



بررسی تجربی تاثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر استحکام برشی اتصال ایجاد شده در آلیاژ آلومینیوم 7075-T6

امیرحسین سخایی^۱، عبدالحسین جلالی آقچای^{۲*} و محمد کاظمی نصرآبادی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

چکیده

در این تحقیق، اثر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای ورق‌های آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 بر استحکام برشی ناحیه اتصال بررسی شده است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی تاثیر مقادیر سرعت دورانی و عمق نفوذ ابزار در شرایط استفاده از صفحه پشتیبان با جنس‌های مختلف بر نیروی شکست برشی و حالت شکست ناحیه جوش است. اتصالات در دو سرعت دورانی با مقادیر ۸۰۰ و ۱۶۰۰ دور در دقیقه و در عمق‌های نفوذ، ۵/۳، ۵/۵، ۵/۷ و ۵/۹ میلی‌متر برای ابزار با استفاده از دو صفحه پشتیبان از جنس‌های آلیاژ آلومینیوم Al1100 و آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V ایجاد شدند. آزمایش استحکام برشی اتصال، جهت بررسی کارایی اتصال در نمونه‌ها انجام شد. نتایج بدست آمده، حاکی از تاثیر مستقیم جنس صفحه پشتیبان بر استحکام برشی اتصال و ابعاد هندسی ناحیه اغتشاش است. در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه با استفاده از صفحه پشتیبان تیتانیومی با افزایش عمق نفوذ، ورق بالایی از ناحیه فلز پایه دچار پارگی شده است. از طرفی مشخص شد که سرعت‌های دورانی بالا، سبب افت استحکام برشی اتصال در مقایسه با سرعت‌های دورانی پایین شده است. بیش‌ترین نیروی شکست برشی اتصال در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه، عمق نفوذ ۵/۹ میلی‌متر و صفحه پشتیبان آلومینیومی بدست آمد.

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

Experimental Study on the Effect of Friction Stir Spot Welding Process Parameters on the Shear Strength of Created Joints in AA7075-T6

A. H. Sakhaie¹, A. Jalali Aghchay^{2*}, M. Kazemi Nasrabi³

¹ Msc. Student, Mech. Eng., Science and Research Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran.

² Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

³ Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Abstract

In this paper, the effect of friction stir spot welding process parameters in AA 7075-T6 sheets has been investigated. Also, the effect of different rotational speeds and plunge depths of the tool with different backplate materials on shear failure load of the welding area has been studied. Joints were created in two rotational speeds of 800 and 1600 (rpm). Also, different plunge depths of 5/3, 5/5, 5/7 and 5/9 (mm) with two backplate of AA1100 and Ti6Al4V were used. Shear strength test was performed to evaluate the quality of the weld. Results indicated that the backplate material has a direct effect on the shear strength and geometry of the stir zone. In rotational speed of 1600 (rpm) and by using Ti6Al4V backplate with increasing plunge depth, upper sheet of the base metal zone has been teared. Also, it was found that high rotational speeds is caused a drop in shear strength of welds compared with low rotational speeds. Maximum load for shear failure obtained in 800 (rpm) and 5/9 (mm) with Al1100 backplate.

Keywords: Friction Stir Spot Welding; Backplate; Rotational Speed; Shear Strength.

۱- مقدمه

از میان آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا، سری ۷۰۰۰ خواص عالی همچون، چگالی نسبتاً کم، استحکام بالا و مقاومت خوب در برابر خوردگی را در بر دارند و از این رو به طور گسترده‌ای در صنایع هوا و فضا^۱ و به‌ویژه ساخت بال و بدنه هواپیما به کار می‌رود [۱].

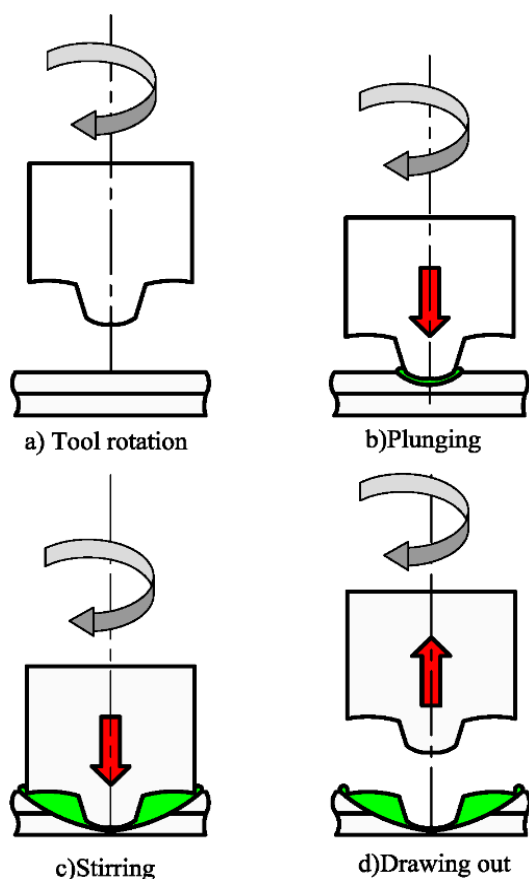
این آلیاژها از طریق فرآیند رسوب سختی، سخت می‌شوند که حضور رسوب‌ها، اتصال این آلیاژها را با روش‌های متداول ذوبی بسیار دشوار می‌کند [۲]. علاوه بر این، آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ به دلیل ریزساختار جامد نامناسب، تشکیل حفره و تخلخل هنگام روش‌های جوشکاری ذوبی، به عنوان مواد غیر قابل جوشکاری دسته‌بندی شده‌اند. با توجه به افت شدید خواص مکانیکی فلز جوش داده شده در مقایسه با فلز پایه، صنعتگران و دانشمندان به استفاده و توسعه روش‌های جوشکاری حالت جامد^۲ در این آلیاژها پرداخته‌اند. در این راستا جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به عنوان یکی از روش‌های جوشکاری در حالت جامد برای اتصال این آلیاژهای آلومینیوم استفاده شده است [۳]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای^۳، یکی از کاربردهای اخیر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۴ است. در این روش همانند FSW یک ابزار دورانی پین‌دار جهت ایجاد اتصال بین ورق‌ها داخل قطعه کار نفوذ می‌کند؛ اما برخلاف FSW در این فرآیند ابزار حرکت خطی در صفحه ورق نداشته، تنها در مسیر ضخامت ورق برای ایجاد اتصال حرکت می‌کند [۴]. این فرآیند بصورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

در فرآیند اتصال فلزات به روش FSSW پارامترهایی از قبیل، عمق نفوذ، سرعت دورانی، جنس صفحه پشتیبان و زمان توقف ابزار بر خواص مکانیکی و ریزساختاری محل اتصال تاثیرگذار است. در مقایسه با جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی^۵ در روش FSSW، کاهش مصرف انرژی به مقدار

۹۹٪ و کاهش هزینه تجهیزات و نصب آن‌ها به میزان ۴۰٪ گزارش شده است [۵].

افزایش خواص مکانیکی و بهبود ریزساختار، همواره از چالش‌های اصلی محققان جهت دستیابی به اتصالی با کم‌ترین عیوب و بیش‌ترین استحکام است؛ به طوری که محققان بسیاری با در نظر گرفتن تاثیر جداگانه هر پارامتر بر خواص مکانیکی و ریزساختاری و یا با بررسی نتیجه اتصال تحت اثر چند پارامتر همزمان به عنوان متغیرهای فرآیند پرداخته‌اند. در این راستا، تعدادی از تحقیقات انجام شده به همراه نتایج آن‌ها در ادامه آورده شده است.

بادریناریان و همکاران در سال ۲۰۰۹، تاثیر هندسه ابزار و پارامترهای جوشکاری را بر استحکام اتصال و حالت‌های شکست در آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴-O را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در مشاهدات خود بیان کردند، ناحیه اغتشاش از



شکل ۱- شماتیک از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای: (a) چرخش ابزار (b) ورود ابزار (c) ایجاد اتصال (d) خروج ابزار

¹ Aerospace Industries

² Solid State Welding

³ Friction Stir Spot Welding

⁴ Friction Stir welding

⁵ Resistance Spot Welding

به لب برای ورق‌های آلیاژ آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ با ضخامت ۳/۲ میلی‌متر در سرعت دورانی ۶۰۰ دور در دقیقه و سرعت جوشکاری ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه را بررسی کردند. آن‌ها در تحقیق خود از سه صفحه پشتیبان با جنس‌های مس، فولاد کربن متوسط و گرانیب استفاده کردند. با تحلیل نتایج بدست آمده توسط صفحه پشتیبان‌های مختلف بر خواص مکانیکی، مشخص شد، اتصالات ایجاد شده با استفاده از صفحه پشتیبان فولادی خواص برتری را بدست می‌دهد [۱۰].

شن و همکاران در سال ۲۰۱۳، ریز ساختار و مکانیزم شکست اتصال آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به روش جوش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با قابلیت پر کردن سوراخ اتصال^۲ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در پژوهش خود تاثیر پارامترهای سرعت دورانی و زمان توقف ابزار را روی اندازه دانه در ناحیه جوش، عیوب جوش، توزیع سختی، استحکام کششی و ابعاد رسوبات ایجاد شده بررسی کردند. نتایج بدست آمده، حاکی از تاثیر مستقیم شکل و هندسه رسوبات بر توزیع سختی و استحکام جوش داشت [۱۱].

لین و همکاران در سال ۲۰۱۵، تاثیر پارامترهای فرآیند بر استحکام اتصال آلیاژهای آلومینیوم به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را مطالعه کردند. آن‌ها در تحقیق خود تاثیر عمق نفوذ، سرعت دورانی و زمان توقف ابزار را روی استحکام مکانیکی و حالت‌های شکست نمونه‌ها بررسی کردند. در نتایج آن‌ها بیان شد، بیش‌ترین استحکام اتصال در سرعت دورانی ۹۰۰ دور در دقیقه و زمان توقف ۹ ثانیه بدست آمده است [۱۲].

با توجه به مطالعات مشخص شد که کاربرد صفحه پشتیبان در FSW مورد مطالعه قرار گرفته، ولی در FSSW این بررسی صورت نگرفته است. روش‌های جوشکاری خطی و نقطه‌ای دارای تفاوت‌هایی از جمله: سریع‌تر بودن فرآیند و توزیع متفاوت دما بواسطه تغییر در نیروهای اعمال شده می‌باشند. با توجه به این که انتخاب جنس صفحه پشتیبان در انتقال حرارت فرآیند تاثیرگذار است، با تغییر شرایط انتقال حرارت به طور قطع خواص مکانیکی اتصال ایجاد شده تغییر خواهد کرد. با بررسی مطالعات انجام شده در فرآیند FSSW مشخص است که تحقیقات بسیار کمی

هندسه ابزار و میزان عمق نفوذ تاثیر می‌پذیرد. در نتایج آن‌ها بیان شد، با افزایش ناحیه پیوند خورده، حالت‌های شکست متفاوتی در ورق‌ها بدست آمده است [۶].

مرزوق و همکاران در سال ۲۰۱۰، به مطالعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در آلیاژ آلومینیوم T۶-۶۰۶۰ پرداختند. هدف آن‌ها از انجام این تحقیق، دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی عمودی ابزار جهت دستیابی به اتصالی مناسب با کم‌ترین میزان عیوب بود. نتایج بدست آمده از تحقیق آن‌ها نشان داد که اهمیت انتخاب صحیح سرعت دورانی جهت دستیابی به اتصالی با بیش‌ترین استحکام، از سرعت پیشروی عمودی بیش‌تر است [۷].

کارتیکیان و بالاسابرامیان در سال ۲۰۱۰، مقدار پارامترهای سرعت دورانی، عمق نفوذ، سرعت پیشروی و زمان توقف ابزار را با استفاده از روش سطح پاسخ^۱ برای آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ بهینه‌سازی و محاسبه کردند. هدف آن‌ها، بررسی تاثیر چهار پارامتر ذکر شده بر میزان استحکام اتصال بود و روش RSM به منظور دستیابی به بیش‌ترین استحکام برشی نقطه جوش‌ها با بهینه کردن مقادیر پارامترها به کار برده شد. نتایج بدست آمده حاکی از این بود که سرعت پیشروی عمودی ابزار، به عنوان تاثیرگذارترین پارامتر بر میزان استحکام جوش و پس از آن به ترتیب، عمق نفوذ، زمان توقف و سرعت دورانی ابزار قرار داشتند [۸].

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱، تاثیر 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 FSSW، چهار ناحیه فلز پایه، منطقه تحت تاثیر حرارت، ناحیه متاثر از حرارت - کار مکانیکی و منطقه اغتشاش تشکیل می‌شود که از لحاظ ریزساختار 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 [۹].

در تحقیقی دیگر ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳، اثر جنس صفحه پشتیبان در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب

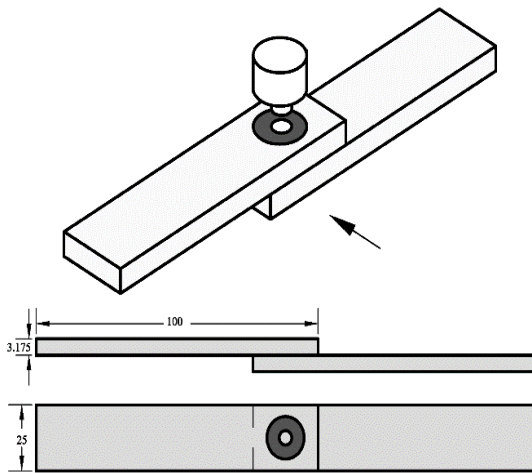
^۲ Refill Friction Stir Spot Welding

^۱ Response Surface Methodology

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی طراحی و ساخته شده بود، مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۳، تصویر ابزار جوشکاری نشان داده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ Ti-۶Al-۴V

۴۸۵	استحکام کششی نهایی (MPa)
۴۱۰	استحکام تسلیم (MPa)
۱۲	درصد ازدیاد طول
۱۶۰	سختی (VHN)
۱۳۰	ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)



شکل ۲- شماتیک نمونه‌های جوش داده شده در نمای ایزومتریک، جلو و بالا



شکل ۳- تصویر ابزار جوشکاری

جهت مشخص شدن تأثیر جنس صفحه پشتیبان بر رفتار مکانیکی اتصال انجام شده است؛ بنابراین بایستی این مورد در فرآیند FSSW، مورد بررسی قرار گیرد.

در این تحقیق، اتصال آلیاژ آلومینیوم Ti-۶Al-۴V به روش FSSW، مورد بررسی قرار گرفته است. هم چنین به تأثیر پارامترهای جنس صفحه پشتیبان، سرعت دورانی و عمق نفوذ ابزار بر استحکام برشی، هندسه اتصالات و حالت‌های شکست پرداخته شده است. در دومین بخش، روش تحقیق ارائه شده است. ارزیابی استحکام برشی قطعات جوشکاری شده، تأثیر جنس صفحه پشتیبان، تأثیر سرعت دورانی و عمق نفوذ ابزار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، موضوع بخش سوم از این تحقیق است. در بخش چهارم، حالت شکست قطعات بیان شده است. در نهایت در آخرین بخش، جمع بندی ارائه شده است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از ورق‌های آلومینیومی Ti-۶Al-۴V با ضخامت ۳٫۱۷۵ میلی‌متر جهت انجام آزمایش‌ها استفاده شد. خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است.

نمونه‌ها به شکل مستطیل با ابعاد ۲۵ x ۱۰۰ میلی‌متر بوسیله دستگاه برش بریده شدند. سپس با استفاده از برس سیمی و استون ورق‌ها آماده‌سازی سطحی شده، جهت انجام جوشکاری مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها به شکل لب روی هم^۱ و مطابق با شکل ۲ جوشکاری شدند.

با توجه به شکل ۲، برای انجام جوشکاری از دو ورق به ابعاد ذکر شده و با ناحیه روی هم افتادگی ۲۵ x ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد. هم چنین عمل اتصال در مرکز ناحیه روی هم افتاده انجام شد. برای ایجاد جوش‌ها، از ابزار فولاد تندبر^۲ استفاده شد. ابزار ساخته شده دارای شانه مقعر^۳ و پینی به شکل مخروط ناقص با ارتفاع ۵ میلی‌متر است. برای انجام فرآیند، از دستگاه فرز دیجیتال FP4MA استفاده شد. هم چنین فیکسچر مخصوصی که جهت نگهداری قطعات در

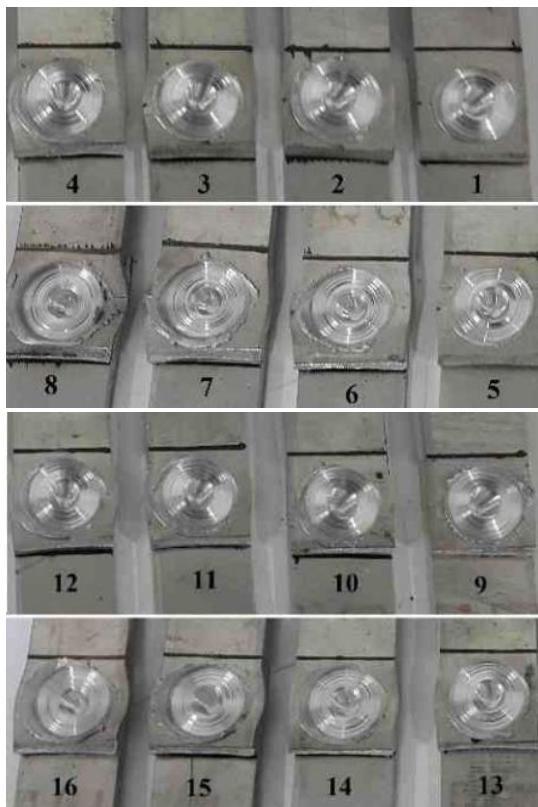
^۱ Lap Joint

^۲ High Speed Steel

^۳ Concave Shoulder

جدول ۳- شماره آزمایش‌ها و پارامترهای جوشکاری

شماره آزمایش	صفحه پشتیبان	عمق نفوذ ابزار (mm)	سرعت دورانی (rpm)
۱	Ti	۵,۳	۸۰۰
۲	Ti	۵,۵	۸۰۰
۳	Ti	۵,۷	۸۰۰
۴	Ti	۵,۹	۸۰۰
۵	Ti	۵,۳	۱۶۰۰
۶	Ti	۵,۵	۱۶۰۰
۷	Ti	۵,۷	۱۶۰۰
۸	Ti	۵,۹	۱۶۰۰
۹	Al	۵,۳	۸۰۰
۱۰	Al	۵,۵	۸۰۰
۱۱	Al	۵,۷	۸۰۰
۱۲	Al	۵,۹	۸۰۰
۱۳	Al	۵,۳	۱۶۰۰
۱۴	Al	۵,۵	۱۶۰۰
۱۵	Al	۵,۷	۱۶۰۰
۱۶	Al	۵,۹	۱۶۰۰



شکل ۴- تصویر تمامی اتصالات انجام شده

در زمان انجام تمامی اتصالات، از سرعت پیشروی عمودی ۱۲ میلی‌متر بر دقیقه، زمان توقف ابزار ۵ ثانیه و زاویه انحراف ابزار نسبت به ورق‌های جوش داده شده برابر ۲ درجه به عنوان پارامترهای ثابت و سرعت‌های دورانی ۸۰۰ و ۱۶۰۰ دور در دقیقه، عمق‌های نفوذ ۵,۳، ۵,۵، ۵,۷ و ۵,۹ میلی‌متر و دو صفحه پشتیبان به جنس‌های آلیاژ آلومینیوم Al1100 و آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V، به عنوان پارامترهای متغیر استفاده شد. در جدول ۲، خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژهای Al1100 و Ti6Al4V ارائه شده است.

در جدول ۳، شماره نمونه‌های آزمایش و پارامترهای جوشکاری ارائه شده است.

به منظور ارزیابی استحکام برشی نمونه‌های جوش داده شده، از دستگاه تست کشش SANTAM استفاده شد. آزمون کشش نمونه‌ها در دمای اتاق و با سرعت ثابت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. لازم به ذکر است، جهت اطمینان از مقادیر بدست آمده برای استحکام برشی اتصالات، برای هر نمونه سه قطعه جهت آزمون ایجاد شد و در نهایت مقدار استحکام اتصال با میانگین گرفتن از سه مقدار بدست آمده محاسبه شد. در شکل ۴، تصویر تمامی اتصالات انجام شده آورده شده است.

در ادامه به طور مشخص و جداگانه تاثیر هر پارامتر بر استحکام برشی، کیفیت ظاهری و حالت شکست ناحیه جوش مورد بحث واقع شده است.

۳- ارزیابی استحکام برشی قطعات جوش داده شده

دستیابی به اتصالی با بیش‌ترین میزان خواص مکانیکی، همواره از اصلی‌ترین اهداف محققان جهت رشد و توسعه

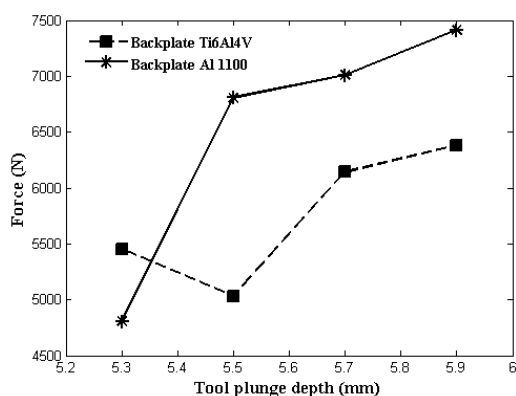
جدول ۲- خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژهای Al1100 و Ti6Al4V

ماده	Al1100	Ti6Al4V
استحکام کششی نهایی (MPa)	۹۰	۹۵۷
استحکام تسلیم (MPa)	۳۵	۸۸۰
درصد ازدیاد طول	۳۵	۱۱
سختی (VHN)	۳۸	۳۵۰
ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)	۲۱۸	۷/۱
دما (°C)	۲۵	۲۵

مشخص است که در ابتدا با افزایش عمق نفوذ نیروی شکست برشی اتصال مقداری کاهش پیدا کرده است؛ اما با افزایش مجدد عمق نفوذ، روند طی شده مشابه با صفحه پشتیبان Al1100 است. در مجموع با توجه به شکل ۵، اتصالات ایجاد شده با صفحه پشتیبان Al1100، دارای استحکام برشی بالاتری نسبت به صفحه پشتیبان Ti6Al4V می‌باشند. این کاهش استحکام در صفحه پشتیبان Ti6Al4V را می‌توان به نرخ انتقال حرارت بسیار پایین این آلیاژ مربوط دانست که دمای ایجاد شده در منطقه اختلاط را به طور متمرکز حفظ کرده است. این جلوگیری از کاهش دما در منطقه اختلاط، باعث کند شدن نرخ خنک‌کاری و در نتیجه کاهش استحکام شده است. در تحقیق آپادای و رینولدز، جنس صفحه پشتیبان در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی خطی لب به لب بررسی شد. هم‌چنین نتایج مشابهی برای استحکام اتصال با توجه به صفحه پشتیبان با ضریب انتقال حرارت بیشتر بدست آمد [۱۵].

جدول ۴- نیروی شکست برشی برای اتصالات

شماره آزمایش	نیروی شکست (N)	شماره آزمایش	نیروی شکست (N)
۱	۵۴۵۴,۴	۹	۴۸۰۸,۹
۲	۵۰۳۰,۶	۱۰	۶۸۰۸,۱
۳	۶۱۴۳	۱۱	۷۰۱۰,۲
۴	۶۳۸۴,۳	۱۲	۷۴۱۴,۴
۵	۴۹۹۱,۳	۱۳	۵۱۹۳,۴
۶	۵۶۳۶,۸	۱۴	۴۵۸۷,۲
۷	۴۷۲۸,۴	۱۵	۴۷۷۸
۸	۴۳۰۲,۳	۱۶	۴۵۰۴,۸



شکل ۵- تأثیر جنس صفحه پشتیبان بر نیروی شکست برشی اتصال در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه

فرآیند FSSW بیان شده است [۸]. به طوریکه در تحقیقات مختلفی تأثیر پارامترهای مختلف بر خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری سنجیده شده است. در این تحقیق، رفتار مکانیکی اتصالات تحت پارامترهای جنس صفحه پشتیبان، سرعت دورانی و عمق نفوذ ابزار توسط آزمایش برش، بررسی و تجزیه و تحلیل شده است.

در جدول ۴ نیروی شکست برشی بدست آمده از آزمایش استحکام برشی برای تمامی نمونه‌ها مطابق با شماره آن‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

۳-۱- تأثیر صفحه پشتیبان

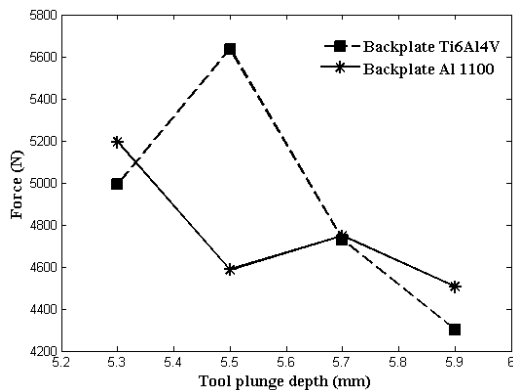
خصوصیات فیزیکی و حرارتی متفاوت جنس صفحه پشتیبان، سبب ایجاد تغییرات در ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی ورق‌های جوش داده شده می‌شود [۱۰]. به همین جهت آگاهی از جنس مواد انتخاب شده به عنوان صفحه پشتیبان جهت انجام فرآیند FSSW، ضروری به نظر می‌رسد.

در شکل ۵ نیروی شکست برشی در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه برای هر دو جنس صفحه پشتیبان آورده شده است.

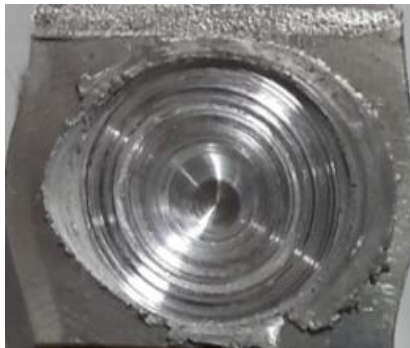
با توجه به شکل ۵، در صفحه پشتیبان Al1100 با افزایش عمق نفوذ، نیروی شکست افزایش یافته است. در فرآیند FSSW در ناحیه اغتشاش بواسطه تغییر شکل پلاستیک شدید و افزایش دما، دانه‌های ریز و هم محور ناشی از تبلور مجدد حاصل شده است. این در حالی است که با افزایش فاصله از منطقه اختلاط، دانه‌ها بواسطه حرارت اصطکاکی رشد کرده، افت خواص مکانیکی را نتیجه داده است [۱۳]. هم‌چنین در مطالعه انجام شده توسط زانگ و همکاران آمده است که منطقه اغتشاش دارای ساختار بسیار متراکم و فشرده بواسطه تبلور مجدد ایجاد شده در اطراف پین ابزار است [۹]. با توجه به تشکیل ساختار ریز و هم محور در اطراف پین می‌توان پیش بینی کرد که صفحه پشتیبان آلومینیومی در زمان کوتاهی حرارت بسیار بالای ایجاد شده در زمان انجام فرآیند را انتقال داده است؛ بنابراین فرصت کافی برای رشد دانه‌ها از بین رفته است. در تحقیق انجام شده توسط گرلیک و همکاران مشخص شد که با کاهش رشد دانه‌ها هنگام فرآیند FSSW، بهبود خواص مکانیکی اتصال حاصل می‌شود [۱۴]. در مورد صفحه پشتیبان Ti6Al4V

در شکل ۷ نمونه جوش داده شده با صفحه پشتیبان Al1100 در شرایط عمق نفوذ ۵/۹ میلی متر و سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه نشان داده شده است.

در شکل ۸ نمونه جوش داده شده با صفحه پشتیبان Ti6Al4V در شرایط عمق نفوذ ۵/۹ میلی متر و سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه نشان داده شده است.



شکل ۶- تاثیر جنس صفحه پشتیبان بر نیروی شکست برشی اتصال در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۷- نمونه جوش داده شده با صفحه پشتیبان Al1100



شکل ۸- نمونه جوش داده شده با صفحه پشتیبان Ti6Al4V

در شکل ۶، نیروی شکست برشی در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه برای صفحه‌های پشتیبان Ti6Al4V و Al1100 بیان شده است.

مطابق شکل ۶، در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه با صفحه پشتیبان Al1100 با افزایش عمق نفوذ روندی نزولی در نیروی شکست مشاهده می‌شود؛ به طوری که در عمق نفوذ ۵/۳ میلی متر نیروی شکست معادل ۵۱۹۳N است. این مقدار به ۴۵۰۴N در عمق نفوذ ۵/۹ میلی متر کاهش یافته است. با اضافه شدن سرعت دورانی، نیروهای فرآیند افزایش یافته است [۱۶]. در ادامه تنش‌های ایجاد شده روی صفحه پشتیبان آلومینیومی به اندازه‌ای بالا می‌رود که از حد تسلیم فراتر رفته، جریان فلزی پلاستیک در صفحه پشتیبان رخ می‌دهد. به این ترتیب صفحه پشتیبان تغییر شکل می‌دهد. در واقع با افزایش حرارت ایجاد شده در سرعت‌های دورانی بالا، استحکام تسلیم آلیاژ Al1100 استفاده شده کاهش یافته، توانایی تحمل تنش‌های حرارتی ایجاد شده را نداشته و دچار تغییر شکل پلاستیک شده است. همچنین مواد ورق‌های جوش داده شده، در اثر فشار پین به داخل صفحه پشتیبان نفوذ کرده‌اند. روندی تقریباً مشابه به حالت بیان شده در استحکام اتصالات ایجاد شده با صفحه پشتیبان Ti6Al4V نیز به چشم می‌خورد؛ بطوری که در ابتدا با افزایش عمق نفوذ از ۵/۳ میلی متر به ۵/۵ میلی متر، نیروی شکست برشی از ۴۹۹۱N به ۵۶۳۶N افزایش پیدا کرده، با افزایش بیشتر عمق نفوذ نیروی شکست کاهش پیدا کرده است. این در حالی است که هیچ‌گونه تغییر شکل پلاستیک در صفحه پشتیبان Ti6Al4V مشاهده نشد.

جنس صفحه پشتیبان به دلیل تغییر رفتار مکانیکی و حرارتی در مواد مختلف، تاثیراتی را در سطوح اتصال داده شده، پدید می‌آورد [۱۷]. در این بخش، تاثیر جنس صفحه پشتیبان آلیاژ آلومینیوم Al1100 و آلیاژ Ti6Al4V در خواص کیفی و ظاهری ورق‌های آلیاژ آلومینیوم Ti6-۷۰۷۵ جوش خورده در قسمت‌های مختلف اتصال آورده شده است. خصوصیات مواد انتخاب شده به عنوان صفحه پشتیبان به این صورت است که آلیاژ آلومینیوم دارای استحکام مکانیکی به مراتب ضعیف‌تری نسبت به آلیاژ تیتانیوم است، ولی در عوض قابلیت انتقال حرارت آن به طور چشمگیری بیش‌تر از آلیاژ تیتانیوم است.



شکل ۹- نمای زیرین ورق پایینی با صفحه پشتیبان
Ti6Al4V



شکل ۱۰- نمای زیرین ورق پایینی با صفحه پشتیبان
Al1100

با توجه به شکل ۱۰، برجستگی‌هایی در سطح ورق‌ها ایجاد شده است که میزان حجم و هندسه این برجستگی‌ها با افزایش عمق نفوذ، بیشتر شده است. دلیل این وقایع را می‌توان به استحکام و سختی سطحی پایین‌تر صفحه پشتیبان Al1100 نسبت به Ti6Al4V ربط داد؛ به‌طوریکه صفحه پشتیبان Al1100، قابلیت تحمل نیروهای وارده شده در حین فرآیند را نداشته و در اثر تغییرات دما، خود نیز دچار مقداری تغییر شکل شده، فرو رفتگی‌هایی در آن بوجود آمده است. لازم به ذکر است، پدیده ایجاد شده در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه مشاهده نشد. علت این موضوع را می‌توان به کاهش نیروهای وارد شده به صفحه پشتیبان Al1100 در این سرعت دورانی مربوط دانست. در تحقیقات انجام شده توسط یان و همکاران [۱۹]، هم‌چنین پایدار و همکاران [۲۰]، بدون اشاره به تاثیر جنس صفحه پشتیبان، بر ایجاد نشانه‌های دایره‌ای در زیر ورق پس از ایجاد اتصال اشاره شده است. تاثیر و نحوه شکل‌گیری هندسه این نشانه‌ها با توجه به جنس صفحه پشتیبان در این تحقیق مورد بحث واقع شد.

مشاهدات نشان می‌دهد که سطح بالایی ورق رویی به هنگام استفاده از صفحه پشتیبان Ti6Al4V در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و عمق‌های نفوذ ۵٫۷ و ۵٫۹ میلی‌متر از کنار محل نشست شانه، دچار گسیختگی شده است. این اتفاق در اتصالات ایجاد شده با شرایط مشابه برای قطعات اتصال داده شده با صفحه پشتیبان Al1100 رخ نداده است. شرایط به وجود آمده برای نمونه‌های گسیخته شده را می‌توان به کاهش استحکام تسلیم و استحکام حد نهایی در اثر تمرکز حرارت و افزایش دما در صفحه پشتیبان Ti6Al4V مربوط دانست. به طوری که این آلیاژ، حرارت تولید شده را در منطقه اختلاط نگه داشته، مانع از انتقال حرارت سریع در نمونه‌ها شده است. این واقعیت منجر به تغییر شکل پلاستیک شدید و ایجاد کرنش بیش از حد در قطعه شده است؛ لذا تنش‌ها و کرنش‌های اعمال شده از ماکزیمم مقدار حد تحمل تنش و کرنش ورق در نقطه پارگی بیشتر شده، در نهایت جدایش ورق‌ها رخ داده است. در توجیه عدم پارگی ورق‌های جوش داده شده با صفحه پشتیبان Al1100، می‌توان به قابلیت انتقال حرارت بالای این آلیاژ اشاره کرد که توانسته با کنترل درجه حرارت در زیر ورق‌های جوش داده شده، مانع از تمرکز حرارتی شدید شود. به عبارت دیگر، قابلیت انتقال حرارت بالای Al1100 در زمان کوتاهی حرارت را از زیر ناحیه اغتشاش انتقال داده است [۱۸].

سطح زیرین ورق پایینی در قطعات جوش داده شده با دو صفحه پشتیبان Al1100 و Ti6Al4V، دارای تفاوت‌های زیادی است. در شکل ۹، نمای زیرین ورق پایینی در اتصالات انجام شده با صفحه پشتیبان Ti6Al4V و سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه در عمق نفوذ ۵٫۹ میلی‌متر آورده شده است.

همانطور که از شکل مشخص است، نشانه‌ها و علامت‌های دایره‌ای بدون حجم، مشابه با شانه و پین ابزار استفاده شده، بوجود آمده است. می‌توان پیش‌بینی کرد که سختی سطحی بالای Ti6Al4V، مانع از جریان مواد به داخل خود شده است.

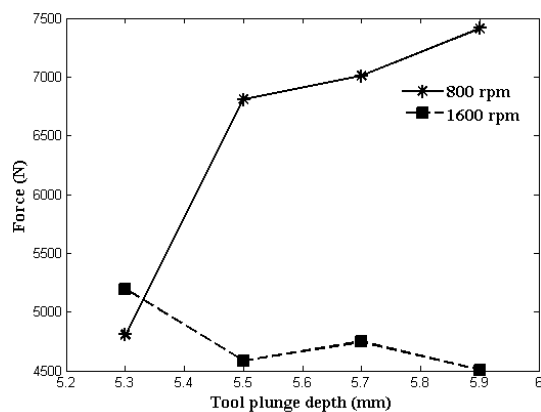
در شکل ۱۰ نمای زیرین ورق پایینی با صفحه پشتیبان Al1100 و سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه در عمق نفوذ ۵٫۹ میلی‌متر آورده شده است.

در دقیقه توجیه کرد که در آن نیروی شکست برشی از ۱۶۰۰ تا ۶۳۴۴ N به ۴۳۰۲ N کاهش پیدا کرده است.

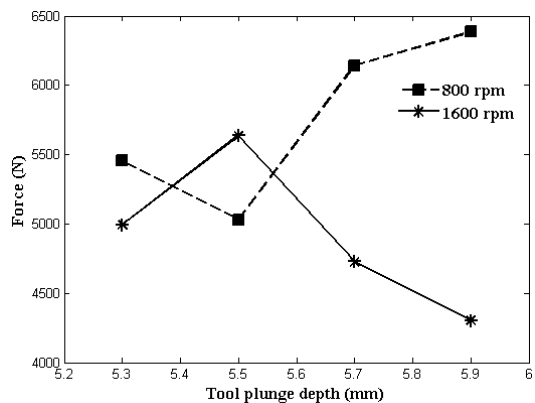
در شکل ۱۳ اتصال انجام شده با سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه با شرایط عمق نفوذ ابزار ۵٫۷ میلی‌متر و صفحه پشتیبان Ti6Al4V نشان داده شده است.

در شکل ۱۴ اتصال انجام شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه با شرایط عمق نفوذ ابزار ۵٫۷ میلی‌متر و صفحه پشتیبان Ti6Al4V نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود، ابعاد ناحیه اغتشاش با افزایش سرعت دورانی گسترده‌تر شده است. همچنین میزان اعوجاج و پلیسه تولید شده به طور محسوسی افزایش یافته است. در تحقیق پایدار و همکاران نیز، نتایج مشابهی مشاهده شد [۲۰]. علت این موضوع را می‌توان



شکل ۱۱- تاثیر سرعت دورانی ابزار بر نیروی شکست برشی اتصال با صفحه پشتیبان Al1100



شکل ۱۲- تاثیر سرعت دورانی ابزار بر نیروی شکست برشی اتصال با صفحه پشتیبان Ti6Al4V

۳-۲- تاثیر سرعت دورانی

در شکل ۱۱، تاثیر سرعت‌های دورانی ۸۰۰ و ۱۶۰۰ دور در دقیقه به هنگام استفاده از صفحه پشتیبان Al1100 بر نیروی شکست برشی اتصال نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۱، اتصالات انجام شده با سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه خواص برشی و راندمان بالاتری را نسبت به اتصالات انجام شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه نتیجه داده است. به عنوان مثال، نیروی شکست برشی در دو اتصال انجام شده با شرایط عمق نفوذ ۵٫۹ میلی‌متر و صفحه پشتیبان Al1100 از ۷۴۱۴ N در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه به ۴۵۰۴ N در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه کاهش یافته است. در فرآیند FSSW با افزایش سرعت دورانی، گرمای ایجاد شده و شدت تغییر شکل پلاستیکی در ناحیه اتصال افزایش پیدا می‌کند؛ همچنین نرخ سرد شدن یا سرعت خنک‌کاری در منطقه اغتشاش کاهش پیدا می‌کند [۱۲]؛ بنابراین بواسطه وجود زمان کافی، دانه‌های ریز و هم‌محور متبلور شده در منطقه اختلاط، فرصت کافی را برای تغییر شکل و رشد خود پیدا خواهند کرد؛ همچنین جریان شدید مواد خمیری در سرعت‌های دورانی بالا، سبب کاهش ضخامت ورق بالایی شده است [۲۱]. از طرفی تغییراتی در مرز دانه‌ها ایجاد شده که در نهایت حفره‌های ریزی بین دانه‌ها تشکیل شده است [۲۲]؛ بنابراین رشد دانه‌ها، جریان شدید مواد و کاهش ضخامت ورق بالایی در منطقه اختلاط، سبب کاهش نیروی شکست برشی اتصالات ایجاد شده در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه در مقایسه با اتصالات تولید شده در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه شده است.

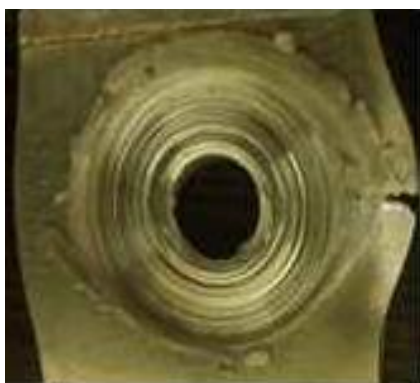
در شکل ۱۲ نیروهای شکست برشی اتصالات انجام شده با صفحه پشتیبان Ti6Al4V در دو سرعت دورانی ۸۰۰ و ۱۶۰۰ دور در دقیقه نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۲، گرانش مشابهی برای روند ایجاد شده در استحکام اتصالات همانند شکل ۱۱ ایجاد شده است. به طوریکه خواص برشی اتصالات ایجاد شده در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه نسبت به اتصالات ایجاد شده با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه، دارای بهبود نسبی است. این ادعا را می‌توان با استحکام برشی اتصال ایجاد شده در شرایط عمق نفوذ ۵٫۹ میلی‌متر در دو سرعت دورانی ۸۰۰ و دور

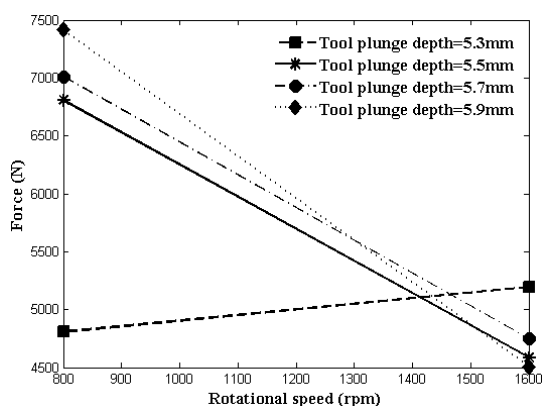
در شکل ۱۶ نیروی شکست برشی در صفحه پشتیبان Ti6Al4V با عمق‌های نفوذ ۵/۳، ۵/۵، ۵/۷ و ۵/۹ میلی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۱۳- تصویر اتصال با سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه



شکل ۱۴- تصویر اتصال با سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه



شکل ۱۵- تاثیر عمق نفوذ ابزار بر نیروی شکست برشی

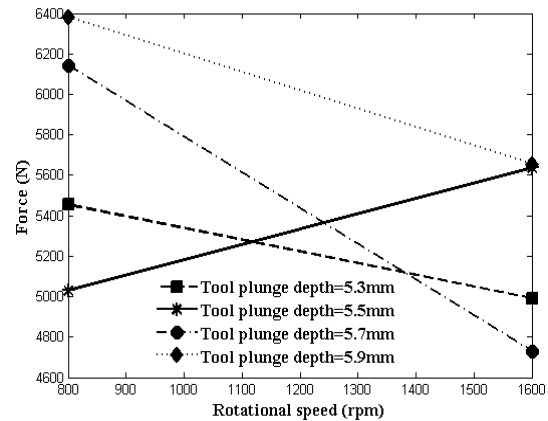
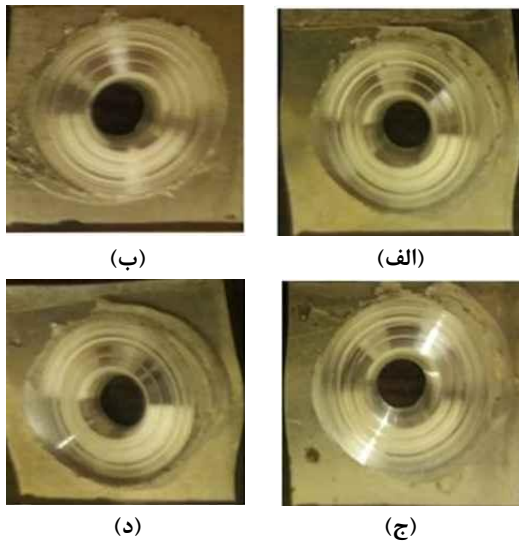
اتصال با صفحه پشتیبان Al1100

به افزایش اصطکاک سطح ابزار با ورق‌ها مربوط دانست که سبب وارد آمدن فشار بیش‌تری به منطقه اختلاط شده است. البته همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، جنس صفحه پشتیبان نیز عاملی تعیین‌کننده در بروز پاره شدن ورق است. می‌توان پیش‌بینی کرد که تاثیر جنس صفحه پشتیبان بر پاره شدن ورق از سرعت دورانی بیش‌تر است؛ زیرا در شرایط مشابه و با همین میزان سرعت دورانی در اتصالات انجام شده با صفحه پشتیبان Al1100، هیچ‌گونه گسیختگی در نمونه‌ها مشاهده نشده است.

۳-۳- تاثیر عمق نفوذ ابزار

در شکل ۱۵ نیروی شکست برشی در صفحه پشتیبان Al1100 با استفاده از عمق‌های نفوذ ۵/۳، ۵/۵، ۵/۷ و ۵/۹ میلی‌متر آورده شده است.

با توجه به شکل ۱۵، با افزایش عمق نفوذ در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه میزان استحکام برشی اتصال افزایش پیدا کرده است؛ بطوریکه با افزایش عمق نفوذ از ۵/۳ به ۵/۹ میلی‌متر، نیروی شکست برشی از ۴۸۰۸ نیوتن به ۷۴۱۴ نیوتن رسیده است. این افزایش نیروی شکست برشی را می‌توان به گسترش سطح ناحیه اغتشاش مربوط دانست. ابعاد سطح ناحیه اغتشاش، عاملی بسیار مهم در استحکام برشی اتصالات ایجاد شده با روش FSSW است [۲۳]. از طرفی با توجه به نمودار مشخص است که با افزایش عمق نفوذ در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه روند کاهش استحکام برشی اتصال حاصل شده است. به نحوی که با افزایش عمق نفوذ از ۵/۳ به ۵/۹ میلی‌متر نیروی شکست برشی از ۵۱۹۳ نیوتن به ۴۵۰۴ نیوتن کاهش یافته است. دلیل کاهش نیروی شکست برشی را می‌توان بواسطه افزایش درجه حرارت با افزایش عمق نفوذ و کاهش سطح ورق بالایی در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه مربوط دانست. از طرفی در تحقیق راوو و همکاران آمده است که با افزایش بیش از حد شدت جریان مواد در ناحیه اغتشاش، ویسکوزیته مواد در اطراف پین کاهش پیدا می‌کند و سبب کاهش عرض ناحیه متصل شده در ورق‌ها می‌شود که نتیجه آن کاهش استحکام اتصال است [۲۴].



شکل ۱۶- تاثیر عمق نفوذ ابزار بر نیروی شکست اتصال با صفحه پشتیبان Ti6Al4V

شکل ۱۷- تصویر چهار اتصال با عمق‌های نفوذ مختلف (الف) عمق نفوذ ۵/۳ میلی‌متر، (ب) عمق نفوذ ۵/۵ میلی‌متر، (ج) عمق نفوذ ۵/۷ میلی‌متر و (د) عمق نفوذ ۵/۹ میلی‌متر

۴- حالت شکست قطعات

نحوه شکست قطعات به شکل مستقیم با ارزیابی کارایی اتصال پیوند خورده است. از آن‌جاکه هدف ما استفاده از قطعات تولید شده با روش FSSW در کاربردهای حساس و دقیق است، آگاهی از رفتار نمونه ساخته شده تحت بارگذاری بسیار حائز اهمیت و حیاتی به نظر می‌رسد [۲۵]. به طور کلی دو نوع شکست برای اتصالات FSSW تحت بارگذاری برشی مطرح شده است، این دو نوع شکست عبارتند از: ۱- شکست برشی مقطع جوش ۲- تلفیقی از شکست برشی و کششی مقطع جوش [۲۶]. با توجه به پارامترهای انتخاب شده جهت انجام فرآیند FSSW، نواحی اغتشاشی متفاوتی به لحاظ ابعاد بوجود آمده است؛ بنابراین موجب شکل‌گیری متنوع محل جدایش ناحیه‌ای شده است که دو ورق با هم پیوند ایجاد کرده‌اند. هرچه اندازه قسمتی که دو ورق با هم پیوند ایجاد کرده‌اند تا محیط حفره اتصال بیشتر باشد، شکست در اتصال تحت نیروهای بیش‌تری اتفاق خواهد افتاد [۲۷].

در شکل ۱۸ تصویر مقطع شکست اتصال ایجاد شده در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و عمق نفوذ ۵/۹ میلی‌متر با استفاده از صفحه پشتیبان Ti6Al4V نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۶، در صورت زیاد شدن عمق نفوذ در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه خواص برشی اتصالات افزایش پیدا کرده است. به‌عنوان مثال، نیروی شکست برشی با افزایش عمق نفوذ از ۵/۳ به ۵/۹ میلی‌متر از ۵۴۵۴N به ۶۳۴۴N صعود کرده است. نتایج حاکی از کاهش نیروی شکست برشی اتصال با افزایش عمق نفوذ در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه است. مجدداً می‌توان دمای بوجود آمده و کاهش سطح ورق بالایی در این سرعت دورانی با افزایش عمق نفوذ را توجیهی جهت کاهش استحکام برشی اتصالات بیان کرد. لازم به ذکر است که کاهش استحکام برشی اتصالات حاصل شده با افزایش عمق نفوذ در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه و صفحه پشتیبان Ti6Al4V، اندکی محسوس‌تر از اتصالات ایجاد شده با صفحه پشتیبان Al1100 است.

در شکل ۱۷ چهار اتصال انجام شده با عمق‌های نفوذ ۵/۳ تا ۵/۹ میلی‌متر با سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه و صفحه پشتیبان Al1100، نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۷، با افزایش عمق نفوذ ابزار، میزان پلیسه و اعوجاج ایجاد شده، اندکی افزایش یافته است. هم‌چنین مشاهده شد که تاثیر جنس صفحه پشتیبان و سرعت دورانی بر ویژگی‌های ظاهری اتصال، از عمق نفوذ بیش‌تر است.

ورق‌های جوش خورده شده است. این موضوع سبب جلوگیری از رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته شده است؛ بنابراین اتصالات تولید شده با صفحه پشتیبان $Al_{11}O_3$ ، دارای مقاومت برشی بیشتری در مقایسه با اتصالات ایجاد شده با صفحه پشتیبان Ti_6Al_4V است.

(۳) استحکام و خواص سطحی ضعیف‌تر صفحه پشتیبان $Al_{11}O_3$ ، سبب شد تا در هنگام فرآیند بواسطه نیروها و تنش‌های وارد شده ناشی از افزایش سرعت دورانی و پیش‌روی عمودی ابزار، مقداری از مواد نرم شده در زیر پین به داخل صفحه پشتیبان $Al_{11}O_3$ نفوذ کند؛ بنابراین برجستگی‌هایی در زیر ورق‌های جوش داده شده با صفحه پشتیبان $Al_{11}O_3$ در سرعت دورانی 1600 دور در دقیقه مشاهده شد.

(۴) افزایش سرعت دورانی بعنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در دمای ایجاد شده، سبب گسترده‌تری حرارت وارد آمده به منطقه اختلاط شده است. همچنین بر نحوه جریان مواد پلاستیکی و ریزساختار منطقه اتصال تأثیر مستقیم گذاشته، سبب کاهش استحکام برشی اتصال شده است. همچنین مشاهده شد که ابعاد منطقه اغتشاش و میزان خارج شدن مواد از اطراف ابزار در حین فرآیند به شکل پلیسه با افزایش سرعت دورانی، افزایش محسوسی داشته است.

(۵) افزایش عمق نفوذ سبب بهبود خواص برشی نمونه‌ها در سرعت دورانی 800 دور در دقیقه گردید. علت این موضوع را می‌توان به گسترده شدن سطح منطقه اختلاط نسبت داد؛ همچنین افزایش عمق نفوذ در سرعت دورانی 1600 دور در دقیقه، به علت افزایش بیش از حد اصطکاک ناشی از حرکت دورانی ابزار، استحکام برشی اتصالات را به طور محسوسی کاهش داد.

(۶) جهت ارزیابی کارایی اتصالات تولید شده، بیش‌ترین نیروی شکست برشی در سرعت دورانی، 800 دور در دقیقه و عمق نفوذ $5/9$



(الف) (ب)

شکل ۱۸- تصویر شکست در نمونه الف) مقطع شکست در ورق رویی و ب) مقطع شکست در ورق زیری

با توجه به شکل ۱۸، نمونه در اثر تنش‌های کششی و فشاری ایجاد شده در آزمایش استحکام برشی اتصال از ناحیه اغتشاش دچار شکست شده است؛ به این صورت که در ابتدا جدایش در فصل مشترک دو ورق شروع شده، با افزایش نیرو در مسیری حول سوراخ کلیدی حرکت کرده، نهایتاً شکست نمونه در محیط سوراخ اتفاق افتاده است. به طور کلی در این تحقیق شکست برشی در نمونه‌ها پس از آزمایش استحکام برشی مشاهده شد. نتایج مشابهی در تحقیق ساجد و بیسادی ارائه شده است [۱۶].

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به مطالعه تجربی جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی آلایژ آلومینیوم $Ti_6Al_4V-7075$ با ضخامت $3/175$ میلی‌متر پرداخته شد. جنس صفحه پشتیبان، عمق نفوذ ابزار و سرعت دورانی به عنوان پارامترهای جوشکاری مطرح شد. در نهایت نتایج بدست آمده از این تحقیق در ذیل آورده شده است:

(۱) بواسطه قابلیت هدایت حرارتی بسیار پایین Ti_6Al_4V ، اتصالات ایجاد شده با این صفحه پشتیبان در اثر افزایش عمق نفوذ و سرعت دورانی دچار پارگی و گسیختگی از نواحی مجاور منطقه اغتشاش در زیر شانه شده است. این عیب در هیچ یک از اتصالات انجام شده با صفحه پشتیبان $Al_{11}O_3$ مشاهده نشد.

(۲) افزایش قابلیت سرد کردن که با میزان انتقال حرارت صفحه پشتیبان رابطه‌ای مستقیم دارد، سبب توزیع سریع‌تر دمای ناحیه اغتشاش از زیر

- friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. Mater Des 32(8-9): 4461-4470.
- [10] 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 Des 50: 551-557.
- [11] Shen Z, Yang X, Zhang Z, Cui L, Li T (2013) Microstructure and failure mechanisms of friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints. Mater Des 44: 476-86.
- [12] Lin YC (2015) Influence of process parameters on friction stir spot welded aluminum joints by various threaded tools. J Mater Process Tech 225: 347-356.
- [13] Badarinarayan H, Yang Q, Zhu S (2009) Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy. Int J Mach Tools Manuf 49(2): 142-148.
- [14] Gerlich A (2008) Local melting and tool slippage during friction stir spot welding of Al-alloys. J Mater Sci 43: 2-11.
- [15] Upadhyay P, Reynolds A (2013) Effect of Backing Plate Thermal Property on Friction Stir Welding of 25-mm-Thick AA6061. Metall Mater Trans A 45A: 2091-2100.
- [16] Sajed M, Bisadi H (2016) Experimental failure study of friction stir spot welded similar and dissimilar aluminum alloys. Weld World 60: 33-40.
- [17] Imam M (2015) Effect of backing plate material in friction stir butt and lap welding of 6063-T4 aluminum alloy. Int J Adv Manuf Technol 77: 2181-2195.
- [18] Zhang ZH, Li WY, Feng Y, Li JL, Chao YJ (2014) Improving mechanical properties of friction stir welded AA2024-T3 joints by using a composite backplate. Mat Sci Eng A-Struct 312-318.
- [19] Yoon SO, Kang MS, Kwon YJ, Hong ST, Park DH, Lee KH, Lim KH, Seo JD (2012) Influences of tool penetration speed and tool penetration depth on friction spot joining of AA5454-O aluminum alloy plates with different thicknesses. Trans Nonferrous Met Soc China 22: 629-633.
- [20] Paidar M, Khodabandeh A, Najafi H, Sabour A, Rouh-aghdam (2014) Effects of the tool rotational speed and shoulder penetration depth on mechanical properties and failure modes of friction stir spot welds of aluminum 2024-T3 sheets. J Mech Sci Tech 4893-4898.
- [21] Bilici MK, Yukler AI (2012) Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets. Mater Des 33: 545-550.
- [22] Rajamanickam N, Balusamy V, Madhusudhana Reddy G, Natarajan K (2009) Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir weld. Mater Des 30: 2726-2731.
- میلی متر در شرایط استفاده از صفحه پشتیبان Al1100 به مقدار ۷۴۱۴N بدست آمد.
- (۷) ویژگی‌های ظاهری اتصال، تاثیر مستقیم پارامترهای فرآیند را بر هندسه و ابعاد ناحیه اختلاط نشان داد. صفحه پشتیبان، سرعت دورانی و عمق نفوذ ابزار به ترتیب، میزان اثربخشی پارامترها را بر کیفیت ظاهری اتصال نشان می‌دهند.
- (۸) شکست برشی در نمونه‌ها پس از آزمایش کشش اتفاق افتاد. گسترش ترک در محیط سوراخ کلیدی، علت ایجاد شکست برشی در نمونه‌ها بیان شد.

۶- مراجع

- [1] Chen DC, You CS, Gao FY (2014) Analysis and experiment of 7075 aluminum alloy tensile test. Procedia Eng 81: 1252-1258.
- [2] Linton VM, Ripley MI (2008) Influence of time on residual stresses in friction stir welds in agehardenable 7xxx aluminium alloys. Acta Mater 56(16): 4319-4327.
- [3] Paglia CS, Buchheit RG (2008) A look in the corrosion of aluminum alloy friction stir welds. Scr Mater 58(5): 383-387.
- [4] Mishra RS, Mahoney MW (2007) Friction stir spot welding. Friction stir welding and processing, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [5] Feldman K, Kohn G, Stern A (2012) Friction stir spot welding. The Engineering Center. <http://www.engineers.org.il/Uploads/3294feldman160107>.
- [6] 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 Tools Manuf 49(11): 814-823.
- [7] Merzoug M, Mazari M, Berrahal L, Imad A (2010) Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys. Mater Des 31(6): 3023-3028.
- [8] Karthikeyan R, Balasubramanian V (2010) Predictions of the optimized friction stir spot welding process parameters for joining AA2024 aluminum alloy using RSM. Int J Adv Manuf Technol 51(1-4): 173-183.
- [9] Zhang ZH, Yang XQ, Zhang JL, Zhou G, Xu XD, Zou BL (2011) Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of

- stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy. *Int J Fatigue* 30(10-11): 1956-1966.
- [26] Song X (2014) Effect of plunge speeds on hook geometries and mechanical properties in friction stir spot welding of A6061-T6 sheets. *Int J Adv Manuf Technol* 71(9-12): 2003-2010.
- [27] Sun YF, Fujii H, Tsuji N (2013) Microstructure and mechanical properties of spot friction stir welded ultrafine grained 1050 Al and conventional grained 6061-T6 Al alloys. *Mat Sci Eng A-Struct* 17-24.
- [23] Gerlich A, North TH, Yamamoto M (2007) Local melting and cracking in Al 7075-T6 and Al 2024-T3 friction stir spot welds. *Sci Technol Weld Join* 12: 472-480.
- [24] Rao HM (2015) Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir spot welded magnesium to aluminum alloys. *Mater Des* 66: 235-245.
- [25] Uematsu Y (2008) Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction