



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

اردشیر محمودی نسب^۱، علیرضا نظام‌آبادی^{۲*} و فرزنان براتی^۳

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

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

^۳ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد 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، ۲ و ۳ 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 کاربردها 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 ۰/۵۳۴ و ۰/۶۹۱ 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 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

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.

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 مبحث 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 بر این، 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 مورد نیاز 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 یک طرف ورق با استفاده از وصله تعمیر می‌گردد. بنابراین در ترمیم نامتقارن به دلیل ایجاد یک خمش 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 ایجاد شده 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 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 ایجاد شده دارند. این شرایط عمر خستگی را به‌طور مؤثری زیاد می‌کند و ایمنی بخش‌های ساختاری ایجاد شده 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 بعد از ترمیم در ورق‌های آلومینیومی تحت بارهای نوسانی به کمک تحلیل المان محدود و آزمایش پرداخت. در این تحقیق، نمونه‌هایی استاندارد با استفاده از بارگذاری نوسانی پیش ترک ایجاد گردیده و این قطعات دارای ترک توسط مواد مرکب از جنس الیاف شیشه- اپوکسی به‌صورت متقارن و نامتقارن ترمیم شده و نرخ رشد ترک در آن‌ها به‌صورت تجربی بررسی شده است. همچنین ترمیم متقارن دارای کارایی بسیار بالاتری

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

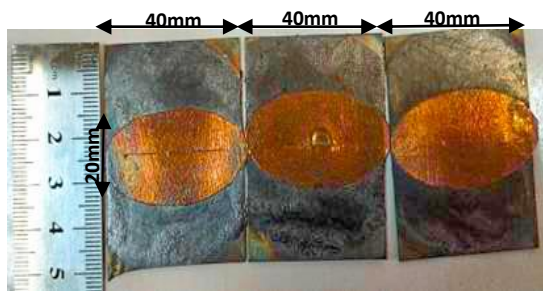
پلاستیک محلی در دمای بالا و ایجاد اتصال لایه‌های حالت جامد است. می‌توان گفت فرآیند دیفیوژن یک تکنیک جوشکاری است که به‌صورت گسترده‌ای در تولیدات صنعتی استفاده می‌شود. در فرآیند دیفیوژن می‌توان با کنترل دما، فشار و مدت‌زمان اعمال فشار و دما به طیف وسیعی از کامپوزیت‌ها و آلیاژها دست‌یافت [۱۳]. به همین جهت با توجه به معایب ارائه‌شده 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 ترک‌دار، فرآیند دیفیوژن روشی مفید و قابل اجرا است.

در این پژوهش در یک نوآوری با روش دیفیوژن ورق‌های ترک‌دار از جنس تیتانیوم با طول ترک‌های مرکزی ۲،۱ و ۳ سانتی‌متر با وصله‌های مسی ترمیم می‌شوند. سه نوع وصله با هندسه‌های مستطیل، بیضی و شش‌ضلعی منتظم برای ترمیم ورق‌های ترک‌دار استفاده می‌شود. مقاومت قطعات ترمیم‌شده تحت بار شبه استاتیکی عمود بر راستای ترک برای بررسی مقاومت قطعات ترمیم‌شده، با وصله‌های مسی روی قطعه پایه با ترک مرکزی به طول‌های متفاوت بررسی می‌شود و به‌عنوان راهکاری جدید برای افزایش مقاومت قطعات ترمیم‌شده، به بررسی استحکام کششی در ورق‌های ترک‌دار پرداخته می‌شود که این تحقیق با پژوهش‌های اخیر از نظر اتصال این شکل هندسی وصله‌ها (مستطیلی، بیضی و شش‌ضلعی منتظم) با جنس مس و ورق ترک‌دار مرکزی با طول ترک‌های مذکور متفاوت بوده و همچنین علاوه بر بررسی تأثیر فشار، دما و مدت‌زمان در بهینه‌سازی قطعه مورد آزمایش، اثر شکل هندسی وصله‌ها (مستطیلی، بیضی و شش‌ضلعی منتظم) در مقاومت ورق ترمیم‌شده مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین از آنجائیکه تیتانیوم قابلیت اکسید شدن سریع در سطح دارد و TiO_2 تشکیل می‌گردد قبل از آزمایش یک عملیات شیمیایی شامل شستن سطح با اسیدهای 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 مخصوصاً 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

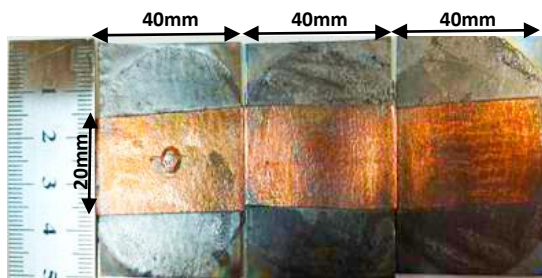
نسبت به ترمیم نامتقارن داشته و دلیل این امر را عدم به وجود آمدن ممان خمشی در ترمیم متقارن ذکر می‌کنند [۷]. امامعلی زاده و همکاران ضرایب شدت تنش و رشد ترک در ورق‌های چندلایه هیبریدی از جنس گلر را بررسی کردند. در این پژوهش ابتدا پس از ایجاد ترک با طول‌های مختلف در لایه‌های آلومینیوم، با استفاده از روش اجزای محدود به محاسبه ضرایب شدت تنش در لایه‌های آلومینیوم پرداخته شد. سپس با استفاده از رابطه پاریس^۱ رشد ترک چندلایه‌های هیبریدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد ضرایب شدت تنش در لایه‌های آلومینیوم مجزا، بسیار بیشتر از لایه‌های آلومینیوم موجود در چندلایه‌های هیبریدی بود و در نتیجه نرخ رشد ترک در آن‌ها سریع‌تر اتفاق افتاد [۸].

کومار و هاکیم نیز طراحی بهینه آسترهای کامپوزیتی متقارن و متعادل را برای تقویت یک صفحه آلومینیومی (بیضی، مربعی و دایروی) ترک‌خورده پیشنهاد کردند. در این پژوهش صفحه با حداقل حجم به‌عنوان بهینه‌ترین حالت معرفی شد [۹]. چاندراپا و همکاران بهینه‌سازی پارامتری فرآیند اتصال دیفیوژنی تیتانیوم-آلومینیوم و تیتانیوم-مس را شامل سه آیتم دما، زمان و فشار را بررسی و از طریق نتایج آزمایش‌های سختی سنجی و تحلیل عکس‌های 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) 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 یکپارچه‌سازی سطحی در مقیاس اتمی در اثر فشردگی در سطح جدایش با تغییر شکل

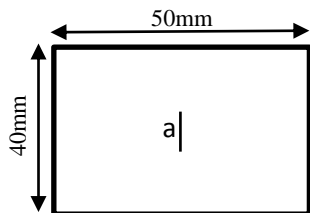
^۱ Paris equation



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

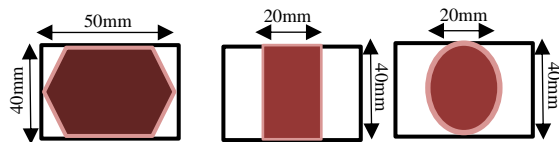


شکل ۳- ورق تیتانیوم ترمیم‌شده با طول ترک‌های ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر با شکل وصله مستطیل



الف- نمونه شماتیک ورق تیتانیوم درجه ۲ به ابعاد استاندارد $50 \times 40 \times 0.5$ میلی‌متر و طول ترک‌های مرکزی (a)

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



ب- ابعاد شماتیک وصله‌ها

شکل ۴- شماتیک ورق ترک‌دار و شکل هندسی وصله

پارامترهای شکل هندسی وصله‌های مسی و طول ترک‌های مرکزی ورق پایه می‌باشد.

۲- روش آزمایشگاهی

۲-۱- مواد اولیه

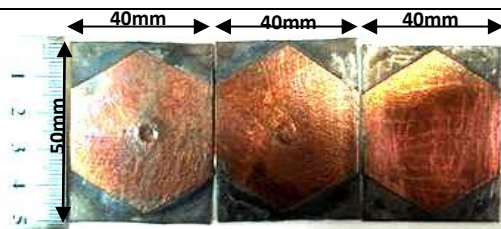
در این تحقیق از تیتانیوم درجه ۲ به جهت ساخت قطعه ترک‌دار و از فلز مس به عنوان وصله استفاده شده است. آزمایش انجام‌شده در این تحقیق شامل آزمون‌های استحکام کششی در حالت قطعه تعمیر شده با وصله‌هایی به شکل‌های مستطیلی، بیضی و شش‌ضلعی است. ابعاد نمونه‌های ورق ترک‌دار تیتانیوم پایه $50 \times 40 \times 0.5$ میلی‌متر است که مطابق استانداردهای 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 منظم 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 [۱۶]

استحکام نهایی (MPa)	چقرمگی شکست (MPa)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)
۳۴۵	۶۶	۰٫۳۷	۱۰۵

جدول ۲- ترکیب عناصر آلیاژی تیتانیوم گرید ۲

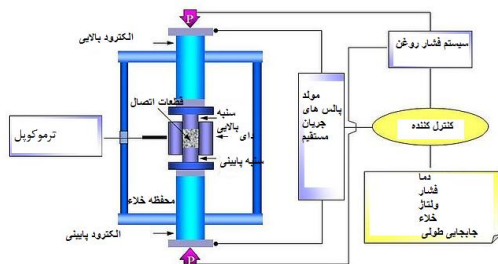
ti	Fe	Cr	Mn
٪۹۹٫۹۲	٪۰٫۰۸	≤٪۰٫۰۴	≤٪۰٫۰۱



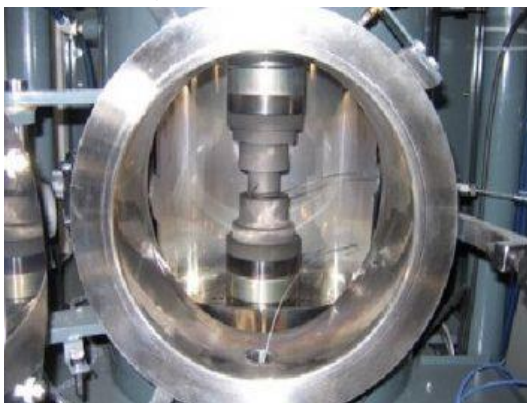
شکل ۱- ورق تیتانیوم ترمیم‌شده با طول ترک‌های ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر با شکل وصله شش‌ضلعی منظم

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 ترک‌دار 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)



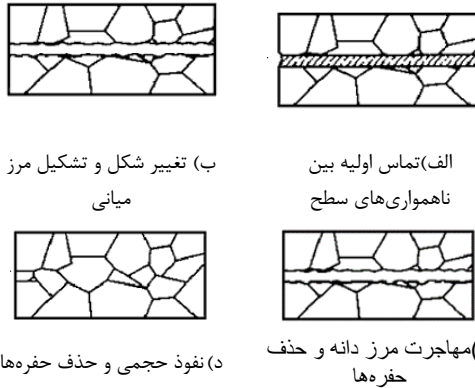
شکل ۶- تصویر محفظه داخلی (قالب های گرافیتی)

تحت خلا دستگاه 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 جرقه های 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 روش های 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 توجه به ابعاد قطعه طبق استاندارد ASTM E 8/E 8M - 08 و [۱۶] / ASME SA-370 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

^۱ Spark Plasma Sintering

همگن شدن ساختار کریستالی این پیوند می‌باشد. در واقع افزایش نرخ فشار و دما و زمان در حالت بهینه سبب تکمیل فرآیند دیفیوژن شده است.

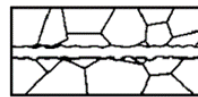


الف) تماس اولیه بین ناهمواری‌های سطح

ب) تغییر شکل و تشکیل مرز میانی

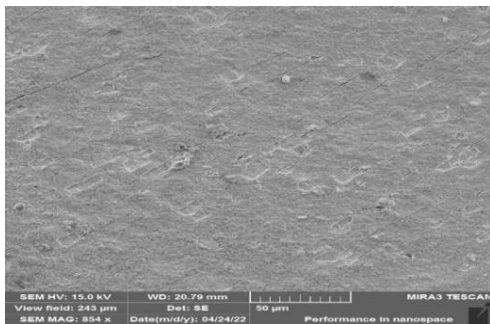


ج) مهاجرت مرز دانه و حذف حفره‌ها

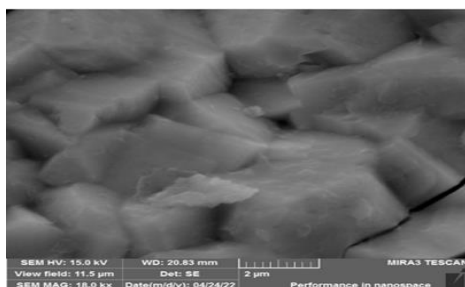


د) نفوذ حجمی و حذف حفره‌ها

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



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

جدول ۳ مشخصات دستگاه SPS مورد استفاده

ولتاژ (V)	حداکثر قدرت جریان (A)	حداکثر فشار (Ton)	منبع تغذیه (Hz)	فرکانس
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 (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

۳-۲- آزمون

تست کشش توسط دستگاه سروو هیدرولیک سنتام ظرفیت ۱۰۰ تن که در شکل ذیل نشان داده شده است انجام شد. تمامی آزمون‌ها در دمای اتاق انجام و سرعت بارگذاری در تمامی آزمون‌ها ثابت و برابر 0.1 min/mm است. حداقل سه نمونه طبق عرف آزمایشگاه‌ها 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 فک‌های دستگاه کشش مطابق شکل (۱۰) آزمایش کشش استاتیکی در قطعه تعمیر شده را نشان می‌دهد. و شکل (۱۱) مراحل نرخ رشد ترک را در یک نمونه وصله مستطیلی در حین آزمون کشش را نشان می‌دهد.



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



شکل شماره ۱۱- مراحل نرخ رشد ترک در آزمون کشش

جدول ۴- تعداد آزمون کشش قطعات ترمیم شده با طول

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

نتایج حاصل از آزمون کشش به‌طور معمول برای انتخاب یک ماده به‌منظور کنترل کیفیت و پیش‌بینی اینکه چگونه یک ماده تحت انواع دیگری از نیروها واکنش نشان می‌دهد به کار می‌رود. منحنی نیرو-جابجایی بر اساس مقادیر نیروواعمالی- ازدیاد طول رسم می‌شود لذا خروجی آزمون یک منحنی نیرو/جابجایی است که نشان‌دهنده رفتار ماده تحت کشش است. داده‌های به‌دست‌آمده در این آزمون برای تعیین خواص مکانیکی و کمیت‌های فیزیکی ماده استفاده شده است.

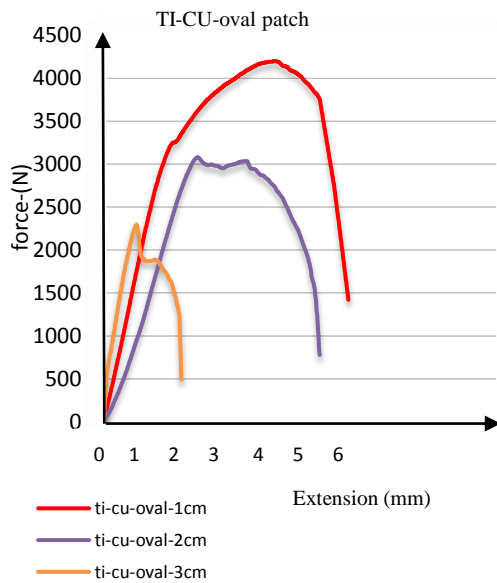
در این پژوهش، برای هر ورق تیتانیوم با طول ترک‌های مرکزی ۳،۲،۱ سانتی‌متر ترمیم شده با وصله مسی به شکل‌های هندسی بیضی، مستطیل و شش ضلعی منتظم مطابق جدول شماره (۴) یک آزمون کشش موفق انجام شده است که حاصل این آزمون نمودارهای نیرو-جابجایی مطابق شکل‌های شماره (۱۱ تا ۱۴) می‌باشد و از مقایسه آن نمودارها نتایج حاصل می‌گردد. همچنین آزمون کشش برای نمونه‌های بدون وصله 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 شش ضلعی منتظم جداگانه ۳ آزمون آزمایشی کشش جمعاً به تعداد ۹ آزمون صورت گرفت که با توجه به نتایج یکسان آزمون‌های آزمایشی مذکور، کالیبره 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.

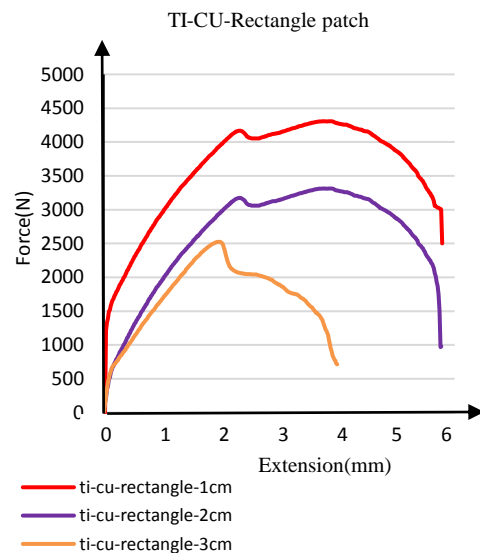
در شکل شماره (۱۱) نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از کشش شبه استاتیکی قطعات را نمایش می‌دهد که در این نمودارها مقاومت ورق تیتانیومی ترمیم‌شده با وصله مسی با شکل هندسی مستطیلی با طول ترک‌های ۱cm، ۲cm و ۳cm مقایسه شده است. با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش، استحکام کششی قطعات به ازای افزایش طول ترک از ۱cm به ۲cm مقدار ۰/۳۰۰۴ کاهش و به ازای افزایش طول ترک از ۲cm به ۳cm مقدار ۰/۷۰۶۴ کاهش می‌یابد و همچنین به ازای افزایش طول ترک از ۲cm به ۳cm 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.

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 ۱cm، ۲cm و ۳cm 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 ۱cm به ۲cm مقدار ۰/۳۶۳۶ کاهش و به ازای افزایش طول ترک از ۲cm به ۳cm مقدار ۰/۸۳ کاهش می‌یابد و همچنین به ازای افزایش طول ترک از ۲cm به ۳cm 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. در واقع 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.



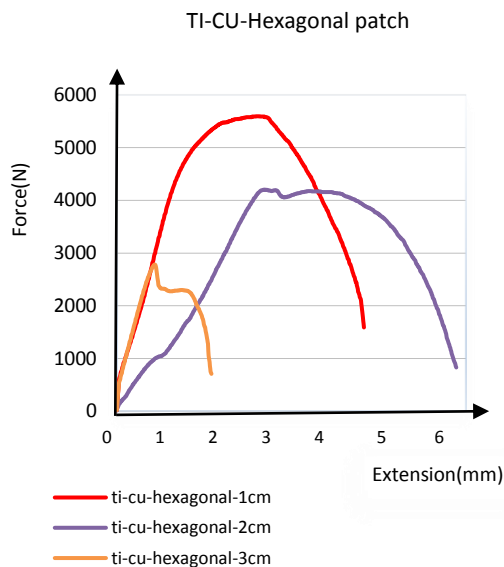
شکل ۱۲- نمودار نیرو-جابجایی برای وصله بیضی

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 ۱cm، ۲cm و ۳cm 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 ۱cm به ۲cm مقدار ۰/۳۳۰۵ کاهش و به ازای



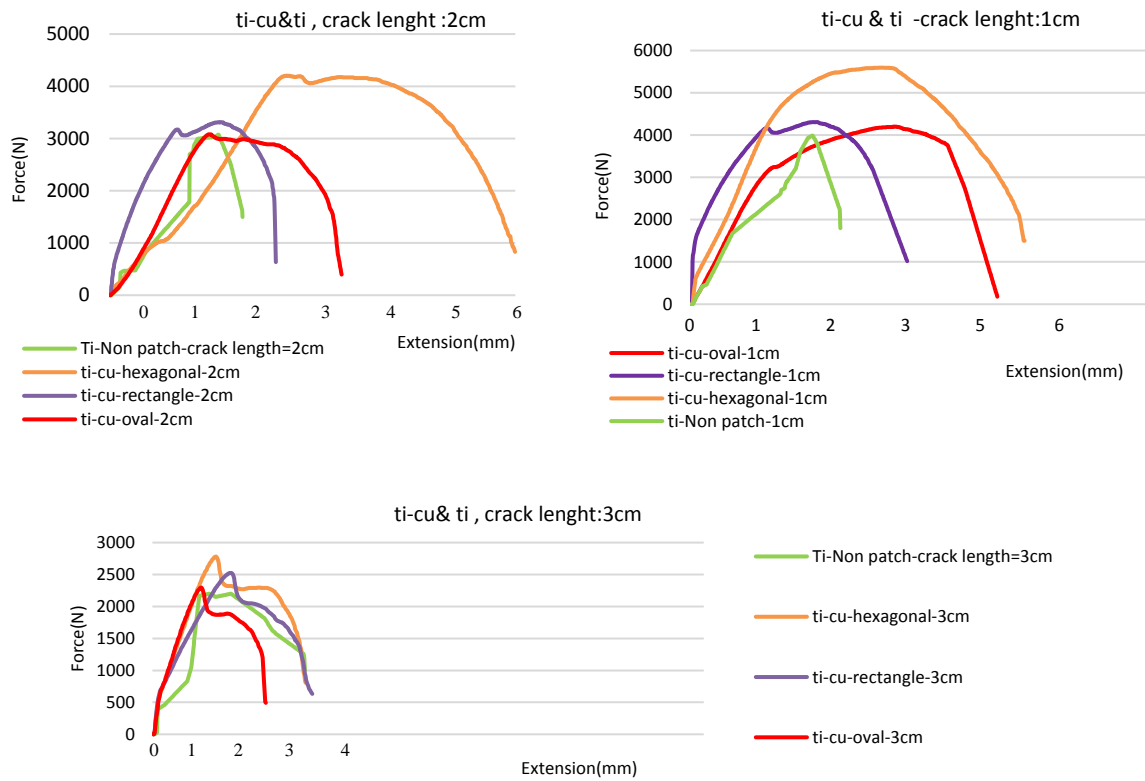
شکل ۱۱- نمودار نیرو-جابجایی برای وصله مستطیلی

با وصله مستطیل و بیضی به ترتیب بیشتر بوده که این نشان از همپوشانی بیشتر و تمرکز تنش کمتر در سطح می-باشد، 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 می-باشد. 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 شش‌ضلعی منظم به دلیل احاطه نمودن سطح بیشتر و داشتن تعداد گوشه بیشتر در استحکام ورق ترمیم‌شده تاثیر گذارتر بوده است.

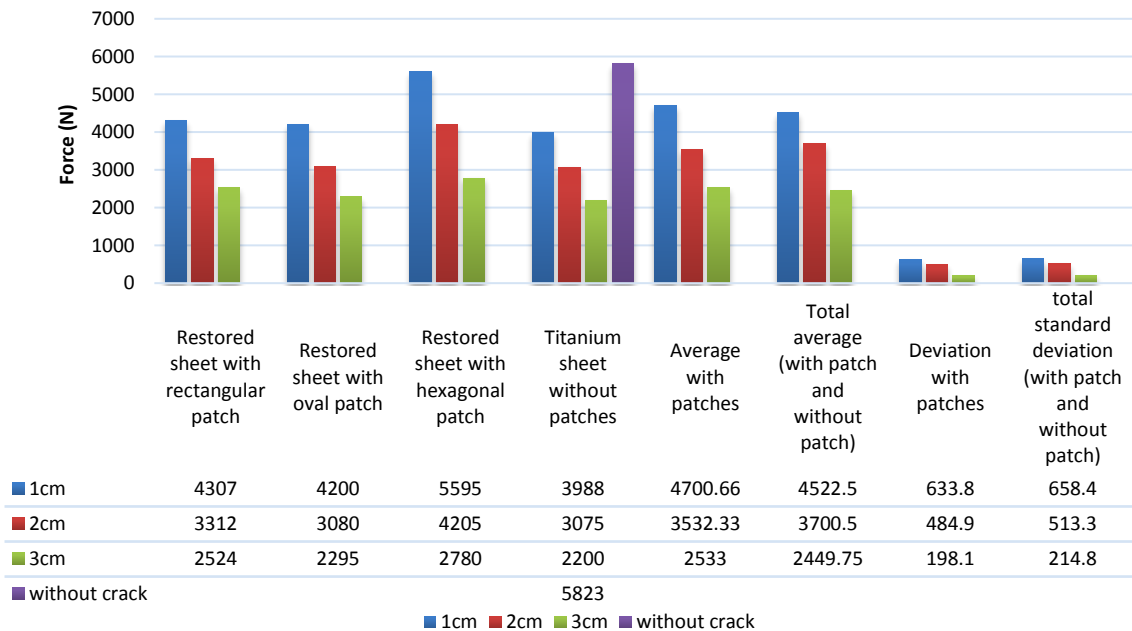


شکل ۱۳ نمودار نیرو-جابجایی برای وصله شش‌ضلعی

افزایش طول ترک از ۱cm به ۳cm مقدار ۱/۰۱۲ کاهش می‌یابد و همچنین به ازای افزایش طول ترک از ۲cm به ۳cm 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 ۱cm به ۳cm 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 از کشش ورق تیتانیوم درجه ۲ ترمیم‌شده با وصله از جنس مس با طول ترک ۱cm 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 ۲cm و ۳cm 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



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



شکل ۱۵- نتایج آزمون کشش شبه استاتیکی همراه با میانگین استحکام کششی نمونه‌ها و انحراف معیار

ازای افزایش طول ترک استحکام کششی نزدیک‌تری به میانگین استحکام نمونه‌ها خواهد داشت.

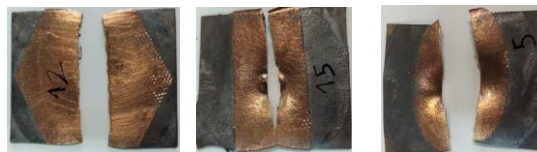
در شکل شماره ۱۶ نمونه گسیخته شده تحت بار شبه استاتیکی ارائه می‌شود. که با توجه به اشکال گسیخته شده با طول ترک‌های یکسان و نوع تغییر شکل و خمش به وجود آمده می‌توان پیوند نمونه گسیخته شده با شکل هندسی شش ضلعی منتظم را نسبت به دو نمونه دیگر و همچنین نمونه گسیخته شده با وصله مستطیل را نسبت به نمونه با وصله بیضی مقاوم‌تر و بهتر دانست. لذا در نمودارهای فوق‌الذکر همپوشانی بهتر شکل هندسی شش ضلعی و تأثیر داشتن گوشه‌های بیشتر وصله در بهبود فرآیند دیفیوژن را می‌توان استنباط نمود.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق حداکثر نیروی کششی تحمل شده توسط قطعه تیتانیوم درجه ۲ ترک‌دار تعمیر شده با وصله‌های شش ضلعی منتظم، مستطیل و بیضی به روش دیفیوژن (SPS) در فشار، دما و زمان‌های متفاوت به قطعه ترک‌دار 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 ترک‌دار تیتانیومی، فرآیند دیفیوژن با دستگاه SPS به ترتیب در ۴ دمای ۸۲۰، ۸۳۰، ۸۴۰، ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و در فشارهای ۴۸،۴۷، ۴۹، ۵۰ مگا پاسکال و در زمان‌های ۵۷۳، ۵۸۱، ۵۹۲ و ۶۰۱ دقیقه در شرایط خلأ نسبی آزمایش شد ولی در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵۰ مگا پاسکال و در زمان ۱۵۰۰ ثانیه نمونه بهینه انتخاب گردید و اتصال مستحکم‌تری را ایجاد نمود یا به عبارتی استحکام اتصال قطعه ترمیم‌شده 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 می‌شد افزایش یافت، لذا در حالت بهینه به دست آمده این فرآیند به علت پیوند کامل (ادغام کامل ورق پایه با وصله) با گذشت مدت‌زمان بیشتر از ۱۵۰۰ ثانیه رنج دما و فشار نمونه پیوند خورده در ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۵۰ مگاپاسکال ثابت شده و از این زمان به بعد پیوند دیفیوژن موردقبول واقع شده است.

۲- با دقت نمودن به شکل ظاهری نمونه‌های گسیخته شده بعد از آزمون کشش که در محدوده ادغام وصله و ورق



الف- نمونه گسیخته شده با وصله بیضی شکل
ب- نمونه گسیخته شده با وصله مستطیل شکل
ج- نمونه گسیخته شده با وصله شش ضلعی منتظم شکل

شکل ۱۶- نمونه قطعه گسیخته شده تحت بار شبه استاتیکی

در این پژوهش با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون کشش برای ورق‌های تیتانیوم با ترک‌های مرکزی به طول‌های ۲، ۱ و ۳ سانتی‌متر (بدون وصله) و ترمیم‌شده با وصله‌های به شکل هندسی مستطیل، بیضی و شش ضلعی مطابق شکل شماره ۱۵ مقایسه‌ای صورت گرفته است. در ادامه میانگین استحکام کششی و انحراف معیار ورق‌های ترمیم‌شده با وصله (ورق ترمیم‌شده برای هر طول ترک و سه وصله مذکور) و میانگین کل و انحراف معیار کل (ورق‌های ترک‌دار ترمیم‌شده با وصله و ورق ترک‌دار بدون وصله) هم ارائه شده است که از نتایج میانگین با سه شکل هندسی وصله‌های مذکور و میانگین کل (ورق‌های ترمیم‌شده با وصله و ورق‌های بدون وصله) می‌توان نشان داد که استحکام کششی قطعات مذکور با طول ترک ۱ سانتی‌متر به ترتیب از ۲ و ۳ سانتی‌متر بیشتر بوده و همچنین استحکام کششی قطعات با طول ترک ۲ سانتی‌متر از طول ترک ۳ سانتی‌متر بیشتر است که از این آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت طول ترک مرکزی در ورق تیتانیوم درجه ۲ با استحکام کششی رابطه‌ای معکوس دارد یعنی طول ترک کمتر استحکام بیشتری را نتیجه خواهد داد. همچنین با توجه به نتایج انحراف معیار با وصله و انحراف معیار کل مطابق شکل ۱۵ و توجه به تعداد قطعات آزمایش شده و پارامترهای مذکور (طول ترک و شکل هندسی وصله) می‌توان استنباط نمود که با افزایش طول ترک، انحراف معیار کمتر شده یعنی استحکام کششی قطعات با افزایش طول ترک به مقدار میانگین استحکام قطعات نزدیک می‌شود لذا می‌توان از انحراف معیار به دست آمده نتیجه گرفت که ورق تیتانیوم درجه دو با ترک مرکزی با وصله به شکل‌های هندسی مذکور و بدون وصله به

- 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.
- [7] Sayyadi, A, (2001). Study of crack growth before and after repair of aluminum plates under oscillating 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 nanocrystallization 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 Products 1
- پایه صورت گرفته می‌توان پیوند دیفیوژن بهینه را با رنج پارامترهای دما و فشار و زمان به دست آمده استنباط نمود.
- ۳- بامطالعه تجربی پارامترهای هندسی بر روی وصله‌های مستطیلی، بیضوی و شش‌ضلعی منتظم مشخص گردید که با افزایش ترک مقاومت ورق پایه کاهش می‌یابد و از میان وصله‌های مطرح شده، وصله شش‌ضلعی به خاطر همپوشانی بهتر در ناحیه اتصال در تمام طول ترک‌ها مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش کشش، استحکام کششی وصله شش‌ضلعی منتظم به ازای طول ترک ۱cm (ترک ورق پایه از جنس تیتانیوم) نسبت به وصله‌های 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 شش‌ضلعی منتظم به ازای طول ترک ۲cm نسبت به وصله‌های 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 شش‌ضلعی منتظم به ازای طول ترک ۳cm نسبت به وصله‌های 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 شش‌ضلعی را می‌توان 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