

کاهش سوانح مربوط به بال و بدنه هواپیما با جایگزینی فرآیند پرچ کاری با فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

محمد کاظمی نصرآبادی^{۱*}، کاظم صادقیپور^۲

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

۲- کارشناسی ارشد هوافضا، دانشگاه علوم و فنون شهید ستاری، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵)

چکیده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای یکی از فرآیندهای تولید برتر با کاربردهای متعددی می‌باشد که امروزه توجه زیادی در صنایع هوافضا به خود معطوف کرده است. هدف اصلی در این تحقیق، مقایسه استحکام کششی-برشی اتصال ورق‌های متفاوت آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ و ۷۰۷۵-T۶ در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با فرآیند پرچ کاری مورد استفاده متداول در سازه‌های بال و بدنه هواپیما می‌باشد. همچنین تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل تاثیر سرعت نفوذ ابزار، سرعت دورانی ابزار و ترتیب قرار گرفتن ورق‌های آلیاژهای آلومینیوم بر استحکام کششی ناحیه اتصال فرآیند جوشکاری اصطکاکی با استحکام کششی فرآیند اتصال پرچ کاری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. با انتخاب مناسب این پارامترها، استحکام کششی-برشی بهینه اتصال قابل دستیابی است. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند جهت جایگزینی فرآیند پرچ کاری با فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در صنایع هوافضا و به‌ویژه در قسمت‌هایی از بال و بدنه هواپیما به‌منظور دستیابی به استحکام بالاتر در اتصالات مورد نظر استفاده نمود. در نتیجه خرابی‌های مرتبط با اتصالات مورد استفاده در سازه‌های هواپیما کاهش موثری داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، پرچ کاری، استحکام کششی برشی

Reduction of wing-related incidents and aircraft fuselage by replacing riveting process with friction stir spot welding process

Mohammad Kazemi Nasrabadi^{1*}, Kazem sadeghpour²

1- Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering, Tehran, Iran.

2- Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering, Tehran, Iran.

Abstract

Friction stir spot welding has been considered as one of the superior manufacturing processes with various applications which nowadays draw the attention of aerospace industries. The main goal of the current study is to compare the shear tensile-shear strength of dissimilar aluminum alloy sheets of 7075-T6 and 2024-T3 in the friction stir spot welding process with the riveting process commonly used in the wing and body structures of the aircraft. In addition, the influence of various parameters such as the influence of tool penetration speed, tool rotational speed, and the arrangement of aluminum alloy sheets on the tensile-shear strength of the joining zone have been investigated and compared with that of rivet joining process. By properly choosing these parameters, the optimum tensile-shear strength of the joint can be attainable. Results obtained during the current research can be considered to replace the riveting process with the stir spot welding process in the aerospace industries, and in particular for some portions of the wing and body of the aircraft in order to achieve higher strength for the desired joints. As a result, the damage related to the joints used in aircraft structures could be efficiently reduced.

Key words: friction stir spot welding, riveting, shear tensile strength

مقدمه

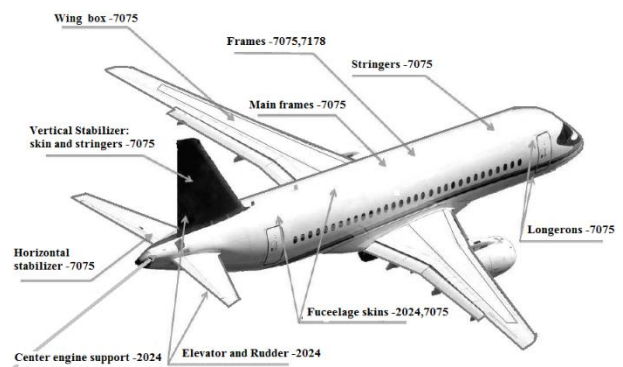
جوشکاری حالت جامد در این آلیاژها پرداخته‌اند. در این راستا جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌عنوان یکی از روش‌های جوشکاری در حالت جامد برای اتصال این آلیاژهای آلومینیوم استفاده شده است. در صنعت هوافضا از این روش جهت جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم سری‌های ۲XXX، ۶XXX و ۷XXX استفاده می‌شود. این روش به‌عنوان جایگزینی برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای و تکنولوژی پرچ کاری مطرح شده است [۴].

پرچ و جوشکاری هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارد. پرچ جزء اتصالات مکانیکی و جوشکاری متعلق به اتصالات متالورژیکی می‌باشد. در فرآیند جوشکاری، معایبی نظیر تحولات فازی ناخواسته، تغییرات اندازه دانه، تنش‌های پسماند، تخلخل و محبوس شدن ناخالصی‌ها، تضعیف خواص مکانیکی در ناحیه مجاور جوش ایجاد می‌شود. جوشکاری‌های حالت جامد مشتمل بر جوشکاری FSW به دلیل عدم ملاقات فاز مایع از خیلی از این عیوب مبری بوده ولی باز نمی‌توانند کاملاً از سایر عیوب خاص خود و حفره‌های داخلی مبری باشند. این امر باعث می‌شود که راندمان اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (یعنی نسبت استحکام اتصال به استحکام فلز پایه) در بازه ۶۵ تا ۱۰۰ درصد متغیر باشد [۵]. در مورد اتصالات پرچی به دلیل ماهیت مکانیکی و در نتیجه عاری بودن از عیوب متالورژیکی دلیلی وجود ندارد که راندمان اتصال پرچ را ۱۰۰ درصد در خصوص پرچ همجنس با فلز پایه و حتی بیشتر از ۱۰۰ درصد در خصوص پرچ‌های با جنس‌های مستحکم‌تر از فلز پایه نگیریم. به این ویژگی بایستی مزایایی از قبیل سادگی فرایند پرچکاری، قابلیت انعطاف و متحرک بودن تجهیزات فرایند را نیز افزود. اما علیرغم این مزایا، تبعات خوردگی گریبان‌گیر فرایند پرچکاری است. در واقع اگر بخواهیم از پرچی با استحکام بیشتر از فلز پایه استفاده کنیم آنگاه اغلب مجبور به تغییر جنس پرچ خواهیم بود که در اینصورت ریسک خوردگی از نوع گالوانیکی افزایش می‌یابد و حتی ممکن است سبب افزایش وزن نیز گردد [۶]. پرچ‌های هم‌جنس علیرغم نداشتن ریسک خوردگی گالوانیکی درگیر نوع دیگری از خوردگی به‌نام خوردگی شیاری هستند. این نوع خوردگی ناشی از سکون محلول خورنده در شیارهای باریک می‌باشد. در واقع یک نمونه کلاسیک این نوع خوردگی اتصالات پرچی می‌باشند و برای مبارزه با این نوع خوردگی جایگزینی پرچ با جوش توصیه

در حیطه جوشکاری فلزات سبک‌وزن، استفاده از روش‌های سنتی جوشکاری منجر به عیوبی همچون تخلخل و حفره می‌شود که باعث افت استحکام کششی می‌گردد. علاوه بر این استفاده از گازهای محافظ در این روش جوشکاری باعث پیچیدگی فرآیند می‌شود [۱]. امروزه اتصالات فلزات غیرهم‌جنس به دلیل امکان بهره‌گیری از خواص مکانیکی، فیزیکی و خوردگی اجزای مختلف یک سازه یا قطعه صنعتی، مورد توجه صنعتگران قرار گرفته است.

در سازه بال و بدنه هواپیما از فلزاتی با نسبت استحکام به وزن بالا نظیر آلیاژهای آلومینیوم ۷۰۷۵ و ۲۰۲۴ استفاده شده است [۲]. آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴، به دلیل استحکام بالا و مقاومت خستگی خوب و آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به دلیل مقاومت به خوردگی مناسب، نسبت استحکام به وزن بالا و هدایت حرارتی خوب به‌طور گسترده در بال و بدنه هواپیما مورد استفاده قرار گرفته است. این آلیاژها در مقابل روش‌های جوشکاری ذوبی قابلیت جوش‌پذیری ضعیفی از خود نشان می‌دهند [۳].

کاربرد آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ در قسمت‌های مختلف بال و بدنه هواپیما به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است [۳].



شکل ۱ - کاربرد آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ در قسمت‌های مختلف بال و بدنه هواپیما [۴].

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل ریزساختار جامد نامناسب، تشکیل حفره و تخلخل در حین روش‌های جوشکاری ذوبی، به‌عنوان مواد غیرقابل جوشکاری دسته‌بندی شده‌اند. با توجه به افت شدید خواص مکانیکی فلز جوش‌داده شده در مقایسه با فلز پایه، صنعتگران و دانشمندان به استفاده و توسعه روش‌های

اتصال آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ به روش جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با پرشدن مجدد توسط مرجع [۱۴] ارزیابی شد. تاثیر پنج نوع ابزار با پین متفاوت شامل استوانه‌ای، استوانه‌ای رزه‌دار، مخروطی، مربعی و مثلثی در اتصال ورق‌های آلومینیوم AA۶۰۶۱ با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بررسی شده است. نتایج نشان داد که ابزار با پین مربعی، جوشی با کیفیت‌تر از سایر ابزارها ارائه می‌کند [۱۵].

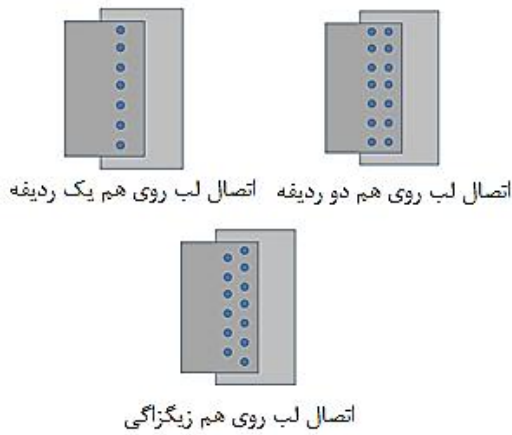
باتوجه به مطالعات انجام‌شده روی استحکام کششی برشی اتصال در جوشکاری ورق‌های ناهم‌نام آلومینیومی، ترتیب قرارگرفتن ورق‌های آلیاژهای آلومینیوم بر استحکام کششی/برشی ناحیه اتصال مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این تحقیق، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار و ترتیب قرار گرفتن ورق‌های آلیاژهای آلومینیوم بر استحکام کششی/برشی ناحیه اتصال مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین مقایسه‌ای بین استحکام کششی/برشی اتصال ورق‌های ناهم‌نام آلیاژهای آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۰۷۵ در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای و فرآیند پرچ کاری مورد استفاده در سازه‌های بال و بدنه هواپیما انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند در صنایع هوافضا و به‌ویژه در قسمت‌هایی از بال و بدنه هواپیما در اتصالات استفاده شود. بنابراین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند در موقعیت‌هایی جایگزینی برای فرآیند پرچ کاری باشد تا بدین‌وسیله سوانح مرتبط با اتصالات مورد استفاده در سازه‌های هواپیما را کاهش یابد. در دومین بخش از این تحقیق جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای ارائه شده است. روش تحقیق، مواد استفاده شده، ابزار و تجهیزات جوشکاری موضوع سومین بخش از این مقاله است. در بخش چهارم شرح فرآیند و طراحی آزمایش ارائه شده است. بررسی استحکام کششی اتصال در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای و فرآیند پرچ کاری موضوع پنجمین بخش از این تحقیق است. نهایتاً در آخرین بخش نتیجه‌گیری آمده است.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، یکی از کاربردهای اخیر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. در این روش همانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک ابزار

می‌گردد [۶]. این توصیه دستاویز نگارندگان مقاله جهت توجیه کار است که مقایسه‌ای میان خواص مکانیکی جوش و پرچ صورت گرفته است تا اطمینان حاصل شود که استحکام جوش نسبت به پرچ در حد قابل قبولی است در این تحقیق چند نمونه از پرچ‌های کاربردی در بال و بدنه هواپیما در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل جنس ضعیف‌تر پرچ در قیاس با فلز پایه استحکام جوش از پرچ هم زیادتر شده است. قابل ذکر است حتی در صورت استفاده از پرچ‌های مستحکم‌تر بنابر ملاحظات خوردگی جایگزینی پرچ با جوشی با استحکام قابل قبول استاندارد می‌تواند توجیه منطقی داشته باشد.

در تحقیقی در سال ۲۰۱۴ خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای ناهم‌نام آلومینیومی ۶۰۶۱ و ۷۰۷۵ مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. استحکام اتصال در فرآیندهای پرچ خودنفوذی؛ جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در ورق‌های آلومینیومی T۴p-۶۱۱ و O-۵۷۵۴ توسط مرجع [۸] مقایسه شده است. خواص مکانیکی و میکروساختاری اتصال‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژهای ناهم‌نام آلومینیومی T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۰۷۵ انجام شده است [۹]. در تحقیقی دیگر رفتار مکانیکی ورق‌های جوش‌داده‌شده آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ را با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و استفاده از جنس‌های متفاوت برای صفحه پشتیبان مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که انتخاب صحیح جنس صفحه پشتیبان سبب افزایش هم‌زمان استحکام و چقرمگی در اتصالات می‌شود [۱۰]. اثر سرعت جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تحت خنک‌کاری با آب ارزیابی شده است [۱۱]. همچنین تاثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی استحکام اتصالات آلیاژ آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ مورد مطالعه قرار گرفته است و با تغییر پارامترهای فرآیند و پارامترهای ابزار تولیدشده، خواص مکانیکی اتصالات اندازه‌گیری و ریزساختار و سختی منطقه اغتشاش مقایسه شده است. [۱۲]. در تحقیقی دیگر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در آلیاژ آلومینیوم T۶-۶۰۶۰ مطالعه شد و هدف از انجام آن، دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی عمودی ابزار جهت دستیابی به اتصالی مناسب با کم‌ترین میزان عیوب بود [۱۳]. ریزساختار و مکانیزم شکست



شکل ۴ - انواع مختلف اتصال لب روی هم

دلایل مختلفی از قبیل خوردگی پرچ‌ها، استفاده از آلیاژهای نامناسب در ساخت پرچ و به کار بردن تعداد کم پرچ در محل اتصالات حساس باعث خراب شدن اتصالات پرچی شده که منجر به حوادث جبران ناپذیری در سازه‌ها می‌شوند. سانحه مربوط به پرواز ۱۲۳ از خط هوایی ژاپن در ۱۲ اوت سال ۱۹۸۵ در اثر عدم تعمیرات صحیح در پرچ کاری قسمتی از بدنه هواپیما ایجاد شده است. دلیل این حادثه تعمیر نامناسب در قسمت دم هواپیما اعلام شد که بر اثر حادثه‌ای ۷ سال قبل از سقوط هواپیما انجام شده بود و با دستورالعمل شرکت بوئینگ تفاوت داشت و حقیقت این بود که به جای استفاده از دو ردیف پرچ، از یک ردیف پرچ استفاده شده بود و همین عدم تعمیر درست دیواره پرچ هواپیما باعث سقوط آن شده بود. شکل ۵ تعمیرات صحیح و نادرست انجام شده را نشان می‌دهد [۲۰].

مورد دیگر می‌توان به کشتی تایتانیک اشاره نمود. یکی از عواملی که در غرق شدن تایتانیک مؤثر بود را می‌توان به میخ‌پرچ‌ها نسبت داد زیرا نزدیک به سه میلیون میخ پرچ در اتصالات تایتانیک به یکدیگر به کار رفته بود. برخی از این



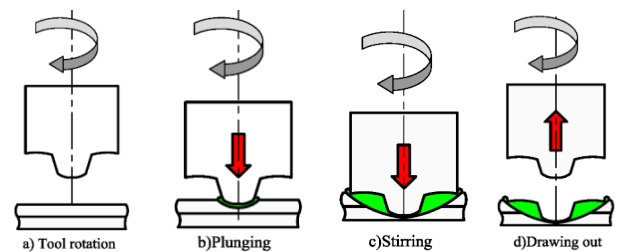
شکل ۵ - تعمیرات صحیح و اشتباه در پرچ کاری

دورانی پین‌دار جهت ایجاد اتصال بین ورق‌ها در داخل قطعه کار نفوذ می‌کند. اما برخلاف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در این فرآیند ابزار حرکت خطی در صفحه ورق نداشته و تنها در مسیر ضخامت ورق جهت ایجاد اتصال حرکت می‌کند. این فرآیند بصورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

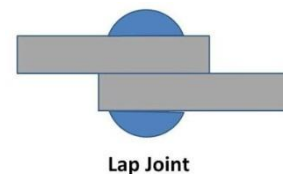
از مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای می‌توان به واپیچش کم، ابزار غیرمصرفی، نداشتن سیم پرکننده، عدم استفاده از گاز محافظ، برداشتن لایه اکسیدی، نداشتن تخلخل و حفره در مقایسه با روش‌های جوشکاری مرسوم اشاره کرد [۱۶ و ۱۷]. مهم‌ترین مزیت فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در قیاس با روش‌های متداول جوشکاری نقطه‌ای این است که بدون ذوب فلز پایه فرآیند جوشکاری صورت گرفته است. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای که معمولاً برای اتصال ورق‌های فولادی استفاده می‌شود، برای ورق‌های آلومینیوم جوش‌های بسیار ضعیفی از لحاظ خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی برشی تولید می‌کند [۱۸].

سوانح هوایی مربوط به بال و بدنه هواپیما ناشی از فرآیند پرچ کاری

اتصالات پرچی دسته‌بندی‌های مختلفی دارند. یکی از این دسته‌بندی‌ها اتصال لبروی هم است که در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۹]. اتصال لبروی هم انواع مختلفی مطابق شکل ۴ دارد.



شکل ۲ - شماتیکی از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای: (a) چرخش ابزار (b) ورود ابزار (c) ایجاد اتصال (d) خروج ابزار



شکل ۳ - اتصال لب روی هم

جدول ۱ - درصد ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم T۳-T۲۴ و T۶-۷۰۷۵ برحسب درصد وزنی [۲۲].

	T۳-T۲۴	T۶-۷۰۷۵
Si	۰/۰-۰/۵	۰/۰-۰/۴
Fe	۰/۰-۰/۵	۰/۰-۰/۵
Cu	۳/۸-۴/۹	۱/۲-۲
Mn	۰/۳-۰/۹	۰/۰-۰/۳
Mg	۱/۲-۱/۸	۲/۱-۲/۹
Cr	۰/۰-۰/۱	۰/۱۸-۰/۳۵
Zn	۰/۰-۰/۲۵	۵/۱-۶/۱
Ti	۰/۰-۰/۱۵	۰/۰-۰/۲
Al	باقیمانده	باقیمانده

جدول ۲ - خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژهای آلومینیوم T۳-T۲۴ و T۶-۷۰۷۵ [۲۲]

	T۳-T۲۴	T۶-۷۰۷۵
تنش کششی (MPa)	۴۶۱	۵۰۳
درصد ازدیاد طول (%)	۱۵	۸
هدایت حرارتی (w/m-k)	۱۲۱	۱۳۴

ابزار و تجهیزات جوشکاری

معمولاً باید از ابزاری استفاده کرد که هم توانایی ایجاد جوش بدون عیب را داشته باشد و هم ساخت آن هزینه زیادی دربر نداشته باشد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته فولاد گرم کار (H13) رایج ترین نوع ابزار جهت جوشکاری ورق‌های آلیاژ آلومینیوم با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای است.

برای استفاده از فولادهای گرم کار در دماهای بالا، برای اینکه استحکام آنها کاهش نیابد باید آنها را عملیات حرارتی کرد. بنابراین ابزاری از جنس فولاد گرم کار با قطر ۲۰ میلی‌متر تهیه شد و هندسه استوانه‌ای روی آن تراشکاری شد. شانه ابزار به شکل مقعر با زاویه ۴ درجه ایجاد شد.

عملیات حرارتی سخت کردن ابزارها مطابق با استاندارد ASM انجام شد. بدین منظور ابزار تا دمای بین ۹۹۵ تا ۱۰۲۵ درجه سانتیگراد حرارت داده شده و به مدت ۲۰ دقیقه در این دما نگه داشته شد. جهت عملیات سرد کردن سریع نیز از روغن استفاده شد. در نهایت تمپر کردن قطعه که شامل نگهداری ابزار در دمای ۵۱۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت و سپس سرد کردن در هوا می‌باشد، انجام شد.

میخ پرچ‌ها از باقیمانده بدنه کشتی بازیابی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یافته‌ها نشان داد که در ساخت آن‌ها از آهن زیرحد استاندارد استفاده شده بود. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، وقتی کشتی با کوه یخ برخورد کرد، نیروی برخورد باعث شد سرک میخ پرچ‌ها شکسته و قسمت‌های بدنه (HULL) کشتی از هم جدا شوند [۲۱].

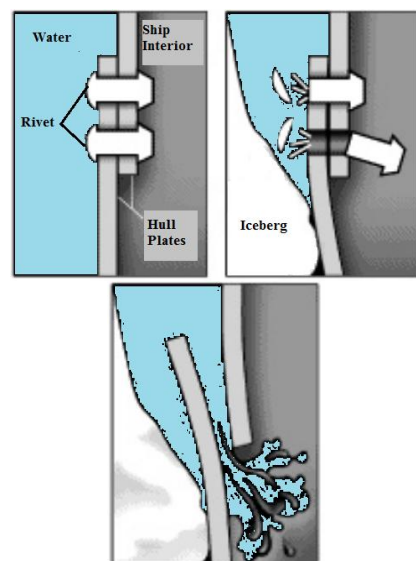
روش تحقیق

مواد استفاده شده

ورق‌های استفاده شده به عنوان فلز پایه برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای از آلیاژهای آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ و T۳-T۲۴ با ابعاد $۲/۴ \text{ mm} \times ۳۰ \text{ mm} \times ۱۲۰ \text{ mm}$ تهیه شدند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ و T۳-T۲۴ به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

ابزار و تجهیزات جوشکاری

معمولاً باید از ابزاری استفاده کرد که هم توانایی ایجاد جوش بدون عیب را داشته باشد و هم ساخت آن هزینه زیادی در بر نداشته باشد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته فولاد گرم کار (H13) رایج ترین نوع ابزار جهت جوشکاری ورق‌های آلیاژ آلومینیوم با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای است.



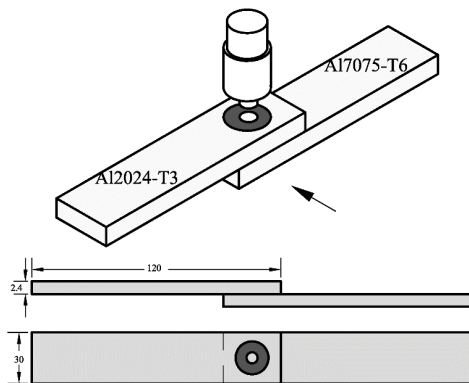
شکل ۶ - جدایی قسمت‌های بدنه (HULL) کشتی از هم پس از برخورد به کوه یخی



شکل ۸ - قید و بند طراحی و ساخته شده

پیشروی پین ابزار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که سطح شانه بر سطح نمونه‌ها مماس شود و به محض مماس شدن شانه ابزار با نمونه‌ها حرکت پیشروی عمقی متوقف شده و به مدت ۵ ثانیه اجازه می‌دهیم تا گرمای ناشی از اصطکاک شانه با نمونه‌ها باعث خمیری شدن نمونه‌ها و جوش خوردن شده و سپس به ابزار اجازه پیشروی در راستای قائم و خروج از قطعه را می‌دهیم. در شکل ۹ نحوه قرارگیری دو قطعه آلومینیم ۲۰۲۴-T۳ و ۷۰۷۵-T۶ را روی یکدیگر برای جوشکاری نشان داده شده است.

شناسایی و انتخاب پارامترها در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای و تعیین محدوده آنها یکی از اهداف بسیار مهم است. در این فرآیند پارامترهای متعددی بر خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری اتصال تاثیرگذار هستند. سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ ابزار، سرعت پیشروی عمودی ابزار، زمان توقف ابزار، جنس و هندسه ابزار، نیروی محوری ابزار، زاویه انحراف ابزار نسبت به بردار نرمال ورق‌ها و جنس



شکل ۹- نحوه قرارگیری دو قطعه آلومینوم غیرهم‌نام روی یکدیگر جهت اتصال

باتوجه به مطالعات مشخص شد که شانه مقعر به دلیل افزایش ضخامت ورق بالایی، سبب ایجاد اتصالاتی با استحکام بیش تر شده است. بنابراین، شانه ابزار به شکل مقعر با زاویه ۴ درجه ایجاد شد.

مشخصات ابزار در جدول ۵ بیان شده است. همچنین مشخصات ابعادی و تصویر ابزار بعد از عملیات حرارتی در شکل ۷ آمده است. از آنجایی که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای حرکت ابزار به صورت عمودی در مسیر نفوذ به داخل ورق‌ها است، به منظور جلوگیری از حرکت احتمالی ابزار داخل کولت و ثابت نگه داشتن عمق نفوذ در تمامی آزمایش‌ها، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است قطر قسمت انتهایی دنباله ابزار یعنی قسمتی که در کولت دستگاه فرز بسته می‌شود کمتر از قطر شانه ابزار است.

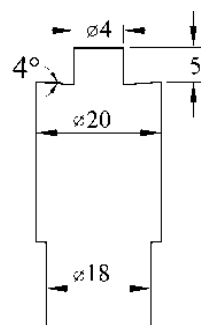
برای انجام جوشکاری از دستگاه فرز دیجیتالی FP4MA استفاده شد. همچنین فیکسچر مخصوصی برای نگهداری قطعات در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای طراحی و ساخته شد. در شکل ۸ تصویری از فیکسچر ارائه شده است.

شرح فرآیند و طراحی آزمایش

پس از بستن ابزار، مربوطه به کنگی ماشین فرز سرعت‌های دورانی و پیشروی مدنظر روی دستگاه تنظیم می‌شوند. ابزار به بالای خط اتصال دو نمونه آورده شده و نفوذ با سرعت‌های پیشروی ۶، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه صورت می‌گیرد.

جدول ۵- خصوصیات ابزار استفاده شده

نوع پین	قطر پین (mm)	ارتفاع پین (mm)	قطر شانه (mm)
استوانه‌ای	۴	۵	۲۰



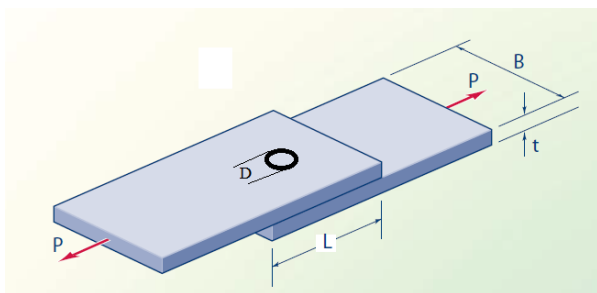
شکل ۷- ابزار مورد استفاده در تست‌های جوشکاری

ضعیف شده و تنش حداکثر در آن مقطع ایجاد می‌شود. مطابق شکل ۱۰ سطح مؤثر ورق از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$A_t = Bt - Dt = (B - D)t \quad (2)$$

که در این رابطه A_t سطح مقطع مؤثر ورق، B عرض ورق، D قطر سوراخ پرچ و t ضخامت ورق می‌باشد.

جدول ۶ و شکل ۱۱ نتایج نیرو و استحکام کششی/برشی اتصالات در سرعت‌های دورانی ۸۰۰، ۱۲۵۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی ۶، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و در عمق نفوذ ۴/۵ میلی‌متر و زمان توقف ۵ ثانیه روی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۰۷۵ و ابزار با پین استوانه‌ای در حالتی که آلیاژ T۶-۷۰۷۵ ورق روی اتصال است را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - اتصال لب روی هم ورق‌ها

جدول ۶- استحکام کششی/برشی اتصالات با آلیاژ T۶-۷۰۷۵

به‌عنوان ورق رویی اتصال

سرعت دورانی ابزار (rpm)	سرعت پیشروی ابزار (mm/min)	نیروی کششی/برشی (N)	استحکام کششی/برشی (MPa)
۸۰۰	۶	۷۱۱۲	۹۸/۷۸
۱۲۵۰	۶	۸۶۶۶/۲	۱۲۰/۳۶
۱۶۰۰	۶	۸۲۵۳/۲	۱۱۴/۶۳
۲۰۰۰	۶	۷۵۹۶/۹	۱۰۵/۵۱
۸۰۰	۱۲	۶۵۸۶/۴	۹۱/۴۸
۱۲۵۰	۱۲	۸۲۰۳/۱	۱۱۳/۹۳
۱۶۰۰	۱۲	۸۱۲۰/۷	۱۱۲/۳۷
۲۰۰۰	۱۲	۷۴۷۵/۲	۱۰۳/۸۲
۸۰۰	۲۰	۶۳۲۳/۵	۸۷/۸۳
۱۲۵۰	۲۰	۸۳۶۴	۱۱۶/۱۷
۱۶۰۰	۲۰	۸۰۹۰/۵	۱۱۲/۷۹
۲۰۰۰	۲۰	۷۰۳۱/۸	۹۷/۶۶

صفحه پشتیبان از مهم‌ترین پارامترها در این فرآیند هستند. در این تحقیق بر اساس مطالعات انجام شده، سرعت دورانی، سرعت پیشروی و ترتیب قرار گرفتن ورق‌های آلیاژهای آلومینیوم جهت بررسی خصوصیات مکانیکی اتصال انتخاب شدند.

باتوجه به قابلیت دستگاه فرز NC آزمایش‌ها با ابزار استوانه‌ای در سرعت‌های دورانی ۸۰۰، ۱۲۵۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی ۶، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و در عمق نفوذ ۴/۵ میلی‌متر و زمان توقف ۵ ثانیه روی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۰۷۵ انجام شد. همچنین به منظور بررسی استحکام کششی/برشی اتصال ناشی از جابجایی ورق‌ها در نیمی از آزمایش‌ها آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ به‌عنوان ورق رویی اتصال و در نیمی دیگر آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ به‌عنوان ورق رویی اتصال استفاده شد.

پس از جوش ورق‌های آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۰۷۵ به یکدیگر، هر یک از آن‌ها برای انجام آزمایش کشش آماده‌سازی شدند. تمامی نمونه‌ها به‌وسیله دستگاه SANTAM مدل MTS250 با نرخ کرنش (mm/min) ۲ در دمای اتاق تحت آزمایش کشش قرار گرفته‌اند.

دستیابی به اتصالی با بیش‌ترین میزان خواص مکانیکی همواره از اصلی‌ترین اهداف محققان جهت رشد و توسعه فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بیان شده است. به‌طوری‌که در تحقیقات مختلفی تاثیر پارامترهای متفاوت بر خصوصیات مکانیکی و ساختاری سنجیده شده است.

بررسی استحکام کششی/برشی اتصال

در این قسمت به بررسی اثر سرعت دورانی، سرعت پیشروی و جابجایی ورق‌ها بر استحکام کششی/برشی اتصالات، می‌پردازیم.

تنش کششی حداکثر ایجادشده در ورق‌ها در اتصال لب روی هم از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

باتوجه به رابطه (۱) حداکثر تنش در مقطعی که کاهش سطح بوجود می‌آید اتفاق می‌افتد. بنابراین در اتصال دو ورق به یکدیگر توسط پرچ به‌دلیل وجود سوراخ، سطح مقطع ورق

کاهش استحکام اتصال است. در شکل ۱۲ تصویر اتصال ایجاد شده در سرعت دورانی ۸۰۰ rpm و ۱۲۵۰ rpm با سرعت پیشروی ابزار برابر ۶ میلی متر بر دقیقه و زمان توقف ۵ ثانیه در حالی که آلیاژ T۶-۷۰۷۵ ورق رویی اتصال است را نشان می- دهد.

در این تحقیق اثر ترتیب قرار گرفتن ورق های آلیاژهای آلومینیوم بر استحکام کششی/برشی ناحیه اتصال نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه در جدول ۷ و شکل ۱۳ نتایج نیروی کششی/برشی در اتصال جوش برای سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه و زمان توقف ۵ ثانیه در ابزار با پین استوانه- ای در حالت هایی که آلیاژ آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ به عنوان ورق رویی و زیرین اتصال قرار می گیرد آمده است.

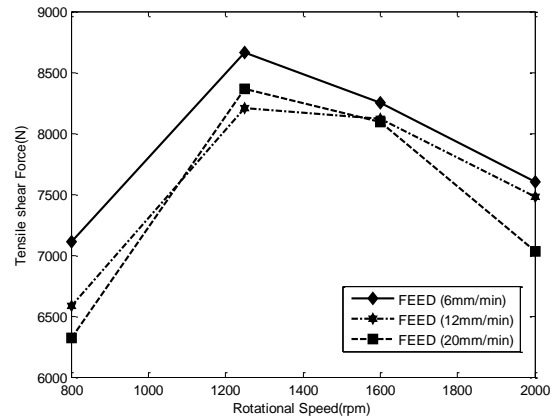
با توجه به نتیجه ارائه شده در شکل ۱۳ در پین استوانه ای در دور ۸۰۰ rpm و زمان توقف ۵ ثانیه اگر T۶-۷۰۷۵ زیر T۳-۲۰۲۴ قرار گیرد استحکام کششی/برشی ناحیه اتصال جوش وضعیت بهتری دارد.



الف- سرعت دورانی ۸۰۰ rpm ب- سرعت دورانی ۱۲۵۰ rpm
 شکل ۱۲ - تصویر اتصال ایجاد شده در سرعت های دورانی ۸۰۰ rpm و ۱۲۵۰ rpm

جدول ۷ - نیروی کششی/برشی ناحیه اتصال در ابزار با پین استوانه ای با تغییر ورق رویی اتصال

سرعت پیشروی ابزار (میلی متر بر دقیقه)	ورق رویی	نیروی کششی/برشی (N)	استحکام کششی/برشی (MPa)
۶	T۶-۷۰۷۵	۷۱۱۲	۹۸/۷۸
۱۲	T۶-۷۰۷۵	۶۵۸۶/۴	۹۱/۴۸
۲۰	T۶-۷۰۷۵	۶۳۲۳/۵	۸۷/۸۳
۶	T۳-۲۰۲۴	۹۲۷۲/۴	۱۲۸/۷۸
۱۲	T۳-۲۰۲۴	۸۸۴۸/۶	۱۲۲/۹۰



شکل ۱۱- نتایج نیروی کششی/برشی اتصالات در سرعت های دورانی مختلف

باتوجه به شکل ۱۱ در هنگام استفاده از ابزار با پین استوانه ای وقتی آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ ورق رویی اتصال است با افزایش سرعت چرخشی از ۸۰۰ به ۱۲۵۰ نیروی کششی/برشی افزایش و با افزایش سرعت چرخشی ابزار به ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه نیروی کششی/برشی کاهش می- یابد. همچنین با افزایش پیشروی ابزار از ۶ به ۱۲ میلی متر بر ثانیه نیروی کششی/برشی کاهش و مجدداً با افزایش پیشروی به ۲۰ افزایش می یابد. به منظور تایید نتایج به دست آمده از تست کشش از نتایج تحقیقات سایر محققین نیز استفاده شد. زمانی که سرعت دورانی ۸۰۰ rpm بود، به دلیل عدم اختلاط مناسب دو ورق، اتصال ضعیفی ایجاد شد. به طوری که در آزمایش کشش، نمونه جوش داده شده از ناحیه ناگت جوش شکسته شد که گرایش مشابهی با تحقیقات لطفی و نوروزی [۲۳] و تاتر و همکاران [۲۴] دارد. لطفی و نوروزی بیان کردند که در سرعت دورانی پایین جریان ناکافی مواد پلاستیکی به دلیل حرارت کم باعث به وجود آمدن عیوبی نظیر فضاهای خالی ریز و ترک در منطقه اغتشاش می شود که منجر به کاهش خواص مکانیکی اتصال می گردد [۲۳]. از طرف دیگر سرعت دورانی بالا نیز باعث تولید حرارت بیش از حد در منطقه اغتشاش و ایجاد جریان توربولانس در مواد پلاستیکی می شود. همچنین در تحقیق تاتر و همکاران آمده است که ناحیه اختلاط ایجاد شده در ورق ها با استفاده از سرعت های دورانی کم تر از ۷۵۰ rpm باعث کاهش عرض ناحیه اتصال شده است [۲۴]. آنها کاهش حرارت در منطقه اختلاط را دلیلی بر عدم جریان کافی مواد پلاستیکی در اطراف پین بیان کردند که نتیجه آن

در اتصال FSSW ناهم نام در صورتی که ورق بالایی با خواص مکانیکی بالاتر و ورق زیری دارای خواص مکانیکی ضعیف تر مورد استفاده قرار گیرد ترکیبات بین فلزی ایجاد شده بسیار ترد شده و باعث سهولت گسترش ترکها و افت خواص مکانیکی اتصال می شود [۲۶].

به منظور مقایسه استحکام کششی/برشی اتصال ایجاد شده توسط فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و فرآیند پرچ کاری، در این قسمت از تحقیق ابتدا نمونه هایی با ابعاد قبلی آماده شده و تعداد ۸ پرچ با مشخصات مختلف مطابق جدول ۸ که در قسمت هایی از اتصالات بال و بدنه هواپیما کاربرد دارد تهیه و ورق ها توسط دستگاه پرچ به یکدیگر اتصال یافته اند.

لازم به ذکر است پرچ های توپر مورد استفاده در صنعت هواپیمایی دارای ترکیبات مختلف فلز آلومینیوم می باشند. در این تحقیق از پرچ هایی با آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۱۷ و ۲۰۱۷ استفاده شده است.

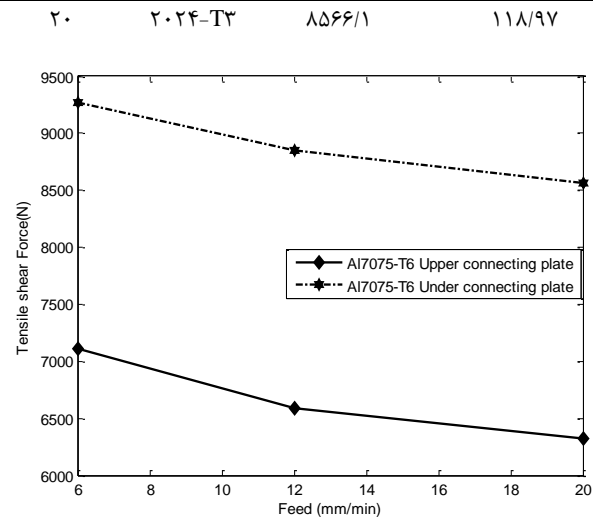
علامت های اختصاری در مشخصات پرچ ها عبارتند از: علامت MS معرف استاندارد نظامی Military Standard؛ شماره 20470 معرف پرچ سرگرد؛ شماره 20426 معرف پرچ سرتخت؛ اعداد 4, 5, 6, 8 نشان دهنده قطر میخ پرچ ها و عدد 6 نشان دهنده طول بدنه میخ پرچ است.

شکل ۱۴ ورق های اتصال یافته به یکدیگر با فرآیند پرچ کاری را نشان می دهد.

نتایج نیروی کششی/برشی اتصال ناشی از فرآیند پرچ کاری نیز در جدول ۸ آمده است.

باتوجه به نتایج به دست آمده برای نیروی کششی/برشی پرچ های استفاده شده مشاهده می شود که بالاترین استحکام برشی کششی برابر ۸۵۸۷/۷ نیوتن مربوط به پرچ با قطر ۱/۴ اینچ سرتخت به شماره MS20426AD8-6 می باشد.

باتوجه به نتایج آزمایش های انجام شده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای و این که اگر آلومینیوم T6-۷۰۷۵ ورق زیرین اتصال باشد وضعیت استحکام کششی/برشی اتصال بهتر است، در این قسمت از تحقیق برای ابزار با پین استوانه ای و سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۶، ۱۲ و ۲۰ میلی متر بر دقیقه و زمان توقف ۵ و ۱۰ ثانیه با عمق نفوذ ۴/۵ میلی متر برای حالتی که آلومینیوم T6-۷۰۷۵ ورق زیرین اتصال است، نتایج استحکام کششی/برشی حاصل از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه شده در جدول ۹ را با نتایج



شکل ۱۳ - نتایج نیروی کششی/برشی اتصالات در اثر جابجایی ورق ها

به علت تفاوت در خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژهای آلومینیوم T3-۲۰۲۴ و T6-۷۰۷۵، شرایط اتصال، نسبت به اتصال در آلیاژهای آلومینیوم مشابه، متفاوت است. هدایت حرارتی T3-۲۰۲۴ از T6-۷۰۷۵ کمتر است [۲۲]. زمانی که آلیاژ T6-۷۰۷۵ ورق بالایی اتصال و آلیاژ T3-۲۰۲۴ ورق زیرین اتصال باشد گرمای تولید شده به سرعت از طریق ورق بالایی به ناحیه اتصال ورق ها منتقل می شود. انباشت گرما در ناحیه اتصال جوش منجر به افزایش دما در ورق پایین می شود. با افزایش دما، تنش کاهش می یابد. از این رو، منجر به حالت خمیری و نرم شدن ورق ها می شود. در این حالت استحکام ناحیه ناگت جوش کاهش می یابد و بنابراین نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از تحقیق مرجع [۲۵] در سال ۲۰۰۷ که برای آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۲۲ و ۵۱۸۲ انجام شده است گرایش مشابهی دارد.

به بیان دیگر نیز می توان نتیجه به دست آمده را توجیه نمود. یکی از مشکلات اساسی در فرآیند اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای ورق های ناهم نام تشکیل ترکیبات بین فلزی است. از آنجاکه هدف از ایجاد اتصال FSSW دستیابی به خواص مکانیکی معادل با خواص مکانیکی فلز پایه است میزان و نوع ترکیبات بین فلزی تأثیری مستقیم در حالت شکست و نیروی شکست دارد. ایجاد ترکیبات بین فلزی باعث گسترش سریع ترکها در هنگام بارگذاری کششی- برشی شده است و شکست ترد اتصال با کرنش های بسیار کم رخ می دهد.

جدول ۹ - نیروی کششی/برشی اتصال برای ابزار با پین استوانه‌ای و سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه

استحکام کشش/ برشی (MPa)	نیروی کششی/برشی (N)	ورق زیرین	زمان توقف ابزار (Sec)	سرعت پیشروی ابزار (mm/min)
۱۲۸/۷۸	۹۲۷۲/۴	۷۰۷۵-T۶	۵	۶
۱۲۶/۵۵	۹۱۱۱/۵	۷۰۷۵-T۶	۱۰	۶
۱۲۲/۹۰	۸۸۴۸/۶	۷۰۷۵-T۶	۵	۱۲
۱۱۹/۵۲	۸۶۰۵/۳	۷۰۷۵-T۶	۱۰	۱۲
۱۱۸/۹۷	۸۵۶۶/۱	۷۰۷۵-T۶	۵	۲۰
۱۲۷/۰۹	۹۱۵۰/۸	۷۰۷۵-T۶	۱۰	۲۰

بنابراین باتوجه به این که هدف از این تحقیق استفاده از پرچ‌های مورد استفاده در صنعت هواپیمایی بوده است و جنس پرچ‌ها آلایژهای آلومینیوم ۲۱۱۷ و ۲۰۱۷ است که ضعیف‌تر از جنس ورق‌های مورد آزمایش است استحکام کششی برشی در اتصالات پرچ از استحکام کششی برشی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای کمتر شده است.

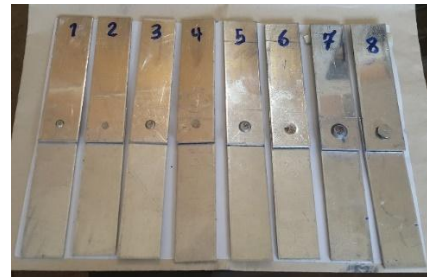
هرچند در صورت استفاده از پرچ‌هایی هم‌جنس با ورق‌های پایه یا حتی مستحکم‌تر از آنها احتمال بهبود استحکام اتصالات پرچی وجود دارد ولی باز نمی‌توان از تبعات خوردگی گریبان‌گیر فرایند پرچ‌کاری چشم‌پوشی کرد. در واقع استفاده از پرچی با استحکام بیشتر از فلز پایه، ریسک خوردگی از نوع گالوانیکی را افزایش می‌دهد و حتی ممکن است سبب افزایش وزن نیز گردد و پرچ‌های هم‌جنس با فلز پایه علی‌رغم نداشتن ریسک خوردگی گالوانیکی درگیر نوع دیگری از خوردگی به‌نام خوردگی شیاری هستند. بنابراین فرآیند جوشکاری اصطکاکی می‌تواند جایگزین مناسبی برای فرایند پرچ‌کاری در نظر گرفته شود مشروط به این که از پارامترهای بهینه فرآیند استفاده شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق نیرو و استحکام کششی/برشی اتصال ورق‌های ناهم‌نام آلایژهای آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۰۷۵ در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای و فرآیند پرچ‌کاری مورد استفاده در سازه‌های بال و بدنه هواپیما مقایسه شده است. تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل انواع مختلف پرچ‌ها، تاثیر سرعت نفوذ ابزار، سرعت دورانی ابزار و ترتیب

استحکام کششی/برشی ۸ نمونه از پرچ‌های مورد استفاده در بال و بدنه هواپیما ارائه شده در جدول ۸ مقایسه می‌کنیم. لازم به ذکر است وزن نمونه‌های جوشکاری شده با نمونه‌های پرچ‌کاری شده کاملاً یکسان می‌باشد.

با مقایسه نتایج نیروی کششی/برشی در جداول ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که بالاترین نیروی کششی/برشی در فرآیند پرچ‌کاری برابر ۸۵۸۷/۷ نیوتن مربوط به پرچ با قطر ۱/۴ اینچ سرتخت به شماره MS20426AD8-6 می‌باشد که این مقدار نزدیک به کمترین مقدار نیروی کششی/برشی (۸۵۶۶/۱ نیوتن) در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مربوط به سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه است.



شکل ۱۴ - ورق‌های اتصال یافته به یکدیگر با فرآیند پرچ‌کاری

جدول ۸ - نتایج نیروی کششی/برشی انواع پرچ‌های سرگرد و سرتخت با علائم اختصاری پرچ‌ها

استحکام (MPa)	نیرو (N)	مشخصات پرچ استفاده شده	آزمایش
۳۷/۰۶	۲۶۶۸/۳	پرچ ۱/۸ اینچ سرگرد MS20470AD4-6	۱
۳۵/۹۲	۲۵۸۵/۹	پرچ ۱/۸ اینچ سرتخت MS20426AD4-6	۲
۵۰/۲۲	۳۶۱۶	پرچ ۵/۳۲ اینچ سرگرد MS20470AD5-6	۳
۵۱/۰۷	۳۶۷۶/۸	پرچ ۵/۳۲ اینچ سرتخت MS20470AD5-6	۴
۷۴/۰۹	۵۳۳۴/۷	پرچ ۳/۴۶ اینچ سرگرد MS20470AD6-6	۵
۷۳/۷۹	۵۳۱۲	پرچ ۳/۴۶ اینچ سرتخت MS20426AD6-6	۶
۱۱۷/۰۱	۸۲۲۴/۸	پرچ ۱/۴ اینچ سرگرد MS20470AD8-6	۷
۱۱۹/۲۷	۸۵۸۷/۷	پرچ ۱/۴ اینچ سرتخت MS20426AD8-6	۸

- [۶] مهندسی خوردگی، تالیف: فونتانا، ترجمه: احمد ساعتی، ویرایش سوم، ص. ۵۵ و ۷۸
- [7] Hariharan, R., and R. J. G. R. Nimal, "*Friction Stir Welding of dissimilar aluminum alloys (6061 and 7075) by using computerized numerical control machine*", Middle East Journal of Scientific Research, Vol. 14.12, pp. 1752-6, 2013.
- [8] Briskham, Paul, et al., "*Comparison of self-pierce riveting, resistance spot welding and spot friction joining for aluminum automotive sheet*", No. 2006-01-0774, SAE Technical Paper, 2006.
- [9] Khodir, Saad Ahmed, and Toshiya Shibayanagi, "*stir welded joints*", Materials & Design, Vol. 50, pp. 551-557, 2013.
- [10] Z. H. Zhang, W. Y. Li, Y. Feng, J. L. Li, Y. J. Chao, "*Improving mechanical properties of friction stir welded AA2024-T3 joints by using a composite backplate*", Materials Science & Engineering, Vol. 598, pp. 312-318, 2014.
- [11] Liu, H. J., H. J. Zhang, and Lei Yu, "*Effect of welding speed on microstructures and mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy*", Materials & Design, Vol. 32.3, pp. 1548-1553, 2011.
- [12] Azizi, Abdolhamid, "*Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminum alloy joints*", Modares Mechanical Engineering, Vol. 13.12, pp. 56-66, 2014.
- [13] Merzoug, Mohamed, et al., "*Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys*", Materials & Design, Vol. 31.6, pp. 3023-3028, 2010.
- [14] Shen, Zhikang, et al., "*Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints*", Materials & design, Vol. 44, pp. 476-486, 2013.
- [15] Elangovan, K., and V. Balasubramanian, "*Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminum alloy*", Materials Science and Engineering: A, Vol. 459.1-2, pp. 7-18, 2007.
- [16] Arora, A., et al., "*Strains and strain rates during friction stir welding*", Scripta Materialia, Vol. 61.9, pp. 863-866, 2009.

قرار گرفتن ورق‌های آلیاژهای آلومینیوم بر استحکام کششی/برشی ناحیه اتصال در این فرآیندها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

۱- در هنگام استفاده از ابزار با پین استوانه‌ای با افزایش سرعت چرخشی از ۸۰۰ به ۱۲۵۰ استحکام کششی/برشی افزایش و با افزایش سرعت چرخشی ابزار به ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه استحکام کششی/برشی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش پیشروی ابزار از ۶ به ۱۲ میلی‌متر بر ثانیه استحکام کششی/برشی کاهش و مجدداً با افزایش پیشروی به ۲۰ افزایش می‌یابد.

۲- در ابزار با پین استوانه‌ای اگر T۶-۷۵-۷۰ به‌عنوان ورق زیرین اتصال مورد استفاده قرار گیرد استحکام کششی/برشی ناحیه اتصال جوش وضعیت بهتری دارد.

۳- استحکام کششی/برشی در فرآیند پرچ کاری از استحکام کششی/برشی مربوط به فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در شرایط خاص می‌تواند کمتر باشد.

نتایج حاصل از این تحقیق در صنایع هوافضا و به‌ویژه در اتصالات قسمت‌هایی از بال و بدنه هواپیما قابل استفاده است. فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان به‌عنوان جایگزینی مناسب برای فرآیند پرچ کاری مطرح نمود مشروط بر این‌که از پارامترهای بهینه استفاده شود. و سوانح مرتبط با اتصالات مورد استفاده در سازه‌های هواپیما را کاهش داد.

مراجع

- [1] Lancaster, John Frederick, "*Metallurgy of welding*", Elsevier, 1999.
- [2] Rambabu, P. P. N. K. V., et al., "*Aluminum alloys for aerospace applications*", Aerospace Materials and Material Technologies, Springer, Singapore, pp. 29-52, 2017.
- [3] Chen, Dyi-Cheng, Ci-Syong You and Fu-Yuan Gao, "*Analysis and experiment of 7075 aluminum alloy tensile test*", Procedia Engineering, Vol. 81, pp. 1252-1258, 2014.
- [4] Wu, Hao, "*Systematic Analysis of the Advantages of Stationary Shoulder Friction Stir Welding in Joining High Strength Aluminum Alloy AA7050-T7651*", Diss. The University of Manchester (United Kingdom), 2017.

[۵] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تالیف: حسین مهرعلی و ...

- 7075-T6 aluminum alloy by the use of Design of Experiment”, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14.3, pp. 17-26, 2014.
- [24] Tutar, Mumin, et al., “The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array”, Materials & Design, Vol. 63, pp. 789-797, 2014.
- [25] Vijay Soundararajan, Eswar Yarrapareddy, and Radovan Kovacevic, “Investigation of the Friction Stir Lap Welding of Aluminum Alloys AA 5182 and AA 6022”, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 16(4), pp. 477, August 2007.
- [26] Y.F. Sun, H. Fujii, N. Takaki, Y. Okitsu, “Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique”, Materials and Design, Vol. 47, pp. 350–357, 2013.
- [17] Zhi-hong, F. U., He Di-qiu, and Wang Hong, “Friction stir welding of aluminum alloys”, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., Vol. 19.1, pp. 61-64, 2004.
- [18] Thornton, P.H., Krause, A.R., Davies, R.G., “Fatigue strength is dependent on nugget diameter rather than the absence of porosity and expulsion”, Welding research supplement, march 1996.
- [19] Module 10 Design of Permanent Joints, Version 2 ME, IIT Kharagpur
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Japan_Airlines_Flight_123.
- [21] Felkins, Katherine, Leighly, H. p., Jankovic, A., “The Royal Mail Ship Titanic: Did a Metallurgical Failure Cause a Night to Remember?”, January, 1998.
- [22] <http://www.wilsonsmetals.com/datasheets>
- [23] Lotfi, Amirhossein, “The microstructure and mechanical properties of friction stir welded