بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری بر خواص مکانیکی اتصالات نامشابه فولاد گالوانیزه‌ی کم کربن و آلومینیوم6061-T6 با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

وحید فیض الهی[۱]، علی حیدری مقدم[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - ساخت و تولید، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

[۲]استادیار گروه مهندسی مواد، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: تابستان ۹۶ پذیرش: پاییز۹۶

چکیده

مطالعه‌ی حاضر، تأثیر پارامترهای جوشکاری بر ویژگی‌های ریزسختی و بارگذاری شکست را در جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی نقطه‌ای غیر مشابه بررسی می‌کند. خواص مکانیکی با آزمون برش و میکروسختی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش صفحات آلومینیومی 6061-T6 و فولاد گالوانیزه‌ی کم کربن با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به یکدیگر متصل شده‌اند. سه طول پین در اندازه‌های کوتاه، متوسط و بلند به شکل استوانه ای ساخته شد و آزمایشات با سرعت دورانی متفاوت و زمان‌های توقف متفاوت ابزار انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که پین کوتاه ریزسختی را در صفحه‌ی آلومینیومی بالایی به میزان بیشتری افزایش داد. با افزایش طول پین، مقادیر ریزسختی از صفحه‌ی بالائی کاهش و بطرف قسمتهای زیرین جوش افزایش یافت. بارگذاری شکست کشش-برش، درهنگام استفاده از پین کوتاه، بالا بوده و در پین‌های متوسط کاهش یافته و مجددا درهنگام استفاده از پین‌های بلند به بیشترین مقدار خود رسید. مود شکست در پین کوتاه، از نوع شکست ترکیبی بوده که با افزایش طول پین به شکل نرم تغییر پیدا می‌کند.

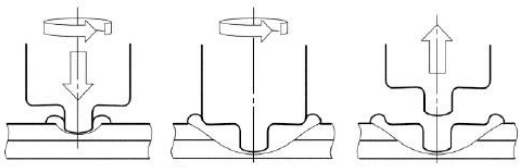
* **عهده‌دار مکاتبات:** alheidarym@yahoo.com

کلمات کلیدی: طول پین، سرعت دورانی ابزار، زمان توقف ابزار، استحکام کششی، فولاد گالوانیزه کم کربن، آلومینیوم ۶۰۶۱

۱- مقدمه

در سالهای گذشته استفاده از آلیاژهای سبک بجای فولادهای سنتی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از آلیاژهای آلومینیوم برای پنل‌های بدنه خودرو منجر به کاهش وزن وسیله‌ی نقلیه می‌شود، این امر بازتاب دهنده‌ی کاهش انتشار گاز سمی و افزایش عملکرد خودرو می‌باشد[۱]. این امر ممکن است بوسیله‌ی جایگزین کردن قسمت‌های فولادی معین با فولادهای با ضخامت کمتر انجام گیرد[۲]. از سویی کاهش وزن صرفا با استفاده از صفحات فولاد نازکتر، به سختی قابل دستیابی است. لذا می توان برخی از قطعات فولادی را با آلیاژهای غیرآهنی سبک وزن مانند آلیاژهای آلومینیوم یا آلیاژهای منیزیم با خصوصیات مکانیکی مشابه جایگزین کرد[۳]. یکی از جفت‌های مطلوب، ترکیب آلومینیوم و فولاد است که مشکل اصلی اتصال آنها، تفاوت در خصوصیات مکانیکی

و فیزیکی آنها می‌باشد[۱۰-۴]. بدین منظور شرکت مزداموتور در ۲۰۰۳ فرآیند اتصال‌دهی جدیدی را که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW) نامیده می‌شود، معرفی نمود[۵و۸]. FSSW یک تکنیک جوشکاری در حالت جامد می‌باشد. در طی فرآیند FSSW، یک ابزار چرخان با یک پین برآمده شده درون صفحات روی هم وارد می‌شود. بعد از یک زمان توقف معین، ابزار پس کشیده شده و یک سوراخ کلیدی به جای می‌ماند. گرمای اصطکاکی در فصل‌مشترک ابزار و قطعه کار باعث نرم شدن صفحات شده و مواد در اثر اغتشاش و دمای بالا به هم متصل شده و یک ناحیه‌ی اتصال‌دهی جامد بدست می‌آید[۶]. تصویر ۱ شماتیک فرآیند اتصال را نشان می دهد.



تصویر ۱: شماتیک فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای a) فرود آمدن ابزار بر روی صفحات b) نفوذ ابزار درون صفحات c) برخاستن ابزار و اتمام فرآیند[۷]

خواکین پیسینی و همکاران، نقش اثر طول پین را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای اتصالات غیرمشابه فولاد- آلومینیوم بررسی کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد که ماکزیمم بارگذاری هنگامیکه عمق نفوذ ابزار بیشتر شده (طول پین کاهش یافته است)، افزایش می‌یابد[۱]. در کار دیگری آقای پیسینی و همکاران، تاثیر عمق نفوذ ابزار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلیاژهای غیرمشابه آلومینیومی را بررسی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.2.2]

کرده‌اند. نتایج نشان داد که عمق نفوذ ابزار، محدودیتی را در افزایش بارگذاری شکست ایجاد می‌کند. همچنین مکانیزم شکست با افزایش عمق نفوذ ابزار، از حالت بین‌وجهی به پیرامونی تغییر کرد[۲]. در پژوهشی دیگر، جی.فیگنر و همکاران بر روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه-ای بین صفحات فولاد و آلومینیوم و تأثیر پارامترهای جوشکاری بر روی ویژگی‌های مکانیکی و ریزساختار آن‌ها، تحقیق نموده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از سرعت اسپیندل و زمان توقف مناسب، می‌تواند استحکام نقطه‌ی جوش را به‌طور مؤثری بهبود بخشد[۳]. آقای دبلیو.یوآن نقش طراحی ابزار و پارامترهای فرآیند بر روی ویژگیهای آلیاژ آلومینیوم 6016 با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که سرعت چرخشی ابزار و عمق فرورفتگی بطور قابل توجهی بارگذاری شکست برشی را تحت تاثیر قرار داد[۴]. در پژوهشی دیگر آقای ژیانگ شن و همکاران، تأثیر پارامترهای فرآیند که شامل سرعت دورانی ابزار و مدت زمان فرآیند می‌باشد را بررسی کرده‌اند. نتایج آزمایشات نشان داد که ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی، به‌طور چشمگیری وابسته به پارامترهای فرآیند می‌باشد که تأثیر مهمی بر روی هندسه‌ی دکمه جوش و جریان مواد دارد، کنترل این پارامترها بر روی اندازه‌ی ناحیه‌ی اغتشاشی هم تأثیر می‌گذارد[۵]. در پژوهشی دیگر آقای جی.وای.کائو و همکاران، بر روی تشکیل دکمه جوش و ویژگی‌های مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای در آلیاژ 6061-T6 کارکرده‌اند. ارتفاع دکمه جوش رابطه‌ی مستقیمی با سرعت دورانی، زمان اتصال‌دهی و عمق‌نفوذ داشت. درحالی‌که استحکام جوش یک رابطه‌ی معکوس با ارتفاع دکمه جوش را نشان داد. افزایش در سرعت دورانی، زمان اتصال دهی یا عمق نفوذ، باعث افزایش ارتفاع دکمه جوش شده و درنتیجه استحکام جوش کمتر شد[۶]. در پژوهش دیگری آقای ام.سانتلا و همکاران، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را بر روی صفحات فولاد کربنی DP780 مورد بررسی قرار داده‌اند. ابزارها با دو حالت مختلف در صفحه نفوذ کرده که یکی با سرعت پیوسته و دیگری در دو مرحله با سرعت نسبتاً زیاد و پس از آن سرعت آهسته‌تر و در عمق کمتر انجام شد. نتایج نشان داد که برای شرایط جوشکاری یکسان، با افزایش سرعت چرخش ابزار از ۸۰۰ به ۱۶۰۰دور بر دقیقه، استحکام اتصال افزایش یافت. استفاده از روش جوشکاری دو مرحله‌ای به جای روش یک مرحله ای تأثیری مشابه داشت[۷].در پژوهش دیگری، اس.بوزی و همکاران بر روی ترکیبات اینترمتالیکی، در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بین فولاد IF و آلومینیوم 6016 مطالعه کرده‌اند. ضخامت لایه‌ی اینترمتالیکی با سرعت چرخشی و عمق نفوذ، افزایش یافت. آنها دریافتند که سختی ساختار لایه‌ی اینترمتالیکی، وابسته به شرایط جوشکاری می‌باشد[۸].

هدف از این پژوهش بررسی نقش طول، سرعت دورانی و زمان توقف ابزار در اتصال غیرهمجنس آلومینیوم 6061-T6 و فولاد گالوانیزه کم کربن می‌باشد. علاوه بر آن میزان استحکام پین‌های فولادی H13 عملیات حرارتی شده مورد بررسی قرار گرفته شد. فولاد H13 در صفحه-ی فولاد گالوانیزه نفوذ کرده و میزان تغییرات داده‌های بدست آمده در مقایسه با حالتی که پین فقط در صفحه‌ی آلومینیومی باقی می‌ماند مقایسه شده است.

۲- روند انجام آزمایشات و روشهای ارزیابی:

در این پژوهش از صفحات آلومینیومی 6061-T6 و فولاد گالوانیزه-ی کم‌کربن استفاده شد. صفحه‌ی آلومینیومی دارای ضخامت ۲ میلی‌متر و صفحه‌ی فولادی ضخامت ۲,۴ میلی‌متر می‌باشد. به‌منظور مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از پین استوانه‌ای، سه ابزار از فولاد H13 تراشیده شد. تمامی ابزارها دارای قطر شانه‌ی ۲۰ میلی‌متر بودند. قطر پین ابزارها ۳,۶ میلی-متر و طول پین آن‌ها از کوتاه به بلند به ترتیب ۱,۷ ، ۲ و ۲,۵ میلی‌متر می‌باشد. صفحات به ابعاد ۴۵ میلی‌متر عرض و ۱۰۵ میلی‌متر طول بریده شده و در دو چیدمان بر روی دستگاه بسته شدند. چیدمان اول به‌صورت همپوشانی شده و با یک ناحیه‌ی همپوشانی ۴۵ میلی‌متر در ۴۵ میلی‌متر بوده که برای تست‌های کشش آماده شده بود. در این چیدمان قطرهای مربع در ناحیه‌ی همپوشانی شده، ترسیم شد و محل برخورد قطرهای مربع، مکان نشستن ابزار و ایجاد جوش را مشخص می‌کرد. در چیدمان دیگر، صفحات بر روی یکدیگر قرارگرفته که برای تست‌های سختی سنجی و متالوگرافی و بررسی‌های ریزساختاری درنظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که صفحه‌ی آلومینیومی در بالا و صفحه فولادی در تمام تست ها در پایین قرار داشتند. برای ایجاد اتصال از دستگاه فرز بلاروس مدل FU450R استفاده شد. پارامترهای متغیر در این پژوهش علاوه بر هندسه و طول پین ابزار، زمان توقف ابزار بر روی صفحات و همچنین سرعت دورانی ابزار در نظر گرفته شد. زمان‌های توقف برای تمامی پین‌ها به ترتیب ۱، ۳ و ۵ ثانیه لحاظ شد و برای سرعت‌های دورانی به ترتیب ۹۰۰ ، ۱۱۰۰ و ۱۴۵۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شد. در جدول ۱ حالات مختلف اتصال نشان داده شده است. در ادامه به منظور بررسی ریزساختار تصاویر SEM و آنالیز EDS نمونه‌ها بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN انجام شد. از دستگاه تست کشش یونیورسال مدل SANTAM-STM150 به منظور بررسی استحکام استفاده شد. در ادامه به منظور مطالعات ریزسختی محل اتصال، پروفیل ریز سختی با دستگاه INNOVATEST از نمونه ها تهیه شد.

جدول۱: حالات ایجاد شده از نظر سرعت دورانی ابزار و زمان توقف ابزار بر روی صفحات

۱-۱ سرعت دورانی کم و زمان توقف کم	۱-۲ سرعت دورانی متوسط و زمان توقف کم	۱-۳ سرعت دورانی زیاد و زمان توقف کم
۲-۱ سرعت دورانی کم و زمان توقف متوسط	۲-۲ سرعت دورانی متوسط و زمان توقف متوسط	۲-۳ سرعت دورانی زیاد و زمان توقف متوسط
-۳ ۱سرعت دورانی کم و زمان توقف زیاد	۳-۲ سرعت دورانی متوسط و زمان توقف زیاد	۳-۳ سرعت دورانی زیاد و زمان توقف زیاد

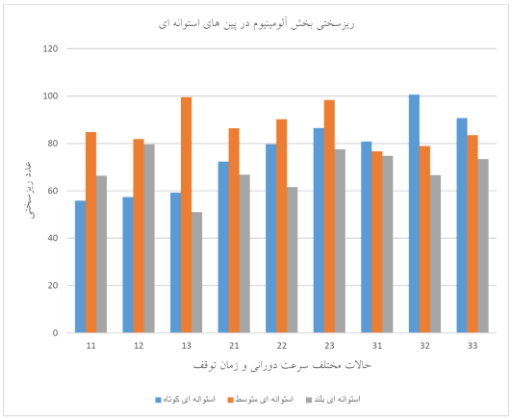
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.2.2]

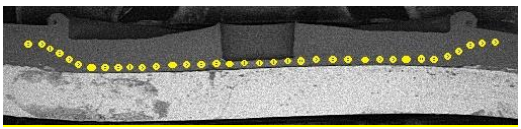
۳- نتایج و بحث:

۳-۱- ریزسختی:

با استفاده از پین کوتاه، میزان دمای اصطکاکی تولید شده پایین است. بتدریج با افزایش میزان عمق نفوذ، گرمای اصطکاکی افزایش می-یابد و با ورود ابزار در صفحه‌ی فولادی، دما به بیشترین مقدار خود می-رسد. پوشش گالوانیزه صفحه‌ی فولادی می‌تواند بعنوان یک لایه واسط در فرآیند شرکت کند. دمای ذوب پوشش گالوانیزه بسیار کمتر از فولاد است. از آنجایی که دمای فرآیند برای ذوب فولاد کافی نیست، لذا ذوب شدن پوشش گالوانیزه باعث بهبود اتصال‌دهی صفحات، به یکدیگر می-شود. هنگامیکه میزان مشارکت فلز روی (موجود در پوشش گالوانیزه) در منطقه‌ی جوش بالا رفته، مقادیر ریزسختی نیز به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. درحالتی که جوشکاری با پین کوتاهتر انجام می-گیرد، میزان ذرات فلز روی و ذرات فولادی جدا شده از صفحه‌ی پایینی در لایه‌های بین فلزی فصل مشترک جوش پایین می‌باشد. به همین دلیل مقادیر ریزسختی در این حالت پایین‌تر از سایر حالات است. با افزایش زمان توقف ابزار بطور جزئی میزان سختی افزایش می‌یابد که البته این افزایش قابل توجه نیست. افزایش سرعت دورانی ابزار نیز به دلیل خردایش دانه ها، منجر به افزایش میزان ریزسختی می‌گردد، که این افزایش قابل اغماض می باشد. با استفاده از پین با طول متوسط، میزان پخش شدن فلز روی و ذرات فولادی در محل اتصال افزایش یافته که منجر به بالارفتن مقادیر ریزسختی می‌شود. با استفاده از پین با طول بلند بدلیل اینکه پوشش گالوانیزه برداشته شده و پین در صفحه‌ی فولادی نفوذ می‌کند، ذرات روی و ذرات فولادی جدا شده از صفحه‌ی پائین، از بخش بالا فاصله گرفته و در قسمت صفحه‌ی فولادی پخش می‌شوند. بطورکلی اینگونه می‌توان استنباط کرد که افزایش عمق نفوذ ابزار بیش از دو پارامتر دیگر، مقادیر ریزسختی را تغییر می‌دهد. پس از عمق نفوذ، سرعت دورانی ابزار و بعد از آن زمان توقف ابزار پارامترهای بعدی موثر در تغییر میزان سختی جوش می‌باشند. در تصویر ۲ تغییرات ریزسختی در صفحه آلومینیومی برای سه حالت مذکور نشان داده شده است. مقادیر ریزسختی در آلومینیوم در حالتی که از پین کوتاه استفاده شده، در محدوده‌ی ۵۵,۸ تا ۱۰۳ HV واقع شده است. این محدوده در هنگام استفاده از پین‌های متوسط در محدوده‌ی ۷۶,۷ تا ۱۰۴,۵ HV واقع شده و برای پین استوانه‌ای بلند محدوده‌ی مقادیر ریزسختی ۵۱ تا ۱۳۷,۱ HV قرار داشت. پروفیل ریزسختی گرفته شده در تصویر ۳ قابل مشاهده می‌باشد.



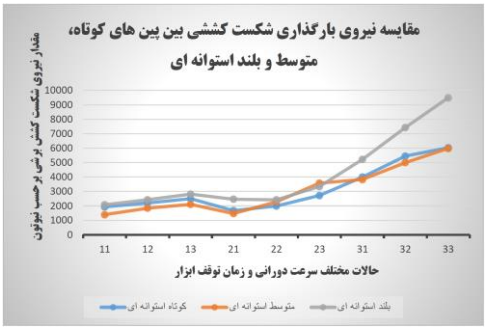
تصویر ۲: تغییرات ریزسختی بخش آلومینیوم در پین‌های استوانه‌ای کوتاه، متوسط و بلند



تصویر ۳: پروفیل ریزسختی گرفته شده به منظور بررسی تغییرات ریزسختی

۳-۲- تست کشش:

بررسی نیروی شکست، نشان می‌دهد که نیروی بارگذاری شکست درهنگام استفاده از پین کوتاه در مقایسه با پین متوسط بطور جزئی بیشتر است. بارگذاری کششی برشی در پین کوتاه تحت تاثیر فشار شانه-ی ابزار قرار دارد، لازم به ذکر است که، عمق نفوذ تمامی پین‌ها در این پژوهش ثابت در نظر گرفته شده است. به همین دلیل زمان استفاده از پین کوتاه، تا موقعی که پین به عمق مورد نظر برسد از طرف شانه‌ی ابزار فشردگی و نیروی بیشتری به صفحات وارد شده که از آن بعنوان اثر ترمومکانیکالی ابزار بر روی فصل‌مشترک تعبیر می‌شود. با استفاده از پین با طول بلند شرایط تغییر می‌کند. پین بلند از صفحه‌ی آلومینیومی عبور کرده و با برداشتن پوشش گالوانیزه‌ی موجود بر روی صفحه‌ی فولادی، در صفحه‌ی فولادی نفوذ کرده است. ذرات فلز روی به همراه ذرات فولادی جدا شده، در منطقه‌ی اغتشاشی با یکدیگر آمیخته شده و باعث بوجود آمدن اتصالات مستحکمی در این ناحیه، می‌گردند. در تصویر ۴ مقایسه نیروی شکست کششی-برشی نمونه ها نشان داده شده است.



تصویر ۴: مقایسه‌ی نیروی شکست کششی برشی پین‌های کوتاه، متوسط و بلند

بطور کلی با افزایش زمان توقف و سرعت دورانی ابزار، استحکام کششی افزایش می‌یابد. تغییرات سرعت دورانی ابزار بیشتر از تغییرات

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

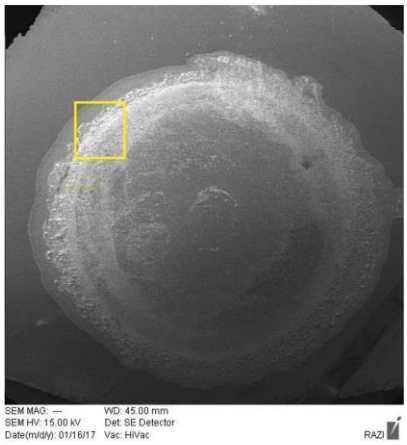
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.2.2]

زمان توقف ابزار، بر روی بارگذاری شکست اثرگذار بوده و تاثیر این پارامتر بر روی استحکام بوجود آمده بیشتر بوده است. البته می‌توان بیشترین پارامتر موثر بر روی بارگذاری شکست را عمق نفوذ ابزار دانست. زیرا که بیشترین تغییرات بوجود آمده در مقادیر شکست کششی برشی، هنگامی ایجاد شده که طول پین افزایش یافته است. در هنگام بررسی حالت شکست، به این مسئله می‌توان پی برد که سطح شکست جوش با استفاده از پین کوتاه، از نوع شکست ترکیبی است. یعنی در برخی نقاط شکست‌ها بصورت ترد و در برخی نقاط شکست نرم اتفاق افتاده است. با افزایش طول ابزار، مشخص گردید که تمامی شکست‌های پین‌های متوسط و بلند از نوع شکست نرم می باشد. در تصویر ۵ سطح شکست اتصال با استفاده از پین متوسط نشان داده شده است.

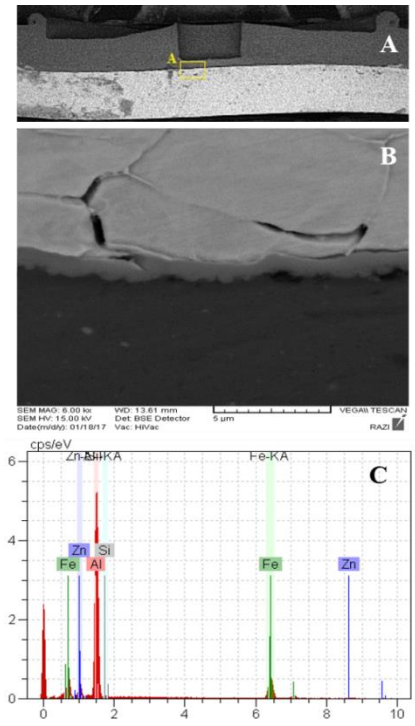
تصویر SEM و آنالیز EDS محل اتصال با استفاده پین متوسط در تصویر ۶ نشان داده شده است. همانگونه که در تصویر A مشاهده می گردد، پین در لایه پوشش نفوذ نکرده است. در تصویر B لایه گالوانیزه و اتصال آن با فولاد و آلومینیوم نشان داده شده است. آنالیز EDS در تصویر C وجود فلز روی را در ناحیه اتصال نشان می دهد. این بررسی نشان می دهد که درصد مشارکت آلومینیوم در لایه‌ی بین فلزی تشکیل شده کاهش یافته و درصد ذرات روی و آهن در لایه‌ی اینترمتالیکی افزایش قابل توجهی داشته است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اتصالات سالم با مشخصه‌های قابل قبولی حاصل گردید. خلاصه‌ی نتایج بدست آمده در این پژوهش به این شرح می‌باشد: دمای اصطکاکی با افزایش طول پین، سرعت دورانی و زمان توقف ابزار، افزایش می یابد. مقادیر ریزسختی در صفحه‌ی آلومینیومی با افزایش طول پین، افزایش می‌یابد. این افزایش بدلیل تاثیر فلز روی و پخش شدن آن در فصل‌مشترک جوش است. اتصالات ایجاد شده با پین کوتاه نسبت به پین متوسط نیروی شکست بیشتری را داشتند. دلیل این امر، اثر ترمومکانیکالی شانه‌ی ابزار بر روی فصل‌مشترک جوش می‌باشد. با استفاده از پین بلند، بارگذاری شکست کششی برشی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. دلیل این امر، پخش شدن ذرات روی به‌همراه ذرات فولادی جدا شده از صفحه‌ی فولادی می‌باشد. با استفاده از پین کوتاه، شکست اتصال حالت ترکیبی داشت. بطوریکه در برخی نقاط شکست ترد و در برخی نقاط دیگر شکست نرم ایجاد شد. اما در شرایط استفاده از پین‌های متوسط و بلند به ازاء تمامی پارامترها، شکست‌ها به‌شکل شکست نرم رخ داد.



تصویر ۵: تصویر SEM سطح شکست اتصال پین متوسط



تصویر ۶: تصویر SEM و آنالیز EDS از لایه‌ی اینترمتالیکی در پین متوسط

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.2.2]

سپاسگزاری:

با تشکر از جناب دکتر عبدالمحمد رضاوند، علی شهروزیانفر و امید حکیم پور که در انجام این پژوهش همیاری و مساعدت نمودنند.

مراجع

[1] J. M. Piccini, H. G. Svoboda, Effect of the tool penetration depth in Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar aluminum alloys, Procedia Materials Science, 8 (2015) 868–877.

[2] J. M. Piccini, H. G. Svoboda, Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-Steel joints, Procedia Materials Science, 9 (2015) 504–513.

[3] G. Figner, R. Vallant, N. Enzinger, Friction stir spot welds between aluminum and steel automotive sheets influence of welding parameters on mechanical properties and microstructure, The Institute for Materials Science and Welding in the World, 53 (2009) 13–23.

[4] W. Yuan, R. S. Mishra, S. Webb, Y. L. Chen, B. Carlson, D. R. Herling, G. J. Grant, Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds, Journal of Materials Processing Technology, 211 (2011) 972–977.

[5] Z. Shen, X. Yang, Z. Zhang, L. Cui, Y. Yin, Mechanical properties and failure mechanisms of friction stir spot welds of AA 6061-T4 sheets, Materials and Design, 49 (2013) 181–191.

[6] J. Y. Cao, M. Wang, L. Kong, L. J. Guo, Hook formation and mechanical properties of friction spot welding inalloy 6061-T6, Journal of Materials Processing Technology, 230 (2016) 254–262.

[7] M. Santella, Y. Hovanski, A. Frederick, G. Grant, M. Dahl, Friction stir spot welding of DP780 carbon steel, Science and Technology of Welding and Joining, 15 (2010) 271-278.

[8] S. Bozzi, A. L. Helbert-Etter, T. Baudin, B. Criquic, J. G. Kerbiguet, Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 4505–4509.

[9] R. S. Coelho, A. Kostka, J. F. Santos, A. Kaysser-Pyzalla, Friction-stir dissimilar welding of aluminum alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure, Materials Science & Engineering A, 556 (2012) 175–183.

[10] C. Y. Lee, D. H. Choi, Y. M. Yeon, S. B. Jung, Dissimilar friction stir spot welding of low carbon steel and Al–Mg alloy by formation of IMC", Science and Technology of Welding and Joining, 14 (2009) 216–220.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.3.2.2]