جلد 5، شماره 3، پاییز 97، ص‌ص 353- 358

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

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

رویاالسادات آشفته[1]، حسن پورنگ[2]، مرصاد مباشری[2]، هادی خرمی‌شاد[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

دریافت: 96/4/21

پذیرش: 96/9/28

کلیدواژگان:

چسب

خزش

استحکام برشی

اتصال چسبی تک لبه

چکیده

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 ساخته‌شده 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 به‌ترتیب 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، به‌ترتیب 20.6 و 49.5 درصد و در نسبت تنش- به- استحکام نهایی معادل 0.35، به‌ترتیب 11.1 و 36.6 درصد افزایش پیدا می‌کنند.

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

Adhesive

Creep

Shear Strength

Single Lap Joint

Abstract

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%.

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 به‌حساب 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 به‌هم خوردن توازن ابعادی[1] 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

Please cite this article using:

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.

Archive of SID

www.SID.ir

حرکت اتم‌ها، مولکول‌ها و نابجایی‌ها[1] 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 گرماسخت از سوی محققان صورت گرفته است. زهساز[2] و همکارانش [1] در سال 2014، اثر ضخامت و پخزنی[3] چسب را بر تغییر شکل و عمر خزشی اتصال چسبی دو لبه مورد آزمایش قرار دادند. چسب مورد استفاده در این تحقیق، آرالدایت[4] 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 خلیلی[5] و همکارانش [2] اثر تقویت ناحیه چسب بر خواص خزشی اتصال ساده تک لبه متشکل از چسبنده‌های آلومینیمی چسبیده شده با چسب آرالدایت 2015 را به‌صورت 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 واماندگی[6] 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 ویسمن[7] [3] به انجام آزمایش خزشی بر روی نمونه حجمی چسب اف-ام 73[8] به‌منظور 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 کوئیروز و همکارانش[9] [4] به بررسی عمر خزشی اتصالات ساده تک لبه ساخته شده با چسبنده‌های 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 به‌گونه‌ای که با کاهش تنش به 6.4 مگاپاسکال، عمر خزشی به حدود 700 ساعت می‌رسد. به‌طور میانگین، اتصالات تحت بار بیش از 60 درصد از استحکام نهایی، عمر خزشی حدود یک ماه داشتند. آن‌ها همچنین بیان داشتند که برای تخمین دقیق‌تر 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 باروس[10] [5] به انجام آزمایش‌های خزشی استاندارد روی یک نمونه چسب اپوکسی در سه سطح تنش مختلف به‌منظور 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، به‌منظور اندازه‌گیری وابستگی نرمی خزشی[11] 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 قابل‌توجهی در تنزل خواص چسب دارد به‌گونه‌ای که مدول یانگ و استحکام شکست به‌ترتیب 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 پایه‌ی 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 به‌صورت غوطه‌ور در آب، در دمای 50 درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶ ماه تحت دو سطح تنش 12 و 17.5 درصد استحکام شکست استاتیکی[12] 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 لایه-ها با یک نرخ ثابت همراه بود. بررسی سازوکارهای مولکولی موثر در بهبود و 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.

درتحقیقی، آلن و شاناهان[13] [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 مولکولی[14] قرار خواهد گرفت.

عمده تحقیقات صورت‌گرفته، 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 به‌صورت همزمان در معرض تنش و دماهای

[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

Archive of SID
www.SID.ir

بالا قرار دارند و با توجه به حساسیت چسب به دماهای بالا، لزوم بررسی گسترده‌تری بر تاثیر توامان این دو عامل بر رفتار خزشی اتصالات چسبی آلومینیمی احساس می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، بررسی رفتار خزشی اتصال چسبی تک لبه ساخته‌شده 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 اِعمال بار بر نمونه‌ها با نسبت "تنش به استحکام نهایی" ثابت بر رفتار خزشی اتصالات در دو سطح دما می‌باشد.

در این تحقیق بررسی می‌شود که اعمال بار بصورت نسبت‌های "تنش به استحکام نهایی" ثابت معادل 0.25 و 0.35 در دو سطح دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد، چه تاثیری بر استحکام خزشی اتصالات چسبی آلومینیوم-آلومینیوم خواهد داشت. به عبارتی، خزش در نسبت "تنش به استحکام نهایی" ثابت هر دما بررسی شده است و به جای درنظر گرفتن یک مقدار تنش ثابت در هر دو دمای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد، ضریب "تنش به استحکامِ" هر دما به عنوان بار خزشی ماده لحاظ شده است. نتایج در قالب نمودارهای جابه‌جایی خزشی- زمان ترسیم شده است. لازم به ذکر است که سطوح دمای انتخاب شده برای انجام آزمون‌ها، دماهای کمتر از دمای انتقال شیشه‌ای است. بدین جهت که اثر ایجاد تغییرات ساختاری چسب از حالت شیشه‌ای به حالت لاستیکی[1] حذف شود.

2-مراحل آزمایشگاهی

2-1-مواد مورد استفاده

در این تحقیق از چسب آرالدایت 2011 استفاده شده که محدوده‌ی دمای کاری بین 40- تا 80+ درجه سانتی‌گراد دارد. رزین بر پایه اپوکسی و سخت‌کننده[2] از نوع پلی‌آمینی است. به‌منظور تعیین دمای انتقال شیشه‌ای چسب آرالدایت 2011، دو نمونه چسب در اندازه مشخص طبق استاندارد ASTM D 3418[9] به پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران ارسال شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد که دمای انتقال شیشه‌ای این چسب برابر 60.2 درجه سانتی‌گراد است. چسبنده ی[3] استفاده شده در ساخت اتصالات، آلومینیم 6061-T6 دارای تنش تسلیم 276 مگاپاسکال و استحکام نهایی 310 مگاپاسکال است. برای برش آلومینیم با ابعاد 4×25×100 میلی‌متر از دستگاه واترجت[4] به دلیل بالا بودن دقت و جلوگیری از به‌وجود آمدن اعوجاج اعوجاج و انحنا 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. همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود طول نمونه آزمایش برابر 187.5 میلی‌متر است. در این تحقیق چسبنده‌ها دارای ابعاد 25×100 میلی‌متر هستند و ضخامت چسب 0.3 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

2-2- ساخت اتصالات

مهم‌ترین عامل در دستیابی به حداکثر میزان استحکام اتصالات چسبی، آماده‌سازی سطح مناسب است. در این تحقیق از فرآیند اسید شویی قطعات و سپس آندایزکردن[5] استفاده شده است. فرآیند اسیدشویی به کمک محلولی متشکل از اسیدسولفوریک غلیظ، دی‌کرومات سدیم و آب مقطر صورت گرفته است. بدین منظور با قرار دادن ظرف حاوی محلول اسیدی روی گرم‌کن برقی، دمای آن به 60 درجه سانتی‌گراد رسانده شده و با قرار دادن چسبنده‌ها درون محلول به مدت 30 دقیقه فرآیند اسیدشویی کامل می‌شود. سپس جهت اتصال بهتر چسب و چسبنده‌ها نیاز است تا سطح آلومینیم‌ها آندایز شوند.

آندایز آلومینیم یک فرآیند الکتروشیمیایی است که منجر به تشکیل لایه‌ی اکسیدی متخلخل روی سطح فلز می‌گردد. در این تحقیق از استاندارد ASTM D 2651 [11] جهت انجام فرآیند آندایز چسبنده‌های آلومینیمی استفاده شده است. سپس سطح چسبنده‌ها به چسب آغشته شده و نمونه‌ها درون قید و بست[6] قرار داده می‌شوند. ضخامت لایه چسب توسط ورق‌هایی[7] با با ضخامت یکسان کنترل می‌شود. فرآیند پخت نمونه‌ها با توجه به کاتالوگ چسب، به مدت 16 ساعت و تحت دمای 40 درجه سانتی‌گراد در کوره صورت گرفت.

2-3- آزمون کشش

جهت به‌دست آوردن استحکام برشی اتصال ساده تک لبه در دماهای 40 و 50 درجه سانتی‌گراد از دستگاه کشش چندمنظوره سنتام[8] بهره گرفته شده است. پیش از اعمال نیرو، دمای موردنظر تنظیم شده و 15 دقیقه به نمونه فرصت داده می‌شود تا به شرایط دمایی پایا برسد. روند آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM D 1002 [12] انجام شده و نرخ جابه‌جایی وارد شده به اتصالات توسط دستگاه برابر با0.5 میلی‌متر 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 نمونه‌ها می‌فرستد. فشار هوا درون پیستون موجب کشش قطعه شده و میزان بار وارده توسط لودسل متصل به نمونه اندازه‌گیری و بر روی نشانگر نیرو نشان داده می‌شود. میزان جابه‌جایی نمونه‌ها به کمک ساعت‌های اندیکاتور متصل به میله‌ی واسط بین سیلندر و نمونه قرائت می‌شود. دقت ساعت‌ها برابر 0.01 میلی‌متر است.

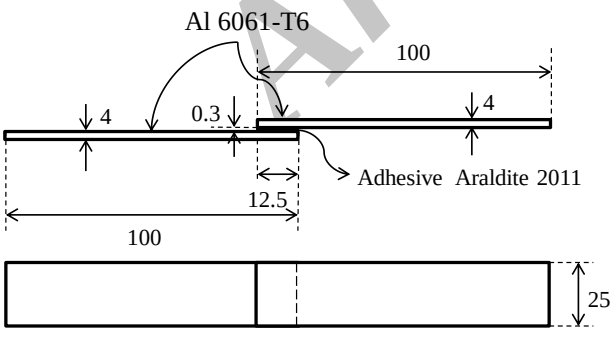

Fig. 1 Geometrical specifications of single lap joints (dimensions in mm)

شکل 1 مشخصات هندسی اتصال تک لبه (ابعاد به میلی‌متر)

[1] Rubbery
[2] Hardener
[3] Substrate
[4] Water jet
[5] Anodize
[6] Fixture
[7] Shim
[8] SANTAM

Archive of SID
www.SID.ir

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 بی‌نظم[1] 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 روبشی[2] 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.

جدول 1 نتایج آزمون کشش اتصال تک لبه

Table 1 Tensile test results of single lap adhesive joints

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

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.

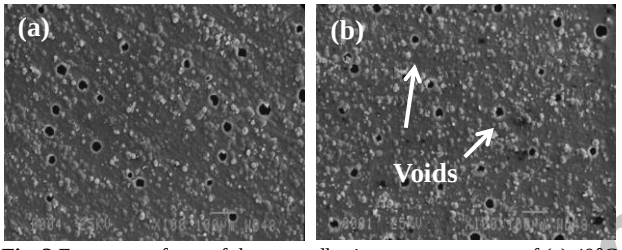

Fig. 3 Fracture surfaces of the neat adhesive at temperatures of (a) 40°C and (b) 50°C

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) (×۱۰$^{-۴}$)
40	25%	0.145	0.93
	35%	0.18	1.83
50	25%	0.175	1.39
	35%	0.2	2.5

[1] Amorphous
[2] Scanning Electron Microscope

Archive of SID
www.SID.ir

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 به‌ترتیب برابر 14.3 و 79.9 درصد است.

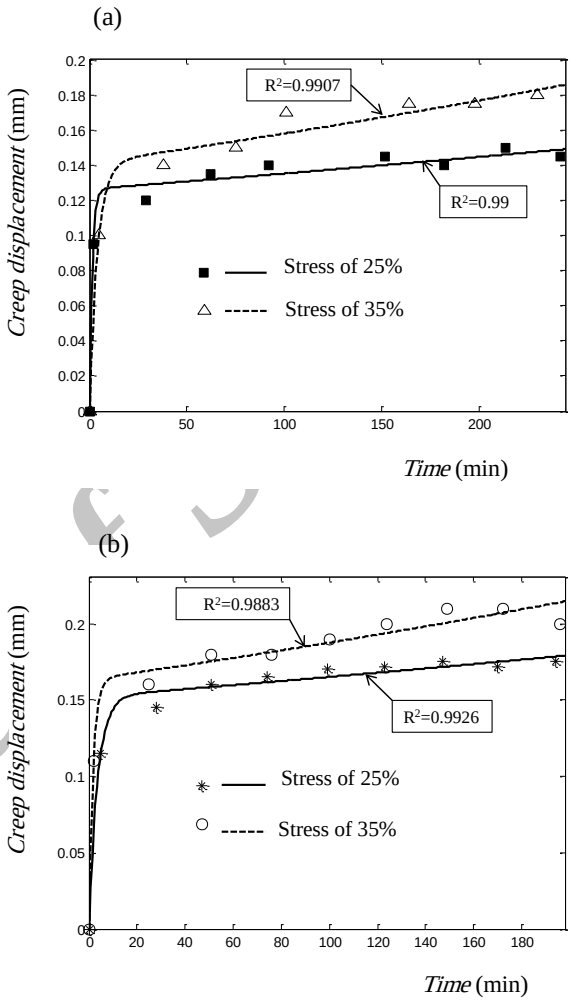

Fig. 4 Effect of stress on creep behavior of adhesive at temperatures of (a) 40°C and (b) 50° C

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 به‌ترتیب 20.6 و 49.5 درصد افزایش می‌یابد. برای سطح تنش 35 درصد این مقادیر به‌ترتیب 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 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 هم‌راستا 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.

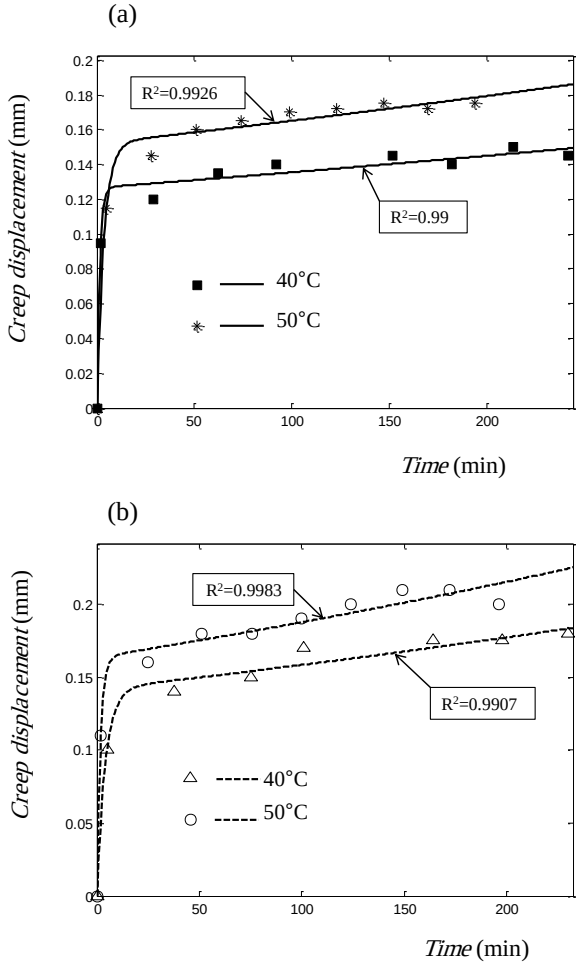

Fig. 5 Effect of increasing temperature on creep behavior of adhesive at (a) 25% of strength and (b) 35% of strength

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

به کمک جعبه ابزار برازش منحنی[1] نرم‌افزار متلب، مناسب‌ترین معادله برای برازش داده‌های خزشی شکل‌های 4 و 5 بدست آمد. از میان معادلات ریاضی، مدل نمائی رابطه 1 استخراج شد.

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

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

www.SID.ir

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

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

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 به‌ترتیب 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 به‌ترتیب 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 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.

Archive of SID

www.SID.ir