ماه‌نامه علمی پژوهشی
مهندسی ساخت و تولید ایران
www.smeir.org
10.22034/ijme.2025.529981.2095

بررسی تاثیر امواج فراصوتی افقی براستحکام قطعه کاردر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه ای مجدد پرکن

اسماعیل پوراسماعیل[۱]، مسعود محمودی[۱*]، سید محمد جعفری[۲]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲- دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: mahmoodi@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی
دریافت: ۲۲ خرداد ۱۴۰۴
پذیرش: ۳۰ آبان ۱۴۰۴

کلیدواژگان:
آلیاژ آلومینیوم 6061-T6
آزمون ریز سختی ویکرز
آزمون کشش
فراصوت
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

چکیده

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای دوباره پُرکن یکی از زیرشاخه‌های جوشکاری اصطکاکی است. در واقع عبارت دوباره پُرکن به سبب از بین بردن عیب حفره به‌جامانده از جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی نقطه‌ای به آن اضافه شده است. ایده اصلی تحقیق حاضر بر این اساس است که چگونه اعمال امواج فراصوتی به‌صورت افقی به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای دوباره پُرکن است، باعث بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 می‌گردد. لذا ابتدا یک میز آزمون شامل قسمت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای دوباره پُرکن و تجهیزات فراصوت آماده شد. نمونه‌ها نیز از ورق‌هایی به ضخامت ۱ میلی‌متر و از جنس آلومینیوم 6061-T6 انتخاب شدند. متغیرهای ورودی شامل امواج صوتی، سرعت دورانی و عمق نفوذ بر روی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 اعمال گردید نمونه‌های جوشکاری به‌دست‌آمده، برای استحکام کششی، سختی و ریزساختاری سنجیده و مقایسه شدند. نتایج نشان داد با افزایش توان فراصوتی همراه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای دوباره پر کن در منطقه اختلاط جوشکاری ازنظر ریزساختاری دانه‌ها ریزتر، این امر باعث افزایش استحکام تا ۲۳٪ در سرعت‌های چرخش ابزار از ۱۲۰۰ به ۱۴۰۰ دور در دقیقه می‌شود و سپس به‌طور چشمگیری در سرعت چرخش ابزار ۱۸۰۰ دور در دقیقه، به علت درشت شدن دانه‌ها استحکام تا ۲۵٪ کاهش می‌یابد.

Investigating the effect of horizontal ultrasonic amplitude on a aluminum workpiece strength in refill friction stir spot welding

Esmaeel PoorEsmaeel[1], Masoud Mahmoodi[1*], Seyed Mohammad Jafari[2]

1- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
2- Faculty of Mechanical & Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
* Corresponding Author's Email: mahmoodi@semnan.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 12 June 2025
Accepted: 21 November 2025

Keywords:
Aluminum Alloy 6061-T6
Vickers Microhardness Test
Tensile Test
Ultrasonic
Friction Stir Spot Welding

Abstract

Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW) is a subset of friction stir welding. The term "refill" is added to this method due to its ability to eliminate the keyhole defect left behind by conventional friction stir spot welding. The core idea of the present research is to investigate how the application of horizontal ultrasonic vibrations to the refill friction stir spot welding process enhances the mechanical and microstructural properties of 6061-T6 aluminum alloy. To achieve this, a test setup consisting of an RFSSW welding unit and ultrasonic equipment was prepared. The specimens were made from 1-mm-thick 6061-T6 aluminum alloy sheets. The input variables, including ultrasonic waves, rotational speed, and plunge depth, were applied to the 6061-T6 aluminum alloy. The resulting welded samples were evaluated and compared in terms of tensile strength, hardness, and microstructure. The results indicated that increasing ultrasonic power during refill friction stir spot welding led to grain refinement in the weld nugget zone. This refinement contributed to a 23% increase in strength at tool rotational speeds ranging from 1200 to 1400 rpm. However, at a higher rotational speed of 1800 rpm, the strength decreased by 25% due to grain coarsening.

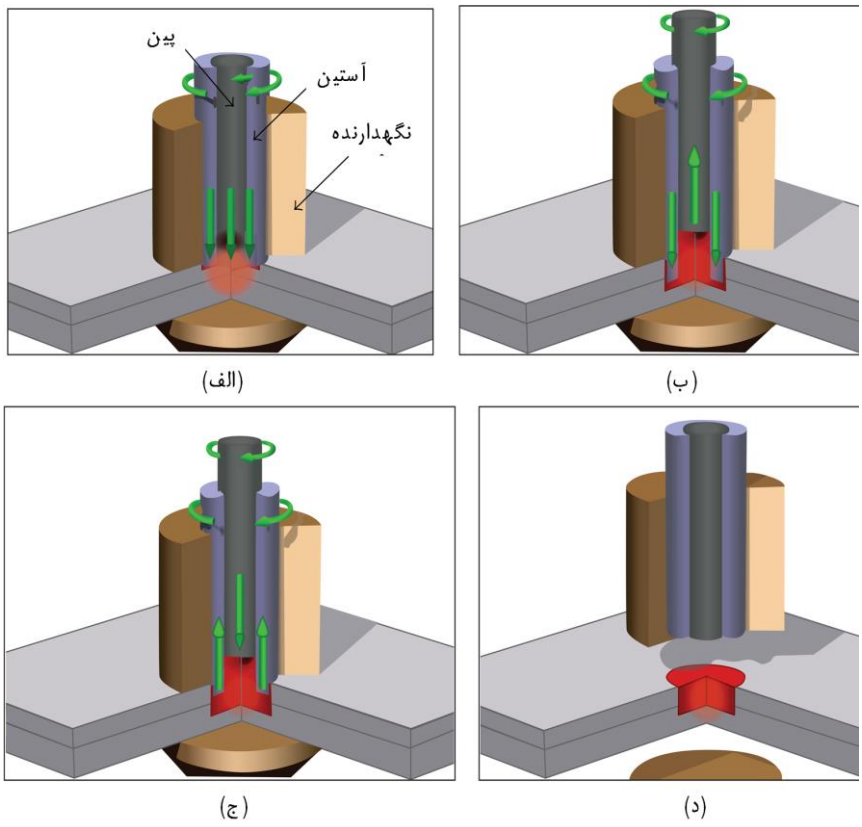
Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

PoorEsmaeel E, Mahmoodi M, Jafari SM. Investigating the effect of horizontal ultrasonic amplitude on a aluminum workpiece strength in refill friction stir spot welding. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Nov 22;12(9):34-41. doi: 10.22034/ijme.2025.529981.2095 [In Persian]

۱– مقدمه

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای دوباره‌پُرکن (RFSSW) از سه عضو کلیدی—نگه‌دارنده، آستین و پین—تشکیل شده است. شکل ۱ مراحل مختلف این فرایند را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد: الف) ایجاد اصطکاک و گرما با چرخش هم‌زمان آستین و پین که در یک سطح قرار دارند، ب) فرورفتن آستین دوار در مذاب و هم‌زمان بالا رفتن پین، ج) حرکت بازگشتی آستین به همراه حرکت پین به سمت پایین تا رسیدن به سطح نگه‌دارنده و در نهایت د) جدا شدن کامل ابزار از قطعه کار. پارامترهای سرعت چرخش، زمان و عمق فرورفتن ابزار، مهم‌ترین متغیرهایی هستند که کیفیت اتصال را تعیین می‌کنند. در مقایسه با روش کلاسیک FSSW، RFSSW علاوه بر مزایای قبلی، با حذف فرورفتگی نهایی، ظاهر و استحکام اتصال را بهبود می‌بخشد.



شکل ۱ فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای دوباره پُرکن [۱]

ژو و همکاران [۱] نشان دادند که در جوشکاری آلیاژ ۶۰۶۱-T6، افزایش تدریجی سرعت چرخش تا حدی مشخص باعث افزایش بار شکست برشی-کششی می‌شود؛ اما پس از رسیدن به مقدار بهینه، ادامه افزایش سرعت موجب کاهش قابل توجه استحکام می‌گردد. آن‌ها دو الگوی شکست «پلاگ» و «مخلوط کشش-برش» را شناسایی کردند.

کلوز و همکاران [۲، ۳] روی ورق ۷۰۷۵-T6 متمرکز شدند و دریافتند که افزایش زمان جوشکاری تا حدی که شرایط دمایی مناسب فراهم شود، کیفیت اتصال را بهبود می‌بخشد؛ در غیر این صورت، عیوبی مانند حفره و عدم پیوستگی ساختاری ظاهر می‌شود. همچنین، افزایش عمق غوطه‌وری پس از یک آستانه، ظرفیت تحمل بار را کاهش داده و نوع شکست را تغییر می‌دهد.

شن و همکاران [۴] در اتصالات ۶۰۶۱-T6، وجود حفره، هوک و ضعف لیگامنت را گزارش کردند و کمترین سختی را در ناحیه اطراف پین ثبت کردند. تحت بارگذاری برشی، شکست پلاگ و شکست برشی، و تحت بارگذاری کششی-برشی، شکست پلاگ در ورق بالایی، جداشدگی ناگت جوش و شکست پلاگ در ورق پایینی مشاهده شد.

لیو و همکاران [۵] نشان دادند که اعمال فراصوت طولی در RFSSW آلیاژ 5A06 باعث تقویت پیوند لیگامنت افقی و افزایش استحکام اتصال می‌شود، در حالی که فراصوت جانبی بیشتر بر پیوند عمودی تأثیر گذاشته و استحکام کششی را افزایش می‌دهد.

زو و همکاران [۶] در مرور جامع خود، اصول عملکرد، پارامترهای مؤثر و چالش‌های فنی RFSSW را تبیین کردند. کار و همکاران [۷] در اتصال Al/Ti به روش FSW نشان دادند که تغییر سرعت چرخش، سازوکارهای ریزساختاری و شکل‌گیری ترکیبات بین‌فلزی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌دهد. نان و همکاران [۸] نیز در RFSSW مشابه، تأثیر سرعت چرخش را بر کنترل ساختار ناحیه جوش و کیفیت اتصال تأیید کردند.

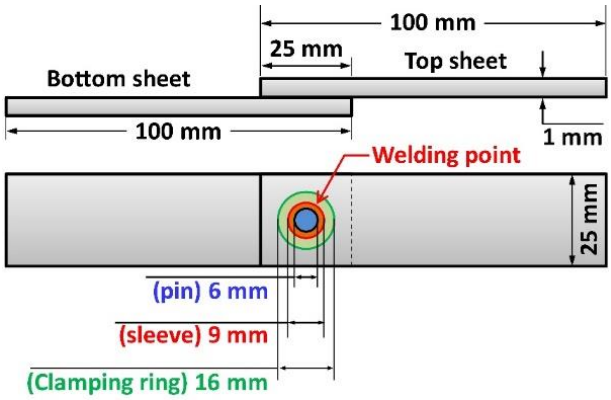
پژوهش حاضر برای نخستین بار امواج فراصوت افقی را در RFSSW ورق آلومینیوم با ضخامت ۱ میلی‌متر به کار می‌برد. هدف، بررسی توأم تأثیر این امواج و سرعت چرخش ابزار بر خواص مکانیکی اتصال است. نتایج اولیه نشان می‌دهد که فراصوت افقی باعث ریزدانه‌شدن ساختار و افزایش ۲۳ درصدی استحکام می‌شود؛ در حالی که سرعت ۱۸۰۰ rpm به دلیل درشتی دانه‌ها، استحکام را ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. این یافته‌ها گامی مهم در بهینه‌سازی RFSSW آلومینیوم محسوب می‌شوند.

۲– مواد و آزمون‌ها

آزمایش‌ها جوشکاری RFSSW به کمک فراصوت بر روی یک دستگاه فرز شامل ابزار RFSSW ساخته‌شده، سر RFSSW و دستگاه فراصوت انجام شد. ابزار از بست حلقوی، بوش و پین تشکیل‌شده است که قطر بیرونی آن بترتیب ۱۸، ۹ و ۵. ۵ میلی‌متر است. دستگاه فراصوت با فرکانس فراصوتی ۲۰kHz از یک ژنراتور، یک مبدل و یک هورن فراصوتی تشکیل‌شده است. این پژوهش، تحقیقی را در مورد موضوع اتصالات RFSSW آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-T6 ارائه می‌دهد.

شکل ۲ اتصال لب روی هم مورداستفاده برای آزمون‌های استحکام برش نشان می‌دهد. اتصالات لب روی هم فلزی با ضخامت‌های مختلف در نظر گرفته شده‌اند؛ ضخامت ورق ۱ میلیمتر بود. نمونه‌ها با کمک دستگاه آزمون کشش STM-400 ساخت شرکت سنتام در دمای اتاق با سرعت ثابت ۲ میلیمتر در دقیقه انجام شد.

نمونه‌ها از ورقی به ضخامت ۱ میلی‌متر با ابعاد ۲۵ در ۱۰۰ میلی‌متر تهیه شدند. تمام نمونه‌ها در پیکربندی اتصال لب روی‌هم جوش داده شدند. فرایند جوشکاری در مرکز ناحیه هم‌پوشانی به ابعاد ۲۵ در ۲۵ میلی‌متر انجام شد. پیکربندی اتصال در شکل ۲ نشان داده‌شده است.



شکل ۲ شماتیک پیکربندی اتصال

جوشکاری با سرعت‌های دورانی بترتیب ۱۲۰۰، ۱۴۰۰، ۱۸۰۰ دور در دقیقه انجام شد. تمام آزمایش‌ها جوشکاری با کمک امواج فراصوتی جانبی با توان هزار وات صورت گرفت. انتخاب سرعت‌های ۱۲۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ دور در دقیقه بر اساس مطالعات پیشین و ملاحظات عملی صورت گرفت. سرعت ۱۲۰۰ دور به عنوان حداقل سرعت مؤثر، ۱۴۰۰ دور به عنوان نقطه بهینه برای تعادل بین گرمای تولیدی و ریزدانه‌سازی (افزایش ۲۳٪ استحکام) و ۱۸۰۰ دور برای بررسی اثرات گرمای بیش از حد و درشتی دانه‌ها (کاهش ۲۵٪ استحکام) در نظر گرفته شد. این محدوده سرعتی امکان بررسی تأثیر امواج فراصوتی بر خواص جوش در شرایط مختلف و همچنین کاربرد صنعتی نتایج را فراهم می‌کرد.

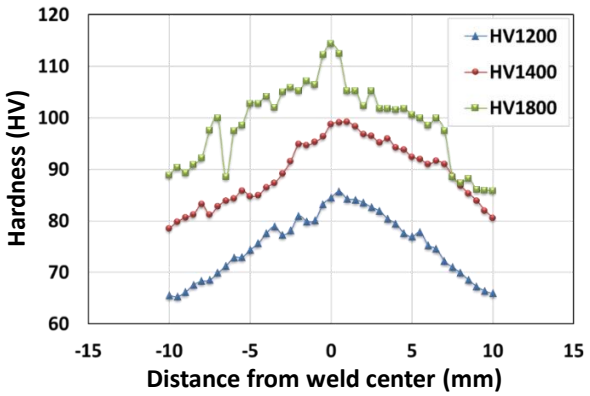
آزمایش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای دوباره پُرکن با کمک فراصوت جانبی انجام‌شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده‌شده است، روش جانبی با استفاده از یک فیکسچر مخصوص ساخته‌شده برای نگه‌داشتن سر نوسان فراصوت شامل هورن و مبدل فراصوت استفاده می‌شود. نمونه‌ها بین قسمت RFSSW و داخل فیکسچر نصب شده قرار داده با اعمال فراصوتی، سرعت چرخشی و عمق نفوذ به نمونه‌ها با ابزار RFSSW استفاده شد.

شکل ۳ آزمایش جوشکاری با کمک امواج فراصوت (جانبی): الف) انجام جوش RFSSW ب) ژنراتور فراصوت پ) سر نوسان فراصوت شامل هورن و مبدل فراصوت در موقعیت ساعت ۹

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون ریز سختی ویکرز

در این آزمون نمونه‌ها با دستگاه مانت گرم آماده‌سازی شدند. بعد از سنباده، پولیش و اچ کردن، سطح کار جهت انجام آزمون ریز سختی آماده شد. سختی نمونه‌ها از طریق آزمون ریز سختی ویکرز و با استفاده از دستگاه سختی سنج ساخت پکن با فناوری جدید تعیین گردید. نیروی آزمون ریزسختی ۰/۹۸ نیوتن بود. نتایج آزمون سختی سنجی در شکل ۴ نشان داده شده است.



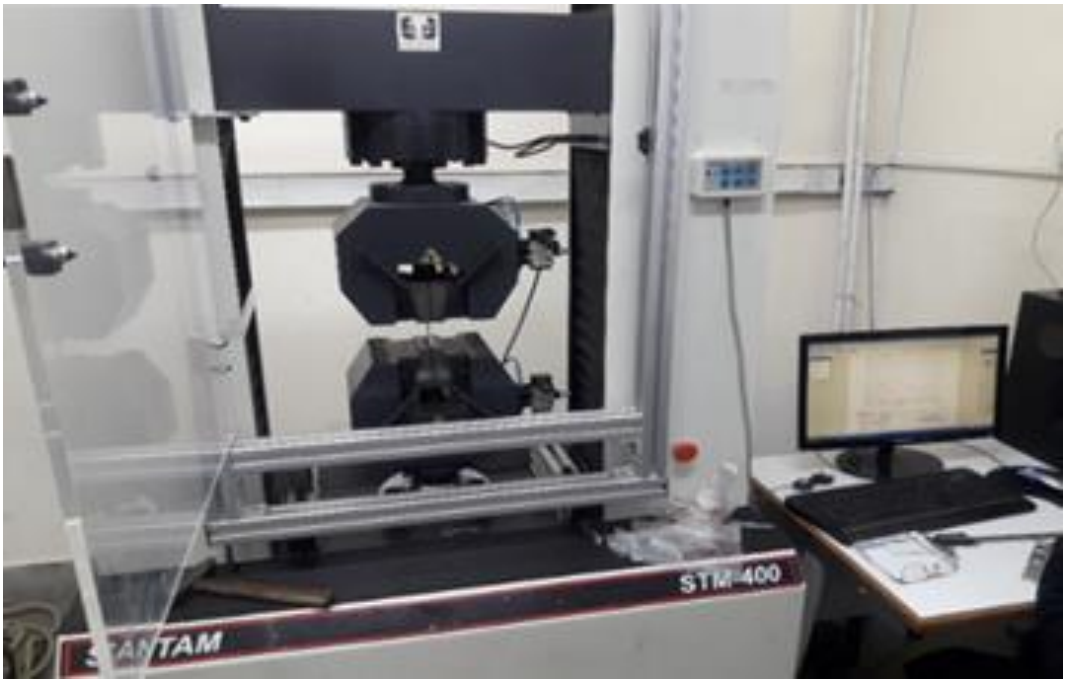
شکل ۴ نتایج آزمون ریز سختی ویکرز با فراصوتی T6-۶۰۶۱

شکل ۴ نشان‌دهنده نتیجه میکرو سختی سنجی نمونه در میانه‌ی ورق بالایی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بالاترین میزان سختی تقریباً در ناحیه‌ای است که محدوده ضخامت پین است. بالاترین میزان سختی اندازه‌گیری شده در میانه ورق بالایی 110.5 HV اندازه‌گیری شد. این موضوع به دلیل پدیده تبلور مجدد و انحلال رسوبات در هنگام سرد شدن رخ می‌دهد و اعتقاد بر این است که اصلی ترین دلیل افزایش سختی این موضوع است [۹]. این محدوده ناحیه‌ای است که می‌تواند به ناحیه SZ تعبیر شود. در ناحیه SZ هم که در محدوده قطر حدود ۹ میلی‌متر است به سمت مرکز جوش سختی جوش شروع به افزایش می‌کند زیرا بالاترین دما و تغییر شکل پلاستیک در محدوده ناحیه SZ رخ می‌دهد که باعث وقوع سختی بیشتر می‌شود. از ناحیهٔ SZ به سمت بیرون یعنی در نواحی TMAZ و HAZ به دلیل تجربه سیکل دمایی پایین‌تر و عدم انحلال رسوبات مطابق شکل ۴ سختی شروع به کاهش می‌کند، تا زمانی که به ناحیه BM و به‌سختی فلز پایه که 79HV است، می‌رسد.

۳-۲- آزمون کشش

در این آزمون از ۹ نمونه با سرعت‌های دورانی و عمق نفوذ جوشکاری بترتیب ۱۲۰۰، ۱۴۰۰، ۱۸۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. نمونه‌ها با کمک امواج فراصوت طولی تهیه‌شده بودند.

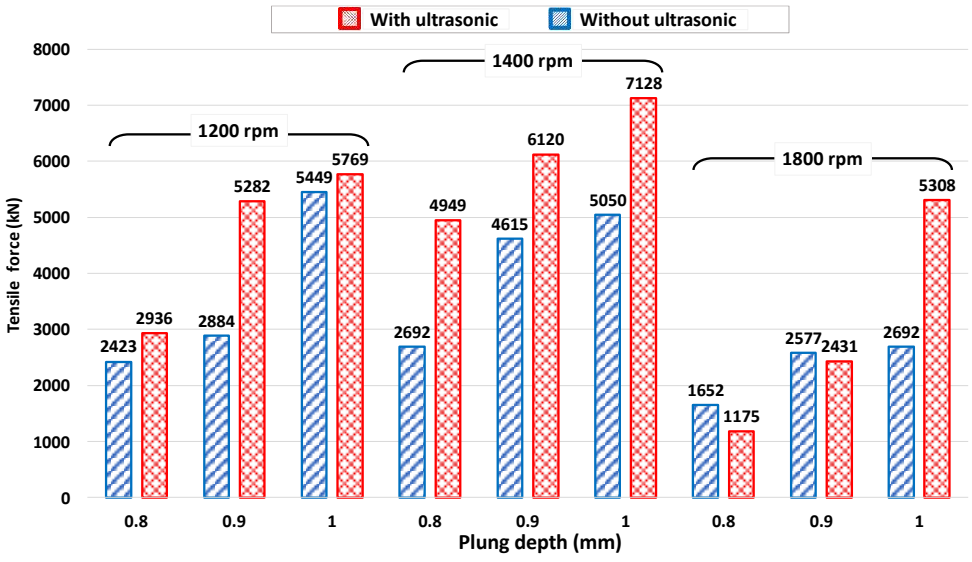
مطابق شکل ۵، نمونه‌ها با کمک دستگاه آزمون کشش STM-400 ساخت شرکت سنتام در دمای اتاق با سرعت خطی ثابت ۲ میلیمتر در دقیقه انجام شد و آزمایش با شکستن قطعه متوقف شد. تصاویر نمونه‌ها بعد از آزمون در شکل ۶ نشان داده‌شده است. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده میشود در بیشتر حالتها، در اثر آزمون کشش، جداشدن پلاگ مشاهده میشود، در این حالت سه گونه جداشدن پلاگ داریم: جداشدن کلی پلاگ از هر دو صفحهٔ بالا و پایین، جداشدن از صفحهٔ پایینی و جداشدن از صفحهٔ بالایی. این نتیجه نشان میدهد که در وهلهٔ اول آزمون تکرار پذیر بوده است و موازنهٔ نیروی کششی در دو طرف یعنی صفحهٔ بالایی و پایینی همزمان در یک حالت تعادل قرار داشته است و این یعنی از لحاظ اجرای آزمون مشکلی وجود نداشته است چون به صورت اتفاقی برخی مواقع جداشن پلاگ از صفحهٔ بالایی رخ داده و گاهی جداشدن پلاگ از صفحهٔ پایینی رخ داده است. در وهلهٔ دوم نتایج جداشدن پلاگ نشان میدهد که کیفیت جوشکاری مناسب بوده است چراکه اگر جوشکاری ضعیف بود، باید خود پلاگ در هنگام آزمون کشش دچار شکست میشد درصورتی که این اتفاق در بیشتر حالت ها رخ نداده است و خود پلاگ جدا شکسته نشده است بلکه از صفحهٔ جوشکاری شده جدا شده است.



شکل ۵ دستگاه آزمون

شکل ۶ تصاویر محل اتصال نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون کشش

در شکل ۷ نتایج آزمون کشش در ۹ نمونه حاصل از فراصوت در مقایسه با ۹ نمونه بدون فراصوت نشان داده‌شده است. در نمودار از چپ به راست سرعت ابزار افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت چرخشی ابزار از ۱۲۰۰ تا ۱۴۰۰ دور در دقیقه تا ۲۳٪ افزایش استحکام سپس در سرعت دورانی در دور ۱۸۰۰ دور در دقیقه ۲۵٪ کاهش می‌یابد که عمدتاً تحت تأثیر سرعت چرخش و توان فراصوتی اتصال قرار می‌گیرد.



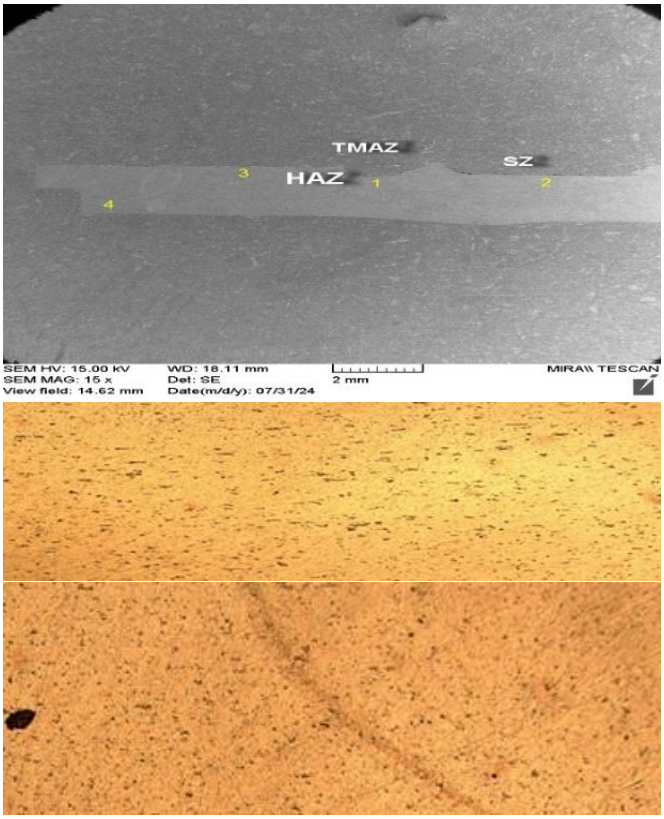
شکل۷ نتایج آزمون کشش با کمک فراصوت

۳-۳- بررسی میکرو ساختاری

ویژگی‌های ساختاری نمونه حاصل از RFSSW به کمک فراصوت

میکروسکوپ نوری Olympus GX51 (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN VEGA II (SEM) برای مطالعه محل استحکام کششی و مورد استفاده قرار گرفت.

به‌منظور مطالعه خصوصیات ریزساختاری در نواحی مختلف اتصال RFSSW، اتصال RFSSW به چهار ناحیه ریزساختار تقسیم شد، یعنی ناحیه مواد پایه (BM)، ناحیه هم زن (SZ)، ناحیه ترمومکانیکی (TMAZ) و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)، طبق مطالعات قبلی در FSSW [۱۰، ۱۱]. طبق شکل ۷، برای حالت بیشترین استحکام (یعنی دور ۱۴۰۰ دور در دقیقه، عمق نفوذ ۱ میلیمتر و توان ۱۰۰۰ وات)، نواحی مختلف در شکل ۸ مشخص‌شده‌اند.



شکل ۸ نمایش نواحی جوش و نواحی متأثر از جوش (دور ۱۴۰۰ دور در دقیقه، عمق نفوذ ۱ میلیمتر و توان ۱۰۰۰ وات)

بر اساس شکل ۸، دلیل اصلی کاهش اندازه دانه در نمونه‌های جوش شده اصطکاکی نسبت به نمونه‌های ماده پایه، پدیده بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی است. ناحیه همزنی ویژگی‌های متمایزی را نشان می‌دهد که ناشی از تغییر شکل قابل‌توجه و حرارت تولید شده در طول فرایند جوش‌کاری است و منجر به ریزساختار کاملاً تبلور مجدد شده با دانه‌های یکنواخت و هم‌محور می‌شود، همان‌طور که معمولاً در آلیاژهای آلومینیوم مشاهده می‌شود. این یافته‌ها همچنین در مراجع [۱۲] تأیید شده است

همچنین مشاهده می‌شود که اندازه دانه در ناحیه با امواج فراصوت ۱۰۰۰ وات است. به‌طورکلی، با افزایش قدرت امواج فراصوت، اندازه دانه‌ها ریزتر می‌شود. بر اساس نتایج آزمایش‌های کششی، افزایش قدرت فراصوت در اتصال منجر به بهبود استحکام جوش می‌شود. بر اساس نتایج [۱۳]، این امر را می‌توان به دو دلیل اصلی نسبت داد:

۱. امواج و ارتعاشات فراصوت تشکیل دانه‌های جدید را تسهیل می‌کنند. انرژی اضافی منتقل‌شده از این ارتعاشات به ذرات و دانه‌ها امکان ادغام مؤثرتر را فراهم می‌کند و منجر به دانه‌های کوچک‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود.

۲. افزایش ارتعاشات منجر به انرژی بیشتر در برخی مناطق می‌شود که کنترل بهتری بر تشکیل دانه‌های کوچک‌تر ایجاد می‌کند. این فرآیند می‌تواند خواص مکانیکی را بهبود بخشد و نواحی جوش شده را تقویت کند.

۴- نتیجه‌گیری

با افزایش فراصوتی با همراه سرعت چرخش ابزار از ۱۲۰۰ به ۱۴۰۰ دور در دقیقه، استحکام آلیاژ آلومینیوم تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و سپس به‌طور قابل‌توجهی به علت گرمای بیشتر در سرعت چرخش ابزار ۱۸۰۰ دور در دقیقه، کاهش می‌یابد.

سختی در منطقه SZ در منطقه اتصال اختلاط حداکثر است. دلیل این امر آن است که این ناحیه در معرض تغییر شکل پلاستیک شدیدتر به دلیل توان فراصوتی بالاتر در محیط بوش قرار می‌گیرد، بنابراین دانه‌ها در این ناحیه کوچک‌تر هم هستند.

با افزایش توان فراصوتی به محل اتصال، استحکام جوش افزایش می‌یابد و در واقع افزایش توان به معنای افزایش شدت‌جریانی است که دستگاه مولد فراصوت مصرف می‌کند. با افزایش توان دامنه فرکانس‌ها تغییر می‌کند و در نتیجه انرژی بیشتری به محل جوش وارد می‌شود و باعث افزایش دما در فصل مشترک ورق‌ها خواهد شد و نفوذ عناصر آلیاژی اتفاق می‌افتد.

نتایج آزمون کشش ۱۸ قطعه نشان داد استحکام جوش با فراصوت افقی بیشتر از بدون فراصوت آن است.

References

[1] Zhou L, Luo LY, Zhang TP, He WX, Huang YX, Feng JC. Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded 6061-T6 aluminum alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017 Oct;92(9):3425-33. doi: 10.1007/s00170-017-0359-1

[2] Kluz R, Kubit A, Wydrzyński D. Analysis of structure and shear/peel strength of refill friction stir spot welded 7075-t6 aluminium alloy joints. Advances in Science and Technology. Research Journal. 2017;11(3). doi: 10.12913/22998624/76481

[3] Kluz R, Kubit A, Wydrzyński D. The effect of plunge depth on the strength properties of friction welded joints using the RFSSW method. Advances in Science and Technology. Research Journal. 2018;12(1). doi: 10.12913/22998624/76547

[4] Shen Z, Yang X, Yang S, Zhang Z, Yin Y. Microstructure and mechanical properties of friction spot welded 6061-T4 aluminum alloy. Materials & Design (1980-2015). 2014 Feb 1;54:766-78. doi: 10.1016/j.matdes.2013.08.021

[5] Liu XB, Qiao FB, Guo LJ, Qiu XE. Metallographic structure, mechanical properties, and process parameter optimization of 5A06 joints formed by ultrasonic-assisted refill friction stir spot welding. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2017 Feb;24(2):164-70. doi: 10.1007/s12613-017-1391-8

[6] Zou Y, Li W, Shen Z, Su Y, Yang X. Refill friction stir spot welding of aluminum alloys: State-of-the-art and Perspectives. Welding in the World. 2023 Aug;67(8):1853-85. doi: 10.1007/s40194-023-01552-0

[7] Kar A, Singh K, Kumar L. Effect of tool rotational speed and mechanisms associated with microstructure evolution and intermetallics formation in friction stir welding of aluminum alloy to titanium alloy. Journal of Materials Engineering and Performance. 2024 Jul;33(13):6748-59. doi: 10.1007/s11665-023-08407-1

[8] Nan X, Zhao H, Jia BB, Ma C, Sun G, Zhou L, Wang R, Song X. The effect of rotational speed on microstructure and mechanical properties of Al/Ti dissimilar joint produced by refill friction stir spot welding. Journal of Materials Engineering and Performance. 2025 Feb;34(3):1812-24. doi: 10.1007/s11665-023-08545-6

[9] Shen Z, Chen Y, Hou JS, Yang X, Gerlich AP. Influence of processing parameters on microstructure and mechanical performance of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy. Science and Technology of Welding and Joining. 2015 Jan;20(1):48-57. doi: 10.1179/1362171814Y.0000000253

[10] Wang DA, Lee SC. Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets. Journal of Materials Processing Technology. 2007 May 7;186(1-3):291-7. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.045

[11] Muci-Küchler KH, Kalagara S, Arbegast WJ. Simulation of a refill friction stir spot welding process using a fully coupled thermo-mechanical FEM model. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2010;132(1). doi: 10.1115/1.4000177

[12] Lacki P, Derlatka A. Experimental and numerical investigation of aluminium lap joints made by RFSSW. Meccanica. 2016 Feb;51(2):455-62. doi: 10.1007/s11012-015-0211-9

[13] Lacki P, Derlatka A. The Plastic Deformation of RFSSW Joints During Tensile Tests/Deformacja Plastyczna Wybranych Połączeń RFSSW Podczas Rozciągania. Archives of Metallurgy and Materials. 2015;60(4). doi: 10.1515/amm-2015-0418