



## بررسی تجربی کیفیت سطح در صفحات آلومینیوم ترک خورده تقویت شده با وصله کامپوزیتی تحت بارگذاری خستگی

مهدی نجف پور ملاباشی<sup>1</sup>، مجید صفرآبادی<sup>2\*</sup>، مجتبی حقیقی یزدی<sup>3</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، شهر، صندوق پستی 14155-6619، msafarabadi@ut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

برای جلوگیری صدمات ناشی از خستگی در تجهیزات و سازه‌های ترک‌خورده، ترمیم به عنوان راهکاری مناسب شناخته شده است. از بهترین روش‌ها برای ترمیم قطعات ترک خورده، استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری و اتصال با استفاده از چسب می‌باشد. در این مقاله به بررسی اثر کیفیت سطح در عمر خستگی قطعات ترمیم شده با وصله کامپوزیتی پرداخته می‌شود. صفحه ترک خورده از آلومینیوم 1050 با ترک لبه‌ای می‌باشد و ترمیم مورد استفاده به صورت یک طرفه بوده است. از لیاف شیشه‌صیری شکل به عنوان وصله و از چسب آرالدیت برای اتصال وصله به قطعه ترک خورده استفاده شده است. نتایج آزمایش تجربی نشان می‌دهد که ایجاد زبری کم با استفاده از کاغذ سنباده 600 می‌تواند باعث افزایش عمر 7٪ در قطعات ترمیمی شود. اما با افزایش مقدار زبری از این مقدار، عمر قطعات از حالت پایه (حالت زبر نشده) کمتر می‌گردد؛ تا جایی که قطعات زبر شده با کاغذ سنباده 40 منجر به کاهش عمر در حدود 25٪ می‌گردد.

دریافت: 1398/12/05

پذیرش: 1399/11/10

### کلیدواژگان:

وصله کامپوزیتی،  
رشد ترک خستگی،  
زبری، اتصال چسبی،  
فاکتور شدت تنش

## Experimental investigation of surface finishing in cracked aluminum plates reinforced by composite patch under fatigue loading

Mahdi Najafpour Mollabashi, Majid Safarabadi\*, Mojtaba Haghighi Yazdi

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14155-6619, Tehran, Iran, msafarabadi@ut.ac.ir

### Keywords

Composite patch,  
Fatigue crack propagation,  
Roughness,  
Cohesive joint,  
Stress intensity factor

### Abstract

To prevent fatigue damages in cracked equipment and structures, the repair is known as a proper method. One of the best practices for repairing cracked plates is using polymer composites with adhesive bonding joints. In this paper, the effects of surface finishing on fatigue life of repaired plates with the composite patch were investigated. The single edge cracked plate was made of aluminum 1050 and the repair was applied for one side of the plate. The woven fiberglass was used as a patch and it was jointed to the cracked plate by Araldite adhesive. In this case, the roughened surface by sandpaper No.40 increased the plate properties by 55%. Also, the experimental results revealed that making low roughness on the cracked plate using sandpaper No.600 increases the life cycles by 7%. However, a higher value of roughness reduced the life cycles of repaired plates compared to the base case (plates without roughness) up to 25%

### 1- مقدمه

اقتصادی مقرون به صرفه بوده و هم باعث کاهش زمان راه اندازی دوباره سیستم می‌شود. برای ترمیم ترک و جلوگیری از رشد ترک روش‌های متنوعی وجود دارد که استفاده از وصله‌های کامپوزیتی با اتصال چسبی از بهترین این روش‌ها محسوب می‌شود. معیار انتخاب چسب به عوامل متعددی وابسته است. اتصالات چسبی در مقایسه با روش‌های اتصال دیگر از جمله بیچ، پرچ و جوش دارای مزایا و ویژگی‌های خاصی است. به همین دلیل، در مواقعی استفاده از چسب به عنوان روش مؤثر اتصال، مطلوب‌تر می‌گردد. نوعی از اتصالات سازه‌های با وزن کم که ترکیب موادی مانند کامپوزیت‌ها و استیل

با رسیدن قطعات تجهیزات و سازه‌ها به اتمام عمر کاری خود، در اطراف سوراخ‌های بیچ و پرچ‌ها و مناطقی که با تمرکز تنش بالا، ترک‌های ناشی از خستگی ایجاد شده و رشد پیدا می‌کنند [1]. برای ادامه کارکرد این ادوات دو روش به کار برده می‌شود: الف) جایگزینی قطعه ترک خورده و ب) ترمیم قطعه. جایگزینی قطعه می‌تواند هزینه‌بر باشد و یا یافتن این قطعه به دلیل قدیمی بودن آن امکان‌پذیر نباشد. در ضمن ممکن است فقط بخش کوچکی از قطعه معیوب شده باشد، که در این صورت گزینه ترمیم هم از لحاظ

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Najafpour Mollabashi, M., Safarabadi, M., Haghighi Yazdi, M., "Experimental investigation of surface finishing in cracked aluminum plates reinforced by composite patch under fatigue loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1171-1176, 2021.

هریک از این وصله‌ها، نمودارهای فاکتور شدت تنش بر اساس طول ترک را به دست آورده‌اند. آن‌ها شکل جدیدی از این وصله‌ها را به نام وصله‌های اریب<sup>3</sup> نیز تحلیل کرده و این شکل از وصله‌ها را به‌عنوان بهترین نوع وصله معرفی کرده‌اند. بهترین نوع وصله، گونه‌ای است که فاکتور شدت تنش<sup>4</sup> پائین‌تر باشد. بعد از وصله‌های اریب نیز بهترین نوع وصله‌ها به ترتیب اشکال مستطیلی، بیضی، دایروی و مربعی می‌باشند. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بین طول و ضخامت وصله، ضخامت وصله تأثیر بیشتری بر کاهش فاکتور شدت تنش دارد. بشیر و همکاران [10]، در راستای بهینه‌سازی شکل وصله‌ها، به بررسی دو شکل مستطیلی و دوزنقه‌ای پرداخته‌اند. آن‌ها با انجام شبیه‌سازی‌های 3 بعدی با استفاده از روش اجزا محدود به این نتیجه رسیده‌اند که به ازای طول ترک‌های کوتاه (5 mm - 20)، وصله دوزنقه‌ای عملکرد بهتری نسبت به وصله‌های مستطیلی داشته و قطعات ترمیم شده، فاکتور شدت تنش پایین‌تری در نوک ترک تحمل می‌کنند. اما با بلندتر شدن طول ترک از کارایی وصله‌های دوزنقه‌ای کاسته شده و وصله مستطیلی عملکرد بهتری خواهد داشت. فکیه و همکاران [11]، برای پیدا کردن مناسب‌ترین اندازه وصله مستطیلی شکل (طول، عرض و ضخامت) پژوهشی عددی انجام داده‌اند. آن‌ها با استفاده از روش اجزا محدود 3 بعدی نمودارهایی بر اساس طول، عرض و ضخامت وصله بر اساس فاکتور شدت تنش بدست آوردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد وصله فاکتور شدت تنش کاهش خواهد یافت. وو و همکاران [12] روی صفحه استیل با ترک مرکزی مطالعه نموده که با استفاده از الیاف کربنی ترمیم شده است. در این مطالعه، صفحه لیاف کربنی با مدول 460 GPa برای افزایش استحکام استفاده شده است. آن‌ها از پنج نوع مختلف وصله با تغییر در اندازه، ضخامت و اتصال یک قطعه دوطرفه استفاده کردند. قطعات تحت بارگذاری خستگی با فرکانس 20 Hz و نسبت تنش 0.1 و تنش ماکزیمم 150 MPa استفاده شده است. نتایج نشان داد که عمر خستگی تا 8 برابر بهبود پیدا کرد. رحمانی و همکاران [13]، به بررسی عددی و تجربی ترمیم قطعات ترک خورده با استفاده از کامپوزیت‌های FML<sup>5</sup> پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش اجزا محدود 3 بعدی ضریب شدت تنش در نوک ترک را محاسبه و به این نتیجه رسیدند که در صورت استفاده از این وصله‌ها، عمر قطعه با توجه به نوع لایه‌چینی 2-6 برابر افزایش می‌یابد. یو و همکاران [14] به بررسی تأثیر وصله کربنی در مراحل مختلف رشد ترک پرداخت. او یک مطالعه عددی روی صفحه استیل تقویت شده با الیاف کربنی با استفاده از روش اجزا مرزی<sup>6</sup> انجام داده است. نتایج این مطالعه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و نشان داده شده است که می‌توان از روش اجزا مرزی در بررسی رشد ترک خستگی استفاده کرد. در این تحلیل اندازه وصله، ضخامت وصله، مدول وصله و مدول برشی چسب روی فاکتور شدت تنش تأثیرگذار بوده است. مشاهده شده است که مدل عددی نتایج مشابهی به مدل آزمایشگاهی داشته است. شیویا و همکاران [15] به بررسی رشد ترک صفحات آلومینیومی با وصله کامپوزیتی و محاسبه تأثیر ترمیم انجام شده است. ایشان با استفاده از روش اجزا محدود و با استفاده از صفحه میندلین انجام گرفته است که مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشت. چانگ و همکاران [16] به بررسی رشد ترک در آلومینیوم 6061 با ترمیم یک طرفه پرداختند. آنها از چهار طول مختلف وصله در آزمایش خود استفاده کردند. نتیجه حاصله از آزمایشات آنها از این قرار بود

هستند، قابل اتصال به روش جوشکاری نمی‌باشند. البته ممکن است دلایل دیگری مانند اجتناب از ایجاد گرما و یا خطر آتش‌سوزی دلیل انتخاب چسب به عنوان اتصال مناسب باشد. در اتصالات چسبی کامپوزیتی، توزیع تنش یکنواخت‌تر خواهد بود؛ زیرا که بار روی محدوده وسیع‌تری نسبت به اتصالات مکانیکی توزیع می‌شود. در این روش نیاز به هیچ سوراخی نیست، ولی در عوض به آماده‌سازی سطح همچون تمیز کردن، عملیات پرداخت و غیره نیاز است.

در یکی از اولین مطالعات تجربی انجام شده در این زمینه، چوئی و همکاران [2] پژوهشی در مورد تأثیر لایه‌چینی وصله‌های کامپوزیت در ترمیم قطعات آسیب دیده انجام دادند. در این مطالعه، بارگذاری قطعات به صورت دو محوره در نظر گرفته شده و تحلیل در محدوده الاستیک انجام گرفته است. نتایج تحقیقات این محققین نشان داد که توزیع انرژی کرنشی در مجاورت رأس ترک، تقریباً مستقل از نوع لایه‌چینی است. دنی [3] تلاش نمود تأثیر اندازه و موقعیت ناحیه جدا شده را روی کاهش عمر پنل ترمیم شده بدست بیاورد. او آزمایشات خود را روی پنل‌های آلومینیومی نازک با ضخامت 1 mm که به وسیله وصله‌هایی از جنس بور/اپوکسی<sup>1</sup> ترمیم شده بودند، به انجام رسانید. مطالعات او نیز نشان داد که وقتی ناحیه جدایش افزایش می‌یابد، از عمر پنل ترمیم شده کاسته خواهد شد؛ با این تفاوت که کاهش عمر در برابر افزایش عمر ناشی از ترمیم بسیار ناچیز است. توکلی‌زاده و سعادت‌مند [4] به بررسی تأثیر نوارهای پلیمری تقویت شده با الیاف کربن<sup>2</sup> در کاهش تنش در تیر آهن فولادی و افزایش تعداد چرخه رشد ترک برداشتند. در این پژوهش گزارش شده است که عمر خستگی 34 نمونه با نوارهای الیاف کربن، 3.4-2.6 برابر حالت قبل از ترمیم بوده است. خلیلی و همکاران [5] به بررسی اثر ضربه روی آلومینیوم ترک خورده ترمیم شده و ترمیم نشده پرداخته‌اند. وصله‌های ترمیم‌کننده از دو جنس شیشه و کربن انتخاب شده و ضخامت آن‌ها به صورت 3 لایه و 5 لایه بوده است. آن‌ها با انجام آزمایشات تجربی به این نتیجه رسیدند که وصله‌های کربنی عملکرد بهتری نسبت به وصله‌های شیشه‌ای دارند. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که میزان انرژی جذب شده در قطعات ترمیم شده با وصله‌های 3 لایه و 5 لایه تفاوت چندانی با هم ندارند. بشیر و همکاران [6]، به بررسی و مقایسه انواع وصله‌های کامپوزیتی نو، کهنه کربنی و آلومینیومی پرداختند. در مطالعه انجام شده از هر دو روش تجربی و عددی بهره گرفته شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که پس از 90 روز قرارگیری وصله کامپوزیتی کربنی در آب، عملکرد آن کاهش یافته و با وصله آلومینیومی تقریباً برابر خواهد شد. شوبل و همکاران [7]، 4 نوع قطعه آلومینیومی 5083، 6061، 7050 و 7075 ترک‌خورده را در هوا و محیط خورنده آب و نمک بررسی کردند. همانطور که انتظار می‌رفت، نتایج نشان می‌دهد نرخ رشد ترک تمامی قطعات در محیط خورنده سریعتر از هوا می‌باشد. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان داده است که برای آلومینیوم 6061، در صورت استفاده از وصله کربنی، عمر قطعه بیش از 27.85٪ نسبت به وصله بور/اپوکسی افزایش خواهد یافت. الجبار و همکاران [8]، در مطالعه‌ای تجربی اثر وصله‌های کامپوزیتی در شکست قطعات در مودهای اول و دوم را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با زاویه‌دار شدن ترک و ترکیب دو مود، شکست در تعداد سیکل کمتر رخ می‌دهد. در زمینه وصله‌های کامپوزیتی، مطالعات عددی مختلفی نیز انجام شده است. کومار و همکاران [9] به بررسی اشکال مختلف وصله پرداخته و برای

<sup>3</sup> Skewed Pins<sup>4</sup> Stress Intensity Factor<sup>5</sup> Fiber Metal Laminate<sup>6</sup> Boundary element method<sup>1</sup> Boron/Epoxy<sup>2</sup> CFRP

بوده و خشک کن<sup>1</sup> مورد استفاده این رزین نیز ARADUR 5052 می باشد. دلیل انتخاب این نوع رزین کاربردهای فراوان این نوع رزین در صنایع هوا و فضا است.

پس از آماده کردن وصله های کامپوزیتی، جهت چسباندن وصله ها به قطعه آلومینیومی، از چسب Araldite 2015 تولید شرکت هانتسمن<sup>2</sup> استفاده شده است. دلیل استفاده از این نوع چسب، چسبندگی خیلی خوب آن به فلزات و کامپوزیت ها است. این چسب از دو بخش تشکیل شده و از لحاظ ظاهری خمیری شکل می باشد. جهت تهیه چسب لازم است که نسبت وزنی 1:1 از دو بخش A و B با یکدیگر ترکیب شود. خواص چسب در جدول 1 آمده است.

جدول 1 خواص چسب Araldite 2015

Table 1 Properties of Araldite 2015

$\rho_{12}$	G (MPa)	E (MPa)
0.33	560	1850

## 2-2- فرآیند ساخت

در ابتدا ورق آلومینیومی با استفاده از دستگاه گیوتین به مستطیل هایی با اندازه  $270 \times 60 \text{ mm}^2$  بریده شده است. دلیل بلند بودن قطعه این است که محل اعمال بار و تکیه گاه تا محل ترک فاصله مناسبی داشته باشد تا انتقال بار کاملاً یکنواخت شده باشد. پس از برش قطعات می بایست ترکی به طول  $6 \text{ mm}$  روی آن ها ایجاد شود. امکان ایجاد ترک واقعی با استفاده از هیچ روشی امکان پذیر نمی باشد؛ به این دلیل که در همه روش ها مقداری از ماده با برش قطعه از بین می رود اما در ترک واقعی در ناحیه ترک جدایش اتفاق افتاده است. به ناچار از روش برشکاری وایرکات<sup>3</sup> برای ایجاد ترک استفاده شده است. دلیل استفاده از این روش کمترین دور ریز مواد در روش وایرکات است. از طرفی کیفیت برش این روش در مقایسه با دیگر روش ها بهتر است. ضخامت ترک ایجاد شده با استفاده از این روش در حدود  $0.3 \text{ mm}$  است.

برای ایجاد زبری در قطعه می توان از روش های سنباده زنی و شات بلاست استفاده کرد. در روش سنباده زنی تنها در ظاهر قطعه تغییر ایجاد می شود؛ بدین صورت که با استفاده از براده برداری از سطح قطعه باعث ایجاد زبری در قطعه می گردد. اما در روش شات بلاست با وارد کردن ضربه روی قطعه منجر به ایجاد تنش های پسماند در داخل قطعه می شود. این تنش های پسماند در عمر خستگی قطعه تأثیرگذار خواهد بود و دیگر نمی توان پارامتر ظاهری را به تنهایی بررسی نمود. در نتیجه روش مناسب برای ایجاد زبری در قطعه، روش سنباده زنی انتخاب شده است. در این مطالعه، فرآیند سنباده زنی در عرض  $6 \text{ cm}$  و در جهت ترک انجام گرفته است. کاغذهای سنباده مورد استفاده با محدوده وسیع و گسترده ای از زبری شامل چهار شماره دانه مختلف 40، 100، 400 و 600 است. این محدوده برای بررسی اثرات خشن ترین تا صاف ترین سنباده ها مناسب می باشد. برای هر یک از این حالات 3 قطعه برای آزمایش ترمیم با وصله و I قطعه برای حالت ترمیم نشده ساخته شد.

برای ساخت وصله کامپوزیتی می بایست مراحل زیر را انجام داد. ابتدا سطحی مسطح را با استفاده از جدا کننده ای مناسب کاملاً چرب نموده تا در انتهای کار بتوان به راحتی قطعه آماده شده را از سطح جدا نمود. مقداری

که با رسیدن ترک به انتهای وصله افت ناگهانی در فاکتور شدت تنش اتفاق می افتد. اروین و همکاران [17] به بررسی عددی صفحه آلومینیومی تعمیر شده با وصله پرداختند. در این مقاله سعی بر این شده است که با استفاده از ابزارهای بهینه سازی بهترین شکل، اندازه، ضخامت و ضخامت چسب بدست بیاید. آنها به این نتیجه رسیدند که مهمترین فاکتور تأثیر گذار در کیفیت وصله بهینه سازی در اندازه عرض وصله می باشد. جیانگ بین و همکاران [18] از یک ورق آلومینیومی ضخیم با ترمیم دوطرفه استفاده کردند و نشان دادند که با ترمی ایجاد شده بهبودی در حدود 31 برابر از حالت ترمیم نشده اتفاق افتاده است و همچنین مشخص شد که در قطعات ضخیم اختلاف در فاکتور شدت تنش در ضخامت قطعه کاملاً مشخص بوده است که این اختلاف در این مقاله تا حدود 10 درصد بوده است. حسینی و همکاران [19] بر روی آلومینیوم 1050 و وصله هایی از جنس فایبر شیشه به بررسی تأثیر نسبت تنش های مختلف پرداختند. نسبت تنش مورد بررسی در این پژوهش به ترتیب 0، 0.25، 0.5، 0.75 بوده است. آنها نشان دادند هرچه میزان نسبت تنش کاهش پیدا می کند عمر قطعات نیز به شدت با کاهش روبرو می شوند به طوری که عمر قطعات در نسبت تنش صفر تا 5 برابر کاهش پیدا کرده است.

با مرور مقالات و تحقیقات منتشر شده، مشاهده می شود که ترمیم قطعات یکی از بهترین راهکارها برای افزایش عمر قطعات و به تأخیر انداختن تعویض قطعات است که منجر به کاهش هزینه ها و جلوگیری از اتلاف زمان می شود. اکثر مقالات پیشین به بررسی بهینه سازی وصله پرداخته اند و تلاش هر یک در راستای افزایش عمر قطعات ترک خورده با تغییر در لایه چینی، تغییر در ابعاد وصله، تغییر در شکل و تأثیر ضخامت چسب در عمر نهایی قطعه بوده است ولی هیچ یک به بررسی کیفیت سطح و تأثیر آن روی عمر قطعه و چسبندگی بین قطعات نپرداخته اند. لذا در این مقاله هدف بررسی اثر کیفیت سطح بر عمر قطعه ترمیم شده با وصله کامپوزیتی است. در ادامه به بررسی و معرفی مواد به کار رفته در آزمایش، فرآیند ساخت و نحوه آزمایش پرداخته شده است. در نهایت با ارائه نمودارها نتایج به تجزیه و تحلیل یافته ها پرداخته شده است.

## 2-روش انجام آزمایش

### 2-1- مواد آزمایش

برای کاربردی بودن نتایج، ماده آزمایش شده از مواد مصرفی در صنایع انتخاب شده است. متداول ترین مواد مورد استفاده در صنعت آلومینیوم های 7075، 6061، 2024 و 1050 می باشند. با توجه به هزینه کمتر آلومینیوم 1050 نسبت به سه مورد دیگر، برای ساخت قطعات از این ماده استفاده گردید. مدول الاستیسیته (GPa) و ضریب پواسون این ماده به ترتیب 71 و  $0.33 \text{ g/m}^2$  می باشد [20]. برای ساخت وصله از الیاف شیشه با  $200 \text{ g/m}^2$  با مشخصات فنی T(90)/M200-E10 استفاده شده است. زاویه T90، زاویه بین الیاف های طولی و عرضی است که در این الیاف قرار دارند. همچنین حرف M اختصار کلمه MAT به معنای حصیری بودن و عدد 200 جرم واحد سطح پارچه برحسب  $\text{g/m}^2$  را نشان می دهد. حرف E به معنی نوع الیاف شیشه است و عدد 10 معرف تعداد تارهای موجود در هر رشته از الیاف می باشد. رزین استفاده شده برای ساخت وصله ها با نام اختصاری LY 5052

<sup>1</sup> Hardner

<sup>2</sup> Huntsman

<sup>3</sup> Wirecut

جدول 2 نتایج آزمایش زبری سنجی

Table 2 Results of roughness test

Ra( $\mu\text{m}$ )	شماره سنباده	Ra( $\mu\text{m}$ )	شماره سنباده
0.33	400	0.53	40
0.27	600	0.40	100

## 4-2- آزمایش خستگی

برای انجام آزمایش، از دستگاه Instron 8502 استفاده شده است. این دستگاه توانایی اعمال بار به میزان 30 ton به صورت استاتیکی و 10 ton به صورت خستگی و دینامیکی را دارا می‌باشد. شکل بارگذاری می‌تواند سینوسی، مربعی و یا به طور دلخواه در نظر گرفته شود. فرکانس بار نیز بین 1-200 Hz قابل تنظیم است. دستگاه دارای سه بخش اصلی سیستم کامپیوتری، سیستم هیدرولیک و سیستم بارگذاری می‌باشد. سیستم کامپیوتر وظیفه کالیبراسیون سیستم، اعمال بار و ذخیره اطلاعات آزمایش را بر عهده دارد. وظیفه سیستم هیدرولیک قفل لبه‌های قطعه در دو فک بالا و پایین و اعمال بار از طریق فک بالایی است. در این مطالعه پس از کالیبره کردن سیستم، قطعه به صورت عمودی بین دو فک قرار داده می‌شود. نحوه قرار گرفتن قطعه در دستگاه در شکل 2 نشان داده شده است. در آزمایش‌ها، تمامی قطعات با بارگذاری از نوع سینوسی با بیشینه نیروی 19 kN، نسبت تنش 0.1 و فرکانس 20 Hz انجام پذیرفت.



Fig. 2 Fixing test pieces in the fatigue machine

شکل 2 نحوه قرارگیری نمونه روی دستگاه

## 3-نتایج و بحث

## 3-1-- بررسی نتایج تجربی مراحل شکست

با توجه به این که ترک روی قطعه توسط هات وایر ایجاد شده است، حالت دایروی در انتهای ترک وجود دارد و با شروع اعمال بار خستگی رشد ترک اتفاق نمی‌افتد. بنابراین لازم است که در ابتدا ترک واقعی روی قطعه ایجاد شود. در واقع می‌بایست چندین سیکل طی شده تا ترک به صورت واقعی شود و پس از این مرحله رشد ترک خستگی اتفاق بیفتد. با ادامه اعمال بار

مناسب از رزین را با خشک‌کن ترکیب کرده و مواد را هم زده تا ترکیبی کاملاً یک دست بدست بیاید. الیاف شیشه را به ترتیب روی سطح واکس زده قرار داده و با استفاده از روش دستی پارچه‌ها آغشته به رزین می‌شود. پس از قرار دادن سه لایه الیاف شیشه یک لایه الیاف داکرون نیز روی سطح انتهایی قرار داده می‌شود. دلیل استفاده از داکرون این است که در انتهای کار با جدا کردن این لایه از سطح وصله، سطحی زبر برای چسبیده شدن بهتر وصله به قطعه ایجاد شود. پس از اتمام مراحل لایه‌گذاری برای بدست آوردن بهترین نتیجه و خروج رزین اضافی لایه‌ها از سیستم مکش استفاده گردید. برای این کار روی کامپوزیت ساخته شده، نایلون وکیوم قرار داده شده و با استفاده از دو درگاه متصل به سیستم مکش، رزین اضافی از قطعه خارج شده است. در انتها پس از خشک شدن قطعه در کوره و جدا کردن لایه داکرون از روی وصله‌ها، کامپوزیت به اندازه مورد نیاز برش داده می‌شود. نسبت وزنی رزین به الیاف در وصله ساخته شده در حدود 1:1 می‌باشد. در آخرین مرحله ساخت قطعات، دو بخش چسب Araldite 2015 را با نسبت وزنی مساوی ترکیب کرده و چسب حاصل روی طرف زبر وصله مالیده می‌شود. وصله روی ترک ایجاد شده در آلومینیوم قرار داده و وزنه‌ای روی وصله قرار داده می‌شود. پس از حدود 2 ساعت انتظار، چسب خشک شده و قطعه آماده می‌گردد. در شکل 1 مراحل ساخت به همراه نمونه‌ای از قطعه آماده شده برای آزمایش نشان داده شده است.

## 3-2- آزمون زبری سنجی

برای بدست آوردن مقدار زبری ایجاد شده از پارامتر Ra استفاده می‌شود. این پارامتر نشان دهنده معدل ارتفاع ناهمواری‌ها نسبت به خط مرکزی می‌باشد و زبری سطح میانگین نامیده می‌شود. در این روش پس از آماده‌سازی سطوح آلومینیومی سنسور دستگاه زبری سنج بر روی محل مورد نظر حرکت داده و میزان ناهمواری‌ها بر روی قطعه بدست می‌آید. نتایج حاصل در جدول 2 ارائه شده است.



Fig. 1 Manual layering (top right), Suction system (top left) and cracked piece with composite patch (down)

شکل 1 نحوه لایه‌چینی به روش دستی (تصویر بالا راست)، اجرای سیستم مکش (تصویر بالا چپ) و قطعه ترک خورده ترمیم شده با وصله کامپوزیتی (تصویر پایین)

می توان زیاد بودن عمق زبری ها دانست که چسب به این منافذ وارد نمی شود و در نتیجه سطح چسبندگی بین قطعات کمتر شده و عمر قطعات کاهش پیدا می کند.

با توجه به شکل 14 این روند کاهشی با افزایش زبری مشهودتر است، به طوری که با افزایش زبری تا شماره سنباده 40، چسبندگی آنقدر کاهش یافته که جدایش بین وصله و ورق آلومینیومی اتفاق می افتد، اما در مابقی قطعات مورد بررسی جدایش کامل بین وصله و ورق اتفاق نیافتاده است. همچنین با مقایسه نتایج جدول 7 و جدول 8 مشاهده می شود که عمر قطعه ترمیم شده در حدود 3 برابر عمر قطعه ترمیم نشده است.

جدول 7 نتایج تجربی عمر آزمون خستگی قطعه ترمیم نشده

Table 7 Experimental results of lifetime of unrepaired samples in the fatigue test

شماره سنباده	عمر (چرخه)	شماره سنباده	عمر (چرخه)
40	2300	600	2900
100	2710	-----	2950
400	2780		

جدول 8 نتایج تجربی عمر آزمون خستگی قطعه ترمیم شده

Table 8 Experimental results of lifetime of repaired samples in the fatigue test

شماره سنباده	نتایج آزمون عمر (چرخه)	میانگین
40	8140	7983±140
100	8700	8230±435
400	8580	9201±468
600	9815	11495±1520
-----	10890	10686±171

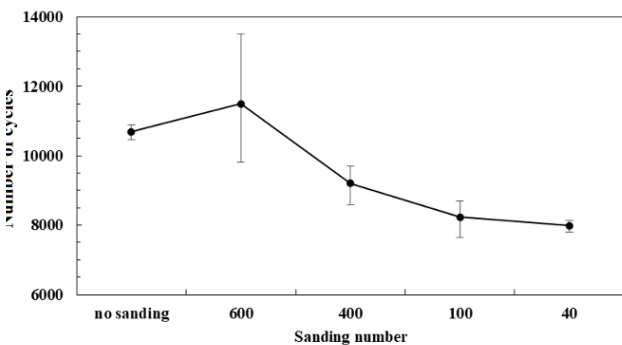
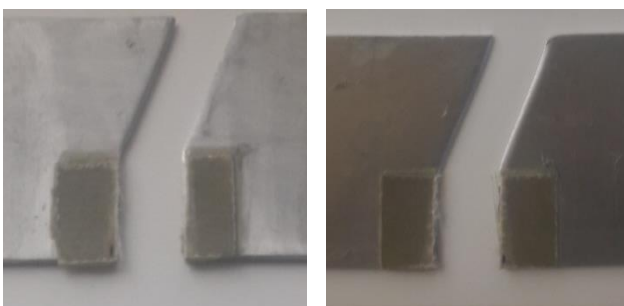


Fig. 13 Experimental results of effects of adhesive properties on lifetime of repaired samples

شکل 13 نتایج تجربی تأثیر زبری بر عمر قطعات ترمیم شده



خستگی ترک رشد پیدا می کند تا زمانی که طول ترک به طول ترک بحرانی برسد. در این صورت حالت مویی شکل در ادامه قطعه بوجود آمده و در نهایت قطعه شکست می خورد. در شکل 12 مراحل شکست قطعه به صورت مرحله ای در طول آزمون خستگی نشان داده شده است. در شکل 12 (تصویر پایین) مقطع شکست قطعه در نمونه بدون وصله دیده می شود. بخش اول ترک ایجاد شده بوسیله دستگاه هات وایر ایجاد شده و بخش دوم ترک رشد کرده به وسیله خستگی است. در بخش سوم نیز شکست نهایی قطعه اتفاق افتاده است.

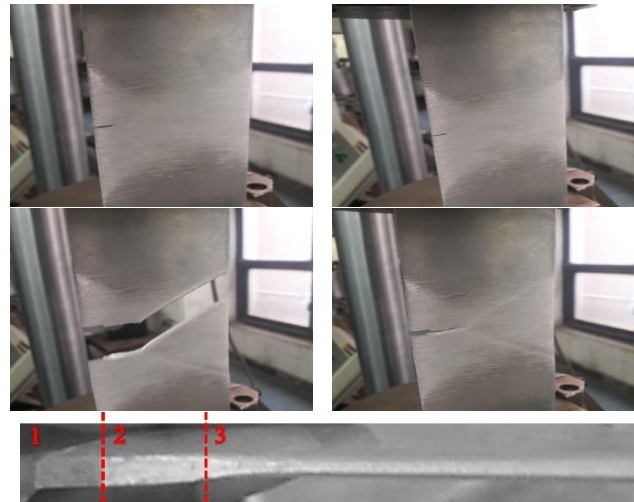


Fig. 12 Fracture steps in the fatigue test-the beginning of the test (top right), the actual cracks (top left), the growth of the cracks and the end of piece thinning (middle right), the final failure and separation (middle left) and fatigue fracture breakdown section in the simple sample (down)

شکل 12 مراحل شکست قطعه در آزمون خستگی - شروع آزمایش (بالا راست)، ایجاد ترک واقعی (بالا چپ)، رشد ترک و مویی شدن انتهای قطعه (وسط راست)، شکست نهایی و جدایش (وسط چپ) و مقطع شکست خستگی در نمونه بدون وصله (پایین)

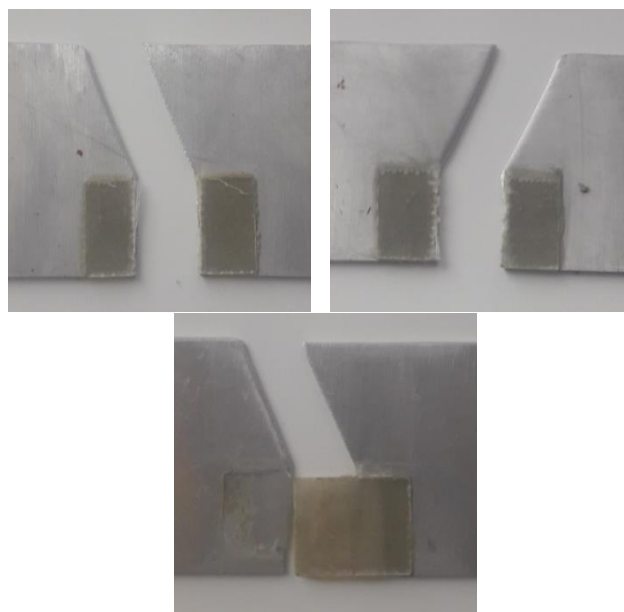
### 2-3- بررسی نتایج تجربی تأثیر زبری بر چسبندگی و عمر خستگی

در ابتدا ورق آلومینیوم ترک خورده را پس از ایجاد زبری به وسیله سنباده، آزمایش خستگی کرده و برای تمامی انواع سنباده این آزمایش یک بار انجام پذیرفته است. نتایج عمر هر یک از این حالات در جدول 7 نشان داده شده است. در صورتی که حالت عدم وجود زبری را به عنوان حالت مرجع قرار داده شود، از نتایج بدست آمده می توان نتیجه گرفت که با ایجاد زبری و کاهش کیفیت سطح، عمر قطعات کاهش پیدا کرده است. البته این کاهش عمر را می توان در زبری با شماره سنباده 600 صرف نظر کرد. در قطعه با شماره سنباده 40 این مقدار کاهش عمر قابل توجه بوده و تأثیر منفی آن در عمر قطعه مشهود است.

در حالت قطعه ترمیم شده، قطعه برای تمامی انواع سنباده، سه مرتبه مورد آزمایش قرار داده شده که نتایج حاصل در جدول 7 و شکل 13 آمده است. همان طور که نتایج جدول نشان می دهد، قطعاتی که با سنباده 600 زبر شده اند، افزایش عمر در قطعه اتفاق افتاده است که به دلیل افزایش سطح تماس بین قطعه و وصله می باشد.

از طرف دیگر در زبری های بالاتر عمر قطعه شروع به کمتر شدن کرده است، که دلیل اول کمتر شدن کیفیت سطح است و همچنین با وجود افزایش زبری چسبندگی بین قطعات کمتر شده است. دلیل این اتفاق را

- Patches" Composite Structures, Vol. 89, No. 2, pp. 270-274, 2009.
- [6] Bouiadjra, B. B., Benyahia, F., Albedah, A., Bouiadjra, B. A. B. and Khan, S. M., "Comparison between Composite and Metallic Patches for Repairing Aircraft Structures of Aluminum Alloy 7075 T6" International Journal of Fatigue, Vol. 80, pp. 128-135, 2015.
- [7] Schubbe, J. J., Bolstad, S. H. and Reyes, S., "Fatigue Crack Growth Behavior of Aerospace and Ship-Grade Aluminum Repaired with Composite Patches in a Corrosive Environment" Composite Structures, Vol. 144, pp. 44-56, 2016.
- [8] Aljabar, N., Zhao, X., Al-Mahaidi, R., Ghafoori, E., Motavalli, M. and Powers, N., "Effect of Crack Orientation on Fatigue Behavior of Cfrp-Strengthened Steel Plates" Composite Structures, Vol. 152, pp. 295-305, 2016.
- [9] Kumar, A. M. and Hakeem, S., "Optimum Design of Symmetric Composite Patch Repair to Centre Cracked Metallic Sheet" Composite Structures, Vol. 49, No. 3, pp. 285-292, 2000.
- [10] Bouiadjra, B. B., Bouanani, M. F., Albedah, A., Benyahia, F. and Es-Saheb, M., "Comparison between Rectangular and Trapezoidal Bonded Composite Repairs in Aircraft Structures: A Numerical Analysis" Materials & Design, Vol. 32, No. 6, pp. 3161-3166, 2011.
- [11] Fekih, S., Albedah, A., Benyahia, F., Belhouari, M., Bouiadjra, B. B. and Miloudi, A., "Optimisation of the Sizes of Bonded Composite Repair in Aircraft Structures" Materials & Design, Vol. 41, pp. 171-176, 2012.
- [12] Wu, C., Zhao, X., Duan, W., Emdad, M. R. and Al-Mahaidi, R., "Fatigue of Center Cracked Steel Plates with Uhm Cfrp Plate Strengthening" in Proceeding.
- [13] Rahmani Kalestan, M., Moayeri Kashani, H., Pourkamali Anaraki, A. and Ashena Ghasemi, F., "Experimental and Numerical Investigation of Fatigue Crack Growth in Aluminum Plates Repaired by Fml Composite Patch" International Journal of Structural Integrity, Vol. 5, No. 4, pp. 242-252, 2014.
- [14] Yu, Q., Zhao, X., Chen, T., Gu, X. and Xiao, Z., "Crack Propagation Prediction of Cfrp Retrofitted Steel Plates with Different Degrees of Damage Using Bem" Thin-Walled Structures, Vol. 82, pp. 145-158, 2014.
- [15] Shibuya, Y., Fujimoto, S., Aoki, D., Sato, M., Shirahata, H., Fukunaga, H. and Sekine, H., "Evaluation of Crack Growth in Cracked Aluminum Panels Repaired with a Bonded Composite Patch under Cyclic Loading" Advanced Composite Materials, Vol. 10, No. 4, pp. 287-297, 2001.
- [16] Chung, K.-H. and Yang, W.-H., "A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior of Thick Aluminum Panels Repaired with a Composite Patch" Composite Structures, Vol. 60, No. 1, pp. 1-7, 2003.
- [17] Errouane, H., Sereir, Z. and Chateaufneuf, A., "Numerical Model for Optimal Design of Composite Patch Repair of Cracked Aluminum Plates under Tension" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 49, pp. 64-72, 2014.
- [18] Jian-Bin, H., Xu-Dong, L. and Zhi-Tao, M., "Fatigue Behavior of Thick Center Cracked Aluminum Plates Repaired by Two-Sided Composite Patching" Materials & Design, Vol. 88, pp. 331-335, 2015.
- [19] Hosseini, K., Safarabadi, M., Ganjiani, M., Mohammadi, E. and Hosseini, A., "Experimental and Numerical Fatigue Life Study of Cracked Al Plates Reinforced by Glass/Epoxy Composite Patches in Different Stress Ratios" Mechanics Based Design of Structures and Machines, pp. 1-17, 2020.
- [20] AZOM, 2018.



**Fig. 14** Experimental results of fracture in repaired samples- sample without roughness (top right), sample with sanding number 600 (top left), sample with sanding number 400 (middle right), sample with sanding number 100 (middle left) and sample with sanding number 40 (down)

**شکل 14** نتایج تجربی شکست قطعات ترمیمی زبر شده- قطعه بدون زبری (بالا راست)، قطعه زبر شده با سنباده 600 (بالا چپ)، قطعه زبر شده با سنباده 400 (وسط راست)، قطعه زبر شده با سنباده 100 (وسط چپ) و قطعه زبر شده با سنباده 40 (پایین)

#### 4-جمع بندی

در این مقاله به منظور افزایش عمر قطعات ترک خورده به بررسی راهکاری برای افزایش عمر قطعات ترمیم شده با استفاده از وصله کامپوزیتی و اتصال چسبی پرداخته شد. بدین منظور با انجام آزمایش خستگی روند افزایش عمر مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج مشاهده گردید که ایجاد زبری با استفاده از سنباده 600 در حدود 7.6٪ افزایش عمر ایجاد نموده که این افزایش نشان دهنده افزایش سطح تماس بین قطعات بوده است. البته ایجاد زبری های بالاتر نتیجه عکس داده و در قطعات زبر شده با سنباده 40، عمر در حدود 25٪ کاهش پیدا کرده و نوع شکست قطعه از حالت شکست وصله به حالت شکست چسب تبدیل شده است.

#### 5- مراجع

- [1] Duong, C. N. and Wang, C. H., "Composite Repair: Theory and Design", Elsevier, 2010.
- [2] Chue, C.-H. and Liu, T. J.-C., "The Effects of Laminated Composite Patch with Different Stacking Sequences on Bonded Repair" Composites Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 223-230, 1995.
- [3] Denney, J. J., "Fatigue Response of Cracked Aluminum Panel with Partially Bonded Composite Patch", Air Force Inst Of Tech Wright-Patterson Afb Oh, pp. 1995.
- [4] Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H., "Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch" Journal of structural engineering, Vol. 129, No. 2, pp. 186-196, 2003.
- [5] Khalili, S., Ghadjar, R., Sadeghinia, M. and Mittal, R., "An Experimental Study on the Charpy Impact Response of Cracked Aluminum Plates Repaired with Gfrp or Cfrp Composite