. 420-436, 2014.

[8] Allen, K. and Shanahan, M., "The Creep Behaviour of Structural Adhesive Joints-I", The Journal of Adhesion, Vol. 7, No. 3, pp. 161-174, 1975.

[9] "Astm-D3418, Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry", 2015.

[10] ASTM-D2294, "Standard Test Method for Creep Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal-to-Metal)", 1996 .

[11] ASTM-D2651, "Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding", Vol. 15, pp. 162-167, 1999.

[12] ASTM-D1002, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), 2010 .

[13] de Almeida, S. F. M. and Neto, Z. d. S. N., "Effect of Void Content on the Strength of Composite Laminates" Composite structures, Vol. 28, No. 2, pp. 139-148, 1994.

[14] Bowles, K. J. and Frimpong, S., "Void Effects on the Interlaminar Shear Strength of Unidirectional Graphite-Fiber-Reinforced Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 10, pp. 1487-1509, 1992.

[15] Adams, R. Coppendale, J. Mallick, V. and Al-Hamdan, H., "The Effect of Temperature on the Strength of Adhesive Joints", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 12, No. 3, pp. 185-190, 1992.

[16] Banea, M. D. da Silva, L. F. and Campilho, R., "Effect of Temperature on the Shear Strength of Aluminium Single Lap Bonded Joints for High Temperature Applications" Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 28, No. 14-15, pp. 1367-1381, 2014.

[17] Adams, R. and Mallick, V., "The Effect of Temperature on the Strength of Adhesively-Bonded Composite-Aluminium Joints" The Journal of Adhesion, Vol. 43, No. 1-2, pp. 17-33, 1993.

[18] Wasserman, S. Dodiuk, H. and Kenig, S., "Shear Creep Behaviour of Elastomeric Adhesives" International journal of adhesion and adhesives, Vol. 12, No. 4, pp. 257-261, 1992.

جدول 3 مقادیر پارامترهای معادله برازش شده به داده‌های خزشی را نشان می‌دهد.

جدول 3 مقادیر پارامترهای معادله برازش شده به نتایج آزمایشگاهی خزش

Table 3 The equation parameter values fitted to the creep experimental data

50		40		دما (°C)
35%	25%	35%	25%	تنش (% استحکام)
0.1635	0.1521	0.1416	0.1267	A
0.001375	0.0008261	0.001121	0.0006767	b
-0.1636	-0.152	-0.1415	-0.1266	C
-0.5556	-0.2775	-0.2404	-0.6882	d
0.988	0.993	0.991	0.99	R ²

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر دما و سطح تنش بر رفتار خزشی اتصالات چسبی تک لبه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا آزمایش کشش اتصال ساده تک لبه در دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد انجام شده است. سپس آزمایش خزش کششی روی اتصالات در دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد، در دو سطح تنش 25 و 35 درصد استحکام نهایی برشی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش سطح تنش، منجر به تشدید رفتار خزشی ماده در دمای ثابت شد. با افزایش سطح تنش از 25 به 35 درصد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش در دمای 40 درجه به ترتیب 24 و 96.7 درصد افزایش پیدا کردند. همچنین در دمای 50 درجه این میزان افزایش برابر 14.3 و 79.9 درصد بود. وضعیت مشابهی با افزایش دما پدید آمد. با افزایش دما از 40 به 50 درجه سانتی‌گراد، جابجایی خزشی و شیب حالت پایدار خزش در سطح تنش 25 درصد به ترتیب 20.6 و 49.5 درصد و در سطح تنش 35 درصد 11.1 و 36.6 درصد افزایش پیدا کرد. بنابراین مقادیر جابجایی خزشی اتصالات در دو دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد در سطح تنش 25% تفاوت زیادی داشتند. این تفاوت در سطح تنش 35% نیز مشاهده شد.

5- مراجع

[1] Zehsaz, M. Vakili-Tahami, F. and Saeimi-Sadigh, M. A., "Parametric Study of the Creep Failure of Double Lap Adhesively Bonded Joints" Materials & Design, Vol. 64, pp. 520-526, 2014.

[2] Khalili, S. Jafarkarimi, M. and Abdollahi, M., "Creep Analysis of Fibre Reinforced Adhesives in Single Lap Joints—Experimental Study", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 29, No. 6, pp. 656-661, 2009.

[3] Peretz, D. and Weitsman, Y., "The Nonlinear Thermoviscoelastic Characterizations of Fm-73 Adhesives" Journal of Rheology (1978-present), Vol. 27, No. 2, pp. 97-114, 1983.

[4] Queiroz, R. A. Sampaio, E. M. Cortines, V. J. and Rohem, N. R., "Study on the Creep Behavior of Bonded Metallic Joints" Applied Adhesion Science, Vol. 2, No. 1, pp. 1-12, 2014.

[5] Costa, I. and Barros, J. A., "Creep of Structural Adhesives: An Overview", in Proceeding of .

[6] Han, X. Crocombe, A. Anwar, S. and Hu, P., "The Strength Prediction of Adhesive Single Lap Joints Exposed to Long Term Loading in a Hostile Environment" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 55, pp. 1-11, 2014.

[7] Han, X. Crocombe, A. Anwar, S. Hu, P. and Li, W., "The Effect of a Hot-Wet Environment on Adhesively Bonded Joints under a