



بررسی تجربی اثر شکل هندسی وصله‌های مسی جهت تعمیر قطعات تیتانیومی ترک‌دار به روش دیفیوژن

اردشیر محمودی نسب^۱، علیرضا نظام آبادی^{۲*} و فرزانه براتی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

^۳ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۳

چکیده

اثر جهت‌گیری و شکل وصله در سازه‌های ترک‌دار بر رفتار مکانیکی اجزا و بهینه‌سازی فرآیند ساخت بسیار مهم است. در این تحقیق در راستای ترمیم قطعات ترک‌دار تیتانیومی درجه ۲ با بررسی پارامترهای طول ترک (ترک‌های مرکزی ۱ و ۲ سانتی‌متر) و نوع وصله از جنس مس (شکل‌های هندسی مستطیل، بیضی و شش‌ضلعی)، رفتار مکانیکی قطعات تحت بارهای شبه استاتیکی کششی مطالعه می‌شود. در این آزمایش اتصال وصله‌ها به ورق پایه تیتانیوم درجه ۲ به ابعاد $50 \times 40 \times 0.5$ میلی‌متر مطابق با استانداردهای ASME SA-370 و ASTM E 8/E 8M - 08 بررسی می‌گردد. به‌عنوان یک ایده‌ی جدید وصله‌ها با روش دیفیوژن پیشرفته (SPS) در محدوده دمایی ۸۵۰-۸۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴۷-۵۰ مگاپاسکال به ورق پایه متصل می‌شوند و کاربردهای آن در صنایع هوافضا می‌باشد. به‌منظور بررسی کیفیت محل اتصال قطعه‌های ترک‌دار وصله شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده می‌شود. با مقایسه قطعات وصله شده تحت بارگذاری کششی استاتیکی می‌توان نتیجه گرفت افزایش طول ترک کاهش مقاومت قطعه را به دنبال خواهد داشت. از میان وصله‌های مطرح‌شده، وصله شش‌ضلعی به خاطر توزیع تنش بهتر نسبت به وصله‌های مستطیل و بیضی به ترتیب ۵۳۴/۰ و ۶۹۱/۰ درصد به طور میانگین در تمام طول ترک‌ها مقاومت بهتری را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: اتصال دیفیوژن؛ وصله مسی؛ ورق ترک‌دار؛ تیتانیوم

An experimental investigation on the influence of geometrical configuration of copper patches on mechanical strength of cracked titanium components using diffusion method

A. Mahmoudi nasab¹, A.R. Nezamabadi^{2,*}, F. Barati³

¹ PhD. Student, Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

² Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran, Iran.

³ Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

Abstract

The orientation and shape of joints in cracked structures significantly impact the mechanical behavior of components and the optimization of the construction process. This study investigates the mechanical behavior of titanium grade 2 cracked components under quasi-static tensile loads, considering the crack length (central cracks of 1, 2, and 3 cm) and patch type (rectangular, oval, and hexagonal shapes) parameters. Patch connections to the $50 \times 40 \times 0.5$ mm titanium grade 2 base plate are examined according to ASTM E 8/E 8M - 08 and ASME SA-370 standards. A novel approach to patch connection is employed using the advanced diffusion method (SPS) at a temperature range of 820-850 degrees Celsius and a pressure of 47-50 megapascals, with potential applications in the aerospace industry. A scanning electron microscope (SEM) is used to investigate the quality of the joint area of the cracked pieces joined together. Results show that an increase in crack length leads to a decrease in component resistance under static tensile loading. The hexagonal patch demonstrates better resistance with averages of 0/534 and 0/691 compared to rectangular and oval patches, respectively, due to its superior stress distribution along the entire length of the cracks.

Keywords: Diffusion bonding; Copper patch; Cracked plate; Titanium.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۸۱۶۱۵۱۵۳؛ فکس: ۰۸۶۳۴۱۳۴۰۲۵

آدرس پست الکترونیک: alireza.nezamabadi@gmail.com, alirezanezamabadi@iaui.ac.ir

۱- مقدمه

ایجاد ترک و گسترش آن در قطعات و سازه‌ها یک امر اجتناب‌ناپذیر است. وجود ترک در یک قطعه یا سازه می‌تواند مقاومت آن را کم کند و حتی منجر به شکست آن شود این امر می‌تواند در تنش‌های کمتر از استحکام تسلیم رخ دهد جهت کم تر محتمل شدن وقوع شکست در قطعات از علم مکانیک شکست به منظور انتخاب مواد و طراحی قطعات و سازه‌ها استفاده می‌شود، مکانیک شکست شاخه‌ای از علم مکانیک است که به بررسی تحلیل اجسام پس از ایجاد ترک می‌پردازد و عمر قطعات از دو منظر بررسی می‌گردد که بخش اول مربوط به میحث خزش و خستگی است و عمر قطعه را تا زمانی که ترک در قطعه جوانه بزند مشخص مینماید و در بخش دوم مربوط به مکانیک شکست است که عمر قطعه تا زمانی که ترک انتشار یافته و موجب شکست قطعه می‌گردد می‌باشد، لذا اهمیت و تاثیر آن در بازرسی‌ها و برنامه تعمیرات در صنایع مختلف پس از رویت نمودن ترک نمایان می‌گردد.

عامل وقوع این ترک‌ها می‌تواند کشیدگی، تنش‌های حرارتی، تنش‌های پسماند مضر، پدیده تمرکز تنش و موارد دیگر باشد [۱-۳]. به‌علاوه براین، بارگذاری متناوب بر روی قطعات فلزی انعطاف‌پذیر منجر به ایجاد ترک بر روی باندهای لغزش می‌شود و این عیوب در اثر بارهای خستگی، بارهای دینامیکی و بارهای استاتیکی رشد می‌کنند [۴]. لذا ارائه راهکارهایی برای جلوگیری از کاهش استحکام این قطعات یکی از موارد موردنیاز صنایع است. با توجه به اینکه امکان تعویض قطعات ترک‌دار و یا قسمتی از سازه از نظر اقتصادی و زمان به صرفه نبوده می‌توان با تعمیر قطعه آسیب‌دیده از رشد ترک جلوگیری کرد و ترمیم قسمت صدمه‌دیده (ترک‌دار) یکی از راه‌های بازگرداندن استحکام و کارایی سازه است.

تعمیر ورق‌ها به دو صورت متقارن و نامتقارن صورت می‌گیرد. در ترمیم متقارن به هر دو طرف ورق در محل ترک وصله چسبانده می‌شود. در ترمیم نامتقارن فقط یک‌طرف ورق با

استفاده از وصله تعمیر می‌گردد. بنابراین در ترمیم نامتقارن به دلیل ایجاد یک‌خمش خارج از صفحه بر اثر خارج از مرکز شدن نیرو بعد از تعمیر، ضریب شدت تنش در طرف آزاد صفحه (در محل ترک) کاهش چندانی نخواهد داشت [۵]. به همین دلیل کارایی وصله نامتقارن کمتر از وصله متقارن در شرایط مشابه (ضخامت وصله و نوع اتصال یکسان) خواهد بود. با این وجود به دلیل عدم دسترسی به دو طرف ورق در بسیاری از موارد امکان ترمیم متقارن وجود ندارد. روش‌های ترمیم به‌طور کلی به دو بخش بدون وصله برای عیب‌های کوچک (تعداد ترک‌ها کم و طول ترک نسبت به اندازه سازه یا قطعه کم یا بحرانی نبودن رشد ترک) و با وصله برای عیب‌های بزرگ (طول ترک بیشتر و بحرانی بودن رشد ترک) که قابلیت‌های سازه را بازیابی می‌کنند تقسیم می‌شوند. آسیب در سازه اغلب ناشی از ترک‌های ایجادشده به دلایل مختلف و سپس رشد ترک‌ها در هنگام کار و در نهایت شکست سازه است. همواره جهت افزایش مقاومت سازه ترک‌دار، نوع هندسه و نحوه‌ی اتصال وصله به قطعه‌ی پایه مؤثر هستند، همچنین روش‌های متفاوتی مانند اتصال‌های چسبی، فشاری و فشار آمیخته با دما علاوه بر استفاده از سوراخ متوقف‌کننده و یا پرچ کردن برای برای جلوگیری از گسترش ترک استفاده شده است [۵]. پراسیلووا در سال ۱۹۹۸ نشان داد که لایه‌های الیاف شیشه در گلر اثر مانع و تورق را بهبود می‌بخشد. لایه‌های الیاف شیشه اثرات بسیار مثبتی بر روی جوانه‌زنی و تأخیر انداختن رشد ترک‌های خستگی از قبل ایجادشده دارند. این شرایط عمر خستگی را به‌طور مؤثری زیاد می‌کند و ایمنی بخش‌های ساختاری ایجادشده در این نوع مواد را افزایش می‌دهد. ترمیم قطعات با استفاده از چسباندن وصله کامپوزیتی، برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۷۰ توسط گروهی تحقیقاتی به سرپرستی آلن بیکر، در مرکز تحقیقاتی نیروی هوایی استرالیا برای تعمیر بال، بدنه و ارابه فرود هواپیما و بالگردهای قدیمی مورد استفاده قرار گرفت [۶]. صیادی در سال ۲۰۰۱ به بررسی رشد ترک قبل و

آلومینیوم‌های تقویت‌شده با لایه‌های GLARE (GLHss-RE in Force)^۱ کامپوزیتی از جنس شیشه/پوکسی هستند.

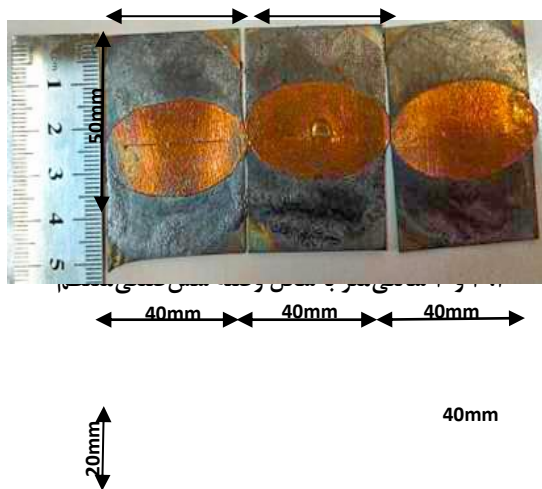
(TiAl) به روش دیفیوژن با استفاده از هات پرس پرداختند که نتیجه این اتصال در دمای ۱۰۷۳ تا ۱۱۷۳ درجه کلوین و فشار ۱۰۰ مگاپاسکال و در زمان ۲ ساعت صورت گرفت که نتایج این اتصال با میکروسکوپ الکترونیکی روبشی بررسی گردید که نشان از اتصال خوب و فاقد ترک و حفره بوده است [۱۲]. دیفیوژن یک فرآیند به جهت یکپارچه سازی سطحی در مقیاس اتمی در اثر فشردگی در سطح جدایش با تغییر شکل پلاستیک محلی در دمای بالا و ایجاد اتصال لایه های حالت جامد است. می توان گفت فرآیند دیفیوژن یک تکنیک جوشکاری است که به صورت گسترده ای در تولیدات صنعتی استفاده می شود. در فرآیند دیفیوژن می توان با کنترل دما، فشار و مدت زمان اعمال فشار و دما به طیف وسیعی از کامپوزیت ها و آلیاژها دست یافت [۱۳]. به همین جهت با توجه به معایب ارائه شده مخصوصاً نبود چسب باقابلیت اطمینان بالا روش دیفیوژن جایگزین مناسبی برای ترمیم قطعات معیوب در صنعت هوافضا مورد استفاده قرار خواهد گرفت. به نظر میرسد جهت ساخت وصله و همچنین اتصال وصله به قطعه ترک دار، فرآیند دیفیوژن روشی مفید و قابل اجرا است.

در این پژوهش در یک نوآوری با روش دیفیوژن ورق های ترک دار از جنس تیتانیوم با طول ترک های مرکزی ۲،۱ و ۳ سانتی متر با وصله های مسی ترمیم می شوند. سه نوع وصله با هندسه های مستطیل، بیضی و شش ضلعی منتظم برای ترمیم ورق های ترک دار استفاده می شود. مقاومت قطعات ترمیم شده تحت بار شبه استاتیکی عمود بر راستای ترک برای بررسی مقاومت قطعات ترمیم شده، با وصله های مسی روی قطعه پایه با ترک مرکزی به طول های متفاوت بررسی می شود و به عنوان راهکاری جدید برای افزایش مقاومت قطعات ترمیم شده، به بررسی استحکام کششی در ورق های ترک دار پرداخته می شود که این تحقیق با پژوهش های اخیر از نظر اتصال این شکل هندسی وصله ها (مستطیلی، بیضی و شش ضلعی منتظم) با جنس مس و ورق ترک دار مرکزی با طول ترک های مذکور متفاوت بوده و همچنین علاوه بر بررسی تأثیر فشار، دما و مدت زمان در بهینه سازی قطعه مورد آزمایش، اثر شکل هندسی وصله ها (مستطیلی، بیضی و شش ضلعی منتظم) در مقاومت ورق ترمیم شده مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین از آنجائیکه تیتانیوم قابلیت اکسید شدگی سریع در سطح دارد

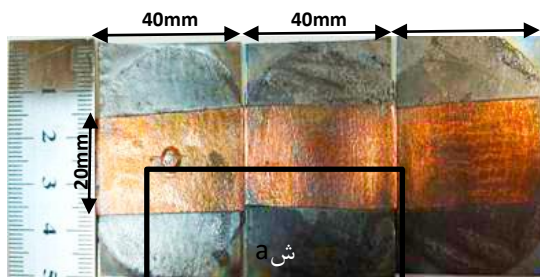
بعد از ترمیم در ورق های آلومینیومی تحت بارهای نوسانی به کمک تحلیل المان محدود و آزمایش پرداخت. در این تحقیق، نمونه هایی استاندارد با استفاده از بارگذاری نوسانی پیش ترک ایجاد گردیده و این قطعات دارای ترک توسط مواد مرکب از جنس الیاف شیشه- اپوکسی به صورت متقارن و نامتقارن ترمیم شده و نرخ رشد ترک در آن ها به صورت تجربی بررسی شده است. همچنین ترمیم متقارن دارای کارایی بسیار بالاتری نسبت به ترمیم نامتقارن داشته و دلیل این امر را عدم به وجود آمدن ممان خمشی در ترمیم متقارن ذکر می کنند [۷]. امامعلی زاده و همکاران ضرایب شدت تنش و رشد ترک در ورق های چندلایه هیبریدی از جنس گِلر را بررسی کردند. در این پژوهش ابتدا پس از ایجاد ترک با طول های مختلف در لایه های آلومینیوم، با استفاده از روش اجزای محدود به محاسبه ضرایب شدت تنش در لایه های آلومینیوم پرداخته شد. سپس با استفاده از رابطه پاریس^۱ رشد ترک چندلایه های هیبریدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد ضرایب شدت تنش در لایه های آلومینیوم مجزا، بسیار بیشتر از لایه های آلومینیوم موجود در چندلایه های هیبریدی بود و در نتیجه نرخ رشد ترک در آن ها سریع تر اتفاق افتاد [۸].

کومار و هاکیم نیز طراحی بهینه آسترهای کامپوزیتی متقارن و متعادل را برای تقویت یک صفحه آلومینیومی (بیضی، مربعی و دایروی) ترک خورده پیشنهاد کردند. در این پژوهش صفحه با حداقل حجم به عنوان بهینه ترین حالت معرفی شد [۹]. چاندراپا و همکاران بهینه سازی پارامتری فرآیند اتصال دیفیوژنی تیتانیوم-آلومینیوم و تیتانیوم-مس را شامل سه آیتم دما، زمان و فشار را بررسی و از طریق نتایج آزمایش های سختی سنجی و تحلیل عکس های میکروسکوپ الکترونیکی روبشی مشخص نمودند که اتصال فلز تیتانیوم در این نوع پیوند بسیار مفید و قابل استفاده بوده و کلیه پارامترهایی که اتصال مناسب با مقاومت بهتر را نتیجه میدهد را بدست آوردند [۱۰]. چان لی و همکاران به بررسی پیوند دیفیوژن تیتانیوم-زیرکونیوم در دمای پایین با سطح نانو کریستالیزاسیون پرداختند که نتایج نشان داد که مقاومت برشی این اتصال ۱۱۲،۹٪ بیشتر از تیتانیوم بدون پیوند میباشد [۱۱]. وانگ شیو فنگ و همکاران به بررسی اتصال تیتانیوم درجه ۶ (Ti-6Al-4V) به آلیاژ تیتانیوم (y-alloy)

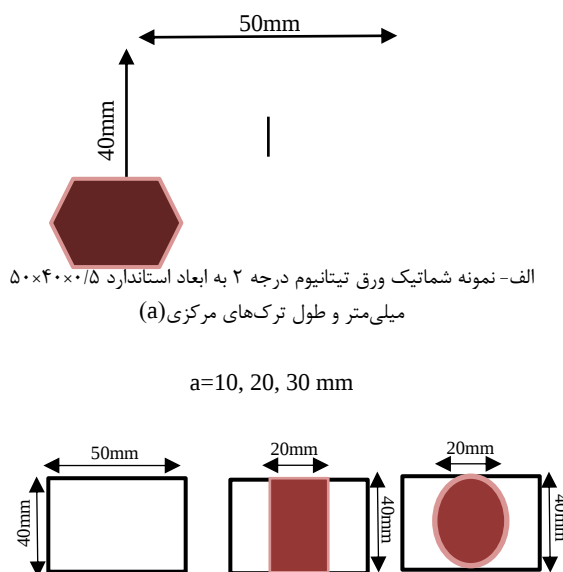
^۱ Paris equation



شکل ۲- ورق تیتانیوم ترمیم‌شده با طول ترک‌های ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر با شکل وصله بیضی



شکل ۳- ورق تیتانیوم ترمیم‌شده با طول ترک‌های ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر با شکل وصله مستطیل



الف- نمونه شماتیک ورق تیتانیوم درجه ۲ به ابعاد استاندارد ۵۰×۴۰×۵ میلی‌متر و طول ترک‌های مرکزی (a)

$$a=10, 20, 30 \text{ mm}$$

و TiO_2 تشکیل می‌گردد قبل از آزمایش یک عملیات شیمیایی شامل شستن سطح با اسید های اکسید زدا و یک عملیات مکانیکی شامل سایش سطحی از سطح ورق صورت گرفته و آزمایش تحت خلا کامل جهت جلوگیری از اکسید شدن قطعه مخصوصا در محل اتصال انجام می‌گیرد. لذا هدف اصلی این پژوهش ارزیابی استحکام کششی ورق تیتانیوم ترک‌دار ترمیم‌شده به روش دیفیوژن با استفاده از دستگاه SPS با تغییر پارامترهای شکل هندسی وصله‌های مسی و طول ترک‌های مرکزی ورق پایه می‌باشد.

۲- روش آزمایشگاهی

۲-۱- مواد اولیه

در این تحقیق از تیتانیوم درجه ۲ به جهت ساخت قطعه ترک‌دار و از فلز مس به عنوان وصله استفاده شده است. آزمایش انجام‌شده در این تحقیق شامل آزمون‌های استحکام کششی در حالت قطعه تعمیر شده با وصله‌هایی به شکل‌های مستطیلی، بیضی و شش‌ضلعی است. ابعاد نمونه‌های ورق ترک‌دار تیتانیوم پایه ۵۰×۴۰×۵ میلی‌متر است که مطابق استاندارد های ASME SA-370 و ASTM E 8/E 8M – 08 است [۱۶]. سه شکاف (به عنوان ترک مرکزی) به طول‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر توسط وایرکات (به قطر ۵۰ میکرون) در مرکز قطعه ایجاد گردیده که در شکل شماره (۴) به صورت شماتیک نمایش داده شده است. خواص مواد صفحه ترک‌دار در جدول شماره (۱) و ترکیب عناصر آلیاژی تیتانیوم بدست آمده با استفاده از دستگاه کوانتومتر در جدول شماره (۲) نشان داده شده است. شکل شماره (۱) تصویری از قطعه ترک‌دار ترمیم‌شده با شکل وصله شش‌ضلعی منتظم و شکل شماره (۲) تصویری از قطعه ترک‌دار ترمیم‌شده با شکل وصله بیضی و شکل (۳) تصویری از قطعه ترک‌دار ترمیم‌شده با شکل وصله مستطیل ارائه می‌شود.

جدول ۱- خواص مکانیکی تیتانیوم درجه ۲ [۱۴]

۹۹٫۹۲٪	۰٫۰۸٪	۰٫۰۴٪	۰٫۰۱٪
40mm	40mm	40mm	40mm

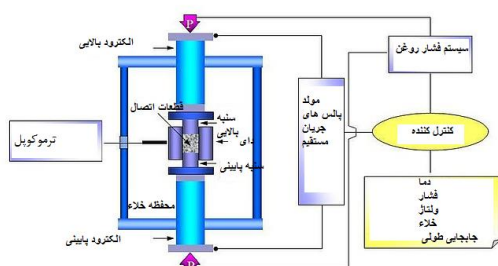
توجه به ابعاد قطعه طبق استاندارد ASTM E 8/E 8M - 08 و ASME SA-370 / [۱۶] و اندازه مجاز محفظه پرس دستگاه SPS قالب مربوطه از جنس گرافیت تراکم بالا به ابعاد (سنبه قطر ۵۵ میلیمتر و دای ۴۵×۵۵ میلیمتر-بزرگتر از ابعاد ورق

ب-ابعاد شماتیک وصله ها

شکل ۴-شماتیک ورق ترک دار و شکل هندسی وصله

۲-۲ روش ساخت نمونه‌ها

مورد آزمایش جهت اتصال دقیق و یکنواخت مرز اتصال (ساخته شد و آزمایش تحت خلا کامل (جهت جلوگیری از اکسید شدن تیتانیوم که میل بالایی به اکسیداسیون دارد) صورت گرفت و نتایج اتصال در رنج دمایی ۸۵۰-۸۲۰ درجه سانتیگراد و فشار ۵۰-۴۷ مگاپاسکال و در زمان ۱۵۰۰ ثانیه صورت گرفت [۱۵]. که تاثیر مثبت این روش دیفیوژن با استفاده از دستگاه SPS اتصال مناسب، یکنواخت، بدون ترک و حفره میباشد و همچنین استفاده از ورق به جای پودر در این روش جنبه ای خلاقانه و نوآوری در اتصال ورق ترک دار تیتانیوم میباشد. و نمونه‌ها در داخل کوره تحت خلا در یک فضای محافظ با نرخ کاهش دمای حدود ۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه خنک می‌شوند. در شکل شماره (۵) شماتیک دستگاه طراحی شده SPS^۱ برای ایجاد پیوند دیفیوژنی آن نمایش داده شده است. شکل شماره (۶) تصویر محفظه داخلی دستگاه SPS مورد استفاده و همچنین جدول شماره (۲) مشخصات این دستگاه را بیان می‌کند.

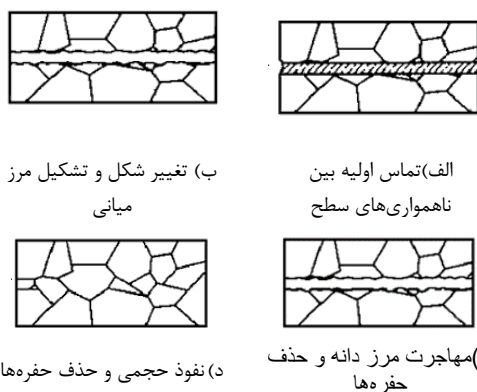


شکل ۵-شماتیک دستگاه دیفیوژن (SPS)

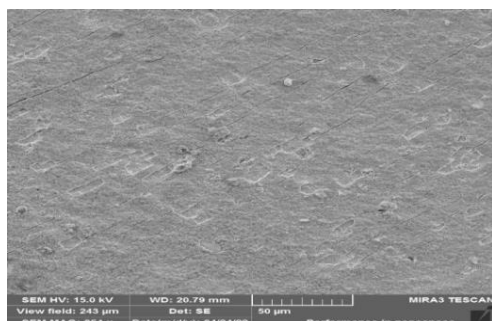
اتصال به روش دیفیوژن با استفاده از دستگاه هات پرس فرایندی زمان‌بر است با افزایش دما زمان اتصال کاهش می‌یابد. مدت‌زمان فرآیند و زمان نگهداری قطعه در دمای موردنظر، باید به اندازه کافی باشد تا نفوذپذیری مطلوب انجام شود. زمان زیاد و نگهداری بیش‌ازحد در دمای موردنظر نیز موجب کاهش خواص مکانیکی فیزیکی و شیمیایی می‌شود [۱۵]. استفاده از روش دیفیوژن با دستگاه SPS نسبت به هات پرس در این آزمایش صرفه جویی در زمان، قابلیت اطمینان بالاتر در ترمیم و همچنین مانور دمایی بالاتر نسبت به قطعه پایه تیتانیومی که دمای ذوب بالایی دارد می‌باشد. فرآیند اسپارک پلاسما زینترینگ یا به اختصار فرآیند SPS حاصل همزمان دو عمل پرس و تخلیه الکتریکی به صورت پالس‌های متناوب در دمای بالا می‌باشد. در طی این فرآیند ذرات ماده در اثر فشار سنبه در جهت عمود به قالب به هم متراکم شده و سپس اثر تخلیه الکتریکی به صورت متناوب انجام می‌شود که این امر سبب به وجود آمدن جرقه‌های پلاسما بین ذرات متراکم می‌شود. با توجه به اینکه کل فرآیند در خلا انجام می‌گیرد امکان ترکیب مواد با گازهای فعال هوا وجود نداشته و خلوص ترمیم بسیار بالا رفته و گرمایش برخلاف روش دستگاه هات پرس که از طریق المنت بوده با استفاده از SPS از طریق جریان بالای پالسی و توان دستگاه دارای نرخ حرارتی بالایی می‌باشد. به همین جهت علاوه بر استفاده از روش دیفیوژن در اتصال قطعه که نسبت به روش‌های دیگر از جمله چسب یا پرچ بهتر بوده به علت صرفه جویی در زمان و انرژی و دقت بالا از دستگاه SPS به روش دیفیوژن انتخاب شده است در این فرآیند سه پارامتر دما، فشار و زمان مهم هستند و بر یکدیگر تأثیر می‌گذارد دما به‌عنوان مهم‌ترین عامل در این فرآیند معرفی می‌شود، زیرا پدیده‌های مهم و تأثیرگذار در اتصال نفوذی مانند خزش بسیار حساس به دما هستند [۱۵]. در این آزمایش با

^۱ Spark Plasma Sintering

شکل (۷) مراحل مختلف نفوذ را در یک پیوند دیفیوژنی نمایش می‌دهد. در مرحله اول تماس اولیه بین ناهمواری‌های سطحی برقرار گشته و مرحله دوم تغییر شکل صورت گرفته مرز میانی تشکیل می‌شود، در مرحله سوم مهاجرت مرز دانه و مرحله چهارم نفوذ حجمی صورت پذیرفته و حفرات حذف می‌گردند. تصویر SEM از سطح مقطع اتصال تشکیل شده تحت شرایط دمایی ۸۲۰ - ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد با بزرگنمایی‌های ۸۵۴ و ۱۸۰۰۰ برابر در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است که این شکل‌ها بعد از عملیات دیفیوژن به روش SPS صورت گرفته و کاملاً در هم فرورفتن ناهمواری‌ها را نشان داده و همچنین مهاجرت مرز دانه و نفوذ کامل به‌صراحت با این بزرگنمایی مشاهده می‌شود که این نشان از همگن شدن ساختار کریستالی این پیوند می‌باشد. درواقع افزایش نرخ فشار و دما و زمان در حالت بهینه سبب تکمیل فرآیند دیفیوژن شده است.



شکل ۷ - مراحل مختلف نفوذ در یک پیوند دیفیوژنی [۸]

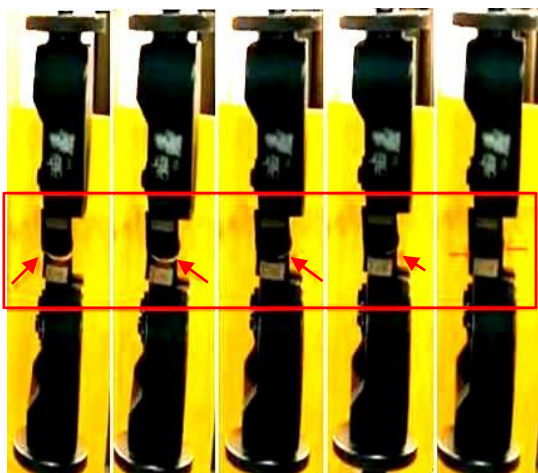


شکل ۶ - تصویر محفظه داخلی (قالب‌های گرافیتی) تحت خلأ دستگاه sps

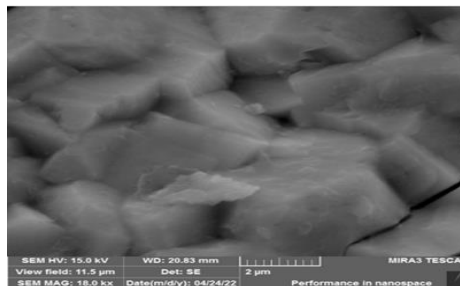
جدول ۳ مشخصات دستگاه SPS مورد استفاده

ولتاژ (V)	حداکثر قدرت جریان (A)	حداکثر فشار تغذیه (Ton)	منبع فرکانس (Hz)
۰-۲۰	۱۰۰۰۰	۶۰	DC پالسی ۲۰۰

با توجه به مطالعات پیشین در زمینه‌ی پیوندهای دیفیوژن و نتایج حاصل شده از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق جهت دستیابی به بهترین نوع تعمیر به روش دیفیوژن در قطعات ترک‌دار تیتانیومی، فرآیند تست دیفیوژن به روش SPS به ترتیب در ۴ دمای ۸۲۰، ۸۳۰، ۸۴۰، ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و در فشارهای ۴۸، ۴۷، ۴۹ و ۵۰ مگاپاسکال و در زمان‌های ۵۷۳، ۵۸۱، ۵۹۲ و ۶۰۱ دقیقه در شرایط خلأ نسبی انجام شد ولی با گذشت زمان این پارامتر دما و فشار مدام در حال تغییر و پیوند نمونه‌ها در حال انجام بوده ولیکن پیوند ایده آل نبود (آزمون کشش انجام میشد وصله از ورق پایه جدا میشد) که با تکرار آزمایشات در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵۰ مگا پاسکال و در زمان ۱۵۰۰ ثانیه نمونه بهینه به صورت تجربی از نظر کیفیت و ثبات انتخاب گردید. یعنی در این فرآیند با تکرار آزمایشات رنج دما و فشار نمونه پیوند خورده در ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۵۰ مگاپاسکال و در زمان ۱۵۰۰ ثانیه به بعد ثابت شده و از این زمان به بعد پیوند دیفیوژن مورد قبول واقع شده است. و با تکرار ۱۰ نمونه آزمایشی دیگر این رنج دما و فشار و زمان نتیجه مثبتی داشته و به این ترتیب کلیه نمونه‌های اصلی با این پارامترهای مذکور پیوند داده شدند یا به عبارتی به علت ادغام کامل وصله و ورق پایه این رنج دما و فشار به ثبات رسید.



شکل ۸- تصویر SEM از اتصال قطعه در این آزمایش با بزرگنمایی ۸۵۴ برابر



شکل ۹- تصویر SEM از اتصال قطعه در این آزمایش با بزرگنمایی ۱۸۰۰۰ برابر

شکل شماره ۱۱- مراحل نرخ رشد ترک در آزمون کشش
جدول ۴- تعداد آزمون کشش قطعات ترمیم شده با طول ترک متفاوت

تعداد آزمون بدون وصله	تعداد آزمایشی قبل تست کشش	تعداد آزمون نهایی کشش	شکل هندسی وصله مسی	طول ترک مرکزی
۳	۳	۳	بیضی	۱cm
۴	۳	۳	مستطیل	۲cm
۳	۳	۳	شش ضلعی	۳cm

نتایج حاصل از آزمون کشش به طور معمول برای انتخاب یک ماده به منظور کنترل کیفیت و پیش بینی اینکه چگونه یک ماده تحت انواع دیگری از نیروها واکنش نشان می دهد به کار می رود. منحنی نیرو-جابجایی بر اساس مقادیر نیرو و جابجایی-ازدیاد طول رسم می شود لذا خروجی آزمون یک منحنی نیرو/جابجایی است که نشان دهنده رفتار ماده تحت کشش است. داده های به دست آمده در این آزمون برای تعیین خواص مکانیکی و کمیت های فیزیکی ماده استفاده شده است.

در این پژوهش، برای هر ورق تیتانیوم با طول ترک های مرکزی ۳،۲،۱ سانتی متر ترمیم شده با وصله مسی به شکل های هندسی بیضی، مستطیل و شش ضلعی منتظم مطابق جدول شماره (۴) یک آزمون کشش موفق انجام شده است که حاصل این آزمون نمودارهای نیرو-جابجایی مطابق شکل های شماره (۱۱ تا ۱۴) می باشد و از مقایسه آن نمودارها نتایج حاصل می گردد. همچنین آزمون کشش برای نمونه های بدون وصله

۲-۳- آزمون
تست کشش توسط دستگاه سروو هیدرولیک سنتام ظرفیت ۱۰۰ تن که در شکل ذیل نشان داده شده است انجام شد. تمامی آزمون ها در دمای اتاق انجام و سرعت بارگذاری در تمامی آزمون ها ثابت و برابر 0.1 min/mm است. حداقل سه نمونه طبق عرف آزمایشگاه ها برای هر شرایط و اطمینان از صحت و دقت نتایج مورد آزمایش قرار گرفته است [۸]. در هر آزمایش بارگذاری تا گسیختگی کامل قطعه ادامه یافته و نمونه در فک های دستگاه کشش مطابق شکل (۱۰) آزمایش کشش استاتیکی در قطعه تعمیر شده را نشان می دهد. و شکل (۱۱) مراحل نرخ رشد ترک را در یک نمونه وصله مستطیلی در حین آزمون کشش را نشان می دهد.



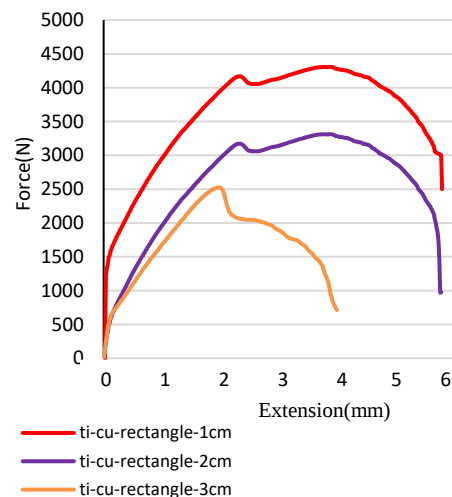
شکل ۱۰- دستگاه کشش ۱۰۰ تن واقع در دانشگاه مالک اشتر اصفهان

مقایسه شده است. با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش، استحکام کششی قطعات به ازای افزایش طول ترک از ۱ cm به ۲ cm مقدار ۰/۳۰۰۴ کاهش و به ازای افزایش طول ترک از ۱ cm به ۳ cm مقدار ۰/۷۰۶۴ کاهش می‌یابد و همچنین به ازای افزایش طول ترک از ۲ cm به ۳ cm مقدار ۰/۳۱۲۲ کاهش استحکام کششی قطعه ترمیم‌شده مشاهده شد. مطابق با نمودار شکل ۱۱ می‌توان گسیختگی زودتر به ازای افزایش طول ترک را استنباط نمود و همچنین طول ترک کمتر کشیدگی طول بیشتری را نتیجه خواهد داد، بدیهی است که طبق تحلیل نمودار ناحیه الاستیک در قطعه با طول ترک کمتر به مراتب بیشتر از قطعات با طول ترک بیشتر است.

شکل ۱۱- نمودار نیرو-جابجایی برای وصله مستطیلی

در شکل شماره ۱۲ نمودارهای نیرو و جابجایی حاصل از آزمایش کشش استاتیکی ورق تیتانیوم ترمیم‌شده با وصله مسی با شکل هندسی بیضی برای طول ترک‌های ۱ cm ، ۲ cm و ۳ cm مقایسه شده که با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش استحکام کششی قطعات ترمیم‌شده مذکور به ازای افزایش طول ترک (ترک ورق پایه از جنس تیتانیوم) از ۱ cm به ۲ cm مقدار ۰/۳۶۳۶ کاهش و به ازای افزایش طول ترک از ۱ cm به ۳ cm مقدار ۰/۸۳ کاهش می‌یابد و همچنین به ازای افزایش طول ترک از ۲ cm به ۳ cm مقدار ۰/۳۴۲۰ کاهش استحکام کششی قطعه ترمیم‌شده مشاهده شد. در این شکل هندسی وصله بیضی همانند شکل قبل به ازای طول ترک کمتر مقاومت بیشتر و ناحیه الاستیک وسیع‌تر مشاهده شد. درواقع با افزایش ناشی از طول ترک قطعات فوق‌الذکر در این آزمایش کشش، شکل ۱۱ -نمودار نیرو-جابجایی برای وصله مستطیلی کاهش استحکام کششی مشاهده می‌شود.

TI-CU-Rectangle patch



شامل ورق تیتانیوم به ابعاد استاندارد مذکور بدون ترک و با طول ترک‌های مرکزی ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر انجام شد. که در مجموع تعداد آزمون کشش برای نمونه‌های بدون وصله ۴ آزمون و برای نمونه‌های با وصله ۹ آزمون جمعاً ۱۳ آزمون شبه استاتیکی اصلی می‌باشد. شایان ذکر است برای هر شکل وصله مستطیل و بیضی و شش‌ضلعی منتظم جداگانه ۳ آزمون آزمایشی کشش جمعاً به تعداد ۹ آزمون صورت گرفت که با توجه به نتایج یکسان آزمون‌های آزمایشی مذکور، کالبره بودن دستگاه و عدم خطای اپراتوری و صحت نتایج بدست آمده در این آزمون کشش را می‌توان استنباط نمود.

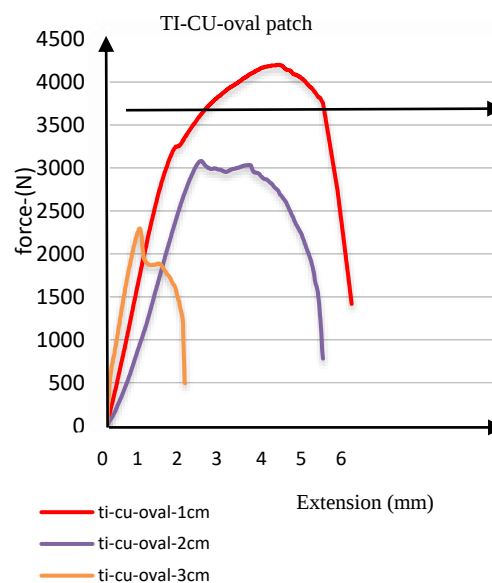
۳- بحث و نتایج

در این پژوهش جمعاً ۹ اتصال مختلف با وصله مسی به اشکال هندسی مذکور و ورق تیتانیومی ترک‌دار با طول ترک‌های متفاوت انجام شد و هر یک از نمونه‌ها مورد تست کشش قرار گرفتند و استحکام کششی قطعات ترمیم‌شده مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل شماره (۱۱) نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از کشش شبه استاتیکی قطعات را نمایش می‌دهد که در این نمودارها مقاومت ورق تیتانیومی ترمیم‌شده با وصله مس با شکل هندسی مستطیلی با طول ترک‌های ۱ cm ، ۲ cm و ۳ cm

شکل ۱۲- نمودار نیرو-جابجایی برای وصله بیضی

در شکل شماره ۱۳ نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش کشش استاتیکی ورق تیتانیوم گرید ۲ ترمیم‌شده با وصله از جنس مس با شکل هندسی شش‌ضلعی منتظم با طول ترک‌های ۱ cm، ۲ cm و ۳ cm مقایسه شده که با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش استحکام کششی قطعات ترمیم‌شده مذکور به ازای افزایش طول ترک (ترک ورق پایه از جنس تیتانیوم) از ۱ cm به ۲ cm مقدار ۰/۳۳۰۵ کاهش و به ازای

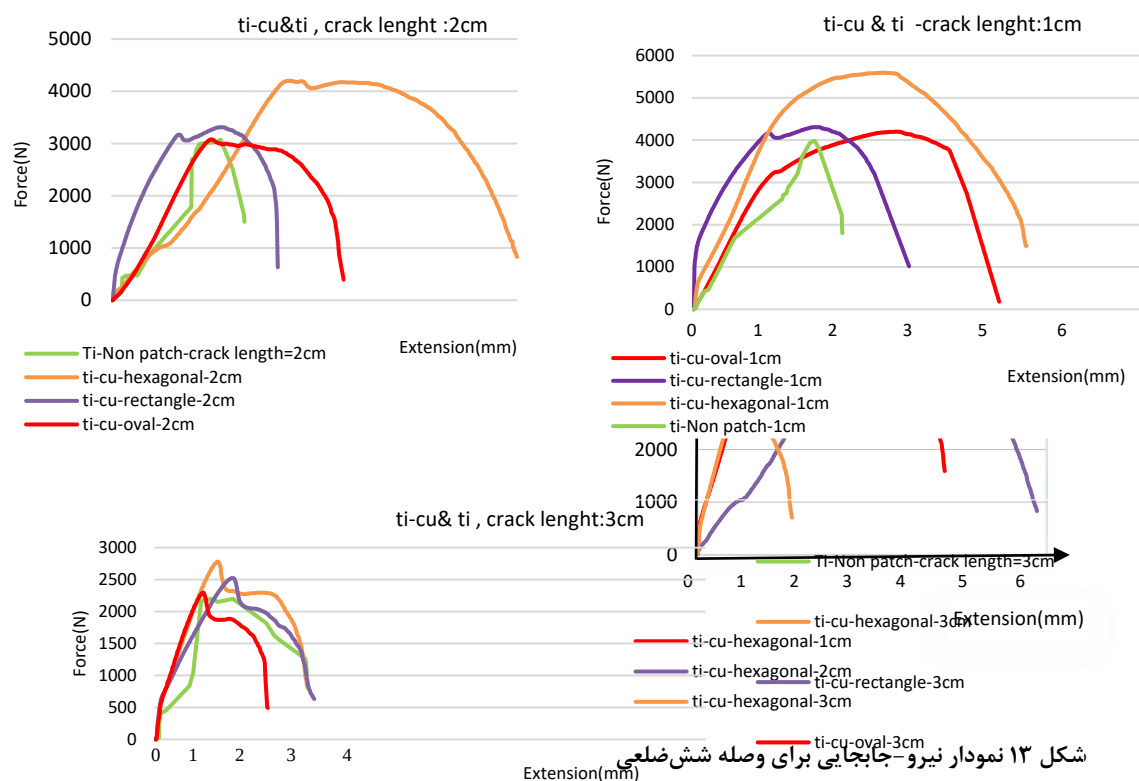


از کشش ورق تیتانیوم درجه ۲ ترمیم‌شده با وصله از جنس مس با طول ترک ۱ cm با شکل‌های هندسی متفاوت (مستطیل، بیضی و شش‌ضلعی) مقایسه شده که با توجه به نتایج بدست آمده استحکام کششی ورق با وصله شش‌ضلعی از مستطیل و بیضی به ترتیب بیشتر می‌باشد. همچنین با تکرار همین آزمایش برای ورق‌های مشابه با طول ترک‌های ۲ cm و ۳ cm طبق شکل‌های قسمت (ب) و (ج) شماره (۱۴) مجدداً همین نتیجه یکسان می‌باشد. لذا استحکام کششی ورق تیتانیوم ترک‌دار با وصله شش‌ضلعی نسبت به ورق ترمیم‌شده

افزایش طول ترک از ۱ cm به ۳ cm مقدار ۱/۰۱۲ کاهش می‌یابد و همچنین به ازای افزایش طول ترک از ۲ cm به ۳ cm مقدار ۰/۵۱۲۵ کاهش استحکام کششی قطعه ترمیم‌شده مشاهده می‌شود. در این شکل هندسی (شش‌ضلعی) همانند شکل‌های قبل به ازای طول ترک کمتر (ترک ورق پایه از جنس تیتانیوم) ازدیاد طول بیشتر ناشی از آزمایش کشش به علت مقاومت بیشتر قطعه و ناحیه الاستیک وسیع‌تر در نمودار نیرو-جابجایی مشاهده می‌شود، لذا بدیهی است که ورق تیتانیوم در زمان گسیختگی حین کشش با وجود اتصال وصله از جنس مس که نرمی بیشتری داشته به علت مقاومت بیشتر قطعه با طول ترک کمتر و عدم ترد بودن تیتانیوم در حین شکست که از ویژگی آن می‌باشد این نتیجه حاصل شده است. لذا با افزایش ناشی از طول ترک قطعات فوق‌الذکر در آزمایش کشش کاهش استحکام کششی دیده می‌شود. همچنین ازدیاد طول ترک در این آزمایش از ۱ cm به ۳ cm کاهش استحکام کششی بیشتری نسبت به دو نمودار شکل‌های قبل (شماره ۱۲ و ۱۳) را می‌توان نشان داد. برخلاف نمودارهای شکل-های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ که استحکام کششی قطعه تعمیر شده با شکل هندسی ثابت وصله و طول ترک متفاوت ارزیابی شد در قسمت الف، ب، ج شکل شماره ۱۴ استحکام کششی ورق‌های ترمیم‌شده با طول ترک یکسان و شکل‌های هندسی متفاوت و ورق بدون وصله با طول ترک مشابه بررسی می‌شود. حال در شکل شماره ۱۴ قسمت الف نمودارهای نیرو و جابجایی حاصل

با وصله مستطیل و بیضی به ترتیب بیشتر بوده که این نشان از همپوشانی بیشتر و تمرکز تنش کمتر در سطح می‌باشد، لذا مطابق نتایج بدست آمده استحکام کششی ورق ترمیم‌شده با وصله مستطیل هم به علت همپوشانی بهتر و تمرکز تنش کمتر در سطح نسبت به ورق ترمیم‌شده با وصله بیضی بیشتر می‌باشد. که از این دو نتیجه اخیر می‌توان به تاثیر تعداد گوشه در شکل هندسی در استحکام بهتر ورق ترمیم‌شده پی برد. معیار انتخاب شکل هندسی وصله ها در این آزمایش احاطه نمودن کل ترک و طول وصله برابر با عرض قطعه پایه

بوده که در این مقایسه شش ضلعی منظم به دلیل احاطه



شکل ۱۳ نمودار نیرو-جابجایی برای وصله شش ضلعی

شکل ۱۴-نمودار نیرو - جابجایی برای قطعات تعمیر شده با وصله و بدون وصله با طول ترک‌های متفاوت

Standard deviation (without patches)	Average with patches	Total average (with patch and without patch)	Standard deviation (with patch)
538.9	4700.66	4502.5	333.9
513.3	3532.33	3700.5	484.9
214.3	2533	2449.75	198.1
582.3			

ورق ترک‌دار بدون وصله () هم ارائه شد

میانگین با سه شکل هندسی وصله‌های مذکور و میانگین کل

استحکام کششی وصله شش ضلعی منتظم به ازای طول ترک ۱cm (ترک ورق پایه از جنس تیتانیوم) نسبت به وصله های مستطیل و لوزی به ترتیب مقادیر ۰/۲۳۰۲ و ۰/۲۴۹۳ درصد بیشتر بوده و مجدداً استحکام کششی وصله مستطیلی به ازای طول ترک ۱cm نسبت به وصله لوزی مقدار ۰/۲۴۰۸ درصد بیشتر است. همچنین استحکام کششی وصله شش ضلعی منتظم به ازای طول ترک ۲cm نسبت به وصله های مستطیل و لوزی به ترتیب مقادیر ۰/۲۱۲۳ و ۰/۲۶۷۵ درصد بیشتر بوده و همچنین استحکام کششی وصله مستطیلی به ازای طول ترک ۲cm نسبت به وصله لوزی مقدار ۰/۰۷۰۰ درصد بیشتر است. در مقایسه پایانی استحکام کششی وصله شش ضلعی منتظم به ازای طول ترک ۳cm نسبت به وصله های مستطیل و لوزی مقادیر ۰/۰۹۲۰ و ۰/۱۷۴۴ درصد بیشتر بوده و همچنین استحکام کششی وصله مستطیلی به ازای طول ترک ۳cm نسبت به وصله لوزی مقدار ۰/۰۹۰۷ درصد بیشتر است. با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه مقادیر فوق همپوشانی بهتر وصله شش ضلعی را می توان استنباط کرد.

۸-مراجع

- [1] L. Doremus, et al, (2015). Influence of residual stresses on the fatigue crack growth from surface anomalies in a nickel-based superalloy. Mater. Sci. Eng. C: A, Volume 644, ,Pages234
- [2] Nannan Lu, et al, (2020). Hot cracking behavior and mechanism of a third-generation Ni-based single-crystal superalloy during directed energy deposition, Additive Manufacturing, Volume 34, 101228, ISSN 2214-8604
- [3] Jordan Franks, Greg Wheatley, Pedram Zamani, Reza Masoudi Nejad, Wojciech Macek, Ricardo Branco, Farzaneh Samadi, (2022). Fatigue life improvement using low transformation temperature weld material with measurement of residual stress, Int. J. Fatigue, Volume 164, , 107137, ISSN 0142-1123
- [4] Oudad W, et al, (2009) , Feaugas X Analysis of the plastic zone size ahead of repaired cracks with bonded composite patch of metallic aircraft structures, Comput Mater Sci, 6, 950-4.
- [5] Dehghanpour, et al, (2021). Experimental and Numerical Investigation on Geometric Parameters of Aluminum Patches for Repairing Cracked Parts by Diffusion Method. J. Solid Mech, 13(1), 54-67. doi: 10.22034/jsm.2020.1885686.1528
- [6] Prasilova, A, Vasek, A, J, E, M, (1998). Retarding effect of reinforcing fibers on early crack growth in fatigued notched laminate GLARE2. 5(3), 219-223.

همپوشانی بهتر شکل هندسی شش ضلعی و تأثیر داشتن گوشه های بیشتر وصله در بهبود فرآیند دیفیوژن را می توان استنباط نمود.

۷-نتیجه گیری

در این تحقیق حداکثر نیروی کششی تحمل شده توسط قطعه تیتانیوم درجه ۲ ترک دار تعمیر شده با وصله های شش ضلعی منتظم، مستطیل و بیضی به روش دیفیوژن (SPS) در فشار، دما و زمان های متفاوت به قطعه ترک دار متصل شده و به روش تجربی تعیین شده و نتایج زیر حاصل شده است:

۱- جهت دستیابی به بهترین نوع تعمیر به روش دیفیوژن در قطعات ترک دار تیتانیومی، فرآیند دیفیوژن با دستگاه SPS به ترتیب در ۴ دمای ۸۲۰، ۸۳۰، ۸۴۰، ۸۵۰ درجه سانتی گراد و در فشارهای ۴۸، ۴۹، ۵۰ مگا پاسکال و در زمان های ۵۷۳، ۵۸۱، ۵۹۲ و ۶۰۱ دقیقه در شرایط خلأ نسبی آزمایش شد ولی در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد و فشار ۵۰ مگا پاسکال و در زمان ۱۵۰۰ ثانیه نمونه بهینه انتخاب گردید و اتصال مستحکم تری را ایجاد نمود یا به عبارتی استحکام اتصال قطعه ترمیم شده با وصله بهینه به علت ادغام کامل نسبت به قطعه بهینه نشده که منجر به جدایش وصله و قطعه پایه در آزمون کشش شبه استاتیکی می شد افزایش یافت، لذا در حالت بهینه به دست آمده این فرآیند به علت پیوند کامل (ادغام کال ورق پایه با وصله) باگذشت مدت زمان بیشتر از ۱۵۰۰ ثانیه رنج دما و فشار نمونه پیوند خورده در ۸۵۰ درجه سانتی گراد و ۵۰ مگا پاسکال ثابت شده و از این زمان به بعد پیوند دیفیوژن مورد قبول واقع شده است.

۲- با دقت نمودن به شکل ظاهری نمونه های گسیخته

شده بعد از آزمون کشش که در محدوده ادغام وصله و ورق

پایه صورت گرفته می توان پیوند دیفیوژن بهینه را با رنج پارامترهای دما و فشار و زمان به دست آمده استنباط نمود.

۳- با مطالعه تجربی پارامترهای هندسی بر روی وصله-

های مستطیلی، بیضی و شش ضلعی منتظم مشخص گردید که با افزایش ترک مقاومت ورق پایه کاهش می یابد و از میان وصله های مطرح شده، وصله شش ضلعی به خاطر همپوشانی بهتر در ناحیه اتصال در تمام طول ترک ها مقاومت بهتری از خود نشان می دهد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش کشش،

- [7] Sayyadi, A, (2001). Study of crack growth before and after repair of aluminum plates under oscilating loads using of finite element methods and experience. MSc Thesis, Amirkabir University of Technology, Department of mechanical
- [8] Emamalizadeh, et al, (2015). Fatigue analyst and crack growth on GLARE
- [9] Kumar ,et al, (2000). Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet. 49(3), 285-292.
- [10] K. Chandrappa et al (2020). Optimization of process parameter of diffusion bonding of Ti-Al and Ti-Cu, Volume 27, Part 2, 2020, Pages 1689-1695
- [11] Chun Li, et al, (2020). Diffusion bonding of Ti and Zr at ultra-low temperature via surface nano-crystallization treatment, . Mater. Sci. Eng. C: A, Volume 785, 139413, ISSN 0921-5093,
- [12] Xiu-feng WANG, et al, (2006). Diffusion bonding of γ -TiAl alloy to Ti-6Al-4V alloy under hot pressure, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 16, Issue 5, Page 1059-1063
- [13] Zhang, X.-P, et al, (1999). Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/SiCp-MMC). 30(12), 1415-1421.
- [14] "Diffusion Bonding". Welding Fundamentals and Processes. Vol. 06A. Materials Park, Ohio: ASM International. Handbook Committee, (2011). pp. 682–689. ISBN 978-0-87170-377-4. OCLC 21034891
- [15] Mahendran, G., Babu, S., Balasubramanian, V. J. J. o. M. E., & Performance. (2010). Analyzing the effect of diffusion bonding process parameters on bond characteristics of Mg-Al dissimilar joints. 19(5), 657-665.
- [16] ASTM A370 / ASME SA-370, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products1