



بررسی استحکام برشی ناحیه اتصال ورق‌های ناهمنام آلیاژهای آلومینیوم در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

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

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

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

یادداشت فنی؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴

چکیده

در مقایسه با فرآیند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، یک فرآیند ایده آل برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم است. در این تحقیق اثر پارامترهای جوشکاری نظیر، عمق نفوذ ابزار، سرعت دورانی ابزار، سرعت نفوذ ابزار و ترتیب قرار گرفتن ورق‌های ناهمنام آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ و ۷۰۷۵-T۶ بر استحکام برشی ناحیه اتصال در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. با انتخاب مناسب این پارامترها، استحکام برشی بهینه اتصال، قابل دستیابی است. نتایج آزمایش برشی نشان می‌دهد که افزایش سرعت دورانی از ۸۰۰ به ۱۲۵۰ دور بر دقیقه، باعث افزایش نیروی برشی می‌شود؛ اما با افزایش سرعت دورانی ابزار به ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، نیروی برشی کاهش می‌یابد. با افزایش عمق نفوذ ابزار، نیروی برشی افزایش می‌یابد. اگر آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ به عنوان ورق رویی اتصال مورد استفاده قرار گیرد، استحکام برشی ناحیه اتصال جوش وضعیت بهتری دارد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای؛ سرعت دورانی؛ سرعت پیشروی؛ استحکام برشی.

Investigation of Shear Strength of the Bonding Region for Dissimilar Aluminum Alloy Sheets in Friction Stir Spot Welding Process

M. Kazemi Nasrabadi^{1,*}, K. Sadeghpour²

¹ Assistant. Prof., Mech. Eng., shahid sattari Air Univ., tehran, Iran.

² M.S. Student, Mech. Eng., shahid sattari Air Univ., Tehran, Iran.

Abstract

Compared to the resistance spot welding (RSW) process, Friction stir spot welding (FSSW) is an ideal process for aluminum alloys. In this study, the effect of welding parameter such as tool penetration depth, tool rotational speed, tool penetration speed and the arrangement of aluminum alloy sheets of 7075-T6 and 2024-T3 on the shear strength of the joining zone in the friction stir spot welding process have been investigated. By properly choosing these parameters, the optimum shear strength of the joint can be attainable. The result of the shear test showed that the increase of tool rotational speed from 800 up to 1250 rpm caused the increase of shear force, However further increase up to at 1600 and 2000 rpm resulted in the decrease of the shear force. By increasing in tool penetration depth, shear force increases. If the alloy Al2024-T3 is selected to be the upper plate, the connection will have better shear strength.

Keywords: Frictional Stir Spot Welding; Revolution Speed; Feed Speed; Shear Strength.

۱- مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فرآیند ساخت با اهمیتی برای تولید سازه‌ها است. این فرآیند می‌تواند باعث جلوگیری از ایجاد تعدادی از عیوب نظیر، ترک و تخلخل مرتبط با فرآیندهای جوشکاری ذوبی شود [۱]. اتصالات فلزات غیر هم‌جنس امروزه به دلیل امکان بهره‌گیری از خواص مکانیکی، فیزیکی و خوردگی اجزای مختلف یک سازه یا قطعه صنعتی، مورد توجه صنعتگران قرار گرفته است.

در آلیاژهای آلومینیوم به دلیل ریزساختار جامد نامناسب، روش‌های جوشکاری ذوبی مشکل بوده و باعث ایجاد عیوبی نظیر، حفره و تخلخل می‌شود؛ همچنین بعضی از روش‌های جوشکاری ذوبی نظیر روش‌های پر انرژی، برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌شود. از آنجایی که عموم این روش‌ها بسیار گران‌قیمت هستند و به تجهیزات خاصی نیاز دارند، بسیار محدود و در کاربردهای ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با توجه به افت شدید خواص مکانیکی فلز جوشکاری شده در مقایسه با فلز پایه، صنعتگران و دانشمندان به استفاده و توسعه روش‌های جوشکاری حالت جامد^۱، در این آلیاژها پرداخته‌اند. در این راستا جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به عنوان یکی از روش‌های جوشکاری در حالت جامد برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم استفاده شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای^۲، یکی از کاربردهای اخیر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۳ است. در این روش یک ابزار دورانی پین‌دار جهت ایجاد اتصال بین ورق‌ها داخل قطعه کار نفوذ می‌کند؛ اما برخلاف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در این فرآیند، ابزار حرکت خطی در صفحه ورق ندارد و تنها در مسیر ضخامت ورق برای ایجاد اتصال حرکت می‌کند.

از مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، می‌توان به واپیچش کم، ابزار غیر مصرفی، نداشتن سیم پرکننده، عدم استفاده از گاز محافظ، برداشتن لایه اکسیدی، نداشتن تخلخل و حفره در مقایسه با روش‌های جوشکاری

مرسوم اشاره کرد [۲ و ۳]؛ همچنین، در صنایع هوافضا و سایر صنایع حساس، می‌تواند برای جوش آلیاژهای آلومینیوم حرارت‌پذیر که توسط جوشکاری ترکیبی مشکل است از قبیل، سری‌های 2xxx، 6xxx و 7xxx مورد استفاده قرار گیرد [۴].

در فرآیند جوشکاری اصطکاکی نقطه‌ای، ابزار دارای پین و شانه است و در نقطه‌ای که از قبل مشخص شده جوشکاری انجام می‌شود. حرکت چرخشی شانه، باعث تولید اصلی‌ترین عیب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای می‌شود که باقی ماندن حفره ناشی از پین در آن پس از عملیات جوشکاری است و زمینه مساعدی برای بروز پدیده خوردگی است [۵]. به‌منظور حل این مشکل، تعدادی از محققین به فکر راه چاره برای حل این عیب افتاده‌اند. از آن جمله یوماتسو و همکارانش [۶]، ابزار جدیدی معرفی نموده‌اند که پین آن متحرک بوده و قابلیت پر نمودن حفره ناشی از پین پس از اتمام جوشکاری را دارا است. در مقاله آنها به بررسی تأثیر پر نمودن حفره با استفاده از این ابزار خاص، بر استحکام کششی و خستگی جوش پرداخته شده است. پس از پایان عملیات بدون حرکت عمودی ابزار پین به داخل ابزار برگشته و شانه تخت به دوران در سطح قطعه‌کار ادامه می‌دهد که این عمل، باعث سیلان مواد و پر شدن حفره می‌شود. به‌طورکلی می‌توان گفت که خواص جوش در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، بستگی به شرایط جوشکاری و هندسه ابزار دارد. شرایط جوشکاری شامل، سرعت چرخش ابزار، عمق نفوذ ابزار، سرعت نفوذ ابزار به داخل قطعه کار، زمان نگهداری آن در مواد تحت جوشکاری، استفاده از صفحه‌های پشتیبان با جنس‌های مختلف، استفاده از صفحه‌های پرکننده و روش‌های ایجاد اتصال بدون حفره^۴ است. هندسه‌ی ابزار نیز شامل، شکل و اندازه شانه و پین است. نمایی از این فرآیند، در شکل ۱ نشان داده شده است.

در تحقیقی ژانگ و همکاران [۷]، اثر جنس صفحه پشتیبان در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب برای ورق‌های آلیاژ آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ با ضخامت ۳/۲ mm را بررسی کردند. از سه صفحه پشتیبان با جنس‌های مس، فولاد کربن متوسط و گرانتیت استفاده کردند. با تحلیل نتایج به

^۱ Solid State Welding

^۲ Friction Stir Spot Welding

^۳ Friction Stir welding

^۴ Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW)

و تأثیر همزمان پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر ریزساختار و میکروسختی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد تحقیق قرار گرفت.

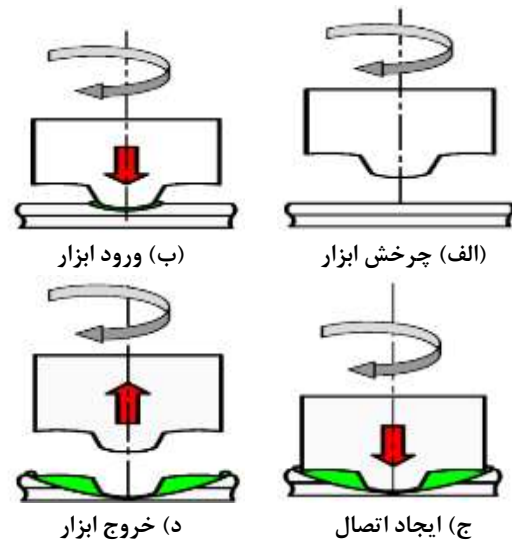
عزیزیه و همکاران [۱۰]، ریز ساختار و ویژگی‌های مکانیکی اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ به آلیاژ منیزیم AZ۳۱ را مطالعه کردند. با توجه به نتایج، محدوده سرعت چرخش ۴۰۰ تا ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت حرکت ۱۵ تا ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه در حالتی به عنوان شرایط بهینه اتصال جهت ایجاد جوش بدون عیب مشخص گردید که تشکیل ترکیبات بین فلزی در منطقه جوش بوسیله آزمون پراش اشعه ایکس نمونه‌های جوشکاری شده معیوب مشاهده شد. بیشترین استحکام برشی در نمونه جوش داده شده با سرعت چرخشی ۵۷۰ دور در دقیقه و سرعت حرکت ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه برابر با ۱۲۲ مگاپاسکال بود.

بادرناریان و همکاران [۱۱]، تأثیر هندسه ابزار و پارامترهای جوشکاری را بر استحکام اتصال و حالت‌های شکست در آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴-O مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در مشاهدات خود بیان کردند، ناحیه اغتشاش از هندسه ابزار و میزان عمق نفوذ تأثیر می‌پذیرد. در نتایج آنها بیان شد، با افزایش ناحیه پیوند خورده، حالت‌های شکست متفاوتی در ورق‌ها به دست می‌آید.

سخایی و همکاران [۱۲] تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر استحکام برشی اتصال ایجاد شده در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آنها مشخص شد که سرعت‌های دورانی بالا، سبب افت استحکام برشی اتصال در مقایسه با سرعت‌های دورانی پایین می‌شود.

سونگ و همکاران [۱۳] فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در اتصال ورق‌های استیل گالوانیزه با استفاده از ابزار با پین استوانه‌ای و شانه را بررسی کردند. نتایج یک تغییر شکل در ناحیه جوش نشان داد که بررسی‌های بعدی علت این تغییر شکل را وجود اکسید روی می‌داند. ماکزیمم دمای جوش ۱۲۹۳ کلوین برآورد شد که پائین‌تر از دمای ذوب آهن است؛ ولی بالاتر از دمای ذوب روی است و همین عامل باعث تبخیر و انفجار روی به دلیل دما و فشار ناشی از ابزار و ایجاد تغییرات در ساختار جوش

دست آمده توسط صفحه پشتیبان مختلف بر خواص مکانیکی مشخص شد، اتصالات ایجاد شده با استفاده از صفحه پشتیبان فولادی، خواص بهتری را به دست می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

لیو و همکاران [۸] اثر سرعت جوشکاری بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۲۲۱۹ را به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ تحت خنک‌کاری با آب ارزیابی کردند. آنها در مقاله خود تأثیر سرعت پیشروی ابزار را به عنوان پارامتر متغیر روی استحکام مکانیکی، توزیع سختی اتصال و اندازه دانه‌ها در نواحی مختلف اتصال مطالعه کردند و نشان دادند که با افزایش سرعت از ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، اندازه دانه‌ها در ناحیه جوش بزرگتر می‌شود؛ اما با افزایش سرعت تا ۲۰۰ mm/min، اندازه دانه‌ها کاهش یافته و استحکام مکانیکی اتصال با افزایش سرعت جوشکاری افزایش می‌یابد.

مردعلیزاده و همکاران [۹] فرآیند اتصال دهی ورق‌های آلیاژی آلومینیوم ۵۴۵۶ در حالت لبه روی هم، به گونه‌ای که ورق کار سرد شده H321 با ضخامت ۵ میلی‌متر روی ورق آیل با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر قرار می‌گیرد، صورت پذیرفت

^۱ Friction Stir Welding

می‌آید. با توجه به پیشینه تحقیقات صورت گرفته لازم است، تأثیر پارامترهای مختلف بر استحکام جوش بررسی شود. با توجه به مطالعات انجام شده روی استحکام برشی اتصال در جوشکاری ورق‌های ناهمنام آلومینیومی، ترتیب قرار گرفتن ورق‌های آلیاژهای آلومینیوم بر استحکام 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 برشی ناحیه اتصال، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد استفاده شده

ورق‌های استفاده شده به عنوان فلز پایه برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای از آلیاژهای آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ و T۳-۲۰۲۴ با ابعاد $2/4\text{mm} \times 30\text{mm} \times 120\text{mm}$ میلی‌متر تهیه شد. آلیاژ آلومینیوم T۶-۷۰۷۵، آلیاژ آلومینیوم و روی است که تحت عملیات حرارتی T۶ قرار گرفته است که این عملیات شامل، انحلال و کوئنچ در آب و پیرسازی مصنوعی^۱ است. آلیاژ T۳-۲۰۲۴ یکی دیگر از سری آلیاژهای آلومینیوم است که در آن مس به عنوان عنصر اصلی آلیاژی است. از این آلیاژ در مواردی استفاده می‌شود که نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خستگی خوب مورد نیاز باشد.

ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ و T۳-۲۰۲۴ به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

۲-۲- 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 گرمکار H۱۳، رایج‌ترین نوع ابزار جهت جوشکاری ورق‌های آلیاژ آلومینیوم با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

گردید. با افزایش نفوذ ابزار در عمق جوش، استحکام کششی افزایش یافته، به طوری که مقدار آن در $0/52\text{ mm}$ برابر با بیشترین مقدار $3/7\text{ KN}$ بوده است.

ژانگ و همکاران [۱۴] تأثیر سرعت دورانی و زمان توقف ابزار بر ریز ساختار و ویژگی‌های مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژ آلومینیوم H۱۱۲-۵۰۵۲ را بررسی کردند. در مشاهدات آنها بیان شده است که در روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای چهار ناحیه فلز پایه، منطقه تحت تأثیر حرارت، ناحیه متأثر از حرارت-کار مکانیکی و منطقه اغتشاش تشکیل می‌شود که از لحاظ ریز ساختار و خصوصیات مکانیکی تفاوت‌های بسیاری با هم دارند. در نتایج آنها بیان شد که استحکام اتصالات با افزایش سرعت دورانی ابزار کاهش می‌یابد و مستقل از تغییر زمان توقف ابزار است.

شن و همکاران [۱۵] ریزساختار و مکانیزم شکست اتصال آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ به روش جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با پر شدن مجدد را ارزیابی کردند. آنها در مقاله خود، تأثیر پارامترهای سرعت دورانی و زمان توقف ابزار را روی اندازه دانه در ناحیه جوش، عیوب جوش، توزیع سختی، استحکام مکانیکی جوش، ابعاد رسوبات ایجاد شده و کیفیت سطح اتصال بررسی کردند و نشان دادند که توزیع سختی جوش، ظاهری W شکل دارد که شکل و ابعاد رسوبات، یک نقش بسیار مهم در توزیع سختی دارد. خواص مکانیکی و استحکام مناسب در سرعت دورانی پایین‌تر و مدت زمان کوتاه‌تر توقف ابزار بدست آمد.

خواص مکانیکی و میکروساختاری اتصال‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژهای ناهمنام آلومینیومی T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۰۷۵ انجام شده است [۱۶].

ایجاد اتصال مطلوب ورق‌های ناهمنام از نظر استحکام برشی، همواره با چالش‌های فراوانی روبه‌رو است. استفاده از این اتصالات در فشارها و بارهای شکست بسیار بالا، نیاز به استفاده از راهکارهای اساسی در جلوگیری از کاهش استحکام برشی اتصال دارد. با توسعه صنایع خودروسازی و هوافضا، بررسی اتصالات ایجادشده در ورق‌های همنام و ناهمنام، مورد توجه محققان قرار گرفته است. با توجه به گسترش روزافزون استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در این صنایع، بررسی استحکام برشی اتصال، بسیار مهم به نظر

^۱ Artificial Aging

جدول ۳- ترکیب شیمیایی فولاد H13 بر حسب درصد وزنی [۱۹]

C	Mn	Si	Cr	V	Mo	Fe
۰/۳۵	۰/۴	۰/۹۶	۴/۸	۰/۹۵	۱/۱۳	باقیمانده

جدول ۴- خواص مکانیکی فولاد H13 [۱۹]

استحکام کششی نهایی (MPa)	۱۸۱۰
استحکام تسلیم (MPa)	۱۵۱۰
مدول یانگ (GPa)	۲۱۰
ضریب پواسون	۰/۳
ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)	۲۵
چگالی (kg/m ³)	۷۵۸۰
سختی برینل	۱۸۰
گرمای ویژه (J/g.0c)	۰/۴۶۱

ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد H13 ارائه شده است.

با توجه به مطالعات مشخص شد که شانه مقعر به دلیل افزایش ضخامت ورق بالایی، سبب ایجاد اتصالاتی با استحکام بیشتر شده است [۱۱ و ۲۰]؛ بنابراین، شانه ابزار به شکل مقعر با زاویه ۴ درجه ایجاد شد. مشخصات ابزار در جدول ۵ بیان شده است؛ همچنین تصویر ابزار بعد از عملیات حرارتی در شکل ۲ آمده است. از آنجایی که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای حرکت ابزار بصورت عمودی در مسیر نفوذ به داخل ورق‌ها است، به منظور جلوگیری از حرکت ناخواسته ابزار داخل فشنگی دستگاه فرز و ثابت نگه داشتن عمق نفوذ در تمامی آزمایش‌ها، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، قطر قسمت دنباله ابزار یعنی قسمتی که در فشنگی دستگاه فرز بسته می‌شود، کمتر از قطر شانه ابزار است.

برای انجام جوشکاری از دستگاه فرز کنترل عددی ۲/۵ محوره FP4MA استفاده شد؛ همچنین فیکسچر مخصوصی برای نگهداری قطعات در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم T۳-T۳-۲۰۲۴ و T۶-T۶-۷۰۷۵ بر حسب درصد وزنی [۱۷]

	Al2024-T3	Al7075-T6
si	۰/۰۱	۰/۰۱
Fe	۰/۰۸	۰/۰۸
Cu	۵/۳۵	۲/۴
Mn	۰/۶۷	۰/۰۹
Mg	۲/۰۷	۲/۵۲
Cr	۰/۰۹	۰/۲۱
Zn	۰/۰۴	۷/۹۹
Ti	۰/۰۵	۰/۰۶
Al	باقیماده	باقیمانده

جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم T۳-T۳-۲۰۲۴ و T۶-T۶-۷۰۷۵ [۱۷]

	Al2024-T3	Al7075-T6
تنش تسلیم (MPa)	۳۲۷	۴۹۸
تنش کششی (MPa)	۴۶۱	۵۹۳
درصد ازدیاد طول (%)	۲۹/۵	۱۷/۷

است. برای استفاده از فولادهای گرمکار در دماهای بالا، برای اینکه استحکام آنها کاهش نیابد، باید آنها را عملیات حرارتی کرد؛ بنابراین ابزاری از جنس فولاد گرمکار با قطر ۲۰ میلی-متر تهیه و هندسه استوانه‌ای روی آن تراشکاری شد. عملیات حرارتی سخت کردن ابزار مطابق با استاندارد ASM انجام شد [۱۸]. 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 انجام شد که شامل نگهداری ابزار در دمای ۵۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت و سپس سرد کردن در هوا است. در جداول ۳ و ۴

تا جایی ادامه پیدا می‌کند که سطح شانه بر سطح نمونه‌ها مماس شود. به محض مماس شدن شانه‌ی ابزار با نمونه‌ها، حرکت پیشروی عمقی متوقف و به مدت ۱۰ ثانیه اجازه داده شد تا گرمای ناشی از اصطکاک شانه با نمونه‌ها، باعث خمیری شدن نمونه‌ها و جوش خوردن شود و سپس ابزار در راستای قائم پیشروی و از قطعه کار خارج شد. شکل ۴ تصویری از دو قطعه آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۵-۷۰ را در زمان جوشکاری نشان می‌دهد.



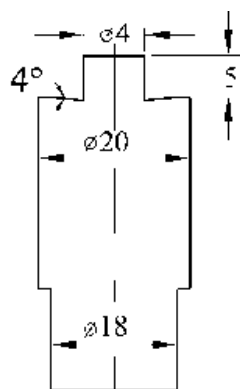
شکل ۴- نحوه جوش دو قطعه آلومینیوم غیر همنام

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 صفحه پشتیبان از مهمترین پارامترها در این فرآیند هستند. در این تحقیق بر اساس مطالعات انجام شده، سرعت دورانی، عمق نفوذ، سرعت پیشروی و ترتیب قرار گرفتن ورق‌های آلیاژهای آلومینیوم جهت بررسی خصوصیات مکانیکی اتصال انتخاب شدند. جهت تعیین محدوده پارامترها، یکی از پارامترها متغیر و بقیه پارامترها ثابت فرض شدند. بر این اساس تعدادی آزمایش انجام شد و نمونه‌ها ارزیابی شدند. با توجه به مرور مقالات و سرعت‌های ارائه شده توسط آنها نظیر مراجع [۱۵ و ۱۷] و با توجه به قابلیت دستگاه کنترل عددی

طراحی و ساخته شد. در شکل ۳ تصویری از فیکسچر ارائه شده است.

جدول ۵- خصوصیات ابزار استفاده شده

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



شکل ۲- ابزار مورد استفاده در آزمایش‌های جوشکاری



شکل ۳- قید و بند طراحی و ساخته شده

۳- شرح فرایند و طراحی آزمایش

پس از بستن ابزار به کلگی ماشین فرز سرعت‌های دورانی و پیشروی مدنظر روی دستگاه تنظیم شد. ابزار به بالای خط اتصال دو نمونه آورده شد و نفوذ به آرامی صورت گرفت. نکته‌ی قابل توجه این است که نفوذ باید به آرامی صورت گیرد و گرنه این پیشروی با براده برداری همراه خواهد بود. در واقع در صورت نفوذ تدریجی به علت گرمای پیشانی پین ابزار با نمونه‌ها باعث ذوب نمونه‌ها خواهد شد. پیشروی پین ابزار

جدول ۶- شماره آزمایش‌ها و پارامترهای جوشکاری

شماره آزمایش	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	ورق رویی اتصال
۱	۶	۸۰۰	AI۲۰۲۴
۲	۱۲	۸۰۰	AI۲۰۲۴
۳	۲۰	۸۰۰	AI۲۰۲۴
۴	۶	۸۰۰	AI۷۰۷۵
۵	۱۲	۸۰۰	AI۷۰۷۵
۶	۲۰	۸۰۰	AI۷۰۷۵
۷	۶	۱۲۵۰	AI۲۰۲۴
۸	۱۲	۱۲۵۰	AI۲۰۲۴
۹	۲۰	۱۲۵۰	AI۲۰۲۴
۱۰	۶	۱۲۵۰	AI۷۰۷۵
۱۱	۱۲	۱۲۵۰	AI۷۰۷۵
۱۲	۲۰	۱۲۵۰	AI۷۰۷۵
۱۳	۶	۱۶۰۰	AI۲۰۲۴
۱۴	۱۲	۱۶۰۰	AI۲۰۲۴
۱۵	۲۰	۱۶۰۰	AI۲۰۲۴
۱۶	۶	۱۶۰۰	AI۷۰۷۵
۱۷	۱۲	۱۶۰۰	AI۷۰۷۵
۱۸	۲۰	۱۶۰۰	AI۷۰۷۵
۱۹	۶	۲۰۰۰	AI۲۰۲۴
۲۰	۱۲	۲۰۰۰	AI۲۰۲۴
۲۱	۲۰	۲۰۰۰	AI۲۰۲۴
۲۲	۶	۲۰۰۰	AI۷۰۷۵
۲۳	۱۲	۲۰۰۰	AI۷۰۷۵
۲۴	۲۰	۲۰۰۰	AI۷۰۷۵

۲/۵ محوره FP4MA، آزمایش‌ها با ابزار استوانه‌ای در سرعت‌های دورانی ۸۰۰، ۱۲۵۰، ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی ۶، ۱۲، ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و در عمق نفوذ ۴/۵ میلی‌متر و زمان توقف ۱۰ ثانیه روی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۰۷۵ انجام شد؛ همچنین در نیمی از آزمایش‌ها آلومینیوم T۶-۷۰۷۵، به عنوان ورق رویی اتصال و در نیمی دیگر آلومینیوم T۳-۲۰۲۴، به عنوان ورق رویی اتصال استفاده شد. شماره آزمایش‌ها و پارامترهای مورد استفاده در فرآیند جوشکاری، در جدول ۶ نشان داده شده‌اند.

پس از جوش ورق‌های آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۰۷۵ به یکدیگر، هریک از آن‌ها برای انجام آزمایش کشش آماده‌سازی شدند. تمامی نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه Santam مدل MTS ۲۵۰ با نرخ کرنش (mm/min) ۲ در دمای اتاق تحت آزمایش کشش قرار گرفتند که شکل ۵ یک نمونه در حال آزمایش را نشان می‌دهد.

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. در این تحقیق رفتار مکانیکی اتصالات تحت پارامترهای



شکل ۵- نمونه‌ی در حال انجام آزمایش کشش

سرعت پیشروی و سرعت دورانی و ترتیب قرارگیری ورق‌های آلومینیومی تجزیه و تحلیل شده است. در جدول ۷ نیروی‌های برشی استخراج شده از تست کشش نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۷- خصوصیات مکانیکی استخراج شده برای اتصالات

شماره آزمایش	نیروی برشی (N)	شماره آزمایش	نیروی برشی (N)
۱	۹۱۱۱/۵	۱۳	۸۳۶۴
۲	۸۶۰۵/۳	۱۴	۷۷۹۹
۳	۹۱۵۰/۸	۱۵	۸۷۰۰
۴	۷۱۷۱/۱	۱۶	۷۴۳۶/۱
۵	۶۸۶۹	۱۷	۷۲۵۳/۵
۶	۷۳۵۲/۶	۱۸	۷۸۷۹/۴
۷	۸۹۰۹/۴	۱۹	۸۴۶۴/۱
۸	۸۷۸۷/۷	۲۰	۸۱۲۵
۹	۹۰۵۰/۷	۲۱	۶۲۲۳/۵
۱۰	۸۱۴۲/۳	۲۲	۷۰۱۴
۱۱	۸۱۰۴	۲۳	۷۱۵۳/۵
۱۲	۸۰۴۰/۳	۲۴	۶۸۰۸/۱

با توجه به شکل ۶ در بین استوانه‌ای وقتی آلومینیوم T6-۷۰۷۵ بالای آلومینیوم T3-۲۰۲۴ قرار دارد با افزایش سرعت دورانی از ۸۰۰ به ۱۲۵۰ دور بر دقیقه نیروی برشی افزایش و با افزایش سرعت دورانی ابزار به ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه نیرو کاهش می‌یابد.

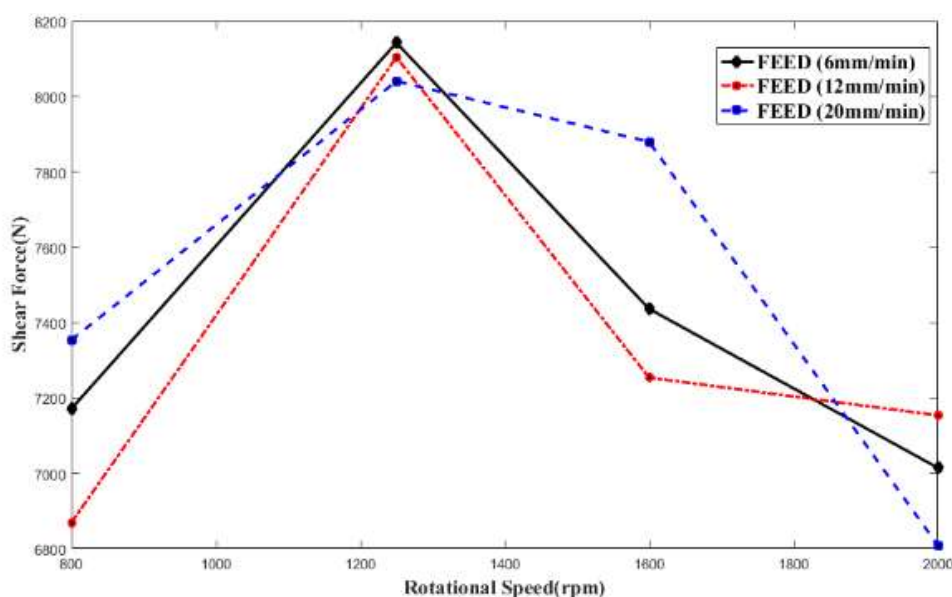
زمانیکه سرعت دورانی rpm ۸۰۰ بود، بدلیل عدم اختلاط مناسب دو ورق، اتصال ضعیفی ایجاد شد. به طوریکه در آزمایش کشش، نمونه جوش داده شده با سرعت دورانی rpm ۸۰۰ تحت نیروی N ۷۱۷۱/۱ از ناحیه ناگت جوش شکسته شد که گرایش مشابه‌ای با تحقیقات لطفی و نوروزی [۲۱] و تاتر و همکاران [۲۲] دارد. لطفی و نوروزی بیان کردند که در سرعت دورانی پایین جریان ناکافی مواد پلاستیکی به دلیل حرارت کم باعث بوجود آمدن عیوبی نظیر، فضاهای خالی ریز و ترک در منطقه اغتشاش می‌شود که منجر به کاهش خواص مکانیکی اتصال می‌شود. از طرف دیگر سرعت دورانی بالا نیز، باعث تولید حرارت بیش از حد در منطقه اغتشاش و ایجاد جریان درهم یا متلاطم در مواد پلاستیکی می‌شود؛ همچنین در تحقیق تاتر و همکاران آمده است که ناحیه اختلاط ایجاد شده در ورق‌ها با استفاده از سرعت‌های دورانی کمتر از rpm ۷۵۰ باعث کاهش عرض ناحیه اتصال شده است. آنها کاهش حرارت در منطقه اختلاط را دلیلی بر عدم جریان کافی مواد پلاستیکی در اطراف پین بیان کردند که نتیجه آن کاهش استحکام اتصال است.

از طرفی، در تحقیق پایدار و همکاران [۲۳] بیان شده است که افزایش بیش از حد دما، باعث ایجاد ذوب موضعی و تشکیل ترک‌های ریز در منطقه اختلاط شده که نتیجه آن کاهش خواص مکانیکی اتصال است؛ همچنین در تحقیق ساجد [۲۴]، مهم‌ترین پارامتر در تغییر حرارت در منطقه اختلاط، سرعت دورانی بیان شده که افزایش آن از حد بهینه سبب درشت شدن دانه‌ها و انحلال ذرات رسوب شده می‌شود و نتیجه آن کاهش استحکام اتصال است. با توجه به نتایج تحقیقات فوق در این تحقیق نیز زمانی که سرعت دورانی rpm ۱۶۰۰ انتخاب شد، افزایش اصطکاک ابزار با قطعه‌کار و تغییر شکل پلاستیک مواد، باعث افزایش بیش از حد دما در منطقه اختلاط شد که نتیجه آن تغییر شکل و اعوجاج هندسی در ورق‌ها بود.

۴- بررسی استحکام برشی اتصال

در این قسمت به بررسی اثر سرعت دورانی و سرعت پیشروی و جابجایی ورق‌ها بر استحکام نهایی اتصال می‌پردازیم.

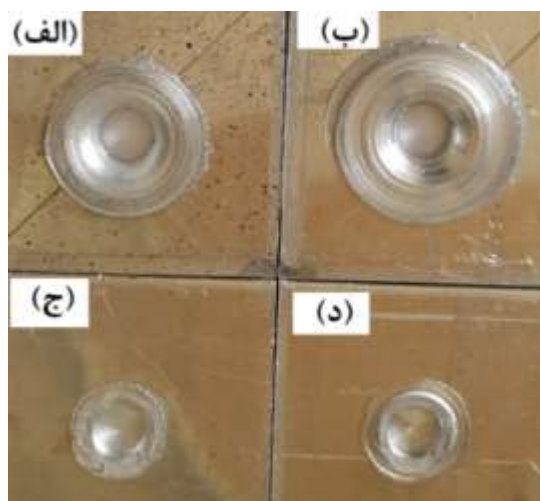
با توجه به تحقیقات انجام شده در مورد آلیاژ آلومینیوم، سرعت‌های دورانی بالا (حدوداً بالاتر از ۲۰۰۰ دور بر دقیقه) به دلیل تولید نیرو و گرمای بیش از حد باعث کاهش خواص مکانیکی اتصال شده است؛ همچنین سرعت‌های دورانی پایین (حدوداً کمتر از ۵۰۰ دور در دقیقه) به دلیل عدم قابلیت کافی برای جریان و اختلاط مواد خمیری ایجاد شده در ناحیه اتصال، سبب کاهش ویژگی‌های مکانیکی اتصال می‌شود [۲۰ و ۱۹].



شکل ۶- نیروی برشی اتصال در سرعت‌های دورانی ۸۰۰، ۱۶۰۰، ۱۲۵۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه (T۶-۷۰۷۵ ورق رویی اتصال)

دقیقه نیروی برشی کاهش و مجدداً با افزایش پیشروی به ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه نیروی برشی افزایش می‌یابد.

در شکل ۷ تصویر اتصال ایجاد شده در سرعت‌های دورانی ۸۰۰ و ۱۲۵۰ دور بر دقیقه برای پیشروی ۶ میلی‌متر بر دقیقه با زمان توقف ۱۰ ثانیه ارائه شده است. قابل ذکر است که جهت چرخش ابزار در تمامی اتصالات، ساعتگرد در نظر گرفته شد.



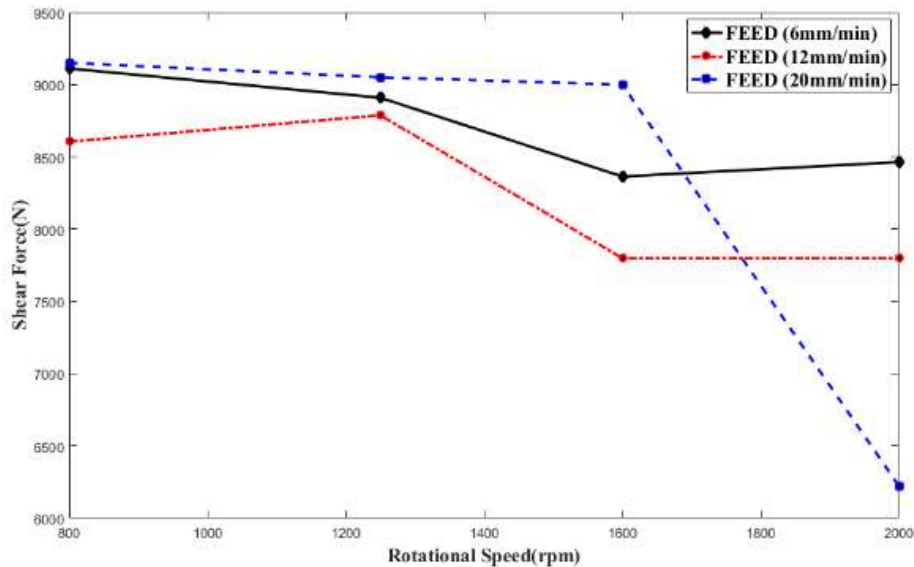
شکل ۷- سرعت‌های دورانی ۸۰۰ و ۱۲۵۰ دور بر دقیقه (الف) سطح بالایی ورق رویی اتصال در سرعت ۸۰۰ rpm، (ب) سطح بالایی ورق رویی اتصال در سرعت ۱۲۵۰ rpm، (ج) سطح بالایی ورق زیرین اتصال در سرعت ۸۰۰ rpm و (د) سطح بالایی ورق زیرین اتصال در سرعت ۱۲۵۰ rpm

برای انتخاب سرعت پیشروی عمودی ابزار، تعدادی آزمایش جهت تعیین محدوده مناسب انجام شد. با توجه به تحقیقات سانگ و همکاران [۲۵] مشخص شد که سرعت‌های پیشروی کم‌تر از ۵ mm/min بدلیل کاهش بیش از حد ضخامت ورق بالایی، کاهش استحکام اتصال حاصل شده است. زمانیکه سرعت پیشروی بیش‌تر از ۲۵ mm/min انتخاب شد، بدلیل سرعت بالای فرآیند و ایجاد اصطکاک چسبیده بین ابزار و قطعه‌کار، لبه انباشته در سطح جانبی شانه و پین ایجاد شد که نتیجه آن کاهش عمر ابزار و افزایش هزینه است. با توجه به قابلیت دستگاه فرز، سرعت‌های پیشروی عمودی ابزار برابر ۶، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر انتخاب شد. در شکل ۸ نتایج نیروی برشی اتصال برای حالتی نشان داده شده است که آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ زیر آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ قرار گرفته است.

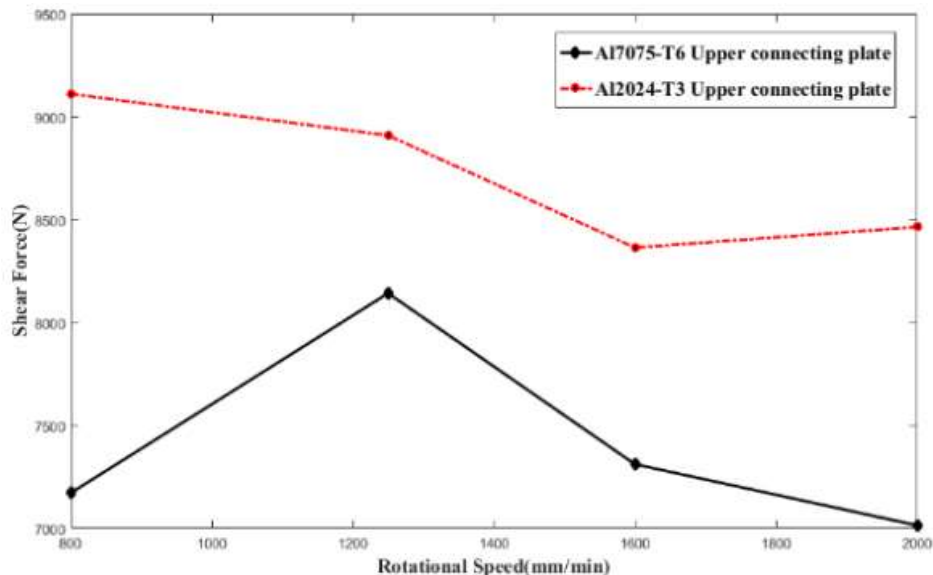
با توجه به شکل ۸ در زمان توقف ۱۰ ثانیه با پین استوانه‌ای با افزایش پیشروی ابزار از ۶ به ۱۲ میلی‌متر بر

۷۰۷۵-T۶ در زیر آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ قرار گیرد، نیروی برشی نهایی وضعیت بهتری خواهد داشت. شکل ۹ نتایج حاصل از جابجایی ورق آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ با ۲۰۲۴-T۳ را در سرعت‌های دورانی ۸۰۰، ۱۲۵۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۶ میلی متر بر دقیقه نمایش می‌دهد.

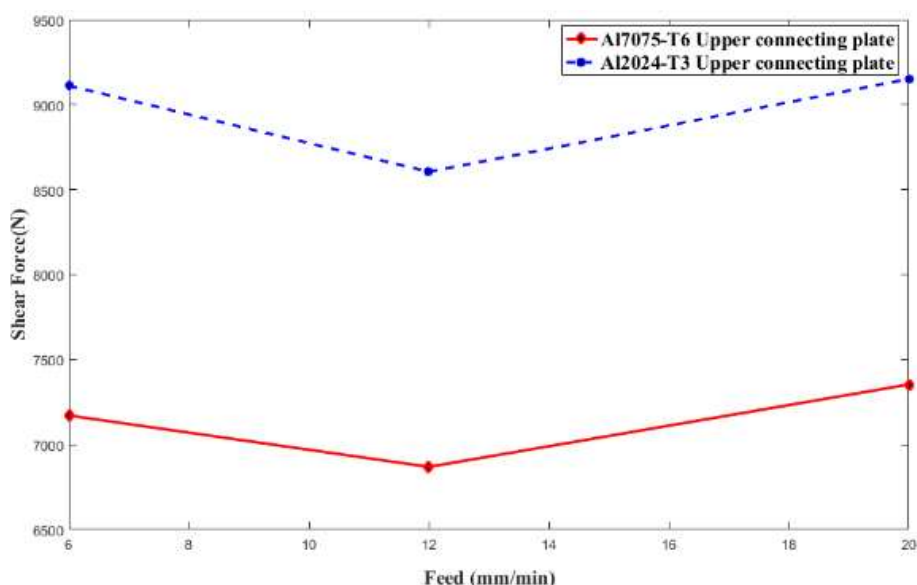
با توجه به نتایج نیرو کششی برشی حاصل از آزمایش‌های شماره ۴، ۱۰، ۱۶ و ۲۲ برای حالتی که آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ ورق رویی اتصال است و مقایسه آن با نتایج نیروی برشی اتصال‌های جوشکاری آزمایش‌های شماره ۱، ۷، ۱۳ و ۱۹ مربوط به حالتی مشاهده می‌شود که ورق رویی اتصال آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ است که اگر آلومینیوم



شکل ۸- نیروی برشی اتصال در سرعت‌های پیشروی ۶، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه (۲۰۲۴-T۳ ورق رویی اتصال)



شکل ۹- اثر جابجایی ورق‌های آلومینیومی ۷۰۷۵-T۶ و ۲۰۲۴-T۳ در سرعت‌های دورانی ۸۰۰، ۱۲۵۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۶ میلی متر بر دقیقه



شکل ۱۰- اثر جابجایی ورق‌های آلومینیومی ۷۰۷۵-T۶ و ۲۰۲۴-T۳ برای سرعت‌های پیشروی ۶، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۱- نمایی از سطح بالایی کیفیت اتصال برای تعدادی از آزمایش‌ها الف) ۷۰۷۵-T۶ ورق زیرین اتصال و ب) ۷۰۷۵-T۶ ورق رویی اتصال

جدول ۸- هدایت حرارتی آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ و ۷۰۷۵-T۶ [۲۶].

	Al2024-T3	Al7075-T6
هدایت حرارتی (w/m-k)	۱۲۱	۱۳۴

به سرعت از طریق ورق بالایی به ناحیه اتصال ورق‌ها منتقل می‌شود. انباشت گرما در ناحیه اتصال جوش منجر به افزایش دما در ورق پایین می‌شود. با افزایش دما، تنش کاهش

همچنین در سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه در آزمایش‌های شماره ۱ تا ۶ برای سرعت‌های پیشروی ۶، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه نتایج جابجایی ورق‌های آلومینیومی در سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی ۶، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

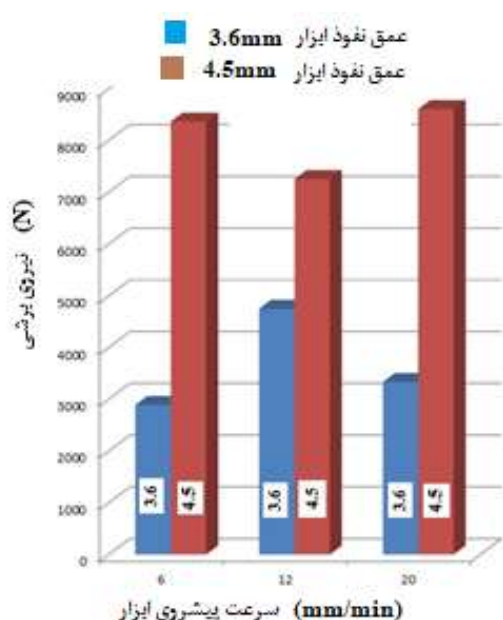
در شکل ۱۱ نمایی از سطح بالایی کیفیت اتصال برای تعدادی از آزمایش‌ها در حالت‌هایی نشان داده شده است که آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ به عنوان ورق رویی و زیرین اتصال بود. از کیفیت ظاهری اتصالات نیز مشاهده می‌شود که در زمان استفاده از آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ به عنوان ورق زیرین اتصال وضعیت استحکام جوش بهتر است.

به علت تفاوت در خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ و ۷۰۷۵-T۶، شرایط اتصال، نسبت به اتصال در آلیاژهای آلومینیوم مشابه، متفاوت است. در جدول ۸ هدایت حرارتی آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳ و ۷۰۷۵-T۶ آمده است.

هدایت حرارتی Al2024-T3 از Al7075-T6 کمتر است. زمانی که آلیاژ Al7075-T6 ورق بالایی اتصال است و آلیاژ Al2024-T3 ورق زیرین اتصال است، گرمای تولید شده

جدول ۹- آزمایشات انجام شده برای شرایط مختلف

نیروی برشی (N)	عمق نفوذ ابزار	ورق روی اتصال	سرعت پیشروی ابزار (mm/min)
۸۳۶۴	۴/۵	AI۲۰۲۴-T۳	۶
۲۸۹۰	۳/۶	AI۲۰۲۴-T۳	۶
۷۲۵۳/۵	۴/۵	AI۷۰۷۵-T۶	۱۲
۴۷۴۸	۳/۶	AI۷۰۷۵-T۶	۱۲
۸۶۰۵/۳	۴/۵	AI۲۰۲۴-T۳	۲۰
۳۳۳۳/۴	۳/۶	AI۲۰۲۴-T۳	۲۰



شکل ۱۲- نیروی برشی با تغییر عمق نفوذ ابزار

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق ورق‌های آلومینیومی آلیاژهای AI۲۰۲۴-T۳ و AI۷۰۷۵-T۶ به صورت لب روی هم به صورت نقطه‌ای توسط فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر جوش داده شده‌اند. اثر سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار، عمق نفوذ ابزار و ترتیب قرار گرفتن ورق‌های آلیاژهای آلومینیوم بر استحکام برشی ناحیه اتصال، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد:

می‌یابد. از این رو، منجر به حالت خمیری و نرم شدن ورق‌ها می‌شود. در این حالت استحکام ناحیه ناگت جوش کاهش می‌یابد؛ بنابراین نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از تحقیق مرجع [۲۷] در سال ۲۰۰۷ گرایش مشابهی دارد که برای آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۲۲ و ۵۱۸۲ انجام شده است گرایش مشابهی دارد.

به بیان دیگر نیز می‌توان نتیجه بدست آمده را توجیه نمود. یکی از مشکلات اساسی در فرآیند اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای ورق‌های ناهمنام، تشکیل ترکیبات بین فلزی است. از آنجا که 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 هنگام بارگذاری برشی شده است و شکست ترد اتصال با کرنش‌های بسیار کم رخ می‌دهد. نشان داده است که در اتصال FSSW ناهمنام در صورتی که ورق بالایی با خواص مکانیکی بالاتر و ورق زیری دارای خواص مکانیکی ضعیف‌تر مورد استفاده قرار گیرد، ترکیبات بین فلزی ایجاد شده بسیار ترد شده و باعث سهولت گسترش ترک‌ها و افت خواص مکانیکی اتصال می‌شود [۲۸].

با توجه به اینکه مجموع ضخامت دو ورق برابر ۴/۸ mm است، افزایش عمق نفوذ بیشتر از ۴/۵ mm، باعث برخورد نوک پین با صفحه پشتیبان، سوراخ شدن اتصال در ورق زیری و کاهش خواص مکانیکی اتصال خواهد شد؛ بنابراین می‌توان گفت، افزایش بیش از حد عمق نفوذ، سبب خارج شدن مواد از زیر شانه شده که نتیجه آن افزایش پلیسه و کاهش کیفیت اتصال است. با توجه به مطالب بیان شده به منظور بررسی اثر عمق نفوذ ابزار در تعدادی از آزمایش‌های انجام شده عمق نفوذی برابر ۳/۶ میلی‌متر نیز علاوه بر عمق نفوذ ۴/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده برای سایر آزمایش‌ها، برای ابزار در نظر گرفته شد.

جدول ۹ و شکل ۱۲ آزمایش‌های انجام شده و نتایج نیروی برشی را برای سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و زمان توقف ۱۰ ثانیه نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق نفوذ نیرو و استحکام برشی افزایش می‌یابد.

- [7] Zhang Z, Li W, Shen J, Chao YJ, Li J, Ma YE (2013) Effect of backplate diffusivity on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints. *Mater Design* 50: 551-557.
- [8] Liu HJ, Zhang HJ, Yu L (2011) Effect of welding speed on microstructures and mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy. *Mater Design* 32(3): 1548-1553.
- [۹] مردعلی زاده م، سلیمانی یزدی م، صفرخانیان م (۱۳۹۲) بررسی تجربی سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر میکرو سختی و ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی. *مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۱۰-۱: ۳(۳): ۱.
- [10] Azizieh M, Sadeghi A, Kokabi A (2012) Microstructures of dissimilar friction stir welded joints between 1100 aluminum alloy and az31 magnesium alloy.
- [11] Badarinarayan H, Shi Y, Li X, Okamoto K (2009) Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. *Int J Mach Tool Manu* 49(11): 814-823.
- [۱۲] سخایی ا.ح، جلالی آقچای ع، کازمی نصرآبادی م (۱۳۹۶) بررسی تجربی تاثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر استحکام برشی اتصال ایجاد شده در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶. *مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۶۶-۵۳: ۷(۳): ۱.
- [13] Baek SW, Choi DH, Lee CY, Ahn BW, Yeon YM, Song K, Jung SB (2010) Microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded galvanized steel. *Mater Trans* 51(5): 1044-1050.
- [14] Zhang Z, Yang X, Zhang J, Zhou G, Xu X, Zou B (2011) Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Mater Design* 32(8-9): 4461-4470.
- [15] Shen Z, Yang X, Zhang Z, Cui L, Li T (2013) Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints. *Mater Design* 44: 476-486.
- [16] Khodir SA, Toshiya Sh (2013) stir welded joints. *Materials & Design* 50: 551-557.
- [17] Khodir SA, Shibayanagi T (2007) Microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar aluminum joints of AA2024-T3 and AA7075-T6. *Mater Trans* 48(7): 1928-1937.
- [18] ASM metals handbook (1991) Heat treating. 4: 1544-1562.
- [19] Azizi A, Aalami Aleagha ME, Moradi H (2015) Investigation of thermal, mechanical and microstructural properties of 7000 series Aluminum alloys welding using friction stir
- ۱- در ابزار با پین استوانه‌ای وقتی آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ ورق رویی اتصال قرار دارد، با افزایش سرعت دورانی ابزار ابتدا استحکام برشی تا نقطه‌ای خاص افزایش، و بعد از آن افزایش بیشتر در سرعت دورانی ابزار باعث کاهش استحکام برشی می‌شود.
- ۲- در ابزار با پین استوانه‌ای با افزایش پیشروی از ۶ به ۱۲ میلی‌متر بر دقیقه استحکام برشی کاهش و مجدداً با افزایش پیشروی به ۲۰ میلی‌متر استحکام برشی افزایش می‌یابد.
- ۳- با افزایش عمق نفوذ از ۳/۶ mm به ۴/۵ mm نیرو و استحکام برشی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه مجموع ضخامت دو ورق برابر ۴/۸ mm است افزایش عمق نفوذ بیشتر از ۴/۵ mm باعث برخورد نوک پین با صفحه پشتیبان، سوراخ شدن اتصال در ورق زیری و کاهش خواص مکانیکی اتصال خواهد شد.
- ۴- نتایج نشان داد، اگر آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ زیر ۲۰۲۴-T۳ قرار گیرد، استحکام برشی ناحیه اتصال جوش وضعیت بهتری دارد.

۶- مراجع

- [1] Lancaster JF (1999) *Metallurgy of welding*. Elsevier.
- [2] Arora A, Zhang Z, De A, DebRoy T (2009) Strains and strain rates during friction stir welding. *Scripta Materialia* 61(9): 863-866.
- [3] Zhi-hong FU, Di-qiu H, & Hong W (2004) Friction stir welding of aluminum alloys. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed* 19(1): 61-64.
- [4] Elangovan K, Balasubramanian V (2007) Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Mat Sci Eng A-Struct* 459(1-2): 7-18.
- [5] Liu H, Fujii H, Maeda M, & Nogi K (2003) Tensile properties and fracture locations of friction-stir welded joints of 6061-T6 aluminum alloy. *J Mater Sci Lett* 22(15): 1061-1063.
- [6] Uematsu Y and Tokaji (2008) Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy. *Int J Fatigue* 10-11: 1956-1966

- aluminum 2024-T3 sheets. *J Mech Sci Technol* 29(11): 4639-4644.
- [24] Sajed M, Bisadi H (2016) Experimental failure study of friction stir spot welded similar and dissimilar aluminum alloys. *Weld World* 60(1): 33-40.
- [25] Song X, Ke Xing, Liu L, Huang LFC, (2014) Effect of plunge speeds on hook geometries and mechanical properties in friction stir spot welding of A6061-T6 sheets. *Int J Adv Manuf Tech* 71: 2003-2010.
- [26] <http://www.wilsonsmetals.com/datasheets>.
- [27] Vijay S, Eswar Y, Radovan K (2007) Investigation of the Friction Stir Lap Welding of Aluminum Alloys AA 5182 and AA 6022. *J Mater Eng Perform* 16(4): 477
- [28] Sun YF, Fujii HN, Okitsu TY (2013) Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique. *Mater Design* 47: 350-357.
- welding process. *Modares Mechanical Engineering* 14(14).
- [20] Ju-Ri Kim, Eun-Yeong Ahn, Hrishikesh Das, Yong-Ha Jeong, Sung-Tae Hong, Michael Miles, and Kwang-Jin Lee (2017) Effect of Tool Geometry and Process Parameters on Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Dissimilar Aluminum Alloys. *Int J Precis Eng Man* 18(3): 1-8.
- [21] Lotfi A (2014) The microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy by the use of Design of Experiment. *Modares Mechanical Engineering* 14(3): 17-26.
- [22] Tutar M, Aydin H, Yuce C, Yavuz N, Bayram A (2014) The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array. *Mater Design* 63: 789-797.
- [23] Paidar M, Khodabandeh A, Sarab ML, Taheri M (2015) Effect of welding parameters (plunge depths of shoulder, pin geometry, and tool rotational speed) on the failure mode and stir zone characteristics of friction stir spot welded