



بررسی اثر آماده‌سازی سطحی و روش پخت بر ظرفیت تحمل بار و عمر خستگی اتصالات لبه‌ای چسبی

پدرام زمانی¹، عبدالرحمن جامی‌الاحمدی^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، کد پستی 9177948974، jaami-a@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 آذر 1398
داوری اولیه 14 دی
پذیرش: 30 دی 1398

کلیدواژگان:

اتصال لبه‌ای چسبی
آزمون خمش چهار نقطه‌ای
روش آماده‌سازی سطحی
روش پخت
عمر خستگی اتصال

چکیده

اتصالات چسبی با امکان اتصال مواد غیر هم‌جنس، در صنایع خودروسازی، هوایی و توربین بادی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. شناسایی عوامل مؤثر بر بهبود ظرفیت تحمل بار و عمر این اتصالات، کیفیت چسبندگی سطوح و انتخاب روش مناسب، حائز اهمیت است. در این مقاله، اثر دو عامل آماده‌سازی سطحی و سه روش پخت بر بارگذاری شبه‌استاتیک و عمر خستگی اتصالات لبه‌ای چسبی فلزی، فلزی-کامپوزیتی و کامپوزیتی تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای بررسی شده است. در آماده‌سازی سطحی، روش‌های مکانیکی سنباده‌زنی و شیمیایی زبری‌سازی با محلول اسید سولفوریک-دی‌کرومات سدیم انتخاب شده‌اند، و روش‌های پخت بدون پسا-پخت، پسا-پخت با سرد کردن تدریجی، و پسا-پخت با سرد کردن سریع بررسی شدند. نتایج نشان دادند که در شرایط آماده‌سازی یکسان، نیروی بیشینه شبه‌استاتیک در اتصال فلز-کامپوزیتی و کمینه آن در اتصال فلزی است. در روش آماده‌سازی مکانیکی، میزان نیروی شبه‌استاتیک و عمر خستگی نسبت به روش شیمیایی افزایش یافته و هم‌چنین در مورد اثر آماده‌سازی سطحی در شرایط پخت مختلف بحث شده است. به‌علاوه، نیروی بیشینه شبه‌استاتیک در اتصال فلز-کامپوزیتی وابستگی کم‌تری به سرد کردن پس از پسا-پخت نسبت به اتصال فلزی داشته و در اتصال کامپوزیتی کاملاً به روش پخت وابسته است. سرد کردن تدریجی پس از پسا-پخت عمر خستگی اتصالات فلز-کامپوزیتی را بهبود می‌بخشد و نیروی بیشینه شبه‌استاتیک و عمر خستگی در اتصال فلز-کامپوزیتی نسبت به سایر اتصالات بیشتر هستند. با بررسی سطوح واماندگی مشاهده شد که با اعمال پسا-پخت برای اتصال فلز-کامپوزیتی، وضعیت واماندگی به نوع واماندگی در چسب تبدیل شده و این بهبود می‌تواند در ترمیم اتصال مفید باشد.

The effects of surface preparation and curing procedures on load carrying capacity and fatigue life of adhesively bonded lap joints

Pedram Zamani, Abdolrahman Jaamialahmadi*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

* P.O.B. 9177948974 Mashhad, Iran, jaami-a@um.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 11 Desember 2019
First Decision: 4 January 2020
Accepted 20 January 2020

Keywords:

Adhesive lap joint
Four-point bending test
Surface preparation
Curing procedure
Fatigue life

Abstract

Bonded joints are widely used in industries such as automotive, wind turbine blade, and aircraft because of their ability to adhere dissimilar materials. It is significant to study manufacturing factors such as surface preparation and curing procedures in order to improve load carrying capacity and durability of the joint. In this paper, the influences of these procedures are investigated on the strength of metal-to-metal, metal-to-composite, and composite-to-composite bonded lap joints subjected to quasi-static and fatigue four-point bending tests. Sandpapering and acid-etching are selected as mechanical and chemical surface preparation methods, and three curing procedures of no post-cure, post-curing with gradual, and sudden cooling are applied. Results showed that, for similar conditions, metal-to-composite and metallic joints achieved the highest and lowest values of maximum quasi-static loads, respectively. Besides, for all joints types, mechanical surface preparation method achieved higher maximum quasi-static load and fatigue life in compare to chemical one. Maximum quasi-static load in the metal-to-composite joint showed less dependency to gradual cooling than with metallic one, and in the composite joint depends strongly to curing procedure. It is also revealed that fatigue life of the metal-to-composite joints improved for gradual cooling after post-curing. Finally, it is concluded that the metal-to-composite joints have superior quasi-static and fatigue behavior in compare with others, and the mechanical surface treatment and second curing procedure are suitable. Microscopic observations of failure surfaces showed that the metal-to-composite joints led to the cohesive failure mode which is appropriate for future repairing purposes of a bonded joint.

Please cite this article using:

P. Zamani, A. Jaamialahmadi, The effects of surface preparation and curing procedures on load carrying capacity and fatigue life of adhesively bonded lap joints, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 6, pp. 18- 33, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، اتصالات چسبی به دلیل ایجاد میدان تنش یکنواخت در ناحیه‌ی اتصال و امکان اتصال قطعات غیر هم‌جنس مورد توجه صنایعی از قبیل خودروسازی، هوایی، توربین بادی و دندان‌پزشکی می‌باشند [1، 2]. اتصال لبه‌ای یکی از پیکر بند‌های رایج اتصال چسبی است. بروز تنش‌های کندی در لبه‌های آزاد ناحیه‌ی هم‌پوشانی اتصال، به‌عنوان عامل اصلی بروز ترک و خرابی سازه محسوب می‌شود [3]. این تنش‌های کندی می‌توانند به دو دلیل ایجاد شوند: 1) ایجاد خمش ثانویه ناشی از ناهم‌راستایی اعمال بار در بارگذاری برشی، 2) بروز گشتاور خمشی ناشی از اعمال نیروی عرضی عمودی بر سطح ورق‌ها؛ بنابراین بررسی استحکام این اتصالات تحت بارگذاری خمش چهار نقطه‌ای حائز اهمیت است. هم‌چنین بهبود عملکرد اتصالات چسبی تحت این نوع از بارگذاری نیز اهمیت کاربردی قابل توجهی دارد. برای تقویت استحکام اتصال چسبی از روش‌های مختلفی نظیر اصلاح پیکر بندی و هندسی اتصال، تقویت چسبندگی و خواص چسب با ذرات افزودنی و اصلاح روش‌های آماده‌سازی اتصال استفاده می‌شود [4-7]. تحقیقات تجربی و عددی متعددی درباره اثر عوامل مختلف هم‌چون جنس ورق‌های اتصال، ضخامت آن‌ها، پهنای اتصال، طول هم-پوشانی و انواع عیوب مصنوعی بر استحکام استاتیکی اتصالات چسبی در بارگذاری برشی انجام شدند [8-12]. لذا به‌منظور بهبود دانش و دامنه کاربرد این اتصالات در بارگذاری استاتیکی و خستگی خمش چهار نقطه‌ای، مطالعه در زمینه اثر عوامل مختلف روش‌های آماده‌سازی اتصال، مهم است.

در بین روش‌های مختلف تقویت استحکام اتصال چسبی، یکی از کاراترین و دست‌یافتنی‌ترین روش‌ها برای تقویت اتصال، توجه به روش آماده‌سازی اتصال چسبی و عوامل مؤثر بر آن است. کیفیت سطوحی که به هم متصل می‌شوند و شرایط پخت اتصال چسبی دو مورد از اصلی‌ترین عوامل آماده‌سازی اتصال محسوب می‌شوند. کیفیت آماده‌سازی سطح با پاک کردن آن از آلودگی‌هایی نظیر روغن باعث بهبود چسبندگی و مقاومت مکانیکی اتصال می‌شود. شرایط پخت نیز تأثیر بسزایی بر کامل شدن پیوندهای شیمیایی چسب و چسبندگی بین چسب و ورق‌ها دارد. علاوه‌براین، دستیابی به روش صحیح پخت، تنش‌های پسماند مضر در اتصال را کاهش می‌دهد. سرچرچی اوغلو و همکارانش [13] اثر زبری سطح را بر استحکام اتصالات چسبی قطعات استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری استاتیکی و دینامیکی بررسی و برای سطوح با زبری یکسان نتایج مشابهی

مشاهده کردند. پیرا و همکاران [14] تأثیر روش‌های آماده‌سازی سطحی زبرسازی¹ به کمک اسید سولفوریک-سدیم دی‌کرومات، سنباده‌زنی، استون‌شویی، زبری‌سازی سوزاننده² و زبری‌سازی تاگر³ را روی استحکام برشی مطالعه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که زبری سطح سبب افزایش استحکام برشی شده و روش زبری‌سازی به کمک اسید سولفوریک-سدیم دی‌کرومات و سنباده‌زنی نسبت به روش‌های دیگر به استحکام‌های برشی بالاتری منجر می‌شود. اسپاگیاری و دراگونی [15] اثر سنباده‌زنی⁴، شن‌پاشی⁵ و کنگره‌دار کردن⁶ سطح روی استحکام مکانیکی اتصال چسبی را به‌طور تجربی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که سنباده‌زنی و شن‌پاشی به نتایج بهتری منجر شده و حداکثر بار در روش سنباده‌زنی دستی بیشتر بوده است. علاوه‌براین، با وجود اینکه پراکندگی زیادی در نتایج روش سنباده‌زنی دستی مشاهده شد، نتایج روش شن‌پاشی در تکرار نتایج و پایداری آن‌ها مطلوب بوده است. بوتار و همکاران [16] اثر ضخامت لایه چسب و آماده‌سازی سطحی را بر استحکام برشی اتصالات لبه‌ای چسبی آلومینیمی با چسب تک‌جزئی پلی‌اورتان به‌روش تجربی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که کاهش زبری سطح منجر به افزایش استحکام برشی شده و افزایش ضخامت لایه‌ی چسب موجب کاهش استحکام برشی می‌گردد. جنتی و همکاران [17] اثر آماده‌سازی سطحی را روی نتایج آزمون‌های کندی⁷، برشی لبه‌ای⁸، و خمش سه نقطه‌ای مطالعه کردند. آزمون‌های کندی، اتصال لبه‌ای، و خمش سه نقطه‌ای به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D4541، NF EN 2243-1، و ISO 1467 انجام شدند. ضخامت ورق آلومینیم در آزمون کندی 1/6 میلی‌متر، در آزمون برش لبه‌ای 1 میلی‌متر و در آزمون خمش سه نقطه‌ای 1 میلی‌متر است. نتیجه پژوهش آن‌ها نشان داد که بار در لحظه شکست در تمامی آزمون‌ها برای آماده‌سازی سطحی به روش سنباده‌زنی بیشتر از زبرسازی با اسید هیدروکلریک است. در پژوهشی دیگر، بوتار و همکاران [18] اثرات زبری سطح ورق از جنس آلیاژ آلومینیم و ضخامت چسب را روی عمر خستگی اتصال لبه‌ای چسبی مطالعه کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن چهار زبری سطح و ضخامت مختلف نشان دادند که عمر اتصال به‌شدت تحت تأثیر زبری سطحی و ضخامت

1 Etching

2 Caustic etch

3 Tucker's etch

4 Sandpapering

5 Sandblasting

6 Knurling

7 Pull-off

8 Lap shear

همچنین اگرچه تحقیقات متعددی در بارگذاری خستگی در وضعیت کشش-کشش یا کشش-فشار بر روی اتصالات لبه‌ای چسبی انجام شده است [28-31]، فقدان پژوهش درباره‌ی بررسی بارگذاری خستگی در وضعیت خمش چهار نقطه‌ای روی این اتصالات احساس می‌شود. در این زمینه، زمانی و همکاران [32] رفتار خستگی اتصال لبه‌ای فلز به کامپوزیت چسبی تحت بارگذاری چرخه‌ای خمش چهار نقطه‌ای را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از اندازه‌گیری کرنش، تأثیر حداکثر بارها و نسبت بارهای مختلف خستگی را بر عمر شروع ترک خستگی مطالعه کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که عمر شروع ترک خستگی برای بارهای حداکثر خستگی 30 تا 60 درصد از بار واماندگی استاتیکی قابل توجه بوده، و برای بارهای حداکثر خستگی بیش از 60% از بار واماندگی استاتیکی قابل صرف نظر است. علاوه بر این نشان دادند که عمر شروع ترک خستگی برای نسبت بارهای کاملاً معکوس شونده قابل چشم‌پوشی است. اثر اعمال تغییر در الگوی هندسه سطح همپوشانی اتصال لبه‌ای چسبی در پژوهش‌های تجربی و عددی به‌واسطه ایجاد هندسه زیگزاگ و سینوسی بر قابلیت حمل بار و عمر خستگی اتصال لبه‌ای چسبی توسط آیت‌اللهی و همکاران [33] و رضوی و همکاران [34] انجام شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که سطوح زیگزاگ و سینوسی به‌طور قابل توجهی باعث افزایش عمر خستگی اتصال چسبی می‌شوند. در زمینه بررسی اثر شرایط آماده‌سازی بر رفتار مکانیکی اتصال لبه‌ای چسبی روی وضعیت بارگذاری کششی مطالعات مختلفی در مقالات پیشین انجام شده است. با توجه به اهمیت بررسی اثر لنگر خمشی ثابت در ناحیه همپوشانی اتصال به‌عنوان عامل اصلی در ایجاد تنش‌های کندی، آزمون خمش چهار نقطه‌ای در شرایط آماده‌سازی سطحی مختلف، مورد توجه محققان این حیطه نبوده است. همچنین با توجه به فقدان تحقیقات در زمینه‌ی بارگذاری خستگی خمش چهار نقطه‌ای، یک فیکسچر متناسب با نمونه‌های لبه‌ای چسبی برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای طراحی و ساخته شده است؛ بنابراین، مقاله حاضر از حیث بارگذاری خمش چهار نقطه‌ای، اعمال بار چرخه‌ای، مطالعه اثر روش آماده‌سازی سطحی و سرد کردن در پسا-پخت چسب برای اتصالات فلزی، فلز-کامپوزیتی و کامپوزیتی از پژوهش‌های پیش از خود متمایز است. بدین منظور، اثر دو روش آماده‌سازی سطحی مکانیکی و شیمیایی و سه روش پخت برای اتصال چسبی روی ظرفیت تحمل بار و خستگی در بارگذاری خمش چهار نقطه‌ای برای اتصالات لبه‌ای چسبی آلومینیم-آلومینیم، آلومینیم-کامپوزیت، و کامپوزیت-

چسب است و بالاترین عمر برای زبری سطح 6 میکرومتر و ضخامت لایه چسب 1 میلی‌متر به‌دست آمد. کریا و همکاران [19]، روش آماده‌سازی سطحی مناسب برای اتصال چسبی آلومینیم-آلومینیم برای دو نوع چسب AF 163 و EA 9658 AERO را به‌صورت تجربی یافتند. آن‌ها چهار روش آماده‌سازی شیمیایی افزایش ضخامت لایه اکسید سطحی¹ با اسید فسفریک، اسید کرومیک، اسید سولفوریک، و اسید بوریک-سولفوریک را مطالعه کردند. در ادامه مشاهده کردند که نتایج استفاده از چسب AF 163-2 به‌همراه روش آماده‌سازی سطحی افزایش ضخامت لایه اکسید سطحی به‌کمک اسید سولفوریک 8% بهتر از حالت‌های دیگر است. صفری و فراهانی [20، 21] اثر زبری سطح حاصل از سنباده‌زنی، شن‌پاشی و ساچمه‌زنی² روی استحکام برشی اتصال لبه‌ای چسبی از جنس آلومینیم 2024 را طی دو پژوهش انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با افزایش زبری سطح در سنباده‌زنی، استحکام برشی نهایی ابتدا افزایش و سپس به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. علاوه بر این، آن‌ها دریافتند که افزایش زبری سطح در نمونه‌های شن‌پاشی و ساچمه‌زنی شده به‌طور پیوسته تنش برشی نهایی را افزایش داده است. مورفینی و همکاران³ [22] اثر دو زمان پخت چسب در اتوکلاو و دو نوع زبری سطحی را بر عملکرد اتصال لبه‌ای چسبی تحت بارگذاری استاتیکی و خستگی آزمایش کردند. ایشان همچنین میانگین حداکثر بار استاتیکی را برای هر یک از حالت‌های اتصال به‌دست آورده و میانگین بار چرخه‌ای و دامنه بار چرخه‌ای هر حالت را به‌صورت درصدی از میانگین حداکثر بار استاتیکی همان حالت در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش زبری سطح برای استحکام استاتیکی مفید بوده ولی اثر تضعیف‌کننده بر روی عمر خستگی دارد. علاوه بر این، افزایش زمان پخت در اتوکلاو برای هر دو استحکام استاتیکی و خستگی تأثیر مثبت دارد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، بررسی اتصالات لبه‌ای چسبی در بارگذاری خمش چهار نقطه‌ای برای بررسی اثر تنش کندی و لنگر خمشی ثابت بر ناحیه اتصال حائز اهمیت است. در پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر، اثرات طول ناحیه همپوشانی، تنش کندی، و فیلت در لبه آزاد ناحیه همپوشانی بر استحکام واماندگی اتصالات لبه‌ای چسبی تحت بار خمش چهار نقطه‌ای مطالعه شده‌اند [23-25]. بررسی رفتار سازه‌های دارای اتصالات لبه‌ای در بارهای چرخه‌ای و رفتار سازه در برابر واماندگی از نوع خستگی بسیار مهم است [26 و 27].

¹ Anodizing² Shot blasting³ Morfini et al.

مجزا و به‌خصوصی برای ابعاد نمونه‌های اتصال لبه‌ای چسبی در آزمون خمش چهار نقطه‌ای وجود ندارد. از طرفی، ابعاد اتصال لبه‌ای استاندارد مبتنی بر استاندارد مربوط به آزمون برشی لبه‌ای ASTM D1002 [36] می‌باشد. از آنجایی که این استاندارد مربوط به نمونه‌های فلزی است، در این پژوهش از ابعاد ذکر شده در استاندارد ASTM D5868 [37] ایده گرفته شده است که مربوط به آزمون استاندارد برشی لبه‌ای برای نمونه‌های از جنس کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف است.

کامپوزیت در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، روش آماده‌سازی مناسب سطحی و شرایط مناسب برای پخت به‌منظور دستیابی به ظرفیت تحمل بار و عمر خستگی بیشتر، پیشنهاد شده و اثر شرایط پخت بر وضعیت و اماندگی در این اتصالات بررسی شده است. علاوه بر این، وضعیت و اماندگی در سطوح شکست اتصالات مختلف در این شرایط بررسی شدند و در مورد انواع وضعیت و اماندگی سطح شکست در شرایط مختلف بحث شد.

2- جزئیات روش تجربی

2-1- مواد

نمونه‌های اتصال لبه‌ای چسبی از قطعات فلزی و کامپوزیتی با پهنای ثابت 60 میلی‌متر به یکدیگر متصل شده‌اند. قطعات فلزی از آلیاژ آلومینیم 2024-T3 با ضخامت 2 میلی‌متر و قطعات کامپوزیتی از نوع لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف شیشه و دارای ضخامت 2/4 میلی‌متر هستند. یکی از روش‌های مرسوم در ساخت اجزای کامپوزیتی در سازه‌های بزرگ، استفاده از روش تزریق رزین به کمک خلأ است. به‌طور مثال، از این روش در ساخت پرده‌های توربین بادی در پژوهشکده‌ی هوا-خورشید واقع در دانشگاه فردوسی مشهد استفاده می‌شود [35]. روش آماده‌سازی ورق کامپوزیتی به روش تزریق رزین به کمک خلأ در شکل 1 نشان داده شده است. ورق‌های کامپوزیتی از 8 لایه‌ی تک جهت از الیاف شیشه با تراکم 280 gr/cm^2 (ساخت شرکت متیکس، ترکیه) و رزین اپوکسی اپولام 2040 (ساخت شرکت آکسون، فرانسه) تشکیل شده‌اند. ورق‌ها پس از آماده‌سازی توسط روش تزریق رزین به کمک خلأ و تحت فشار مکش 0/7 بار، به مدت 24 ساعت در دمای محیط پخت شدند و پس از پخت آن‌ها به مدت 12 ساعت در دمای 70 درجه‌ی سانتی‌گراد در کوره انجام شد. برای اتصال دو قطعه، از چسب سازه‌ای دو قسمتی گرما سخت کاماتینی (محصول شرکت الانتاس) استفاده شده است. لازم به ذکر است که این چسب در اتصال دو قسمت کامپوزیتی در پرده‌های توربین بادی (پژوهشکده هوا-خورشید دانشگاه فردوسی مشهد) استفاده می‌شود. رزین این چسب از نوع AS90 و سخت‌کننده آن AW92 است که رزین با نسبت وزنی 100 با سخت‌کننده با نسبت وزنی 45 با هم مخلوط می‌شوند.

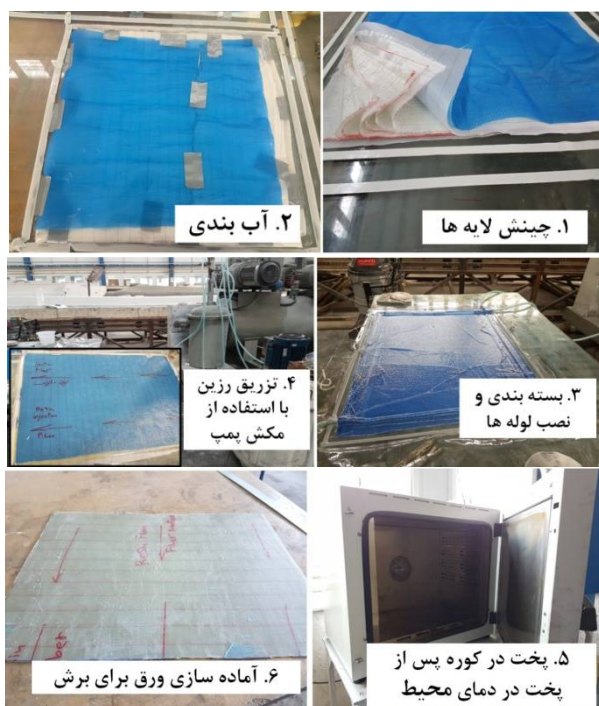


Fig. 1 Fabrication of the composite sheet by the vacuum infusion process

شکل 1 روش آماده‌سازی ورق کامپوزیتی با روش تزریق رزین به کمک خلأ

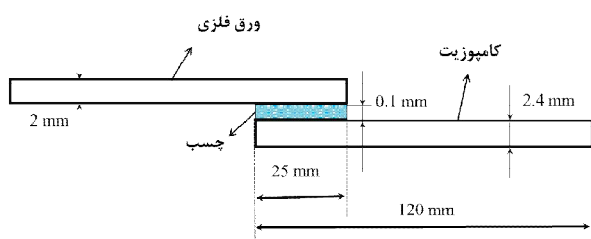


Fig. 2 Geometrical configuration of the aluminum to composite lap joint

شکل 2 پیکربندی هندسی اتصال لبه‌ای آلومینیم به کامپوزیت

بدین ترتیب، با بهره‌گیری از این استاندارد که در آن استفاده هم‌زمان از فلز و کامپوزیت به‌عنوان دو قطعه متصل شونده بلامانع است، تمامی نمونه‌های کامپوزیتی و فلز-کامپوزیتی را

2-2- آماده‌سازی نمونه‌ها

2-2-1- آماده‌سازی سطح نمونه‌ها

پیکربندی هندسی اتصال و طول ناحیه‌ی هم‌پوشانی در شکل 2 نشان داده شده‌اند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که استاندارد

پس از آماده‌سازی، دو قطعه از لایه چسب به‌راحتی جدا می‌شوند. ضخامت لایه چسب در نقاط مختلف اندازه‌گیری شد که میانگین آن‌ها برابر با 0/1 میلی‌متر است.



Fig. 3 Surface preparation method of the metallic surfaces

شکل 3 روش آماده‌سازی شیمیایی سطوح فلزی

شامل شده و به‌منظور امکان مقایسه، در انتخاب ابعاد نمونه‌های فلزی نیز از همین استاندارد تبعیت شده است. استحکام اتصال چسبی تا حد زیادی به کیفیت دو قطعه آلومینیمی و کامپوزیتی بستگی دارد. در اینجا، دو روش برای آماده‌سازی سطح آلومینیم در نظر گرفته شده است: روش اول، روش زبری‌سازی با محلول اسید سولفوریک و سدیم دی‌کرومات به‌عنوان یک روش شیمیایی، و روش دوم، استفاده از روش مکانیکی مبتنی بر سنباده‌زنی است.

برای آماده‌سازی سطح نمونه‌های فلزی به روش شیمیایی، ابتدا به‌منظور پاک کردن سطح نمونه‌های آلومینیمی از آلودگی‌هایی نظیر چربی و اثرانگشت، سطح نمونه‌ها با استفاده از برس و استون شسته شدند. سپس محلول 300 گرم اسید سولفوریک 95-98 درصد در یک لیتر آب مقطر آماده شد. در ادامه 30 گرم پودر دی‌کرومات سدیم به محلول اسید سولفوریک اضافه شده و پس از رسیدن دمای محلول اسید سولفوریک-دی‌کرومات سدیم به 70 درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها به مدت 15 دقیقه در این محلول غوطه‌ور شدند [38]. در ادامه، نمونه‌ها در ظرف دیگر حاوی آب مقطر غوطه‌ور و سطوح زبری‌سازی‌شده آن‌ها توسط برس تمیز شستشو داده شدند. در نهایت نمونه‌ها در آب مقطر شسته شده و با قرار دادن تحت دمای 50 درجه به مدت 20 دقیقه در کوره، خشک شدند. روند آماده‌سازی سطوح به روش شیمیایی در شکل 3 نشان داده شده است.

در روش آماده‌سازی مکانیکی سطوح فلزی، ابتدا سطح نمونه‌ها با استون شسته شده، سپس با استفاده از کاغذ سنباده سیلیکون کاربرد با عدد غربال¹ شماره 120، سطح نمونه‌ها سنباده‌زنی شد. در ادامه، به‌منظور پاک کردن سطوح سنباده‌زنی‌شده از ذرات ریز آلومینیم، این سطوح پس از استون‌شویی، با آب مقطر شستشو و در دمای 50 درجه سانتی‌گراد به مدت 20 دقیقه در کوره خشک شدند. این مراحل با حذف سنباده‌زنی برای همه قطعات کامپوزیتی هم انجام شد.

2-2-2- روش آماده‌سازی و پخت اتصال

سطوح هم‌پوشانی دو قطعه‌ای که با چسب به یکدیگر متصل می‌شوند، با استفاده از گیره نگه داشته می‌شوند (شکل 4). برای حصول اطمینان از ضخامت یکنواخت چسب در ناحیه هم‌پوشانی، با استفاده از چسب نواری پوششی (چسب سینا) سطح دو قطعه پوشیده شد. مطابق روند قبلی نمونه آماده‌سازی شد و به‌سبب این‌که چسب اپوکسی به سطح چسب نواری نمی‌چسبد،

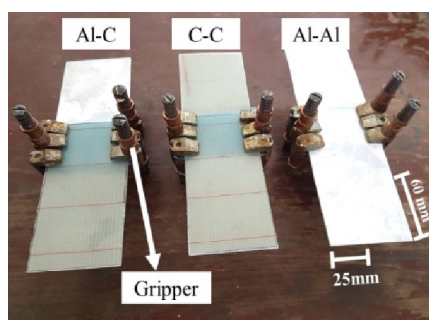


Fig. 4 Applying pressure on the surface of bonded lap joints specimens using clamps

شکل 4 اعمال فشار به سطح نمونه‌های اتصال لبه‌ای چسبی توسط گیره

نمونه‌های لبه‌ای چسبی متصل شده تحت نیروی گیره‌ها، برای پخت اولیه به مدت 24 ساعت در دمای محیط قرار می‌گیرند. سه شرایط پخت برای هر یک از سه دسته نمونه‌های

¹ Mesh number

2-3-3- روش آزمون

2-3-3-1- طراحی آزمایش‌ها

پیش از آغاز آزمون‌های استاتیکی و خستگی و توضیح درباره‌ی نحوه اجرای هر یک از این آزمون‌ها، لازم است به‌طور دقیق تمامی عوامل موردبررسی و دسته‌بندی نمونه‌ها ذکر شده و طراحی آزمایش‌ها ارائه شود. عوامل موردبررسی شامل عامل روش آماده‌سازی سطح (شیمیایی و مکانیکی) و عامل شرایط پخت (سه حالت) هستند؛ بنابراین، آزمون‌های مکانیکی با در نظر گرفتن تمامی حالات بین عوامل در شکل 5 نشان داده شده‌اند.

2-3-3-2- آزمون‌های مکانیکی

آزمون‌های استاتیکی و خستگی با استفاده از دستگاه سروو-هیدرولیک زوئیک روئل آملسر (آلمان)³ با ظرفیت بار 10 کیلو نیوتن انجام شده‌اند. اگرچه استاندارد به‌خصوص و مشخصی برای اتصالات لبه‌ای چسبی تحت آزمون خمش چهار نقطه‌ای و بارگذاری چرخه‌ای وجود ندارد، از استانداردهای نزدیک به این شرایط ایده گرفته شده است.

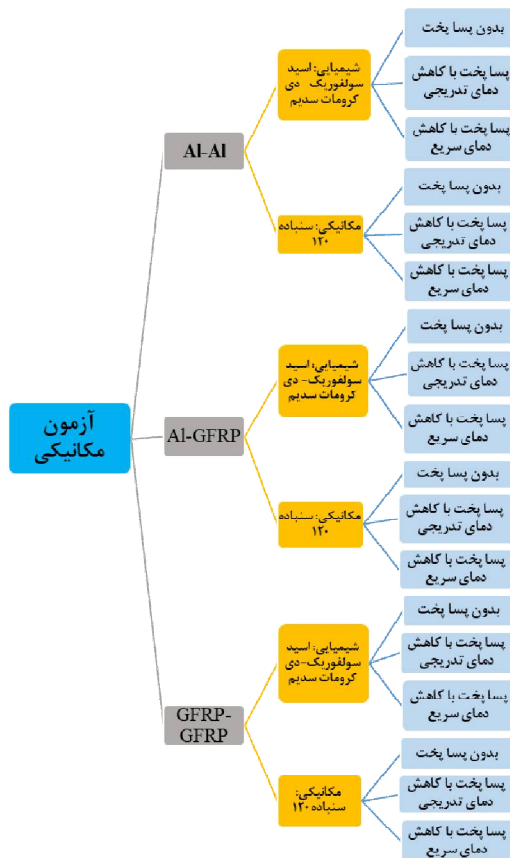


Fig. 5 Design of experiment diagram for various factors

شکل 5 نمودار طراحی آزمایش‌ها برای عوامل مختلف

لبه‌ای چسبی آلومینیم-آلومینیم (AI-AI)، آلومینیم-کامپوزیت (AI-C) و کامپوزیت-کامپوزیت (C-C) در نظر گرفته شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که بر اساس گزارش تخصصی شرکت الانتاس¹ برای چسب ترموست² مورد استفاده در این مقاله، در نظر گرفتن زمان پخت اولیه به مدت 24 ساعت در دمای محیط به منظور دستیابی به حداقل تنش برشی است. از آنجایی که در پژوهش‌های اخیر در زمینه اتصالات چسبی، زمان پخت به‌عنوان یکی از عوامل اثرگذار بر کیفیت اتصال معرفی شده است، در پژوهش حاضر نیز پخت اولیه به مدت 24 ساعت در دمای محیط به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شده است. سپس بر اساس اطلاعات فنی چسب موردنظر، با توجه به اینکه مرحله پسا-پخت برای آن مجاز دانسته شده است، زمان‌های متفاوتی نیز برای آن انتخاب شده است. همچنین لازم به تأکید است که در سال‌های اخیر، مدت زمان پخت چسب به‌عنوان عاملی حائز اهمیت معرفی شده است [22]. لذا، تمایز پژوهش حاضر با مرجع [22] در بررسی سرعت سرد کردن پس از پسا-پخت است. بدین منظور سه حالت برای پسا-پخت در نظر گرفته شده است. در حالت اول، وضعیت پخت شامل همان پخت اولیه در دمای محیط است. در حالت دوم، هر سه دسته اتصال لبه‌ای به مدت 7 ساعت در دمای 70 درجه سانتی‌گراد پسا-پخت شدند. در این شرایط، روند افزایش دما در ابتدای مرحله پسا-پخت به‌گونه‌ای انتخاب شد که گرادیان افزایش دما تا رسیدن به 70 درجه سانتی‌گراد آهسته باشد (نیم درجه در هر دقیقه). همچنین در این حالت، پس از تکمیل زمان پخت، ابتدا نمونه‌ها به آهستگی در کوره تا دمای 25 درجه سانتی‌گراد سرد شده، سپس از کوره خارج شدند. این کاهش دما با نرخ یک درجه در هر دقیقه انجام شده و دمای کوره پس از 45 دقیقه به دمای محیط رسیده است. در حالت سوم، شرایط انجام پخت مشابه حالت دوم است؛ با این تفاوت که در این حالت سرد شدن تدریجی حذف شده و نمونه‌ها بلافاصله از کوره خارج شده و در دمای محیط قرار داده شدند. دلیل انتخاب سه روش ذکر شده برای پخت نمونه‌ها، اولاً، بررسی اثر پسا-پخت بر استحکام نمونه‌ها نسبت به پخت در دمای محیط، و ثانیاً، بررسی اثر احتمالی بروز عیب در لایه چسب و کاهش استحکام ناشی از شیوه‌ی سرد کردن بعد از تکمیل پسا-پخت است. علت این کاهش استحکام می‌تواند تغییر در ضرایب انبساط حرارتی فلز، چسب و کامپوزیت باشد.

¹ Elan-Tech adhesives & sealants, Elantas electrical insulation, ELANTAS Europe GmbH

² Camattini spa thermosetting resin

³ Zwick/Roell Amsler HB 100

از نوع شیمیایی و شرایط پسا-پخت با سرد کردن تدریجی در شکل 8 نشان داده شده است.

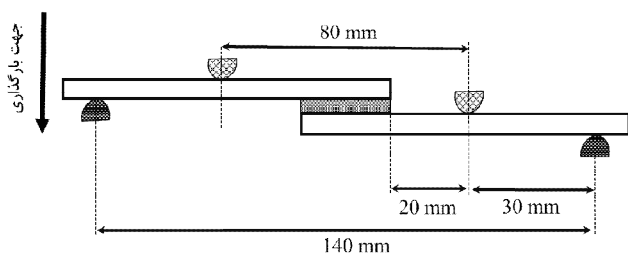


Fig. 6 Schematic of loading and supporting rollers in four-point bending test
شکل 6 شماتیک فواصل غلتک‌های تکیه‌گاهی و بارگذاری در آزمون خمش چهار نقطه‌ای

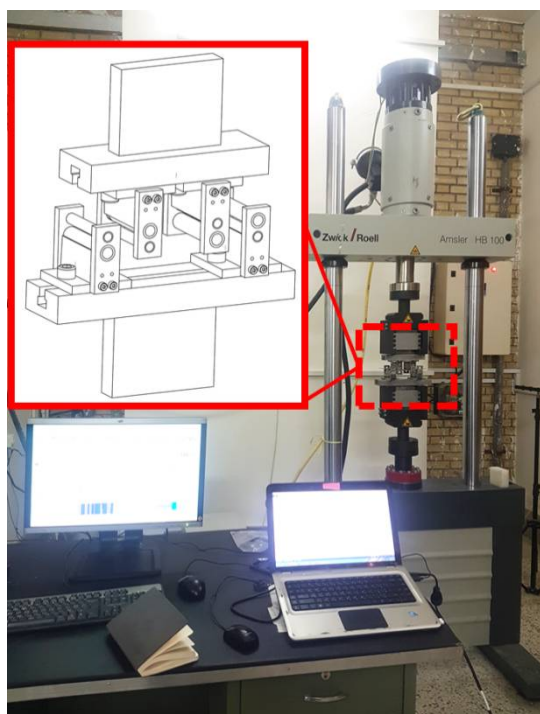


Fig. 7 The four-point bending test

شکل 7 آزمون خمش چهار نقطه‌ای

مطابق این شکل، نیروهای بیشینه و کمینه شبه‌استاتیک به ترتیب در اتصال لبه‌ای فلز-کامپوزیت و فلز-فلز اتفاق افتاده‌اند. لازم به ذکر است که نیروی بیشینه شبه‌استاتیک، همان ظرفیت تحمل بار در اتصال است. علاوه بر این، بیشترین جابجایی در جهت عمودی در اتصال کامپوزیت-کامپوزیت و کمترین جابجایی عمودی در اتصال فلز-فلز قابل مشاهده است. میزان انرژی تغییر شکل یا به عبارت دیگر سطح زیر نمودار، معرف میزان انرژی جذب شده توسط اتصال تا وقوع واماندگی شکست است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اتصال کامپوزیت-کامپوزیت،

در این راستا، استاندارد ASTM D7249 برای در نظر گرفتن فواصل غلتک‌های بارگذاری، تکیه‌گاهی، و فاصله غلتک بارگذاری از تکیه‌گاهی استفاده شده است [39]. همچنین سرعت بارگذاری توسط دستگاه آزمون و شرایط اجرای آن با توجه به استانداردهای ASTM C393 و ASTM D7249 انتخاب شده‌اند [39، 40]. علاوه بر این، جهت اجرای آزمون خستگی نیز از استاندارد ASTM D3166-99 استفاده شده است [41]. آزمون شبه‌استاتیکی با نرخ بارگذاری 5 میلی‌متر بر دقیقه و آزمون خستگی به ازای حداکثر بار چرخه‌ای 70 درصد از حد بار شبه‌استاتیک (نیروی بیشینه شبه‌استاتیک) منجر به واماندگی و نسبت بار صفر انجام شده‌اند. لازم به ذکر است که اعمال بارگذاری به نمونه توسط دستگاه آزمون به صورت یکنوا¹ است. آزمون خستگی به صورت نیرو-کنترلی با فرکانس 2 هرتز و الگوی بار چرخه‌ای سینوسی انجام شده است. فیکسچر ویژه‌ای برای اعمال بارگذاری خمش چهار نقطه‌ای بر نمونه‌های لبه‌ای چسبی طراحی و ساخته شد. این فیکسچر در گیره‌های دستگاه زوئیک تعبیه شده و قابلیت اعمال بارگذاری خستگی در نسبت بارهای مختلف (مثبت، صفر و منفی) را دارد. فواصل غلتک‌های بارگذاری و تکیه‌گاهی در شکل 6 نشان داده شده است. هم‌چنین دستگاه آزمون خستگی به همراه فیکسچر نصب شده بر روی آن در حین اجرای آزمون در شکل 7 مشخص شده‌اند. لازم به ذکر است که عمر خستگی نمونه‌ها برحسب تعداد چرخه‌های بارگذاری طی شده تا وقوع واماندگی (جدا شدن کامل اتصال از ناحیه هم‌پوشانی) در نظر گرفته شده است.

آزمون‌های مکانیکی در دمای محیط (25 درجه‌ی سانتی-گراد) و رطوبت نسبی 50 درصد انجام شدند. تکرار انجام آزمون‌های استاتیکی برای هر یک از شرایط، سه بار و تکرار انجام آزمون خستگی در هر یک از شرایط، برای نمونه‌های فلز-فلز سه بار و برای نمونه‌های فلز-کامپوزیت و کامپوزیت-کامپوزیت، پنج بار در نظر گرفته شد. پس به‌طور کلی به تعداد 54 آزمون استاتیکی، 30 آزمون خستگی برای نمونه‌های فلزی، و جمعاً 60 آزمون خستگی برای نمونه‌های فلز-کامپوزیتی و کامپوزیتی انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج آزمون استاتیکی

نتایج بار برحسب جابجایی برای سه نوع اتصال فلز-فلز، فلز-کامپوزیت و کامپوزیت-کامپوزیت در شرایط آماده‌سازی سطحی

¹ Monotonic

جدول 1 نیروی بیشینه شبه استاتیک و نسبت بار به وزن برای سه دسته اتصال در آماده‌سازی سطحی و شرایط پخت ثابت

Table 1 Maximum quasi-static load, and load to weight ratios of three joint types for constant surface treatment and curing conditions

کامپوزیت- آلومینیم	آلومینیم- کامپوزیت	کامپوزیت- آلومینیم	
82	87	92	وزن (گرم)
709/7	726/5	650/4	نیروی بیشینه شبه‌استاتیک (نیوتن)
20/2	24/7	16/4	انحراف معیار
8/66	8/35	7/07	نسبت بار به وزن (نیوتن بر گرم)

مقایسه بین نیروی بیشینه شبه‌استاتیک برای نمونه‌های لبه‌ای چسبی فلزی در سه حالت پخت که پیش‌تر ذکر شد (حالت اول: بدون پسا-پخت، حالت دوم: پسا-پخت با کاهش دمای تدریجی، و حالت سوم: پسا-پخت با کاهش دمای ناگهانی)، در شکل 9-الف نشان داده شده است. با توجه به شکل، برای آماده‌سازی سطحی ثابت، نیروی بیشینه شبه‌استاتیک در شرایطی که پسا-پخت نمونه‌ها با کاهش دمای تدریجی انجام شده از پسا-پخت با کاهش دمای ناگهانی بیشتر بوده و کمترین سطح این نیروی بیشینه مرتبط با شرایط بدون پسا-پخت است. دلیل این تفاوت‌ها در اختلاف بین ضرایب انبساط حرارتی در چسب و فلز است. به‌طور مثال، در حالت سوم پخت، با قرار دادن یک‌باره‌ی اتصال فلز-فلز در دمای محیط پس از اتمام پسا-پخت، به‌دلیل ضریب انبساط حرارتی بالاتر در آلومینیم نسبت به چسب، تفاوت بین انبساط حجمی چسب و آلومینیم باعث ایجاد عیوب ریز و درنهایت حداکثر بار کمتر می‌شود.

همان‌طور که در شکل 9-الف مشاهده می‌شود، روش آماده‌سازی سطحی مکانیکی در هر یک از شرایط پخت دوم و سوم، نیروی بیشینه‌ی شبه‌استاتیک بالاتری را نسبت به روش آماده‌سازی سطحی شیمیایی، دارا می‌باشد. با وجود این، در روش پخت بدون پسا-پخت، اختلاف بین دو روش آماده‌سازی سطحی تقریباً ناچیز است. مطابق شکل، انحراف معیار داده‌ها برای روش شیمیایی در سه شرایط پخت به‌ترتیب 26/1، 16/4، 19/6 و در روش مکانیکی برای این سه روش به‌ترتیب 27/4، 21/5 و 25/8 می‌باشد.

مقایسه بین شرایط پخت مختلف و آماده‌سازی سطحی برای هر یک از آن‌ها در اتصال لبه‌ای چسبی فلز-کامپوزیت در شکل 9-ب نشان داده شده است.

فلز-کامپوزیت و فلز-فلز به‌ترتیب بیشترین تا کمترین انعطاف-پذیری و جذب انرژی را در برابر بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای استاتیکی دارند.

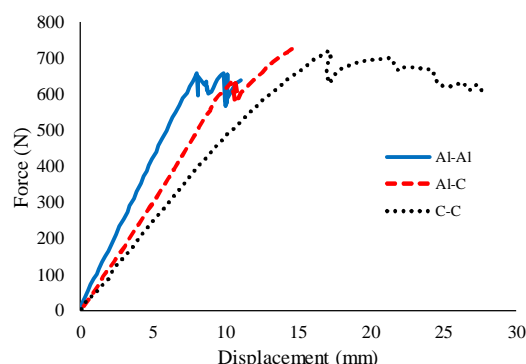


Fig. 8 Load-displacement curves of three lap joints for the chemical surface treatment and gradual post-cure

شکل 8 نمودار بار بر حسب جابجایی برای سه نوع اتصال لبه‌ای در شرایط آماده‌سازی سطحی شیمیایی و پسا-پخت با سرد کردن تدریجی

نیروی بیشینه شبه‌استاتیک در هر یک از سه اتصال معرفی‌شده در شکل 8، به‌همراه وزن هر یک از نمونه‌ها در جدول 1 نشان داده شده‌اند. با توجه به این جدول، نیروی بیشینه شبه‌استاتیک برای اتصالات فلز-کامپوزیت و کامپوزیت-کامپوزیت به ترتیب 11/7 و 9/11 درصد از اتصال فلز-فلز بیشتر است. تفاوت اندک بین ظرفیت تحمل بار اتصالات فلز-کامپوزیت و کامپوزیت-کامپوزیت قابل صرف‌نظر بوده و بدین معنی است که در سازه‌های دارای بخش‌های انعطاف‌پذیر، اتصالات فلز-کامپوزیت و کامپوزیت-کامپوزیت نسبت به اتصالات چسبی فلزی برتری دارند. علاوه‌براین، نیروی بیشینه‌ی شبه‌استاتیک برای هر یک از اتصالات فلزی، فلز-کامپوزیتی و کامپوزیتی میانگین بیشینه نیروی آزمون‌های تکرار شده برای هر حالت است و انحراف معیار آن‌ها در جدول 1 نشان داده شده است. اتصال فلز-کامپوزیتی به‌دلیل دخیل بودن پارامترهای عدم‌قطعیت و ایجادکننده پراکندگی در داده‌های تجربی نظیر ناهمسانی جنس‌های الیاف و ماتریس و تفاوت در خواص چسبندگی سطوح تماس آلومینیم و کامپوزیت با چسب، بیشترین انحراف معیار را دارد. نسبت استحکام به وزن در سامانه‌های حمل‌ونقل سبب کاهش مصرف سوخت می‌شود و در صورت استفاده از این نوع اتصالات در این صنایع، از این منظر مقایسه آن‌ها ضرورت پیدا می‌کند. نتایج نشان داده‌اند که نسبت بار به وزن در اتصال کامپوزیتی به‌ترتیب 22/5 و 3/7 درصد از اتصالات فلزی و فلز-کامپوزیتی بیشتر است.

برای این سه روش به ترتیب 35/2، 26/8 و 29 می‌باشد. با توجه به اینکه روش آماده‌سازی سطحی برای کامپوزیت انجام نمی‌شود، تنها اثر روش پخت برای اتصال کامپوزیت-کامپوزیت بررسی شده است (شکل 9-ج). با توجه به اختلاف زیاد بین شرایط پخت اول و دوم در اتصال کامپوزیتی می‌توان نتیجه گرفت که این اختلاف نسبت به دو نوع اتصال دیگر بیشتر بوده و این اتصال به روش پخت وابسته است. انحراف معیار داده‌ها در شکل 9-ج برای سه روش پخت به ترتیب 20/2، 25/7 و 17/6 می‌باشد.

به‌منظور مقایسه تجمیعی و مقایسه هر یک از انواع اتصالات با سایر آن‌ها در شرایط مختلف، از شکل 10 (یا از مقایسه شکل‌های 9-الف و 9-ب) چنین استنباط می‌شود که اختلاف بین نیروی بیشینه شبه‌استاتیک دو روش آماده‌سازی سطح برای وضعیت بدون پسا-پخت در اتصال فلز-کامپوزیت نسبت به اتصال فلز-فلز، مشهودتر شده است؛ بنابراین آماده‌سازی سطحی در شرایط بدون پسا-پخت، به نوع اتصال بستگی دارد. این در حالی است که اختلاف نیروی بیشینه شبه‌استاتیک در دو روش آماده‌سازی سطحی، در اتصالات فلز-فلز و فلز-کامپوزیت برای هر یک از دو وضعیت دیگر پخت تقریباً یکسان است. با توجه به اینکه اختلاف بین نیروی بیشینه شبه‌استاتیک در دو روش پخت دوم و سوم در اتصال فلز-کامپوزیتی کمتر از اتصال فلزی است، می‌توان نتیجه گرفت که اتصال فلز-کامپوزیتی وابستگی کمتری به سرد کردن پس از پسا-پخت دارد و لذا زمان پخت آن می‌تواند کوتاه‌تر باشد.

از مقایسه نتایج مقاله حاضر با پژوهش انجام‌شده توسط جنتی و همکاران [17] می‌توان نتیجه گرفت که در آزمون‌های کندگی، لبه‌ای برشی و خمش سه‌نقطه‌ای، نیروی در لحظه شکست در روش آماده‌سازی سطحی مکانیکی بیشتر از مقدار این نیرو در آماده‌سازی سطحی شیمیایی است. در نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر نیز رفتاری مشابه برای آزمون خمش چهار نقطه‌ای مشاهده شده است. البته اندازه ضخامت ورق آلومینیومی در [17] برای آزمون‌های لبه‌ای برشی و خمش سه‌نقطه‌ای 1 میلی‌متر و برای آزمون کندگی 1/6 میلی‌متر، و ضخامت چسب 0/15 میلی‌متر می‌باشد که نزدیک به ابعاد استفاده‌شده در این مقاله هستند.

وجود تغییر شکل ناشی از لنگر خمشی علاوه‌براین که عامل اصلی بروز تنش کندگی در لبه‌های آزاد از ناحیه هم‌پوشانی است، سبب بروز تنش کششی در سمت پایین لایه چسب و تنش فشاری در سمت بالایی آن می‌شود.

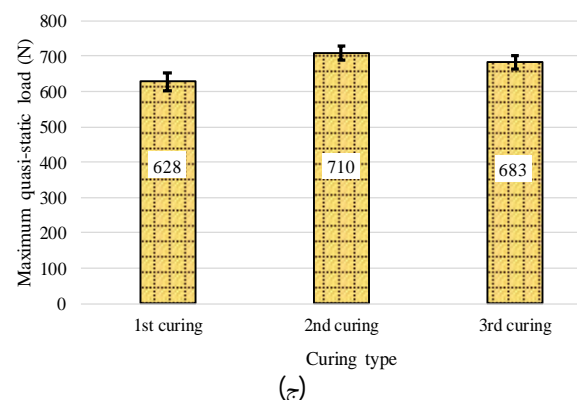
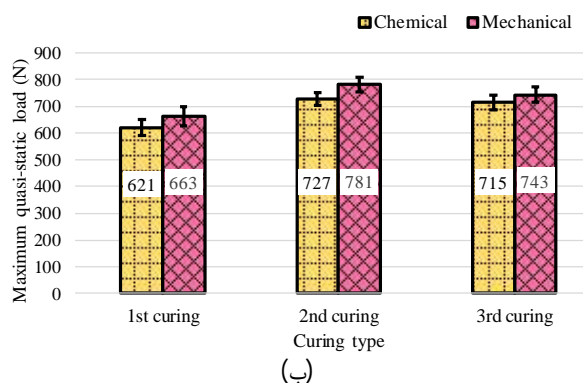
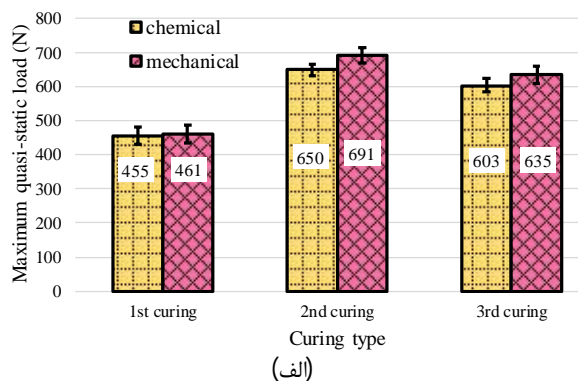


Fig. 9 Comparison of quasi-static load of the lap joints for two surface treatments, and three curing conditions, a: Metallic joint, b: Metal-composite joint, c: Composite joint

شکل 9 مقایسه نیروی بیشینه شبه‌استاتیک برای اتصالات لبه‌ای به تفکیک اتصال و برای دو آماده‌سازی سطحی و سه شرایط پخت، الف: اتصال فلزی، ب: اتصال فلز-کامپوزیت، ج: اتصال کامپوزیتی

این شکل بیان می‌کند که مشابه اتصال فلز-فلز، در اینجا نیز شرایط پخت نوع دوم حداکثر مقدار بیشینه نیروی شبه‌استاتیک را دارد. علاوه‌براین، همانند اتصال فلز-فلز، در اتصال فلز-کامپوزیت نیز آماده‌سازی سطحی مکانیکی به نیروی بیشینه شبه‌استاتیک بالاتری نسبت به روش شیمیایی منجر شده است. مطابق شکل، انحراف معیار داده‌ها برای روش شیمیایی در سه شرایط پخت به ترتیب 31/3، 24/7 و 27/4 و در روش مکانیکی

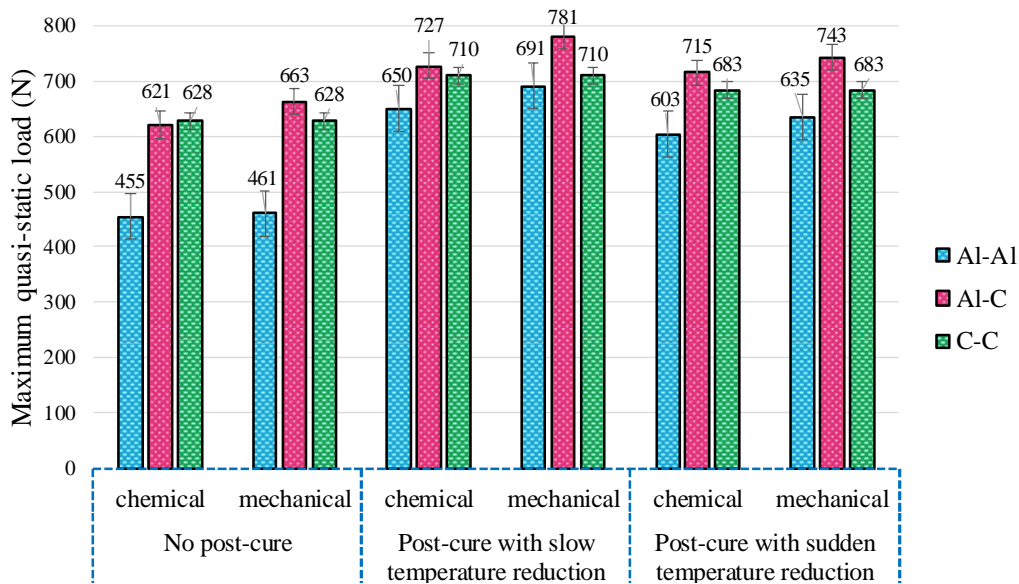


Fig. 10 Comparison of maximum quasi-static load for all surface treatment and curing conditions

شکل 10 مقایسه تجمعی نیروی بیشینه شهابستاتیک اتصالات برای تمامی شرایط آماده‌سازی سطحی و پخت

و متعاقب آن استحکام چسب به کیفیت مطلوب خود نرسیده و آسیب علاوه بر خود چسب، مستعد رشد در ناحیه بین سطحی نیز می‌باشد. علاوه بر این، هر یک از این اتصالات، در وضعیت پسا-پخت با کاهش دمای تدریجی، بیشترین عمر خستگی و در شرایط بدون پسا پخت کمترین عمر خستگی را دارا می‌باشند. لازم به توضیح است که برای اتصال فلز-کامپوزیت، به دلیل تفاوت در خواص انبساط حرارتی آلومینیم و کامپوزیت، بین روش دوم و سوم پخت تفاوت بیشتری نسبت به دو اتصال دیگر مشهود است.

همان‌طور که در شکل 12 قابل مشاهده است، حذف سرد کردن تدریجی بعد از تکمیل پسا-پخت (اختلاف بین وضعیت پخت دوم و سوم)، برای اتصالات با قطعات مشابه (اتصال لبه‌ای فلزی و کامپوزیتی) بسیار کمتر از اتصال فلز-کامپوزیتی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مرحله سرد کردن تدریجی بعد از تکمیل پسا-پخت در بهبود عمر خستگی اتصال فلز-کامپوزیت لبه‌ای بسیار مؤثر بوده و برای اتصالات فلزی و کامپوزیتی چسبی کم‌اثر است. عمرهای خستگی اتصالات فلزی، فلز-کامپوزیتی، و کامپوزیتی در آماده‌سازی‌های سطحی شیمیایی و مکانیکی و شرایط پخت مختلف نشان می‌دهد که اولاً، بیشترین عمر خستگی از بین تمامی حالات مربوط به آماده‌سازی مکانیکی سطح و روش دوم پخت برای اتصال فلز-کامپوزیت است؛ ثانیاً، عمر خستگی در آماده‌سازی سطحی به روش مکانیکی در هر یک از اتصالات بیشتر از آماده‌سازی سطحی به روش شیمیایی است (شکل 13).

از آنجایی که مقاومت چسب در فشار نسبت به کشش بیشتر است، بروز ترک از پایین لایه چسب آغاز شده و به درون لایه گسترش می‌یابد [24]؛ بنابراین، همان‌طور که در شکل 11 به‌طور شماتیک نشان داده شده است، تفاوت در عامل بروز ترک می‌تواند از عوامل تفاوت در نتایج بررسی اثر روش‌های مختلف آماده‌سازی اتصال در بارگذاری کششی (آزمون برش لبه‌ای) و خمش چهارنقطه‌ای باشد. در بارگذاری خمش چهارنقطه‌ای به دلیل نوع بارگذاری، وضعیت تنش در بالای ناحیه هم‌پوشانی و لایه چسب فشاری و در پایین لایه چسب کششی می‌باشند. پس می‌توان استنباط کرد که اگرچه نتیجه مقاله حاضر با برخی پژوهش‌ها هم‌چون [17] هم‌خوانی دارد، ولی در مقایسه با پژوهش‌هایی نظیر مقاله پیرا و همکاران [14] در روش آماده‌سازی سطحی مشابه، وضعیت متفاوت تنش در لایه چسب موجب رفتار متفاوت اتصال شده است.

3-2- نتایج آزمون خستگی

نتایج آزمون خستگی برای سه اتصال فلزی، فلز-کامپوزیت و کامپوزیتی نشان داد که اتصال فلزی در هر یک از وضعیت‌های پخت، عمر کمتری نسبت به سایر اتصالات داشته و بیشترین عمر در وضعیت پخت دوم مربوط به فلز-کامپوزیت و در پخت سوم مربوط به اتصال کامپوزیتی است. بیشترین عمر خستگی در وضعیت پخت اول نیز متعلق به اتصال فلزی است (شکل 12). در اتصال کامپوزیتی و در وضعیت پخت اول، عمر خستگی بیشتر از آن اتصال فلز-کامپوزیت است، که می‌تواند به این دلیل باشد که در این اتصال پیوندهای شیمیایی چسب

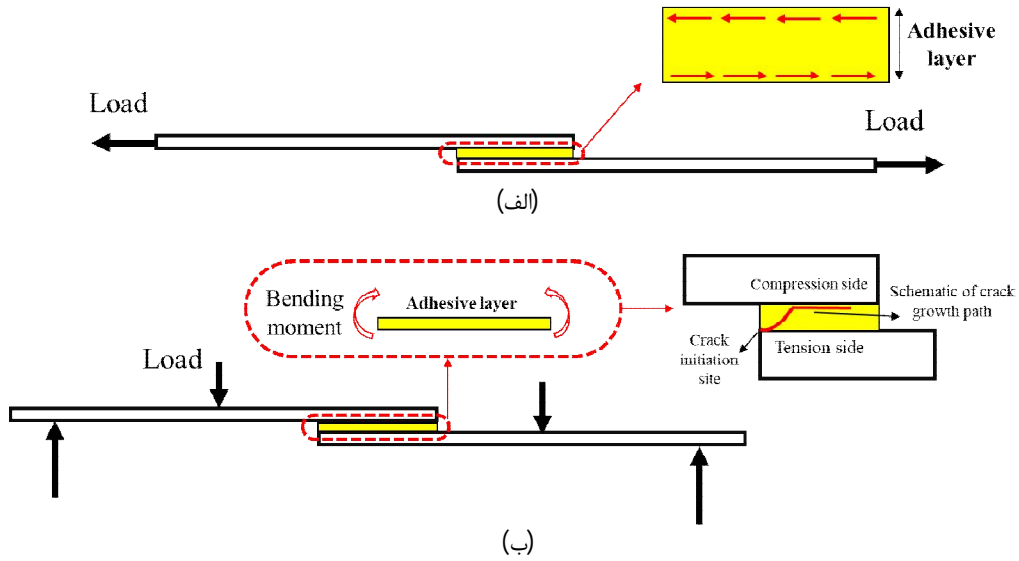


Fig. 11 Schematic of stress and damage in bond line of the lap joint, a: Stress condition in lap shear test, b: Bending moment and crack initiation site in the bond line

شکل 11 شماتیک وضعیت تنش و آسیب در لایه چسب در اتصال لابه‌ای، الف: وضعیت تنش لایه چسب در آزمون برش لابه‌ای، ب: وضعیت ممان خمشی و مکان بروز ترک در لایه چسب

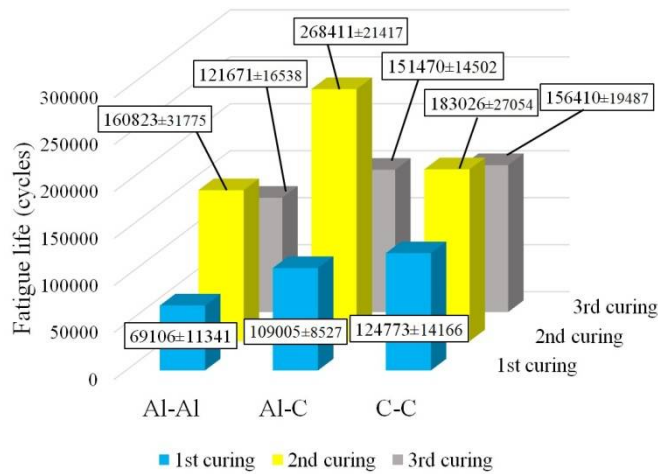


Fig. 12 Comparison of fatigue life cycles of various curing conditions for three joint types of metallic, metal-composite, and composite

شکل 12 مقایسه عمر خستگی در روش‌های پخت متفاوت برای سه اتصال فلزی، فلز-کامپوزیتی، و کامپوزیتی

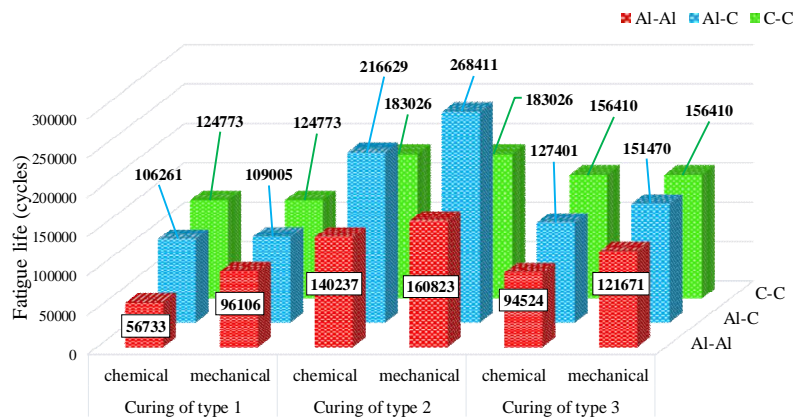


Fig. 13 Comparison of fatigue life cycles of various curing conditions and surface treatments for three joint types of metallic, metal-composite, and composite

شکل 13 مقایسه عمر خستگی در روش‌های پخت و آماده‌سازی سطحی مختلف برای سه اتصال فلزی، فلز-کامپوزیتی، و کامپوزیتی

سطح یک قطعه و چسبیدن به سطح قطعه دیگر³، و در وضعیت پخت دوم و سوم اتصال فلزی واماندگی از نوع ترکیبی واماندگی چسب-جدایش چسب، و برای اتصال فلز-کامپوزیتی واماندگی چسب بوده است؛ بنابراین، وضعیت واماندگی در این اتصالات تنها به شرایط پخت بستگی داشته و متأثر از نوع سرد کردن در پسا-پخت نیست. برای اتصالات کامپوزیتی در شرایط بدون پسا-پخت، علاوه بر جدایش چسب، کندگی الیاف در لایه خارجی در سطح تماس نیز رخ داده است (وضعیت ترکیبی جدایش چسب- کندگی الیاف). با به کار بردن پسا پخت (فارغ از نوع سرد کردن)، چسب تقریباً به‌طور یکنواخت روی سطوح پخش شده و وضعیت واماندگی از ترکیب نوع ترکیبی واماندگی چسب- کندگی الیاف بوده است. با توجه به این بررسی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که از منظر نوع واماندگی، اتصال فلز-کامپوزیتی نسبت به اتصال کامپوزیتی از آن جهت دارای برتری است که به دلیل تقویت نوع چسبندگی در روش پخت، وضعیت واماندگی در آن به‌گونه‌ای است که آسیبی به کامپوزیت وارد نکرده و قابل ترمیم می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر دو شرایط آماده‌سازی سطحی مکانیکی و شیمیایی، و سه شرایط پخت بدون اعمال پسا-پخت، پسا-پخت با سرد کردن تدریجی، و پسا-پخت با سرد کردن ناگهانی بر نیروی بیشینه‌ی شبه‌استاتیک و عمر خستگی سه اتصال لبه‌ای چسبی فلزی، فلز-کامپوزیتی، و کامپوزیتی و تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان داده‌اند که:

حداکثر مقدار نیروی بیشینه‌ی شبه‌استاتیک در شرایط سطحی و پخت ثابت، در اتصال فلز-کامپوزیت و کمترین آن در اتصال فلزی است. همچنین اتصال کامپوزیتی بیشترین، و اتصال فلزی کمترین جذب انرژی تا لحظه شکست را دارند. به‌علاوه، نسبت استحکام به وزن در اتصال کامپوزیتی به ترتیب 22/5 و 3/7 درصد از اتصالات فلزی و فلز-کامپوزیتی بیشتر است.

برای هر یک از اتصالات، نیروی بیشینه‌ی شبه‌استاتیک در شرایط پسا-پخت با کاهش دمای تدریجی بیشتر از پسا-پخت با کاهش دمای ناگهانی است.

علاوه‌براین، می‌توان نتیجه گرفت که در عمر خستگی نمونه‌های با روش اول پخت (بدون پسا-پخت) و با دو روش آماده‌سازی سطحی تغییر محسوسی مشاهده نشده و تأثیر آماده‌سازی سطحی در وضعیتی که پسا-پخت حذف شود، تقریباً ناچیز است.

3-3- بررسی واماندگی سطوح شکست

دسته‌بندی انواع سطوح واماندگی نمونه‌های لبه‌ای چسبی و ارتباط نوع واماندگی به شرایط مختلف، در این قسمت بررسی شده است. بررسی سطوح واماندگی، پس از وقوع واماندگی (جدایش دو ورق) و به‌واسطه تصویربرداری همراه با بزرگ‌نمایی از سطح هم‌پوشانی هر یک از ورق‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که از بین انواع مختلف سطوح واماندگی، پخش‌شدگی تقریباً یکنواخت چسب بر روی دو سطح متصل شده به یکدیگر (واماندگی چسب¹) در اتصالات چسبی مطلوب است؛ زیرا بروز صرف این نوع از واماندگی در صورت عدم وقوع انواع دیگر آن‌ها، نظیر تغییر شکل پلاستیک موضعی در فلز، کندگی الیاف در کامپوزیت، و شکست در ورق کامپوزیت، امکان تعمیر اتصال و استفاده مجدد آن را فراهم می‌کند. علاوه‌براین، وقوع این واماندگی، به‌منزله‌ی چسبندگی مناسب چسب به سطح دو ورق و دستیابی به حداکثر استحکام در لایه چسب می‌باشد. وضعیت واماندگی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری الیمپوس (ژاپن)² ثبت شده و مطابق شکل 14 برای سه نوع اتصال، سه شرایط پخت، و برای آماده‌سازی سطحی شیمیایی نشان داده شده‌اند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که اگرچه نتایج اتصالات فلزی و فلز-کامپوزیتی از نظر نیروی بیشینه‌ی شبه‌استاتیک و عمر خستگی برای دو شرایط آماده‌سازی سطحی اندکی متفاوت هستند، اما سطوح واماندگی آن‌ها مشابه هستند. به‌طور مثال، در شکل 14-الف و در شرایط پخت اول (بدون پسا-پخت)، وضعیت واماندگی برای آماده‌سازی سطحی مکانیکی و شیمیایی مشابه است. از آنجایی که تشابه وضعیت واماندگی برای دو روش آماده‌سازی سطحی برای هر یک از شرایط پخت در اتصالات مختلف مشاهده شد، لذا در شکل 14 صرفاً مقایسه بین اتصالات مختلف و شرایط پخت آن‌ها انجام شده است.

اتصال فلزی و فلز-کامپوزیتی در شرایط بدون پسا-پخت، دچار واماندگی از نوع جدایش چسب (کنده شدن چسب از

¹ Cohesive failure

² Olympus SZX9

³ Adhesive failure

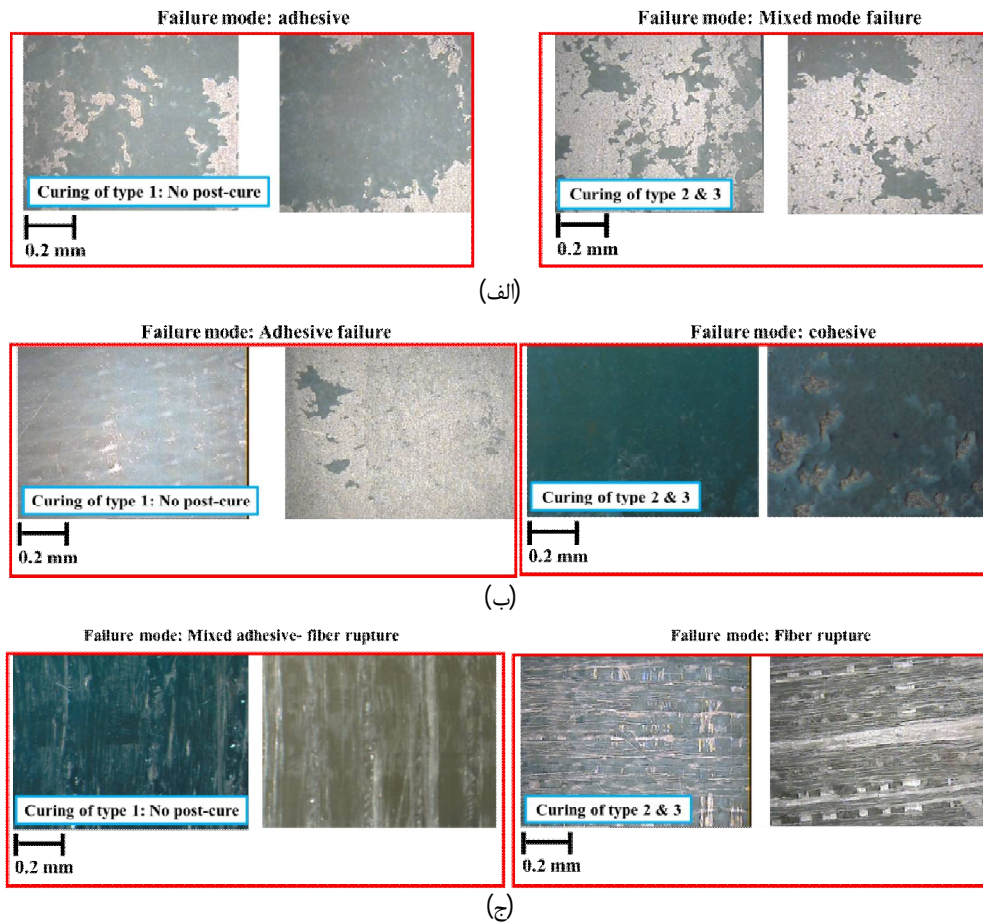


Fig. 14 Comparison of failure modes for the single bonded lap joints, a: Metal-to-metal, b: Metal-to-composite, c: Composite-to-composite

شکل 14 مقایسه عمر خستگی در روش‌های پخت متفاوت برای سه اتصال (الف) فلزی، (ب) فلز-کامپوزیتی، و (ج) کامپوزیتی

دوم و سوم به ترتیب مربوط به اتصال فلز-کامپوزیت و اتصال کامپوزیتی است. اگرچه تمامی اتصالات در وضعیت پسا-پخت با کاهش دمای تدریجی عمر خستگی بیشتری از پسا-پخت با کاهش دمای ناگهانی دارند، اختلاف این دو روش پخت برای اتصال فلز-کامپوزیتی بیشتر است. دلیل این مسئله تفاوت در ضریب انبساط حرارتی آلومینیم و کامپوزیت به‌عنوان اجزای یک اتصال غیر هم‌جنس است؛ بنابراین، سرد کردن تدریجی پس از پسا-پخت در بهبود عمر خستگی اتصالات غیر هم‌جنس فلز-کامپوزیتی ضروری است و برای اتصالات هم‌جنس قابل صرف‌نظر می‌باشد.

بررسی و اماندگی سطوح شکست نمونه‌های اتصالات مختلف نشان داد که نحوه سرد کردن پس از پسا-پخت تأثیری روی نوع و اماندگی ندارد. انجام پخت برای اتصالات فلزی، باعث تغییر وضعیت و اماندگی سطوح از نوع جدایش چسب به وضعیت خرابی ترکیبی چسب-جدایش چسب می‌گردد. اجرای پخت برای اتصال کامپوزیتی نیز وضعیت و اماندگی سطوح شکست را از وضعیت ترکیبی کندگی الیاف-مهندسی ساخت و تولید ایران، شهریور 1399، دوره 7 شماره 6

همچنین اختلاف بین نیروی بیشینه‌ی شبه‌استاتیک برای دو روش پخت دوم و سوم در اتصال فلز-کامپوزیتی کمتر از اتصال فلزی است، و می‌توان نتیجه گرفت که اتصال فلز-کامپوزیتی وابستگی کمی به سرد کردن پس از پسا-پخت در بارگذاری استاتیکی دارد.

اگرچه آماده‌سازی سطحی به روش مکانیکی در هر سه شرایط پخت موجب بهبود نیروی بیشینه‌ی شبه‌استاتیک و عمر خستگی نسبت به روش شیمیایی شده است، اختلاف بین این دو روش آماده‌سازی سطحی برای شرایط بدون پسا-پخت ناچیز بوده، و در نتیجه این شرایط پخت مستقل از نوع آماده‌سازی سطحی است. این در حالی است که آماده‌سازی سطحی در شرایط بدون پسا-پخت به نوع اتصال وابسته بوده و در اتصال فلز-کامپوزیت اختلاف بین دو روش آماده‌سازی سطحی قابل توجه بوده و این اختلاف برای اتصالات هم‌جنس قابل صرف‌نظر است.

کمترین عمر خستگی در همه شرایط پخت مربوط به اتصال فلزی است، و بیشترین عمر خستگی در شرایط پخت

- pp. 36-745, 2014.
- [10] Banea M.D., Rosioara M., Carbas R.J.C., da Silva L.F.M., Multi-material adhesive joints for automotive industry, *Composites: Part B*, Vol. 151, pp. 71-77, 2018
- [11] F. Heidarpour, M. Farahani, P. Ghabezi, Experimental investigation of the effects of adhesive defects on the single lap joint strength, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 80, pp. 128-132, 2018.
- [12] D. Fazel, M.H. Kadivar, H. Zohoor, M.R. Hematiyan, M. Farid, Failure procedure in adhesive composite joints under different types of loading, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Vol. 5, pp. 647-651, 2019.
- [13] T. Sekercioglu, H. Rende, A. Gulsoz, C. Meran, The effects of surface roughness on the strength of adhesively bonded cylindrical components, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142(1), pp. 82-86, 2003.
- [14] A.M. Pereira, J.M. Ferreira, F.V. Antunes, P.J. Bartolo, Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminum adhesive single-lap joint, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 610-617, 2010.
- [15] A. Spaggiari, E. Dragoni, Effect of mechanical surface treatment on the static strength of adhesive lap joints, *The Journal of Adhesion*, Vol. 89(9), pp. 677-696, 2013.
- [16] Y. Boutar, S. Naimi, S. Mezlini, L.F.M. da Silva, M. Hamdaoui, M. Ben Sik Ali, Effect of adhesive thickness and surface roughness on the shear strength of aluminum one-component polyurethane adhesive single-lap joints for automotive applications, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 30, pp. 1913-1929, 2016.
- [17] S. Genty, J.B. Sauvage, P. Tingaut, M. Aufray, Experimental and statistical study of three adherence tests for an epoxy-amine/ aluminum alloy system: Pull-Off, Single Lap Joint and Three Point Bending Tests, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 79, pp. 50-58, 2017.
- [18] Y. Boutar, S. Naimi, S. Mezlini, R.J.C. Carbas, L.F.M. da Silva, M. Ben Sik Ali, Fatigue resistance of an aluminum one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 83, pp. 143-152, 2018.
- [19] S. Correia, V. Anes, L. Reis, Effect of surface treatment on adhesively bonded aluminum-aluminum joints regarding aeronautical structure, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 84, pp. 34-45, 2018.
- [20] A. Safari, M. Faahani, Study on the effects of sanding on the strength of the adhesive joints, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 50(3), pp. 619-626, 2018 (in Persian).
- [21] A. Safari, M. Farahani, Comparison of the effects جدایش چسب به وضعیت پارگی الیاف-خرابی چسب تغییر می‌دهد. درنهایت، انجام پخت برای اتصال فلز-کامپوزیتی وضعیت واماندگی سطوح را از جدایش چسب به وضعیت خرابی در چسب تغییر می‌دهد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که وضعیت واماندگی سطوح اتصال فلز-کامپوزیتی در شرایط پخت نسبت به دو اتصال دیگر بهتر است. دلیل این برتری در وارد نشدن آسیب به کامپوزیت و توزیع یکنواخت چسب روی دو سطح و در نتیجه فراهم آمدن امکان ترمیم اتصال پس از واماندگی است.
- ### 5- مراجع
- [1] R. Hunter, J. Leyner, E. Leal, A. Vizan, J. Perez, L.F.M. da Silva, Influence of dissimilar composite adherends on the mechanical adhesion of bonded joints for small blade wind turbine applications, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 83, pp. 178-183, 2018.
- [2] A. Pizzi, K.L. Mittal, *Handbook of Adhesive Technology*, Third Edition, Taylor & Francis, CRC press, 2018.
- [3] S. Akpınar, M.D. Aydin, 3-D non-linear stress analysis on the adhesively bonded composite joint under bending moment, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 81, pp. 149- 157, 2014.
- [4] A. Tutunchi, R. Kamali, A. Kianvash, Adhesive strength of steel-epoxy composite joints bonded with structural acrylic adhesives filled with silica nanoparticles, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 29, No. 3, pp. 195-206, 2015.
- [5] H. Zhou, H.Y. Liu, H. Zhou, Y. Zhang, X. Gao, Y.W. Mai, On adhesive properties of nano-silica/epoxy bonded single-lap joints, *Materials and Design*, Vol. 95, pp. 212-218, 2016.
- [6] Gh. R. Marami, F. vakili-Tahami, M.A. Saeimi Sadigh, Effects of reduced graphene oxide particles on the creep behavior of adhesively bonded joints, *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, Vol. 85, pp. 281-287, 2019 (in Persian).
- [7] A.R. Dadian, S. Rahnama, A. Zolfaghari, Strength improvement of composite-steel lap joint by grading the joint area with carbon and glass fiber and also mechanical interference by reverse step, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, pp. 393-400, 2019 (in Persian).
- [8] P.N.B. Reis, J.A.M. Ferreira, F. Antunes, Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 31, pp. 193-201, 2011.
- [9] K. Gultekin, S. Akpınar, A. Ozel, The effect of the adherend width on the strength of adhesively bonded single-lap joint: experimental and numerical analysis, *Composites: Part B*, Vol. 60,

- fatigue, *International Journal of Fatigue*, Vol. 96, pp. 224-236, 2017.
- [32] P. Zamani, A. Jaamialahmado, L.F.M. da Silva, Kh. Farhangdoost, An investigation on fatigue life evaluation and crack initiation of Al-GFRP bonded lap joints under four-point bending, *Composite Structures*, V. 229, 1 December 2019, DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111433.
- [33] M.R. Ayatollahi, M. Samari, S.M.J. Razavi, L.F.M. da Silva, Fatigue performance of adhesively bonded single lap joints with non-flat sinusoid interfaces, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 40(9), pp. 1355-1363, 2017.
- [34] S.M.J. Razavi, M.R. Ayatollahi, M. Samari, L.F.M. da Silva, Effect of interface non-flatness on the fatigue behavior of adhesively bonded single lap joints, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 233(7), pp. 1277-1286, 2019.
- [35] M. Soleimani, M. Tahani, P. Zamani, Investigation of resin pocket area effect on crack growth in foam core of composite wind turbine blade by the finite element method, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 8, pp. 27-38, 2019 (in Persian).
- [36] ASTM D1002-10, Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, 2019.
- [37] ASTM D5868-01, standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, 2014.
- [38] ASTM D2651-01, Standard guide for preparation of metal surfaces for adhesive bonding, ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2001.
- [39] ASTM D7249/ D7249M-18, Standard test method for facesheet properties of sandwich constructions by long beam flexure, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, 2018.
- [40] ASTM C393/ C393M-16, Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, 2016.
- [41] ASTM D3166-99, Standard test method for fatigue properties of adhesives in shear by tension loading (Metal/Metal), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, 2012.
- of shot blasting and sandblasting processes on the strength of the aluminum adhesive bonded joints, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 50(5), pp. 329-332, 2018 (in Persian).
- [22] I. Morfini, L. Goglio, G. Belingardi, Sayed A. Nassar, Effect of autoclave cure time and bonded surface roughness on the static and fatigue performance of polyurethane film adhesive single lap joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 92, pp. 37-43, 2019.
- [23] M.D. Aydin, A. Ozel, S. Temiz, Non-linear stress and failure analyses of adhesively-bonded joints subjected to a bending Moment, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 18, pp. 1589-1602, 2004.
- [24] E.F. Karachalios, R.D. Adams, L.F.M. da Silva, The behavior of single lap joints under bending loading, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 27, pp. 1811-1827, 2013.
- [25] S. Akpınar, M.O. Doru, A. Ozel, M.D. Aydin, H.G. Jahanpasand, The effect of the spew fillet on an adhesively bonded single-lap joint subjected to bending moment, *Composites Part B*, Vol. 55, pp. 55-64, 2013.
- [26] H. Moslemi, Kh. Farhangdoost, P. Zamani, Fatigue life evaluation of single and two riveted coach peel joints using strain-life criteria, *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 13 February 2019, DOI: 10.22060/AJME.2019.14541.5731
- [27] P. Zamani, Kh. Farhangdoost, On the influence of riveting process parameters on fatigue life of riveted lap joints, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Vol. 6(2), pp. 248-258, 2020.
- [28] M. Quaresimin, M. Ricotta, Fatigue behavior and damage evolution of single lap bonded joints in composite material, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 176-187, 2006.
- [29] A.M. Pereira, P.N.B. Reis, J.A.M. Ferreira, Effect of the mean stress on the fatigue behavior of single-lap joints, *The Journal of Adhesion*, Vol. 93(6), pp. 504-513, 2017.
- [30] P. Akbarzadeh, Kh. Farhangdoost, Fatigue life prediction of adhesive joints based on initial stiffness and stiffness degradation, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 6, pp. 175-183, 2019 (in Persian).
- [31] S.O. Olajide, Progress on investigation on damage analysis in bonded polymer composites under