مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۴۰۰/ دوره ۱۱/ شماره ۳/ صفحه ۸۵-۹۶

نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

دانشگاه صنعتی شاهرود

DOR:

بررسی تجربی پارامترهای هندسی وصله‌های کامپوزیتی زمینه فلزی جهت تعمیر قطعات آلومینیومی ترک‌دار

رضا ضامنی مفخم[۱]، علیرضا نظام آبادی[۲،*] و فرزان براتی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

[۲] استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

[۳] دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۴

چکیده

تعمیر قطعات ترک‌دار با استفاده از وصله روشی متداول جهت بازیابی خواص مکانیکی و استحکام کششی است. کارایی این گونه وصله‌ها را می توان با بدست آوردن حداکثر میزان نیروی تحمل شده توسط قطعه ترمیم شده و مقایسه آن با قطعه ترمیم نشده به دست آورد. هدف از این پژوهش، بررسی روش دیفیوژن استفاده شده در ترمیم قطعات ترک‌دار آلومینیومی و ارزیابی وصله‌ها و الیاف استفاده شده است. در این مطالعه روش دیفیوژن برای اتصال وصله آلومینیومی برای تعمیر ترک مرکزی در ورق نازک آلومینیومی مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی ریز ساختارها نشان داد که با استفاده از روش دیفیوژن می‌توان قطعات را به یکدیگر جوش داد و بدون استفاده از چسب به قطعه مناسب دست پیدا کرد. فرآیند تعمیر قطعات ترک‌دار ساخته شده از آلومینیوم یا آلیاژهای آن در این پژوهش شامل استفاده از سه نوع وصله و الیاف مختلف و شرایط متفاوت است، و در نهایت فشردن وصله و قطعه روی هم تحت گرما در مدت زمانی معین است. قطعات تعمیر شده تحت بارگذاری شبه استاتیکی کششی قرار گرفته و میزان ماکزیمم نیروی تحمل شده قطعه در حالات مختلف به دست آمده است.

کلمات کلیدی: تعمیر ترک؛ اتصال دیفیوژن؛ وصله آلومینیومی؛ الیاف.

Experimental Analysis on the Geometric Parameters of the Composite Metal Matrix Patch to Repair Cracked Aluminum Part

R. Zameni Mofakham[1], A.R. Nezamabadi[2,*], F. Barati[3]

[1] Ph.D. Student, Mech. Eng., Islamic Azad Univ., Arak, Iran.

[2] Assoc. Prof., Mech. Eng., Islamic Azad Univ., Arak, Iran.

[3] Assoc. Prof., Mech. Eng., Islamic Azad Univ., Hamedan, Iran.

Abstract

Repairing cracked parts using patches is a common method to restore mechanical properties and tensile strength. The efficiency of such patches can be achieved by obtaining the maximum amount of force borne by the repaired part and comparing it with the non-repaired part. The purpose of this study is to investigate the diffusion method used in the repair of cracked aluminum parts and to evaluate the patches and fibers used. In this study, the diffusion method is used to connect the aluminum patch to repair the central crack in the aluminum thin sheet. Examination of microstructures showed that using the diffusion method, parts can be welded together and a suitable part can be obtained without the use of glue. The process of repairing cracked parts made of aluminum or its alloys in this study involves the use of three types of patches and different fibers and different conditions, and finally pressing the patch and the piece together under heat for a certain period of time. The repaired parts are subjected to quasi-static tensile loading and the maximum amount of force borne by the part is obtained in different states.

Keywords: Repair cracks; Diffusion bonding; Aluminum patch; Fiber.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۸۱۶۱۵۱۵۳ فکس: ۰۸۶۳۴۱۳۴۰۲۵

آدرس پست الکترونیک: alireza.nezamabadi@gmail.com

۱- مقدمه

از سال‌های خیلی دور صنایع مختلف به منظور دستیابی به قطعات با وزن کمتر و استحکام بالاتر درصدد کشف راه حل برای ساخت این گونه مواد بودند که بالاخره نتیجه بخش شد و کامپوزیت‌ها قدم به عرصه صنعت گذاشته که نمونه ساده و بارز آن اتصال ورق‌ها (فلز با فلز، فلز با الیاف) تحت عنوان جوش نفوذی با فشار و دما بدون ایجاد حوضچه است که می‌تواند انتظارات خواسته شده را برآورده سازد [۱].

فلزات سبک مواد بسیار مناسب در مهندسی هستند. یک ماده فلزی دارای گستره وسیعی از خواص قابل کنترل است که این خواص با انتخاب عناصر آلیاژی و فرآیندهای تولید ماده کنترل می‌شود. استفاده گسترده از فلز نه تنها باعث ایجاد تغییرات استحکام در فلزات می‌شود، بلکه سهولت نسبی و قیمت پایین تولید قطعات مهندسی با گستره وسیعی از روش‌های تولید را نیز نشان می‌دهد [۲]. برای رسیدن به خواص مطلوب مانند، مقاومت در برابر خستگی، سایش و استحکام بالا در عین دارا بودن خواص مانند کاهش ضریب انبساط حرارتی و رسانش باید زمینه فلزی با یک تقویت کننده مناسب ترکیب شود. از مهمترین چالش‌ها در زمینه اشاعه کاربردهای کامپوزیت زمینه فلزی، تولید بهترین حالت ترکیب فلز با غیر فلزات است. در این زمینه فرآیند اتصال و جوش دادن کامپوزیت‌ها بسیار مهم و با اهمیت است [۳].

وجود یک ترک در قطعه‌ای از یک ماشین، خودرو یا سازه ممکن است آن را ضعیف کند، بدین ترتیب این قطعه بواسطه شکسته شدن به دو یا چند تکه تخریب می‌شود. این امر می‌تواند در تنش‌های کمتر از استحکام تسلیم رخ دهد. زمانی که جلوگیری از ایجاد ترک مشکل باشد، یک روش خاص به نام مکانیک شکست می‌تواند در کمک به انتخاب مواد و طراحی قطعات استفاده شود تا احتمال شکست کم شود. مطالعه و کاربرد مکانیک شکست از نظر مهندسی بسیار مهم است، زیرا ترک‌ها و عیوب ترک مانند بیشتر از آن چیزی رخ می‌دهند که ما تصور می‌کردیم. به عنوان مثال، در بازرسی‌های متناوب هواپیمای بزرگ تجاری، ترک‌های متعددی را رویت کردند که باید تعمیر و ترمیم شوند. ترک‌ها یا عیوب ترک مانند نیز معمولا در سازه‌های کشتی، سازه‌های پل، مخازن تحت فشار و لوله کشی، ماشیت آلات سنگین و خودروهای زمینی رخ می‌دهند [۴]؛ همچنین مطالعه این عیوب در قطعات مختلف راکتورهای هسته‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است [۵]. تعمیراتی که باید به دلیل وجود ترک‌ها انجام شوند، ممکن است توسط جایگزینی یک قطعه یا اصلاح آن مثلا با ماشین‌کاری کنار یک ترک کوچک برای هموار شدن سطح یا بوسیله تقویت ناحیه ترک‌دار به شیوه‌ای مشابه انجام شوند.

با توجه به تحقیقات انجام شده، تاکنون حضور همزمان الیاف تقویت کننده و وصله‌های کامپوزیتی زمینه فلزی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بر این اساس در این کار تحقیقاتی، انواع الیاف و وصله‌های کامپوزیتی زمینه فلزی جهت ترمیم قطعات کامپوزیتی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- روش‌های تعمیر و ترمیم ترک‌ها:

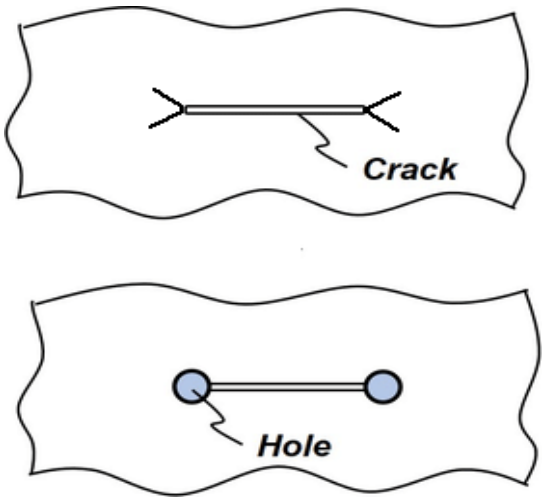
ایجاد و رشد ترک در قطعات و سازه‌ها یک امر اجتناب ناپذیر است. عامل وقوع این ترک‌ها می‌تواند نیروهای متناوب وارد بر قطعه، کشیدگی ناشی از عملیات جوشکاری، عیوب و حفره های ناشی از ریخته‌گری، تنش‌های حرارتی و موارد دیگر باشد؛ لذا تعویض یک قطعه یا قسمتی از سازه شاید به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشد و یا بسیار دشوار و زمان‌بر باشد، بنابراین ارایه روش‌های تعمیری بسیار سودمند است و استفاده از تعمییرات ترک‌ها در صنایع هوایی و سازه‌های فولادی بخصوص در پل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶].

روش‌های تعمیر و ترمیم ترک‌ها به شیوه‌های مختلف انجام می‌گیرد که بسته به چگونگی نیروی وارد، شکل ترک و نیز جنس ماده‌ایی دارد که ترک در آن بوجود می‌آید. روش‌های اصلی تعمیرات ترک را می‌توان بدین صورت بیان کرد:

۱- استفاده از چاک‌های تعمیری
۲- تعمیر به وسیله سوراخ‌های متوقف کننده
۳- ترمیم به کمک صفحات تقویت کننده پرچ شده یا چسبیده روی سطح دارای ترک
۴- چفت کردن با استفاده از پیچ و مهره و یا دوختن دو سطح مجزا
۵- جوش کردن دو سطح مجزا و یا پر کردن با مواد ترمیمی

روش‌های فوق راه‌کارهای اصلی مقابله با ترک‌های ایجاد شده می‌باشند [۷].

در یکی از روش‌های متداول برای ترمیم قطعات ترک‌دار، می‌توان با ایجاد سوراخ در نوک ترک از مقدار شدت تنش در نوک ترک کاسته و بدین وسیله از شکست آن جلوگیری نمود. این کار را حتی با ایجاد شکاف‌های جانبی در نوک ترک می‌توان انجام داد. شکل۱ نحوه قرارگیری سوراخ‌های متوقف کننده و شکاف‌های جانبی در نوک ترک را نشان می‌دهد؛ همچنین در شکل ۲ نمونه‌ای از کاربرد این روش نشان داده شده است. این روش‌ها علی‌رغم افزایش استحکام شکست سازه ترک‌دار، باعث ضعیف شدن قطعه ترمیم‌شده در برابر عوامل خوردگی و نیروهای متناوب خستگی می‌گردند.



شکل ۱- روش ترمیمی ایجاد سوراخ‌های متوقف کننده و شکاف جانبی در نوک ترک

هدف اصلی ترمیم، برگرداندن استحکام و سختی سازه به شرایط قبل از ایجاد عیب است. استفاده از موادی هم‌جنس با عضو ترمیم شونده مثل آلومینیم طراحی را برای ترمیم آسان می‌کند. هرچند، به دلایل مختلف می‌توان از یک ماده جایگزین برای ترمیم استفاده کرد [۸].

مواد مرکب با توجه به مزایایی همچون نسبت استحکام به وزن بالایی که دارند جهت تقویت سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. امروزه در صنایع استفاده از وصله‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری برای تعمیر قطعات ترک‌دار به علت افزایش مقاومت در جهت‌های خاص که احتمال رشد ترک بیشتر است متداول است. از این نوع وصله‌ها با توجه به مزایای بسیاری که دارند جهت تقویت سازه‌ها و برای تعمیر سازه‌های هوایی مخصوصاً قطعات هواپیماها، مخازن تحت فشار، لوله‌های انتقال دهنده مواد و دیگر صنایع استفاده می‌شود [۹]. در جدول ۱ خلاصه‌ای از مزیت‌ها و معایب وصله‌ها از جنس فلز و کامپوزیت نوشته شده است.

شکل ۲- ترمیم ترک با سوراخ متوقف کننده

جدول ۱- خلاصه‌ای از مزیت‌ها و عیب‌های جنس وصله‌های چسبی (قیدی)

جنس ماده	مزیت‌ها	عیب‌ها
فلز	شناخت کامل خواص ایزوتروپیک بودن ضریب انبساط حرارتی بالا	احتیاج به اماده‌سازی سطح حساس نسبت به خستگی و خوردگی مشکل برای استفاده در سطوح
کامپوزیت	وزن کم مقاومت در برابر خستگی و خوردگی سختی ویژه‌ی بالا قابلیت شکل‌پذیری عالی برای هر سطحی	ضریب انبساط خطی پایین

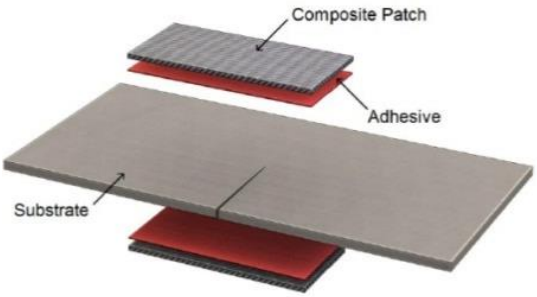
مطالعات نشان داده است که استفاده از وصله کامپوزیتی سبب افزایش عمر خستگی قطعه می‌شود. استفاده از این نوع وصله‌ها به‌عنوان تقویت کننده جهت ترمیم سازه‌های فلزی ترک‌دار هواپیما در نیروی هوایی ایالات متحده آمریکا و صنایع هوا فضا استفاده شده و به علت راندمان بالا و صرفه اقتصادی مورد استقبال قرار گرفته است این نوع تعمیر سبب افزایش وزن زیاد سازه نمی‌گردد که در سازه‌های هوایی دارای اهمیت است؛ همچنین این نوع روش تعمیر برخلاف روش‌های مکانیکی دارای محدودیت در تعداد دفعات تعمیر برای بار دوم و بیشتر نمی‌باشد و تعمیر قطعات دارای ضخامت بیشتر نیز با وصله‌های کامپوزیتی امکان‌پذیر است [۱۰].

۳- ترمیم قطعات ترک‌دار با وصله کامپوزیتی

ترمیم قطعات با استفاده از چسباندن وصله کامپوزیتی، برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۷۰ گروهی تحقیقاتی در مرکز تحقیقاتی نیروی هوائی استرالیا برای تعمیر بال و بدنه هواپیما و هلی‌کوپترهای قدیمی مورد استفاده قرار گرفت.

شکل ۳ نحوه قرار گرفتن وصله کامپوزیتی روی ورق ترک‌دار را نشان می‌دهد؛ همچنین در شکل ۴ تقویت یک طرفه و دوطرفه، برای یک ورق ترک‌دار به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.

تعمیر ورق‌ها با استفاده از وصله‌ها از نظر هندسه تعمیر به دو صورت متقارن و نامتقارن صورت می‌گیرد. در مقایسه با روش‌های ذکر شده، ترمیم ترک با استفاده از چسباندن وصله تقویت‌کننده کامپوزیتی، هیچ‌گونه تمرکز تنش اضافه‌ای را ناشی از سوراخ‌کاری و... به قطعه ترک‌دار وارد نمی‌کند، در نتیجه تمرکز تنش در سازه به حداقل می‌رسد، این در حالی



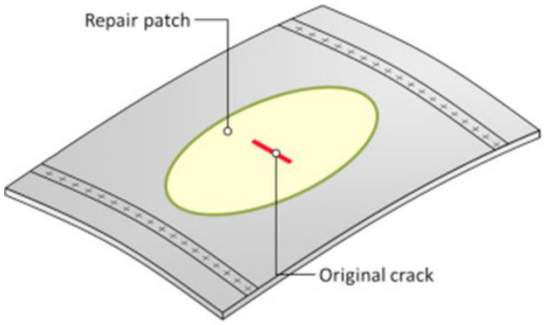
شکل ۳- نحوه قرارگیری وصله کامپوزیتی روی ورق ترک‌دار

شکل ۴- مقایسه بین روش‌های تقویت یک‌طرفه و دوطرفه ورق ترک‌دار

است که در روش استفاده از سوراخ متوقف کننده و یا روش پرچ کردن وصله آلومینیومی، به دلیل ایجاد سوراخ در قطعه ترک‌دار، تمرکز تنش ناخواسته‌ای به قطعه تحمیل می‌شود که این مسئله ضریب اطمینان تعمیر را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. از طرف دیگر لایه‌های کامپوزیتی چسبانده شده روی ورق، می‌توانند به‌صورت لایه‌ای عایق در برابر رطوبت و عوامل ایجادکننده خوردگی روی سطوح ترک، عمل نموده و از بحرانی‌تر شدن وضع ترک جلوگیری نمایند [۱۱].

از آنجائی که وصله کامپوزیتی به‌صورت یکپارچه و پیوسته، با استفاده از چسب بر محدوده ترک چسبانده می شود، مقدار نیروی بیشتری را از ورق ترک‌دار جذب نموده و درنتیجه، راندمان بالاتری نسبت به روش‌های دیگر خواهد داشت. علاوه بر آن مواد کامپوزیتی دارای خصوصیات مکانیکی بارزی هستند که استفاده از آن‌ها را به‌عنوان تقویت کننده در صنایع مختلف امکان‌پذیر می‌کند. این مواد علی‌رغم وزن و چگالی کم دارای استحکام بالای استاتیکی می‌باشند. وجود پارامترهای مختلف طراحی مانند جنس، ضخامت و جهت الیاف در مواد کامپوزیتی عاملی است که دست مهندس طراح را برای استفاده از این مواد در شرایط گوناگون باز می‌گذارد، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌کنید، می‌توان وصله‌های کامپوزیتی را روی سطوح انحنادار مانند بال هواپیما و یا بدنه مخازن تحت‌فشار، مورداستفاده قرارداد [۱۲].

در این پژوهش به بررسی اثر وصله، به‌عنوان راهکاری برای افزایش مقاومت باقیمانده قطعات، بر نیروی نهایی تحمل شده ترک پرداخته می‌شود؛ همچنین علاوه بر بررسی تأثیر نوع الیاف استفاده شده در ساخت قطعات، شکل هندسی وصله‌ها شامل وصله پیکانی، اچ شکل و شش ضلعی روی حداکثر نیروی قابل تحمل قطعه تعمیر شده نسبت به قطعه ترک‌دار نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۵- تقویت سازه انحنادار با چسباندن وصله کامپوزیتی روی آن

۴- مواد و فرآیند آزمایش

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶ که دارای استحکام کششی ۲۶۰ Mpa، استحکام تسلیم ۱۱۵ Mpa و دارای ازدیاد طول ۲۲ درصد است؛ به جهت ساخت قطعه ترک‌دار و وصله استفاده شده است. آنالیز شیمیایی مواد اولیه در جدول ۲ آورده شده است. برنامه آزمایش انجام شده در این تحقیق شامل، آزمون‌های استحکام کششی در حالت قطعه تعمیر شده با وصله‌های پیکانی، شش‌ضلعی و اچ شکل و استفاده از الیاف شیشه، کولار، کربن یک‌جهته و کربن دوجهته می‌باشد. ابعاد نمونه‌ها ۱۲۰×۴۰×۱ mm است که از ورق‌های آلومینیوم ۵۰۸۶ بریده شده‌اند. یک شکاف اولیه به طول ۱۰ mm و با زاویه ۹۰ درجه نسبت به بارگذاری توسط لیزر در مرکز قطعه ایجاد گردیده که در شکل ۶ نمایش داده شده است. برای نگه‌داشتن نمونه درون گیره‌های دستگاه، از هر طرف ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. خواص مواد و مشخصات هندسی صفحه ترک‌دار و وصله در جدول ۳ نمایش داده شده است.

نمونه آلومینیومی بدون ترک در شکل ۷ و قطعه با طول ترک 10mm در شکل ۸ نشان داده شده اند. شکل ۹ تصویری از ترک ایجاد شده توسط لیزر به طول 10mm با بزرگنمایی ۱۰ برابر را نشان داده است.

شکل ۱۰ تصویر قطعه ساخته شده به روش دیفیوژن[1] با ترکی به طول 10mm پس از انجام تست کشش تا گسیختگی کامل را نمایش می‌دهد.

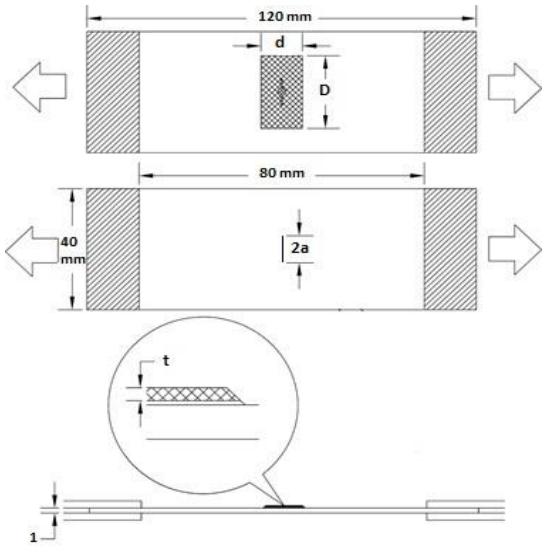
[1] Diffusion

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم

alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
۵۰۸۶	۰/۴	۰/۵	۰/۳	۰/۵	۰/۴	۰/۲	۰/۲	۰/۱

جدول ۳- ابعاد و خواص مواد

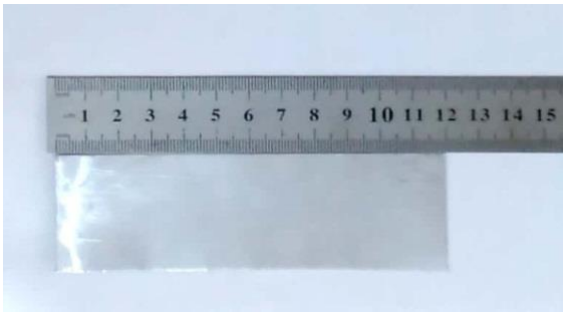
Layer	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Material properties
Aluminum alloy Al5086	۱۲۰	۴۰	۱	E =۷۳/۰۱ Gpa $\vartheta = 0/33$



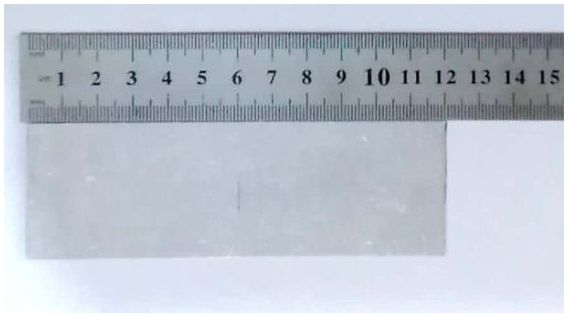
شکل ۶- تصویر شماتیک قطعه ترک‌دار تعمیر شده با وصله

۵- فرآیند ساخت کامپوزیت زمینه فلزی به روش دیفیوژن

تحقیق حاضر مربوط به تکنیک اتصال دیفیوژنی قطعه ترک‌دار و وصله از جنس آلومینیوم و آلیاژهای آن به‌صورت یک ساختار کامپوزیتی با استفاده از الیاف است. اتصال دیفیوژنی یک تکنیک بسیار مفید و ارزشمند برای اتصال اجزاء مخصوصاً در صنایع هوایی است و شامل تحت فشار قرار دادن قطعات گرم شده است تا اتم‌های سطح قطعات به‌صورت یک اتصال فلز با فلز به یکدیگر متصل گردند [۱۳]. آلومینیوم و اکثر آلیاژهای آن دارای یک سطح سرسخت و چسبنده از اکسید می‌باشند که این سطح مانع اتصال دیفیوژنی می‌شود. به خاطر خواص فیزیکی مطلوب آلومینیوم همانند چگالی

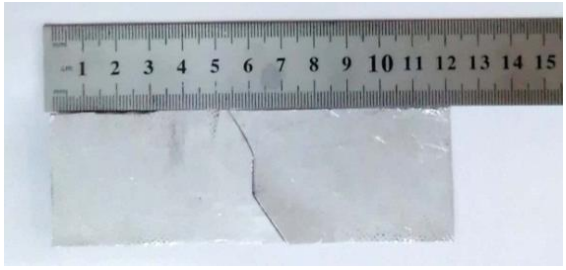


شکل ۷- نمونه بدون ترک



شکل ۸- نمونه با ترکی به طول 10mm

شکل ۹- تصویری از ترک ایجاد شده توسط لیزر به طول 10mm با بزرگنمایی ۱۰ برابر



شکل ۱۰- تصویر قطعه با ترک اولیه به طول 10mm پس از انجام تست کشش تا گسیختگی کامل

پایین و استحکام بالا یک فلز ایده‌آل برای استفاده در صنایع مختلف مخصوصاً صنایع هوایی است، اما عدم قابلیت شکل‌دهی و ساخت کامپوزیت به روش‌های متداول باعث محدودیت‌هایی در طراحی شده است. اکسید سطحی روی آلومینیوم حتی در فشار نسبی بسیار کم اکسیژن، به‌سرعت شکل می‌گیرد و برطرف کردن لایه اکسید و ایجاد یک سطح بدون اکسید جهت اتصال دیفیوژن به‌سادگی امکان‌پذیر نیست و فاصله زمانی میان انتهای آماده‌سازی سطح و فرآیند اتصال دیفیوژنی بسیار مهم است و می‌بایست در حدود بیست دقیقه و نهایتاً زیر یک ساعت در معرض هوا باشد. اجزاء در قبل از عملیات سایش به‌صورت شیمیایی و با استفاده از اسیدهای مختلف و روانسازها تا حدودی اکسید زدایی شده‌اند و انجام آزمایشات ثابت کرد که انجام فرایند شیمیایی فوق جهت از بین بردن کامل لایه اکسید مؤثر است، فقط قسمت‌هایی که تحت دیفیوژن قرار می‌گیرد، اکسید زدایی شده و لازم نیست کل سطح قطعه اکسید زدایی شود.

در این فرآیند سه پارامتر دما، فشار و زمان مهم هستند و بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. مهم‌ترین عامل در این فرآیند دما است، زیرا پدیده‌های مهم و تأثیرگذار در اتصال نفوذی مانند خزش بسیار حساس به دما هستند [۱۴]. افزایش دمای عملیات حرارتی نفوذی باعث افزایش حجم برهم‌کنش میان اتم‌های لایه پوشش و فلز پایه می‌شود. به‌طوری که کاهش دمای فرآیند موجب حذف منطقه نفوذی در فصل مشترک لایه‌های اتصال می‌شود. دمای اتصال در این روش بین ۶۰ تا ۹۵ درصد دمای ذوب فلز زمینه است. تحقیقات نشان داده است که استفاده از دماهای بالاتر به نفوذ اتم‌ها در فصل مشترک را مشکل می‌کند و باعث تغییر شکل سطح تماس می‌شود. فشار نیز عاملی تأثیرگذار است و نقش اصلی آن در فرآیند اتصال نفوذی شکستن لایه‌های اکسیدی تشکیل شده روی سطح فلز است. فشار اعمالی در این فرآیند در پژوهش‌های مختلف معمولاً در محدوده ۰/۱ تا ۲۰ MPa متغیر بوده است. اتصال به روش دیفیوژن فرایندی زمان‌بر است که با افزایش دما زمان اتصال کاهش می‌یابد. مدت زمان فرآیند و زمان نگه‌داری قطعه در دمای موردنظر، باید به‌اندازه کافی باشد تا نفوذپذیری مطلوب انجام شود؛ اما زمان زیاد و نگه‌داری بیش‌ازحد در دمای موردنظر نیز موجب کاهش خواص مکانیکی فیزیکی و شیمیایی می‌شود [۱۵].

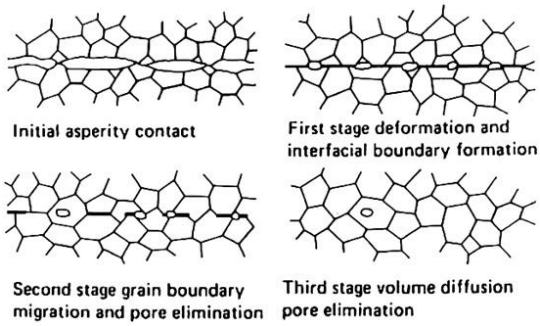
همواره سرعت نفوذ با بالا بردن فشار اعمالی و درجه حرارت شتاب می‌گیرد. حرارت لازم با استفاده از یک کوره با یک پرس غلطکی داغ یا با ایجاد مقاومت و یا به روش القایی تامین می‌شود. فشار نیز به وسیله وزن یک پرس، اختلاف انبساط حرارتی بین دو قطعه است، بهم متصل شوند و یا توسط ابزار آلاتی تأمین می‌شود که قطعات را جلو و عقب می‌کنند. تکنیک فشار تک محوره فرآیند را به جوشکاری قطعات صاف، موازی و دارای سطوح صفحه‌ای محدود می‌کند که عمود بر جهت اعمال نیرو هستند. هدف اصلی از اعمال فشار، ایجاد پیوند بین سطوح است. این اتصال ابتدا با تغییر شکل پلاستیک ناهمواری‌های میکروسکوپی سطح و سپس با خزش ایجاد می‌شود [۱۶]. مدت زمان فرآیند و زمان نگه‌داری قطعه در دمای موردنظر، باید به‌اندازه کافی باشد تا نفوذپذیری مطلوب انجام شود. دستگاه طراحی شده برای ایجاد پیوند دیفیوژنی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

شکل ۱۱- نمایی از دستگاه دیفیوژن با قابلیت تنظیم دما و فشار

در ساختارهای بلوری فشرده FCC[1] آلومینیوم، نفوذ از طریق جاهای خالی انجام می‌گیرد؛ زیرا انرژی محرکه لازم برای نفوذ توسط جای خالی در این نوع شبکه نسبت به سایر مکانیزم‌ها کمتر است. درواقع این سازوکار در اکثر فلزات به‌عنوان غالب‌ترین و مهم‌ترین سازوکار نفوذ است. به‌علاوه فرآیند تشکیل ترکیبات بین فلزی به شدت وابسته به ضخامت فلزات پایه است. میزان تشکیل فاز جدید به‌وسیله نفوذ در روش حالت جامد بستگی به نرخ نفوذ و نرخ واکنش‌ها در فصل مشترک دارد. نرخ نفوذ وابستگی شدیدی به دما دارد. بااین‌حال، عوامل دیگری مانند اندازه دانه، مهاجرت مرز دانه و چگالی نابجایی‌ها می‌توانند نرخ نفوذ را تحت تأثیر قرار دهند [۱۷].

شکل ۱۲ شروع فرآیند نفوذ و شکل ۱۳ مراحل مختلف نفوذ را در یک پیوند دیفیوژنی نمایش می‌دهد که در مرحله اول تماس اولیه بین ناهمواری‌های سطحی برقرار گشته، در مرحله دوم تغییر شکل صورت گرفته و مرز میانی تشکیل

شکل۱۲- شروع مکانیزم نفوذ



شکل ۱۳- مراحل مختلف نفوذ در اتصال دیفیوژن

[1] Face Centered Cubic

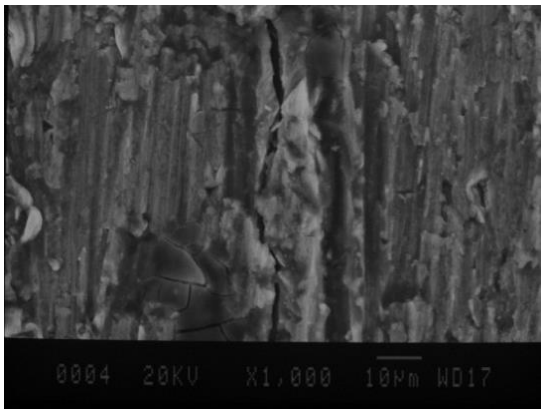
می‌شود، در مرحله سوم مهاجرت مرز دانه آغاز گشته و حفرات شروع به حذف شدن می‌کنند، در مرحله چهارم نفوذ حجمی صورت پذیرفته و حفرات حذف می‌گردند.

عکس‌های میکروسکوپی از سطح مقطع اتصال برش خورده پس از آماده‌سازی نمونه در آزمایشگاه و با استفاده از میکروسکوپ مدل jsm-840A تهیه گردیده‌اند. در این مرحله سطح نمونه با استفاده از پودرهای کاربید سیلیسم ساییده شده که روی کاغذهای مخصوص تعبیه شده‌اند و نمونه به‌صورت دستی روی کاغذ سنباده‌ای ساییده شده است که روی یک سطح تخت نظیر یک‌تکه شیشه قرار دارد و از آب به‌عنوان یک روان‌ساز استفاده شد که باعث حمل ذرات جدا از سطح نیز می‌شود، سه نوع ساینده با شماره‌های ۳۲۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ که در آن‌ها به ترتیب اندازه ذرات کاربید سیلیسم برابر ۳۳، ۲۳ و ۱۷ میکرون است، مورد استفاده قرار گرفته است. در هر یک از مراحل سایش اولیه نمونه به صورتی روی یک سطح حرکت داده شده که خراش‌ها فقط دریک جهت تشکیل شود، هنگام تعویض یک کاغذ سنباده نمونه به‌اندازه تقریبی ۴۵ درجه دوران داده شده که درنتیجه خراش‌های جدید تشکیل شده روی سطح با خراش‌های قبلی زاویه می‌سازند. سایش تا زمانی ادامه یافته که خراش‌های تشکیل شده از مراحل قبل ناپدید شوند.

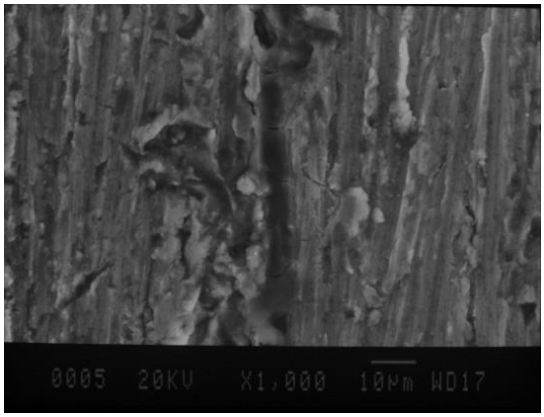
تصویر SEM[1] از سطح مقطع اتصال تشکیل شده در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر نشان داده شده است. در شکل ۱۴ تماس بین ناهمواری‌های سطحی برقرار گشته و ناهمواری‌ها در هم فرو رفته‌اند. در شکل ۱۵ مرز میانی تشکیل شده و مهاجرت مرزدانه آغاز شده است. در شکل ۱۶ نفوذ انجام گرفته و اثری از خط جدایش مشاهده نمی‌شود.

۶- نتایج و بحث

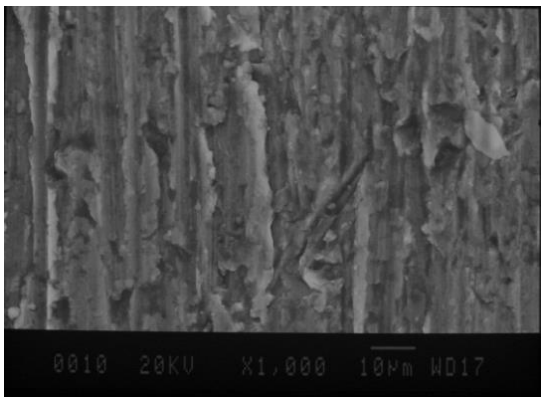
تست کشش توسط دستگاه سروو هیدرولیک سنتام ظرفیت ۱۰۰ تن انجام شد. تمامی آزمون‌ها در دمای اتاق انجام شده است. سرعت بارگذاری در تمامی آزمون‌ها ثابت و برابر 0.1mm/min است. حداقل سه نمونه برای هر شرایط برای اطمینان از صحت و دقت نتایج مورد آزمایش قرار گرفته است. در هر آزمایش بارگذاری تا گسیختگی کامل قطعه ادامه می‌یابد. در شکل ۱۷ نحوه قرارگیری نمونه تعمیر شده در فک‌های دستگاه کشش نشان داده شده است.



شکل ۱۴- تصویر SEM از سطح مقطع اتصال

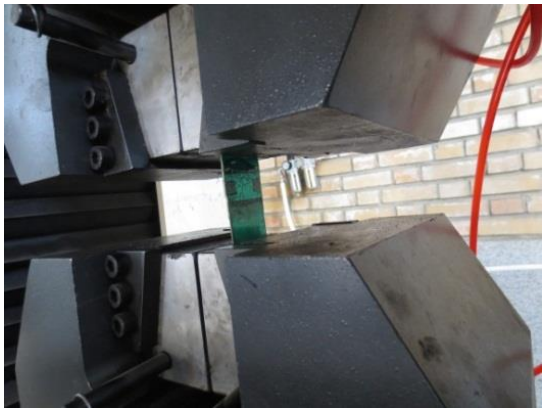


شکل ۱۵- تصویر SEM از سطح مقطع اتصال



شکل ۱۶- تصویر SEM از سطح مقطع اتصال

[1] Scanning Electron Microscope



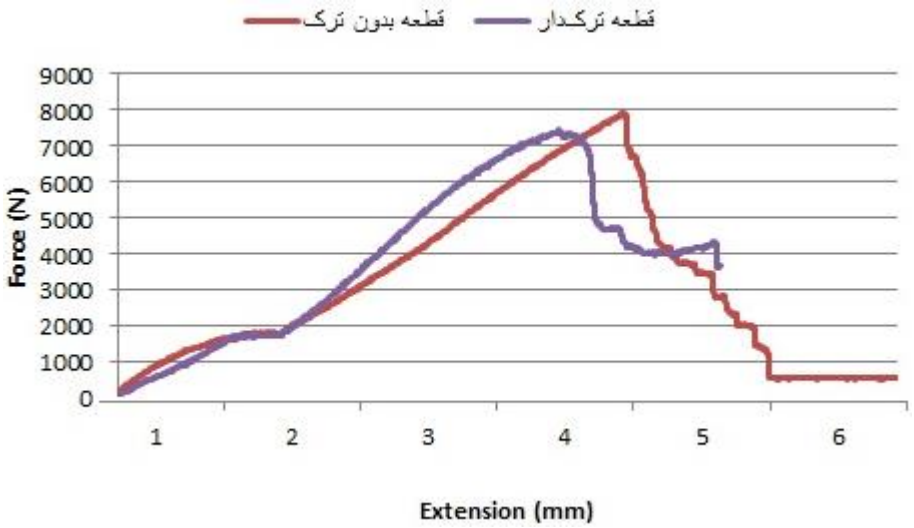
شکل ۱۷- نحوه قرارگیری قطعه تعمیر شده در دستگاه

در پژوهش حاضر یک نوآوری جهت چسباندن وصله‌های ساخته شده از آلومینیوم و الیاف جهت تعمیر قطعات آلومینیومی ترک‌دار به روش دیفیوژن فراهم شده است. فرآیند شامل فشردن قطعه و وصله روی هم تحت گرما و گذشت زمان است تا اتصال به روش دیفیوژن برقرار گردد. در این پژوهش از وصله‌های پیکانی، شش‌ضلعی و اچ شکل برای تعمیر ترک استفاده شده و از الیاف کولار، شیشه، کربن دوجهته و کربن یک‌جهته برای ساخت قطعه کامپوزیتی استفاده شده است. و پس از انجام آزمایش کشش با دستگاه سنتام در آخر کلیه نتایج با هم مقایسه شده‌اند.

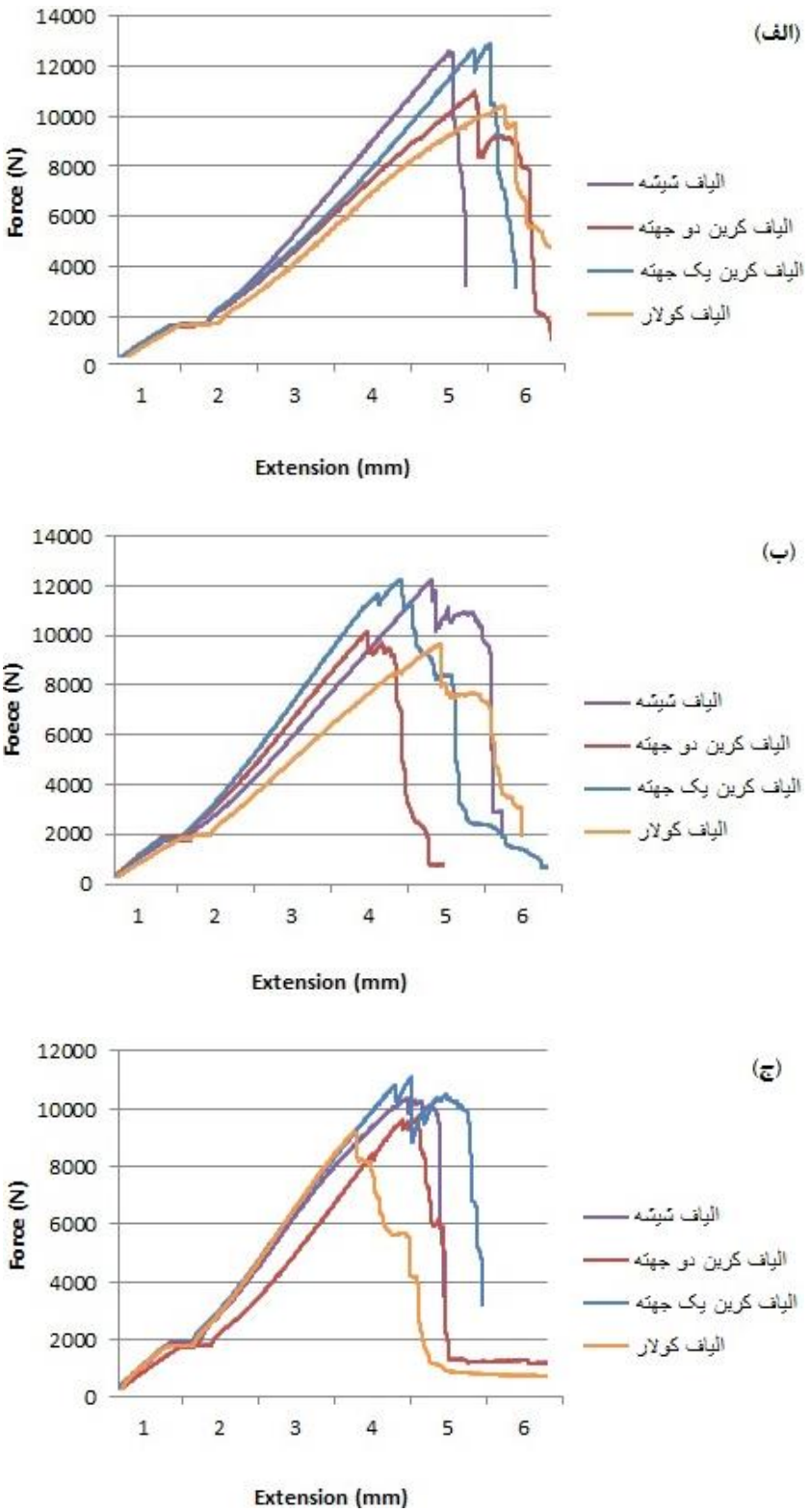
در شکل ۱۸ نمودار نیرو- جابجایی قطعات ترک‌دار تعمیر نشده و بدون ترک، ساخته شده به روش دیفیوژن آورده شده است. قطعه ترک‌دار به‌دلیل وجود ترک توان تحمل نیروی کمتری را نسبت به قطعه بدون ترک دارد تا دچار شکست کامل شود.

شکل و ابعاد وصله مورد استفاده جهت تعمیر ترک بر روی کیفیت تعمیر تأثیرگذار بوده و دارای اهمیت است. شکل ۱۹ نمودارهای نیرو- جابجایی حاصل از آزمایش کشش قطعات ساخته شده را نمایش می‌دهد که در این نمودارها مقاومت انواع الیاف استفاده شده در ساخت قطعات با استفاده از یک نوع وصله مشابه مقایسه شده است. با توجه به تحقیقات و آزمایشات انجام شده به دلیل شکل ساختاری، الیاف کربن یک جهته و شیشه دارای اتصال یکنواختی با استفاده از روش دیفیوژن دارا می‌باشند که همین امر باعث شده تا اتصالات با این الیاف نیروی بیشتری را در آزمایش کشش تحمل کنند. البته به دلیل خواص مکانیکی بهتر الیاف کربن یک جهته این نوع از الیاف راندمان بالاتری نسبت به الیاف شیشه دارا می‌باشند.

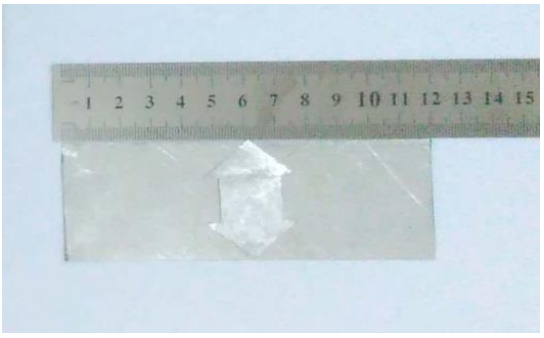
شکل‌های ۲۰ الی ۲۲ تصویر قطعه ترمیم شده به روش دیفیوژن با استفاده از وصله‌های پیکانی، شش ضلعی و اچ شکل را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۸- نمودار نیرو- جابجایی قطعه سالم و قطعه ترک‌دار تعمیر نشده



شکل ۱۹- نمودار نیرو- جابجایی قطعات ترمیم شده با وصله‌های: الف) اچ شکل، ب)پیکانی و ج)شش ضلعی



شکل ۲۰- تصویر قطعه با ترک اولیه به طول 10mm وبا وصله پیکانی

شکل ۲۱- تصویر قطعه با ترک اولیه به طول 10mm وبا وصله شش ضلعی

شکل ۲۲- تصویر قطعه با ترک اولیه به طول 10mm وبا وصله اچ

۷- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر کامپوزیت زمینه آلومینیومی به روش دیفیوژن با موفقیت تولید شد و با استفاده از روش ذکر شده ترمیم قطعات کامپوزیتی ترک‌دار با انواع وصله و الیاف‌های گوناگون با موفقیت انجام شد. مهمترین نتایج حاصل به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که این نوع روش تعمیر می‌تواند جایگزینی مناسب و ارزانی برای وصله‌های کامپوزیتی و اتصالات چسبی باشد و مزیت‌هایی همچون ضریب انبساط یکسان فلز پایه و وصله و عدم ایجاد تغییر در ضرایب رسانایی گرمایی و الکتریکی داشته و کارایی تعمیر را افزایش می‌دهد.

۲- در دما و فشار ثابت با افزایش مدت‌زمان در فرآیند دیفیوژن اتصال مستحکم‌تری ایجاد می‌شود و مقدار حداکثر نیروی تحمل شده افزایش می‌یابد، اما با گذشت مدت زمان بیشتر، این افزایش متوقف شده و تأثیری بر اتصال ایجاد شده ندارد.

۳- با آزمایش روی انواع الیاف استفاده شده مشخص گردید که الیاف شیشه و الیاف کربن یک جهته به دلیل نفوذ و جوش بهتر قطعات با یکدیگر اتصال بهتری نسبت به بقیه الیاف مورد آزمایش در روش دیفیوژن را دارا می‌باشند.

۴- همچنین با مطالعه روی الیاف استفاده شده مشخص گردید که الیاف کربن یک جهته بهترین کارایی را نسبت به بقیه الیاف دارا است.

۵- با مطالعه تجربی پارامترهای هندسی روی وصله‌های پیکانی، اچ شکل و شش ضلعی مشخص گردید که وصله‌های پیکانی و اچ شکل به دلیل تحمل نیروی بیشتر و همپوشانی مناسب محل ترک نسبت به وصله شش ضلعی کارایی بهتری دارند.

۸- مراجع

[1] Aryal B (2019) Effects of impact energy and impactor mass on the damage inducted in Composite laminates and sandwich panels. Compos Struct 154: 226-238.

[۲] عالی ح (۱۳۸۸) آشنایی با فرایند ساخت و تولید. انتشارات دانشگاه امام حسین.

[۳] تویسرکانی ح (۱۳۸۱) شکل دادن فلزات. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.

[۴] عابدی م (۱۳۹۹) مشخصه سازی ابعادی ورق کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با ترک لبه‌ای تحت سیکل‌های سرمایش/گرمایش مرطوب. *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۰(۳): ۲۱۹-۲۳۱.

[۵] فرهی غ (۱۳۷۶) مکانیک شکست. انتشارات دانشگاه بوعلی سینا.

[6] Sabelkin V (2006) Fatigue crack growth analysis of stiffened cracked panel repaired with bonded composite patch. Eng Fract Mech 73(11): 1553-1567.

[7] Tsouvalis G (2009) Experimental and numerical study of the fatigue behaviour of composite patch reinforced cracked steel plates. Int J Fatigue 31(10): 1613-1627.

[8] Jones R (1999) Composite repairs to cracks in thick metallic components. Compos Struct 44(1): 17-29.

[9] Kurt B (2007) Diffusiyon bonding between Ti-6Al-4 V alloy and ferritic stainless steel. Mater Lett 61: 1747-1750

[10] Mahendran G (2010) Analyzing the effect of diffusion bonding process parameters on bond characteristics of Mg–Al dissimilar joints. J Mater Eng Perform 19: 657-665

[11] Wei Y (2008) Formation process of the bonding joint in Ti/Al diffusion bonding. Mater Sci Eng A 480: 456-463

[12] Kenevisi M (2012) A study on the effect of bonding time on the properties of Al7075 to Ti–6Al–4 V diffusion bonded joint. Mater Lett 76:144-146

[13] Ismail A (2016) Fe-Al Diffusion Bonding: Effect of Reaction Time on The Interlayer Thickness. J Mech Eng 13(2): 10-20.

[14] Jafarian M (2016) The comparison of microstructure and mechanical properties of diffusion joints of 5754, 6061, and 7039 aluminum alloys to AZ31 magnesium alloy. Journal of Advanced Materials in Engineering 35(1): 11-21.

[15] Fernandus M (2011) Developing Temperature–Time and Pressure–Time diagrams for diffusion bonding AZ80 magnesium and AA6061 aluminium alloys. Mater Des 32(3): 1651-1656.

[16] Fernandus M (2012) Optimising diffusion bonding parameters to maximize the strength of AA6061 aluminium and AZ31B magnesium alloy joints. Mater Des 33: 31-41.

[۱۷] تویسرکانی ح (۱۳۷۵) اصول علم مواد. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.