

تأثیر سختی و سرعت دورانی ابزار بر روی استحکام کششی و ریزسختی اتصالات نامشابه آلومینیوم 6061-T6 و آلومینیوم 7075-T6 در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

فرج اله ضامن^۱، علی حیدری مقدم^{۲*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک ساخت و تولید، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

^۲ گروه مهندسی مواد و متالورژی، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

The effect of hardness and rotational speed tools on tensile strength and micro-hardness of dissimilar joints of aluminum 6061-T6 and aluminum 7075-T6 by friction stir spot welding

Faraj Allah Zamen¹, Ali Heidary Moghadam^{*2}

¹ Department of Mechanic engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.

² Department of Materials engineering, Materials & Energy research center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.

Abstract

In this research, friction stir spot welding on aluminum plates 7075 and 6061 was performed. The purpose of this work is to investigate the impact of the tool's hardness and its rotational speed by changing the layout of the plates on the mechanical properties of the made welds. Two tools were made of H13 steel, with different hardness was used. The mechanical properties of the weld were studied for shear strength and microhardness. The results showed that when the 6061 aluminum plate is located on top of the layout, the shear tensile strengths are less than the 7075 aluminum plate. Also, with the increase in the speed of the tool, the shear force values have undergone a downward trend. The microhardness of the heat treatment device is higher than the microhardness of the raw material. Also, with increasing speed of tool, the obtained microconstability has a rising trend. This is due to the increased frictional heat transferred by the very high speed of the tool, which increased the hardness of the boiling region. The optimum mode is achieved at a speed of 1000 rpm and in a position where aluminum 7075 was placed on top of the plates.

Keywords: Tool Hardness, tensile Shear load, Micro hardness, rotational Speed Tool, Layout Pages.

Received: 16/07/2022

Accepted: 22/08/2022

چکیده

در این پژوهش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر روی صفحات آلومینیومی ۷۰۷۵ و ۶۰۶۱ انجام شده است. هدف از این کار، بررسی تأثیر سختی ابزار و سرعت دورانی آن با تغییر چیدمان صفحات بر خواص مکانیکی اتصالات می‌باشد. دو ابزار از جنس فولاد H13 با سختی متفاوت استفاده گردید. خواص مکانیکی جوش از نظر استحکام کششی برشی و ریزسختی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد در حالتی که صفحه آلومینیوم ۶۰۶۱ در بالای چیدمان قرار دارد، مقادیر نیروی کششی برشی کمتر از شرایطی است که صفحه آلومینیوم ۷۰۷۵ در بالا قرار می‌گیرد. همچنین با افزایش سرعت دورانی ابزار، مقادیر نیروی کشش برشی روندی نزولی را طی کرده است. مقادیر ریزسختی در ابزار عملیات حرارتی شده بالاتر از مقادیر ریزسختی ابزار خام می‌باشد. همچنین با افزایش سرعت دورانی ابزار، مقادیر ریزسختی بدست آمده روندی صعودی به خود گرفته است. این امر بدلیل افزایش گرمای اصطکاکی منتقل شده در اثر سرعت بسیار بالای ابزار بوده که سختی منطقه جوش را افزایش داده است. بهترین حالت در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و در چیدمانی که آلومینیوم ۷۰۷۵ در بالای صفحات قرار گرفته بود، بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: سختی ابزار، استحکام کششی برشی، ریزسختی، سرعت دورانی ابزار، چیدمان صفحات.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

* نویسنده مسئول: علی حیدری مقدم

آدرس: دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، گروه مهندسی مواد و متالورژی، مرکز تحقیقات مواد و انرژی

پست الکترونیکی: alheidarym@yahoo.com

۱. مقدمه

در سالهای اخیر صنعت حمل و نقل علاقه‌ی شدیدی برای کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش انتشار گازهای آلاینده‌ی محیط زیست نشان داده است. یکی از راههای دستیابی به این هدف، کاهش وزن وسیله‌ی نقلیه می‌باشد [۱]. این امر ممکن است بوسیله‌ی جایگزینی قسمت‌های فولادی معین با فولادهای با استحکام بالا از جمله فولاد دوفازی^۱ و پرس گرم^۲ که خصوصیات مکانیکی بالایی را در ضخامت کم قطعات ارائه می‌کند، انجام گیرد. هرچند صرفاً با استفاده از صفحات فولاد نازکتر، نهایتاً می‌توان حدود ۳۰٪ وزن وسیله‌ی نقلیه را کاهش داد و بیشتر از این مقدار امکان پذیر نیست. پس قطعات آهنی معینی می‌تواند با آلیاژهای غیر آهنی سبک وزن مانند آلیاژهای آلومینیوم یا آلیاژهای منیزیم با خصوصیات مکانیکی مشابه جایگزین شود. استفاده از فلزات غیرمشابه، یک اقدام موثر در مقابله با این مشکل است که البته نیازمند توسعه‌ی فرآیندها و تکنیک‌های اتصال-دهی مواد غیرمشابه است. شرکت مزداموتور در ۲۰۰۳ یک فرآیند اتصال‌دهی جدید حالت جامد را که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای نامیده می‌شود را توسعه داده است. این فرآیند تکنیکی از اتصال‌دهی در حالت جامد است که از تکنیک ارائه شده در انستیتوی جوشکاری^۳ در سال ۱۹۹۱ توسعه داده و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نامیده می‌شود، مشتق شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک ماهیت حالت جامد دارد که از ذوب کامل فلز پایه جلوگیری کرده و اتصال‌دهی در حالت خمیری انجام می‌شود. بنابراین مزیت‌های معینی نسبت به روشهای جوشکاری ذوبی سنتی را ارائه می‌دهد که شامل اجتناب از مشکلات مربوط به فرآیند انجماد است و بدلیل گرمای ورودی پایین، می‌تواند بطور موثری مانع تشکیل ترکیبات بین فلزی^۴ شود که این راه حل نویدبخشی برای اتصال‌دهی مواد غیرمشابه می‌باشد [۲،۳]. تازوکی^۵ و همکاران، تأثیر

پارامترهای فرآیند FSSW^۶ بر روی استحکام استاتیکی و مکانیزم‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای آلیاژهای غیرمشابه آلومینیوم را مورد مطالعه قرار دادند. صفحات مورد استفاده، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ و ۲۰۱۷-T6 با ضخامت‌های ۱ میلی‌متر بودند. نتایج نشان داد که ضخامت صفحه بالا، در محیط بیرونی تورفتگی شانه و ناحیه‌ی ناگت، با بالا رفتن سرعت چرخشی و زمان نگهداری ابزار، کاهش پیدا کرده و این در صورتی است که استحکام کششی برشی با کاهش هردو پارامتر مذکور، افزایش می‌یافت. دو حالت شکست معمول تحت بارگذاری کششی برشی مشاهده شده بود: شکست برشی ناگت و حالت ترکیبی که شامل شکست برشی و شکست کششی صفحه‌ی بالا می‌باشد. این حالات شکست به هر دو ضخامت صفحه‌ی بالایی در محیط بیرونی تورفتگی شانه و ناحیه‌ی ناگت، وابسته می‌باشد. به‌استثنای مواردی که مواد کم می‌باشد، استحکام کششی متقاطع با افزایش زمان نگهداری و سرعت چرخشی ابزار کاهش می‌یابد. در سرعت‌های دورانی کمتر از ۱۰۰۰ rpm، استحکام کششی متقاطع در ابتدا پایین بوده و بعد افزایش یافته و سپس با افزایش زمان نگهداری ابزار، کاهش یافته بود. دو حالت معمول شکست تحت بارگذاری کششی متقاطع مشاهده شده بود: شکست جداشدگی و شکست بیرون‌زدگی ناگت [۴]. آویناش^۷ و همکاران، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای اتصال‌دهی آلیاژهای آلومینیوم AA7075 T6 و AA2024 T3 بر روی بکار بردند. از آنجا که آلومینیوم‌های قابل جوش نخواهند بود، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال این آلیاژهای غیرمشابه استفاده شده است. در حالت سرعت دورانی متوسط (۱۰۰۰ دور در دقیقه) و سرعت جوشکاری کمتر ابزار (۸۰ میلی‌متر در دقیقه) ظاهر جوش بهتر به نظر می‌رسید. استحکام جوش نسبت به فلز پایه پایین‌تر بود. شکستگی نسبتاً نرم در ناگت جوش اتفاق می‌افتد که در این بخش‌ها تغییرات قابل توجهی

⁵ Y.Tozaki

⁶ Friction Stir Spot Welding

⁷ Avinash P

¹ Dual Phase

² Hot Stamped

³ The Welding Institute (TWI)

⁴ Intermetallic compounds (IMC)

یکنواخت‌تر ذرات در ناگت جوش می‌شود. جوشکاری پس از حرارت دهی، منجر به استحکام اتصال شده که نزدیک به استحکام فلز پایه AA6061-T6 می‌باشد. علاوه بر این، پیش آیل کردن و عملیات حرارتی پس از فرآیند منجر می‌شود که استحکام کششی و چقرمگی به ترتیب ۹۲ و ۹۶ درصد استحکام کششی و چقرمگی AA6061-T6 بدست آید. در نمونه‌های جوش داده شده، مکانیزم تحریک هسته‌ی ذرات منجر به کوچکتر شدن اندازه ذرات در ناحیه‌ی اغتشاشی می‌شود. قسمت بالای ناگت جوش و نزدیک به شانه ابزار به علت درجه حرارت بالا به عنوان مکان‌های هسته ذرات بوده و اندازه بزرگتر دانه را نشان می‌دهند. رشد غیر طبیعی دانه در منطقه‌ی متأثر از ترمومکانیکالی بیشتر از رشد دانه در فلز جوش و فلز پایه است [۸]. خدیو^۴ و همکاران، بهینه سازی خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را بر روی اتصالات غیرمشابه آلیاژ آلومینیوم AA2024-T3 و AA5754-H114 را مورد بررسی قرار دادند. در این کار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای برای ورق‌های غیرمشابه آلومینیوم در ضخامت ۲ میلی‌متر و با سرعت‌های دورانی مختلف ابزار، زمان‌های فرو رفتن و پروفیل پین یا هندسه ابزار انجام گرفت. مشخص شد که حداکثر نیروی برشی در بهترین پارامترهای فرآیند جوشکاری بدست آمده است که شامل سرعت چرخشی ۱۲۵۰ دور در دقیقه، زمان فرو رفتن ۶۰ ثانیه و پین استوانه ای شیاردار است که از طراحی آزمایشات بدست آمده است. نتایج تست کشش برش نشان داد که پروفیل پین مؤثرترین پارامتر نسبت به سایر پارامترهای جوشکاری (سرعت چرخش و زمان فرو رفتن) بود. همچنین مشخص شد که درصد مشارکت برای پروفیل پین ۶۱/۵٪ و پس از آن سرعت چرخش ابزار ۲۰/۱٪ و در نهایت زمان چرخش ۱۸/۴٪ بود [۹]. هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر سرعت ابزار بر ساختار جوش در اتصالات نامشابه همپوشانی شده و بررسی تأثیر سختی ابزار بر روی اتصال غیرمشابه در جوش FSSW و همچنین ایجاد اتصال با استحکام مناسب

در ضخامت نمونه‌های جوش شده وجود دارد. دانه‌ها در منطقه اغتشاشی به شدت تصفیه شده‌اند که به علت حرارت اصطکاکی پایین تولید شده در طی فرآیند بوده است [۵]. داوودی و همکاران، ریزساختار و مشخصه خوردگی ناحیه-ی فصل مشترک را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیرمشابه AA5083 به AA7023 مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که در حضور خط مرزی ناهمگن که متشکل از رسوبات آلومینیوم، منیزیم و روی می‌باشد، یک سلول گالوانیزه در منطقه‌ی فصل مشترک تشکیل شده است. سختی این خط مرزی اندازه‌گیری شد. تحقیقات میکروساختاری نشان‌دهنده‌ی حضور مس و سیلیسیوم در فازهای اینترمتالیکی زمینه AA7023 است. در قسمت AA5083، در فازهای اینترمتالیکی Al-Mn-Fe شناسایی شد [۶]. زمان خان^۱ و همکاران، ریزساختار و رفتار مکانیکی جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی صفحات مشابه و غیرمشابه از آلیاژهای آلومینیوم AA2219 و AA7475 را مورد بررسی قرار دادند. کمترین استحکام برای اتصال غیرمشابه در درجه اول به دلیل حرکت غیرهمگن مواد پایه مشاهده شد که در نتیجه تفاوت در خواص مکانیکی و فیزیکی می‌باشد. حداقل سختی در ناحیه‌ی متأثر از کار ترمومکانیکالی^۲ برای تمام اتصالات ایجاد شده بود که این امر به علت نرم شدن حرارتی می‌باشد. سطوح شکسته شده از اتصالات مشابه نشان‌دهنده‌ی شکست نرم‌تر در مقایسه با اتصالات غیرمشابه است که به همین علت منجر به ازدیاد طول کمتر در اتصالات غیرمشابه شده بود. بالاترین مقادیر سختی در تمام اتصالات در منطقه‌ی اغتشاشی بدست آمده بود که بدلیل پالایش قابل توجه دانه در این ناحیه است [۷]. مرادی و همکاران، بر روی تأثیر رفتار حرارتی قبل و بعد از جوشکاری در اتصالات غیرمشابه آلومینیوم AA6061-AA2024 پژوهش کرده‌اند. این مطالعه با هدف تأثیر رفتار حرارتی قبل و پس از جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری انجام شده است. آیل کردن^۳ فلزات پایه به عنوان یک روش گرمایش پیش از جوشکاری است که منجر به توزیع

³ annealing

⁴ Muna Khethier

¹ Noor Zaman Khan

² TMAZ: Thermo Mechanically Affected Zone

نشان داده شده است. صفحات در ابعاد ۱۰۵×۵۵ میلیمتر بریده شده و سپس جهت برطرف شدن آلودگی‌ها و ناصافی‌ها سنباده زنی شده و صیقل داده شده‌اند. صفحات جهت انجام جوشکاری در دو چیدمان در نظر گرفته شده‌اند. در چیدمان اول صفحات بر روی یکدیگر قرار گرفته و عملیات جوشکاری انجام پذیرفت. این چیدمان جهت انجام بررسی‌های ریزسختی و همچنین آنالیز درشت ساختاری مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلومینیوم T6-۶۰۶۱ براساس استاندارد ASTM 1251-11

نام عنصر	Al	Ti	Zn	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
درصد وزنی	۹۶/۸۵	$0/15 \geq$	$0/25 \geq$	$0/04-0/35$	$0/8-1/2$	$0/15 \geq$	$0/15-0/4$	$0/7 \geq$	$0/4-0/8$

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلومینیوم T6-۷۰۷۵ براساس استاندارد ASTM 1251-11

نام عنصر	Al	Zn	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
درصد وزنی	۹۱	$5/1-6/1$	$0/18-0/28$	$1/2-2/9$	$0/3$	$1/2-2$	$0/5$	$0/4$

استحکام کششی برشی و ریزسختی جوش می‌باشد. لذا برای این منظور از دو ابزار با سختی متفاوت استفاده شد. ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش از جنس فولاد H13 بوده است. جهت بررسی میزان سختی ابزار، یکی از آنها در کوره در دمای 1000°C به مدت یک ساعت قرار گرفت و سپس بلافاصله در آب خنک کاری شد. ابزار دیگر بدون انجام عملیات حرارتی استفاده شده است. قطر شانه ابزارها ۲۰ میلیمتر و شکل پین استوانه‌ای در نظر گرفته شد. شانه ابزار به اندازه 3° مقعر انتخاب شد که این زاویه بدلیل شکل گیری فضای اغتشاشی مناسب‌تر تعبیه شده است. طول پین ابزارها ۲mm و قطر پین ۴mm می‌باشد. تصویر و نقشه پین‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است.



شکل ۲- ابزارهای استفاده شده در این پژوهش. ابزار تیره رنگ ابزار عملیات حرارتی شده و ابزار روشن بدون انجام عملیات حرارتی است.

از دو فلز غیرهمجنس برای استفاده در صنایع خودروسازی و هوافضا می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش صفحات آلومینیوم T6-۷۰۷۵ و T6-۶۰۶۱ جهت انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای انتخاب شده است. ضخامت هر دو صفحه ۲ میلی‌متر می‌باشد. ترکیب شیمیایی آلومینیوم T6-۷۰۷۵ و T6-۶۰۶۱ براساس استاندارد ASTM 1251-11 به ترتیب در جداول ۱ و ۲

در چیدمان دوم، صفحات بر روی یکدیگر بصورت همپوشانی شده (Overlap) قرار گرفتند. در این حالت ناحیه همپوشانی شده صفحات، یک مربع با ابعاد 55×55 را تشکیل داده بود. این چیدمان به منظور بررسی مقاومت کششی جوش‌های تولید شده مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در هر دو چیدمان یکبار صفحه آلومینیوم ۷۰۷۵ در بالا قرار گرفته و جوشکاری انجام پذیرفته است و بار دیگر صفحه آلومینیوم ۶۰۶۱ در بالای چیدمان استفاده شده است. در شکل ۱ چیدمان صفحات نشان داده شده است.

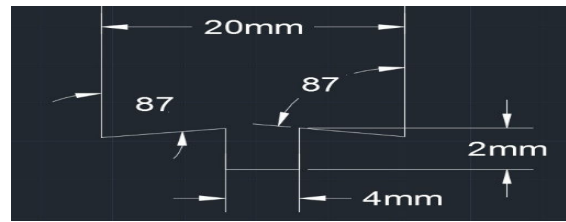


شکل ۱- چیدمان صفحات در دو حالت رویهم و همپوشانی شده

پارامترهای متغیر در این پژوهش سختی ابزار، سرعت دورانی ابزار و تغییر موقعیت صفحات بر روی تغییرات

۲.۱. بررسی سختی نمونه ها

به منظور انجام این تست، ابتدا نمونه‌ها با استفاده از کاتر از مرکز جوش بریده شدند. پس از انجام برش، نمونه‌ها بوسیله سنباده، صاف و صیقلی شدند. برای این منظور از سنباده‌های شماره ۶۰، ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۵۰۰ استفاده شده است. دستگاه تست ریزسختی استفاده شده مدل INNOVATEST می-باشد. نیروی ۰/۲۵ نیوتون به مدت ۱۵ ثانیه تعیین شد که این نیرو بصورت یک پروفیل ۱۲ نقطه‌ای بصورت مورب در امتداد ناگت جوش گرفته شده است



شکل ۳- نقشه ابزار استفاده شده در این پژوهش

سرعت‌های دورانی در نظر گرفته شده در این پژوهش مقادیر ۱۰۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شد. نرخ نفوذ ابزار ۰/۲ میلی‌متر در ثانیه و زمان توقف برای تمامی جوش‌ها ۳ ثانیه ثابت بود و عمق نفوذ ابزار نیز برای تمامی جوش‌ها مقدار یک میلی‌متر را داشت. در جدول ۳ کد گذاری نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۳- کد گذاری نمونه‌ها

عملیات	سرعت	موقعیت	کد	ردیف	عملیات	سرعت دورانی	موقعیت	کد نمونه	ردیف
حرارتی	دورانی ابزار	صفحات	نمونه		حرارتی	ابزار (rpm)	صفحات		
ابزار	(rpm)				ابزار				
با عملیات	۱۰۰۰	۶۰۶۱ در	H67A	۷	بدون عملیات	۱۰۰۰	۶۰۶۱ در	W67A	۱
	۱۶۰۰		H67B	۸		۱۶۰۰		W67B	۲
	۲۰۰۰		H67C	۹		۲۰۰۰		W67C	۳
	۱۰۰۰	۷۰۷۵ در	H76A	۱۰		۱۰۰۰	۷۰۷۵ در	W76A	۴
	۱۶۰۰		H76B	۱۱		۱۶۰۰		W76B	۵
	۲۰۰۰		H76C	۱۲		۲۰۰۰		W76C	۶

شده که با این سرعت نمونه‌های آماده شده تحت کشش قرار گرفته و بریده شد. در نهایت منحنی‌های نیرو-جابجایی استخراج گردید که با بررسی این نمودارها رفتار کششی جوش‌ها قابل تحلیل و بررسی خواهند بود.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. تست کشش در ابزار عملیات حرارتی نشده
مقادیر بدست آمده از تست کشش برشی در ابزار عملیات حرارتی نشده برحسب تغییرات سرعت دورانی ابزار در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲.۲. بررسی درشت ساختاری

به منظور بررسی درشت ساختاری، نمونه‌های آماده شده در زیر میکروسکوپ نوری قرار گرفت. از نمونه‌ها با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر تصویر برداری شده است.

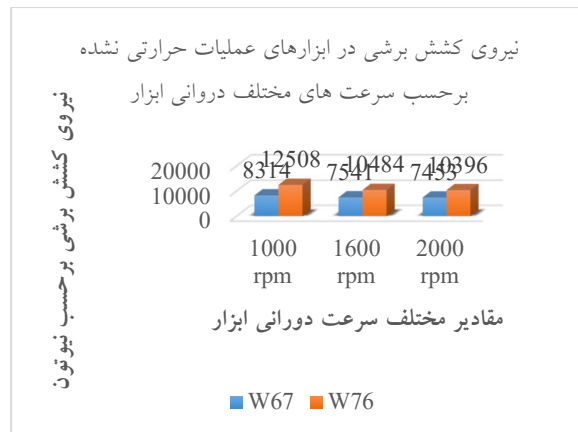
۳.۲. تست کشش برشی

نمونه‌هایی که در چیدمان همپوشانی آماده شدند، تحت تست کشش برشی قرار گرفتند. دستگاه تست کشش استفاده شده دستگاه اونیورسال مدل SANTAM STM-150 بود. سرعت کراس هد دستگاه بر روی ۵ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم

می‌باشد. محدوده ذوب آلومینیوم ۷۰۷۵ در دمای ۴۷۵ تا ۶۳۵ درجه سانتیگراد بوده که این محدوده برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در دمای ۶۰۵ تا ۶۵۵ درجه سانتیگراد می‌باشد. دمای ذوب پایین‌تر آلومینیوم ۷۰۷۵ سبب می‌شود که گرمای اصطکاکی، منطقه خمیری شکل وسیع‌تر و گسترده‌تری را ایجاد کرده و جوش مستحکم‌تری تولید گردد. نیروی کشش برش برای حالتی که آلومینیوم ۷۰۷۵ در بالای صفحات قرار گرفته، در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه مقدار ۱۲۵۰۸ نیوتن را داشت که این مقدار در حالتی که آلومینیوم ۶۰۶۱ در بالا قرار گرفته و در سرعت دورانی مشابه ۸۳۱۴ نیوتن بود. در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه نمونه W76B مقدار نیروی کششی برشی ۱۰۴۸۴ نیوتن را داشته که این مقدار در نمونه W67B در سرعت دورانی مشابه ابزار، ۷۵۴۱ نیوتن است. در نهایت مقدار نیروی کششی برای نمونه W76C در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور در دقیقه ابزار ۱۰۳۹۶ نیوتن بوده که در سرعت مشابه برای نمونه W67C مقدار نیروی شکست ۷۴۵۳ نیوتن حاصل گردید.

همانطوری که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دورانی ابزار، مقادیر نیروی کشش برش روندی نزولی را طی کرده است. می‌توان اینگونه بیان کرد که مناسب‌ترین سرعت دورانی ابزار به منظور حصول بالاترین استحکام کششی برشی جوش، ۱۰۰۰ دور در دقیقه می‌باشد. سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه منجر به مناسب‌ترین اختلاط و آمیختگی صفحات آلومینیومی با یکدیگر شده است. با توجه به اینکه بین ابزار در حدود ۱ میلیمتر درون صفحه پایینی نفوذ کرده است، لذا ترکیب شدگی مناسب مواد صفحات در دستیابی به یک اتصال مناسب‌تر بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با افزایش سرعت دورانی ابزار مشاهده شد که شانه‌ی ابزار منجر به بیرون راندن مواد خمیری شده به بیرون ناحیه اغتشاشی شده است. در چنین شرایطی مشاهده شد که پشته کناری ناگت جوش مرتفع‌تر گردیده است. این نتیجه قابل استنباط است که سرعت دورانی بالاتر گرچه سبب بالا رفتن گرمای اصطکاکی شده است اما در عوض بدلیل سرعت دورانی بسیار بالا اختلاط مواد را در ناحیه اغتشاشی

در این شکل ستون‌های مشخص شده به رنگ آبی مقادیر بدست آمده در تست کشش برشی در حالتی می‌باشد که صفحه آلومینیوم ۶۰۶۱ در بالای چیدمان قرار گرفته است. مقادیر نیروی کششی برشی در این حالت بطور قابل توجهی کمتر از شرایطی است که صفحه آلومینیوم ۷۰۷۵ در بالا قرار داشته است. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای مهم‌ترین عامل اتصال‌دهی صفحات، گرمای اصطکاکی تولید شده در طی انجام فرآیند است. با توجه به اینکه این گرما در هنگام نشستن ابزار چرخان بر روی صفحات تولید می‌شود، لذا منتقل شدن این حرارت به صفحات به منظور ایجاد یک ناحیه جوش مناسب بسیار ضروری می‌باشد [۹].



شکل ۴- مقادیر بدست آمده از تست کشش برشی در ابزار عملیات حرارتی نشده برحسب تغییرات سرعت دورانی ابزار

یکی از مهم‌ترین عناصر موجود در ترکیب آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، عنصر مس می‌باشد که به میزان زیادی در این آلیاژ موجود است (۲-۱/۲ درصد وزنی). مس قابلیت انتقال حرارتی و گرمایی بسیار بالایی را داشته که منجر به منتقل شدن گرمای اصطکاکی تولید شده از ابزار در حال چرخش به صفحات می‌شود. میزان مس در ترکیب آلومینیوم ۶۰۶۱ بسیار پایین‌تر از آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌باشد (۰/۴-۰/۱۵ درصد وزنی). لذا مشخص است که گرمای اصطکاکی منتقل شده در سرعت دورانی مشابه بسیار پایین‌تر بوده است. پایین بودن فاحش مقادیر نیروی کشش برش در حالتی که آلومینیوم ۶۰۶۱ در بالای صفحات قرار گرفته نسبت به حالت دیگر را می‌توان به همین امر نسبت داد. از طرف دیگر دمای ذوب آلومینیوم ۷۰۷۵ بسیار پایین‌تر از آلومینیوم ۶۰۶۱

۳.۳. مقایسه استحکام کششی ابزار عملیات حرارتی شده

و ابزار عملیات حرارتی نشده

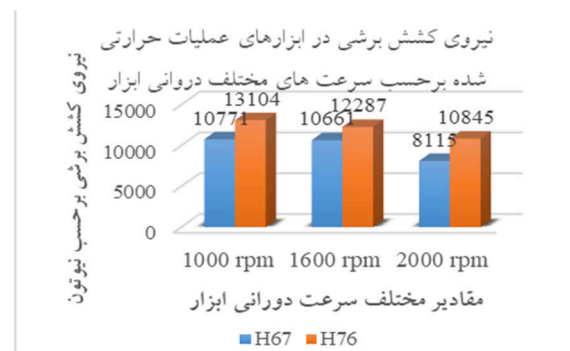
با مقایسه نتایج استحکام کششی، کاملاً مشهود است که جوش‌هایی که با ابزار عملیاتی حرارتی شده تولید شده‌اند، استحکام کششی بهتری را دارند. بطور کلی می‌توان اینگونه بیان کرد که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای علاوه بر نقش تاثیرگذار گرمای اصطکاکی، عامل مهم دیگر در کیفیت و استحکام جوش‌ها، کار مکانیکی ابزار می‌باشد که از آن به اثر ترمومکانیکالی شانه ابزار تعبیر می‌گردد. این نقش در واقع فشار مکانیکی است که ابزار چرخان در حین نشستن به صفحات وارد می‌آورد و موجب فشردگی بیشتر صفحات به یکدیگر و استحکام بالاتر جوش‌های تولید شده می‌گردد [۱۱]. بدلیل اینکه ابزار عملیات حرارتی شده سختی بسیار بالاتری را نسبت به ابزار دیگر دارد، لذا فشار مکانیکی ابزار یا کار مکانیکی ابزار بر روی صفحات بیشتر و استحکام کششی برشی جوش‌های تولید شده، بهتر بوده است. این شرایط برای نمونه‌های H76 و H67 و در تمامی سرعت‌های دورانی ابزار صادق می‌باشد.

در بررسی نحوه شکست جوش‌ها، این نکته قابل ذکر است که بطور کلی دو نوع شکست در جوش‌ها وجود دارد که شکست فصل مشترکی و شکست بیرون زدگی دکمه جوش. در شکست فصل مشترکی، جوش از فصل مشترک و محل ایجاد جوش شکسته شده و مستلزم صرف نیروی کمتر به منظور شکست می‌باشد. درحالی‌که در شکست بیرون زدگی دکمه جوش، محل شکست از صفحه بوده و جوش شکسته نمی‌شود. شکست بیرون زدگی نیازمند صرف نیروی بالاتری به منظور شکست می‌باشد. بطور کلی شکست بیرون زدگی دکمه جوش، بیانگر استحکام بالاتر جوش بوده که امری مطلوب‌تر در جوشکاری می‌باشد. در جوش‌های ایجاد شده با ابزار عملیات حرارتی شده مشاهده گردید که در نمونه‌های H76 تمامی شکست‌ها در سرعت‌های مختلف دورانی ابزار از نوع بیرون زدگی دکمه جوش بوده است. بیرون زدگی دکمه جوش بیانگر استحکام بالای جوش‌های تولید شده در این شرایط آزمایش است. در شکل ۶ حالات شکست‌های

نامناسب‌تر کرده و بجای ترکیب مواد صفحات در یکدیگر آنها را به نواحی کناری رانده است [۱۰]. همین امر سبب تشکیل یک ناحیه ضعیف اغتشاشی و پایین آمدن مقادیر نیروی کششی برشی در سرعت‌های بالاتر شده است. این شرایط برای نمونه‌های W67 و W76 مشابه بوده است. مقادیر نیروی کشش برش در سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور در دقیقه برای نمونه‌های W76B و W67B به ترتیب ۱۰۴۸۴ و ۷۵۴۱ نیوتن بوده است. مقادیر شکست در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور در دقیقه برای نمونه‌های W76C و W67C به ترتیب ۱۰۳۹۶ و ۷۴۵۳ نیوتن بدست آمد.

۲.۳. تست کشش در ابزار عملیات حرارتی شده

مقادیر بدست آمده از تست کشش برش در ابزار عملیات حرارتی شده برحسب تغییرات سرعت دورانی ابزار در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مقادیر بدست آمده از تست کشش برشی در ابزار عملیات حرارتی شده برحسب تغییرات سرعت دورانی ابزار

با بررسی مقادیر بدست آمده از شکست کشش برش مشاهده گردید که در هنگام استفاده از ابزار عملیات حرارتی شده شرایط مشابه با هنگامی است که از ابزار عملیات حرارتی نشده استفاده شده بود. در این حالت نیز در چیدمان‌هایی که آلومینیوم ۷۰۷۵ در بالای صفحات قرار گرفته است، مقادیر شکست کششی برشی بطور قابل توجهی بیشتر از چیدمانی است که آلومینیوم ۶۰۶۱ در بالا قرار گرفته بود. همچنین در این حالت مشابه با شرایط قبلی با افزایش سرعت دورانی ابزار، مقادیر شکست کشش برش روندی کاهشی داشته است. لذا شرایط و تحلیل‌های بیان شده در حالت قبلی نیز برای این شرایط صادق می‌باشد.

حالات شکست جوش‌های تولید شده با ابزار عملیات حرارتی نشده در نمونه‌های H67 تقریباً مشابه با ابزار عملیات حرارتی شده می‌باشد.

۴.۳. بررسی ریزسختی جوش

در این پژوهش از نمونه‌ها جهت انجام تست ریزسختی، یک پروفیل ۱۲ نقطه‌ای در اطراف و ناگت جوش گرفته شده که محل انجام نقاط تست در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- پروفیل ۱۲ نقطه‌ای گرفته شده جهت انجام تست ریزسختی

۴.۳.۱. مقایسه مقادیر ریزسختی برای ابزارهای عملیات

حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده

در شکل ۹ مقایسه مقادیر ریزسختی بدست آمده برای ابزار عملیات حرارتی شده و ابزار عملیات حرارتی نشده نشان داده شده است. همانگونه که از نمودار فوق مشخص است، ریزسختی بدست آمده در ابزار عملیات حرارتی شده بطور کاملاً مشهودی بالاتر از مقادیر ریزسختی ابزار خام می‌باشد.

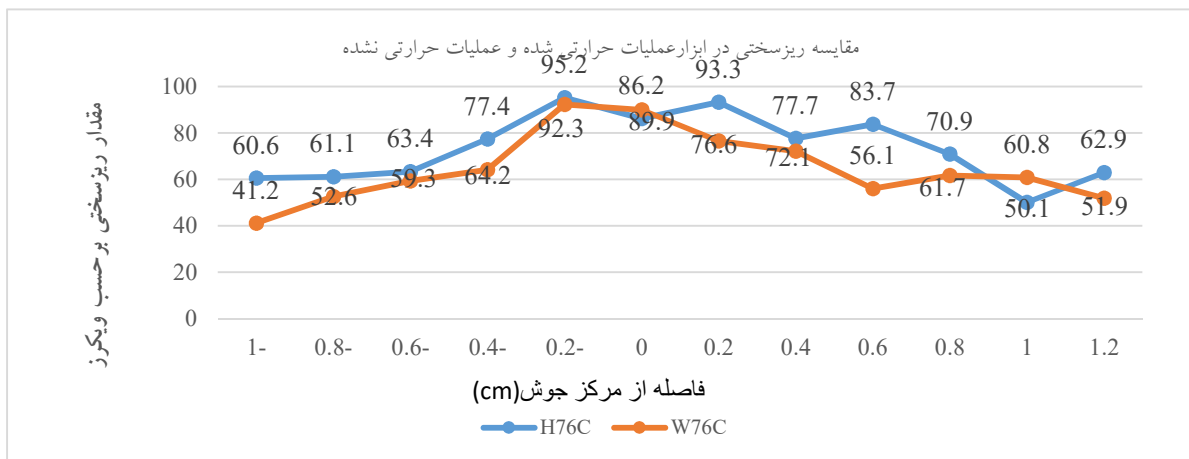
جوش در ابزار عملیات حرارتی شده در نمونه‌های H76 به ازای سرعت‌های دورانی مختلف نمایش داده شده است. با تغییر موقعیت صفحات، شرایط مقداری تغییر پیدا کرده است. در نمونه H67A در سرعت دورانی کم ابزار حالت شکست جوش از نوع بیرون زدگی دکمه جوش بوده است. اما با افزایش سرعت دورانی ابزار، حالت شکست به فصل مشترکی تغییر پیدا می‌کند که این به منزله افت استحکام کششی اتصال در این شرایط می‌باشد. شکل ۷ نشان‌دهنده تغییرات حالات شکست جوش در نمونه‌های H67 در سرعت‌های مختلف دورانی ابزار است.



شکل ۶- حالات شکست‌های جوش در ابزار عملیات حرارتی شده در نمونه‌های H76 به ازای سرعت‌های دورانی مختلف



شکل ۷- حالات شکست جوش تولید شده با ابزار عملیات حرارتی شده در نمونه‌های H67 و سرعت‌های مختلف دورانی ابزار



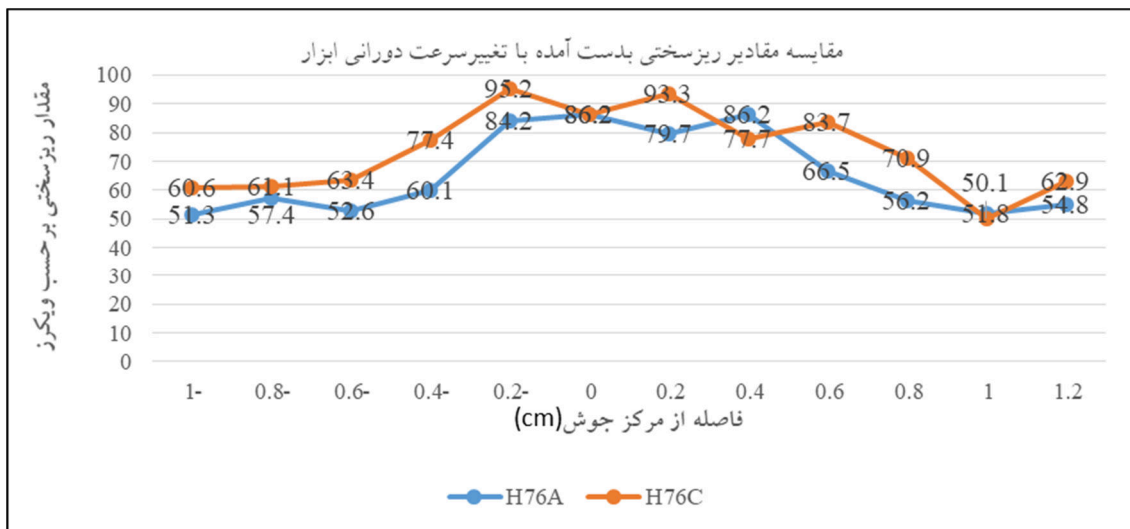
شکل ۹- مقایسه مقادیر ریزسختی بدست آمده برای ابزار عملیات حرارتی شده و ابزار عملیات حرارتی نشده

دورانی ابزار، مقادیر ریزسختی بدست آمده روندی صعودی به خود گرفته است. هر چند که سرعت دورانی بالاتر ابزار منجر شده که مواد خمیری شکل به کناره‌های حفره جوش منحرف شود که این امر منجر به افت خواص کششی جوش‌ها شده بود. اما بدلیل افزایش گرمای اصطکاکی منتقل شده در اثر سرعت بسیار بالای ابزار، سختی منطقه جوش افزایش یافته است. مواد در این ناحیه تحت تأثیر حرارت بالای اصطکاکی توام با فشار مکانیکی ابزار قرار گرفته‌اند که این عوامل منجر می‌شود که مواد در ناحیه ناگت جوش فشرده و سخت گردند. سرعت دورانی پایین منجر به گرمای اصطکاکی کمتر و فشرده‌گی کم مواد در ناحیه جوش می‌شود که مقادیر ریزسختی بدست آمده افت پیدا می‌کند. روند تغییرات ریزسختی در هر دو سرعت مشابه بهم بوده است. در ناحیه مرکزی جوش بدلیل متمرکز شدن حرارت، ریزسختی‌های بدست آمده به بیشینه مقادیر خود رسیده و با فاصله گرفتن از مرکز جوش، به تدریج روندی نزولی به خود گرفته است.

البته در هر دو مورد تغییرات ریزسختی تقریباً روند مشابهی را داشته است. بگونه‌ای که با نزدیک شدن به ناحیه مرکزی جوش مقادیر ریزسختی به مقدار پیک خود رسیده است. این بدلیل این مسئله است که با نزدیک شدن به مرکز جوش، گرمای اصطکاکی منتقل شده بیشینه شده و حرارت به مقدار بیشتری متمرکز گردیده است. همچنین در ناحیه زیرین ابزار بدلیل فشار مکانیکی ابزار، منطقه‌ای فشرده شده تشکیل شده که مقدار سختی بیشتری را نسبت به نواحی کناری دارا می‌باشد. در ابزار عملیات حرارتی شده بدلیل سختی بالاتر شانه ابزار، این فشرده‌گی افزایش یافته و ریزسختی را بصورت کاملاً چشمگیری نسبت به نوع عملیات حرارتی نشده، افزایش داده است

۳. ۴. ۲. مقایسه مقادیر ریزسختی با تغییر سرعت دورانی ابزار

در شکل ۱۰ مقادیر ریزسختی بدست آمده برحسب تغییر سرعت دورانی ابزار نشان داده شده است. با افزایش سرعت



شکل ۱۰- مقادیر ریزسختی بدست آمده برحسب تغییر سرعت دورانی ابزار

مقادیر ریزسختی بیشتر از نمونه‌های H67 بوده است. بطور کلی مقدار ریزسختی آلومینیوم ۷۰۷۵ بیشتر از صفحه آلومینیوم ۶۰۶۱ می‌باشد. آلومینیوم ۷۰۷۵ خام مقدار ریزسختی ۵۵ ویکرز را دارد، در حالیکه مقدار ریزسختی آلومینیوم ۶۰۶۱ خام ۴۰ ویکرز می‌باشد. همچنین بدلیل اینکه دمای ذوب آلومینیوم ۷۰۷۵ پایین‌تر از آلومینیوم ۶۰۶۱

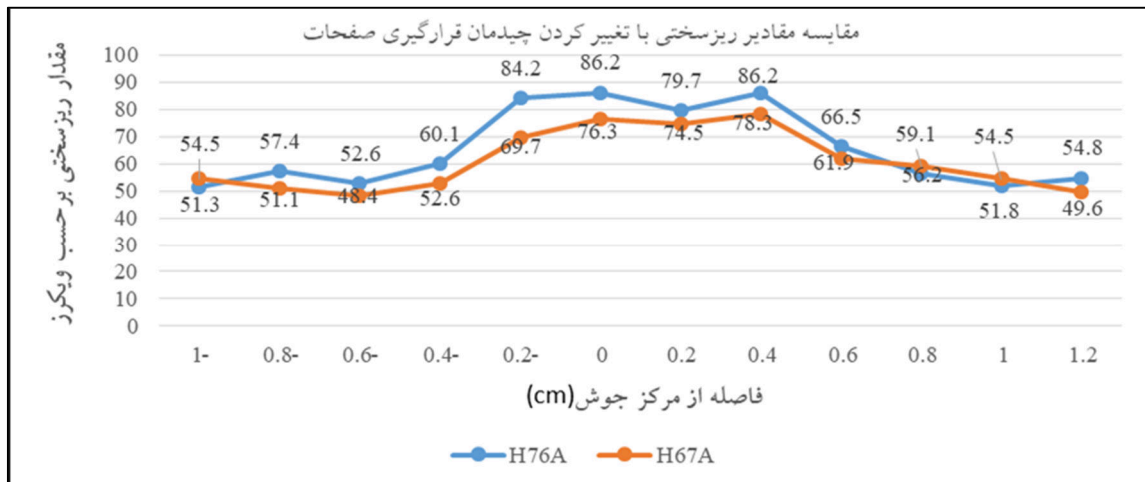
۳. ۴. ۳. مقایسه مقادیر ریزسختی با تغییر چیدمان صفحات

در شکل ۱۱ مقایسه مقادیر ریزسختی بدست آمده با تغییر چیدمان قرارگیری صفحات آلومینیومی نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر ریزسختی بدست آمده با تغییر چیدمان صفحات مشخص گردید که نمونه‌های H76 یعنی در شرایطی که صفحه آلومینیومی ۷۰۷۵ در بالا قرار گرفته است،

۵.۳. بررسی ماکرو ساختاری جوش‌ها

برای بررسی درشت ساختاری جوش، پس از سنباده زنی و آماده سازی نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری استفاده شده است. از بخش‌های حفره و ناگت جوش در بزرگنمایی ۴۰۰ برابر عکسبرداری شد و عکس‌های گرفته شده با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت دورانی ابزار، مواد نرم شده منطقه اغتشاشی به قسمت‌های حاشیه حفره جوش منحرف شده است که این امر باعث مرتفع شدن پشته کناری حفره جوش شده است. هر چه سرعت دورانی بیشتر شود، ارتفاع این قسمت افزایش می‌یابد.

است، لذا گرمای اصطکاکی تولید شده در طی جوشکاری موجب شده که این آلیاژ به میزان بیشتری در مقایسه با نمونه‌های H76 در ناحیه اغتشاشی جوش مشارکت کند. این عوامل سبب شده که مقادیر ریزسختی بدست آمده در هنگامیکه صفحه آلومینیوم ۷۰۷۵ در بالا قرار گرفته بیشتر از حالتی باشد که آلومینیوم ۶۰۶۱ در بالا قرار گرفته است. البته تغییرات ریزسختی در هر دو چیدمان تقریباً روند مشابهی را طی کرده است، بگونه‌ای که در مرکز ناگت جوش مقادیر ریزسختی به مقدار پیک رسیده‌اند و با فاصله گرفتن از ناحیه مرکزی روند نزولی را در کناره‌های جوش بخود گرفته‌اند.



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر ریزسختی بدست آمده با تغییر چیدمان قرارگیری صفحات آلومینیومی

همچنین در بخش مرکزی جوش‌هایی که با ابزارهای عملیات حرارتی شده تولید شده‌اند، مواد بطور کامل با یکدیگر مخلوط و ترکیب شده و هیچگونه حفره و ناپیوستگی در فصل مشترک صفحات مشاهده نگردیده است. با توجه به اینکه طول و پروفیل پین در هر دو ابزار عملیات حرارتی شده و خام یکسان بوده و عمق نفوذ ابزارها نیز ثابت در نظر گرفته شده، در قسمت ناگت جوش هیچگونه اختلافی از لحاظ شکل و ظاهر جوش‌ها با یکدیگر مشاهده نشده است.

البته در ابزار عملیات حرارتی نشده در بخش ناگت جوش، مقداری شکاف و ناپیوستگی مشاهده می‌شود که این پدیده بیانگر این مسئله است که فشار وارد شده از طرف ابزار کمتر از نوع عملیات حرارتی بوده است. می‌توان اینگونه استنباط کرد که فشار وارد شده از طرف ابزار عملیات حرارتی نشده

قادر به یکپارچه کردن و اختلاط کامل مواد در منطقه اغتشاشی در مقایسه با نوع عملیات حرارتی شده که سختی بیشتری دارد، نبوده است.

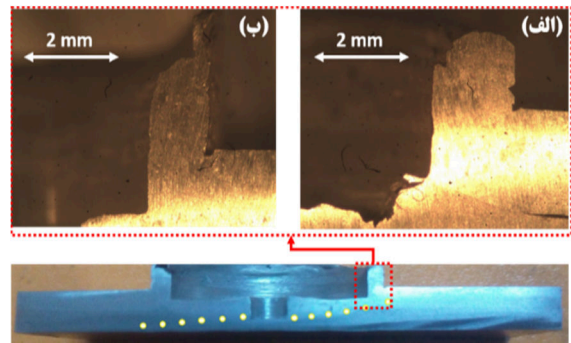
با مقایسه ناگت جوش در حالتی که نمونه‌های H67 وجود دارد مشخص گردید که منطقه اغتشاشی یکنواخت‌تری نسبت به نمونه‌های H76 شکل گرفته است. همچنین بدلیل دمای ذوب کمتر آلومینیوم ۷۰۷۵ نسبت به آلومینیوم ۶۰۶۱، این آلیاژ به میزان بیشتری در منطقه اغتشاشی مشارکت داشته و ارتفاع پشته اطراف ناگت جوش نسبت به نمونه‌های H67 مرتفع‌تر شده است. در شکل ۱۲ مقایسه ارتفاع پشته ناگت در نمونه‌های H76 و H67 نمایش داده شده است.

همچنین در بخش مرکزی جوش‌هایی که با ابزارهای عملیات حرارتی شده تولید شده‌اند، مواد بطور کامل با یکدیگر مخلوط و ترکیب شده و هیچگونه حفره و ناپیوستگی در فصل مشترک صفحات مشاهده نگردیده است. با توجه به اینکه طول و پروفیل پین در هر دو ابزار عملیات حرارتی شده و خام یکسان بوده و عمق نفوذ ابزارها نیز ثابت در نظر گرفته شده، در قسمت ناگت جوش هیچگونه اختلافی از لحاظ شکل و ظاهر جوش‌ها با یکدیگر مشاهده نشده است.

البته در ابزار عملیات حرارتی نشده در بخش ناگت جوش، مقداری شکاف و ناپیوستگی مشاهده می‌شود که این پدیده بیانگر این مسئله است که فشار وارد شده از طرف ابزار کمتر از نوع عملیات حرارتی بوده است. می‌توان اینگونه استنباط کرد که فشار وارد شده از طرف ابزار عملیات حرارتی نشده

مراجع

- [1] G. Buffa, P. Fanelli, L. Fratinia, F. Vivio, Influence of joint geometry on micro and macro mechanical properties of friction stir spot welded joints, *Procedia Engineering*, **81** (2014) 2086 – 2091.
- [2] S. Manickam, C. Rajendran, S. Ragu Nathan, V. Sivamaran, V. Balasubramanian, Assessment of the influence of FSSW parameters on shear strength of dissimilar materials joint (AA6061/AZ31B), *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, **6** (2023) 33-45.
- [3] T. Nonnenmann, R. Beygi, R. J.C. Carbas, L. F.M. da Silva, A. Öchsner, Feasibility study on hybrid weld-bonding between dissimilar material for automotive industry, *International Journal of Adhesion and Adhesives* (2022) 103316.
- [4] Y. Tozaki, Y. Uematsu and K. Tokaji, Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys, *Department of Mechanical and Systems Engineering* **30** (2006) 143-148.
- [5] P. Avinash, M. Manikandan, N. Arivazhagan, K. Devendranath Ramkumar, Friction stir welded butt joints of AA2024 T3 and AA7075 T6 aluminum alloys, *Procedia Engineering*, **75** (2014) 98-102.
- [6] A. Davoodi, Z. Esfahani, M. Sarvghad, Microstructure and corrosion characterization of the interfacial region in dissimilar friction stir welded AA5083 to AA7023, *Corrosion Science*, **107** (2016) 133-144.
- [7] N. Zaman Khan, A. Noor Siddiquee, A. Zahid, K. Mukhopadhyay, "Mechanical and microstructural behavior of friction stir welded similar and dissimilar sheets of AA2219 and AA7475 aluminium alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, **695** (2017) 2902-2908.
- [8] M. M. Moradi, H. Jamshidi Aval, R. Jamaati, Effect of pre and post welding heat treatment in SiC-fortified dissimilar AA6061-AA2024 FSW butt joint, *Journal of Manufacturing Processes*, **30** (2017) 97-105.
- [9] M. Khethier Abbass, S. Khamass Hussein, A. Adnan Khudhair, Optimization of Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Joints for Dissimilar Aluminum Alloys (AA2024-T3 and AA 5754-H114), *Journal for Science and Engineering* **41**(2016) 1-10.
- [10] S. Mehrez, M. Paidar, K. Cooke, R.V. Vignesh, O.O. Ojo, B. Babaei, A comparative study on weld characteristics of AA5083-H112 to AA6061-T6 sheets produced by MFSC and FSSW processes, *Vacuum*, **190**(2021) 110298.
- [11] M. Paidar, R. Vaira Vignesh, A. Moharrami, O.O. Ojo, A. Jafari, S. Sadreddini, Development and characterization of dissimilar joint between AA2024-T3 and AA6061-T6 by modified friction stir clinching process, *Vacuum* **176** (2020) 109298



شکل ۱۲- الف) ارتفاع پشته در نمونه‌های H76 و ب) ارتفاع پشته در نمونه‌های H67

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بین اتصالات غیرمشابه آلومینیوم ۷۰۷۵ و آلومینیوم ۶۰۶۱ با موفقیت انجام پذیرفت. سختی ابزار و سرعت دورانی ابزار در حالتی که چیدمان صفحات آلومینیومی تغییر پیدا می‌کند بررسی گردید. نتایج بدست آمده بشرح ذیل می‌باشند:

در نمونه‌های W76 و H76 استحکام کششی برشی جوش کمتر از نمونه‌های W67 و H67 می‌باشد. این امر به دمای ذوب و وجود مس در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ارتباط داده شد. با افزایش سرعت دورانی ابزار استحکام نیروی کشش برش روندی نزولی را طی کرده است. سرعت دورانی بسیار بالا اختلاط مواد را در ناحیه اغتشاشی نامناسب‌تر کرده و مواد را به نواحی کناری رانده است. جوشهایی که با ابزار عملیاتی حرارتی شده تولید شده‌اند، استحکام کششی بهتری را دارند. دلیل این امر سختی بسیار بالاتر ابزار می‌باشد. سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه منجر به مناسب‌ترین اختلاط و آمیختگی صفحات آلومینیومی با یکدیگر شده است.

در جوشهای ایجاد شده با هر دو ابزار، در نمونه‌های W67 و H67 تمامی شکست‌ها در سرعت‌های مختلف دورانی ابزار از نوع بیرون زدگی دکمه جوش بوده است. در نمونه‌های W76 و H76 در سرعت دورانی کم ابزار، حالت شکست جوش از نوع بیرون زدگی دکمه جوش بوده است. اما با افزایش سرعت دورانی ابزار، حالت شکست به فصل مشترکی تغییر پیدا می‌کند. مقادیر ریزسختی در نمونه‌های W67 و H67 بیشتر از نمونه‌های W76 و H76 است.