E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 8, Number 2, 2023

Microstructure and mechanical properties assessment of dissimilar AA5083/AA6061 joint welded by GTAW

N. Taheri Moghaddam, A. Rabiezadeh*, A. Khosravifard, L. Ghalandari
Department of Materials Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

Received 18 September 2022 ; Accepted 24 November 2022

Abstract

Despite the increased use of aluminium alloys in several industries, their common concern is the difficulty of joining dissimilar alloys using welding techniques. Based on this, the primary purpose of this research is to assess the mechanical characteristics of dissimilar joining of heat-treatable 6061 and non-heat-treatable 5083 aluminium alloys by gas tungsten arc welding and to discover the link between microstructure and mechanical properties. Similar welds were also implemented and evaluated in order to more properly analyze and compare the outcomes. The quality of the weld generated after establishing the health of the joint using non-destructive testing was evaluated by destructive bending, tensile, metallographic, and hardness tests to check the mechanical and microstructural qualities. The intended dissimilar weld was produced under the parameters of pulse current 120-80 amps, voltage 20 volts, welding speed 15 cm/min, and filler 5356. It should be highlighted that the dissimilar weld had the maximum joint efficiency, and with perfect control of welding settings and the absence of flaws, only 36% loss of strength was recorded when compared to the base metal. Metallographic images revealed that the formation of hot cracks in the dendritic structure of the weld metal is the major cause of strength loss for 5083 similar weld and the production of numerous porosities in the weld metal for 6061 similar welds.

Keywords: Dissimilar welding, Composite, Interface, Vortex, Hardness.

Corresponding Author: a.rabiezadeh@gmail.com

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هشتم، شماره2، پاییز و زمستان 1401

ارزیابی ریزساختار وخواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس AA5083/AA6061 جوشکاری شده با استفاده از فرایند GTAW

نوراله طاهری مقدم، امین ربیعی‌زاده*، سید علی خسروی فرد، لاله قلندری

گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

دریافت مقاله: 1401/06/27 ؛ پذیرش مقاله: 1401/09/03

چکیده

علی رغم گسترش کاربردهای آلیاژهای آلومینیم در بخش‌های مختلف صنعت، مشکل مشترک آن‌ها سختی اتصال غیرهمجنس این آلیاژها به روش جوشکاری می‌باشد. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم عملیات حرارتی پذیر 6061 و عملیات حرارتی ناپذیر 5083 به روش جوشکاری قوس تنگستنی با گاز محافظ و یافتن ارتباط آن با ریزساختار می‌باشد. به منظور ارزیابی دقیق‌تر نتایج و مقایسه منطقی آن‌ها، اتصال‌های همجنس نیز اجرا و مشخصه‌یابی شد. برای بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری، کیفیت جوش ایجاد شده پس از تایید سلامت اتصال توسط آزمون‌های غیرمخرب، توسط آزمون‌های مخرب خمش، کشش، متالوگرافی و سختی‌سنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اتصال غیرهمجنس مطلوب تحت شرایط جریان پالسی 80-120 آمپر، ولتاژ 20 ولت، سرعت جوشکاری 15 سانتی‌متر بر دقیقه و فیلر 5356 ایجاد گردید. لازم به ذکر است که بالاترین راندمان اتصال، برای اتصال غیرهمجنس بدست آمد که با کنترل دقیق پارامترهای جوشکاری و عدم تشکیل عیوب، تنها 36% افت استحکام نسبت به فلزپایه مشاهده گردید. تصاویر متالوگرافی نشان داد که، عامل اصلی افت استحکام برای اتصال همجنس 5083 تشکیل ترک گرم در ساختار دندریتی فلزجوش و برای اتصال همجنس 6061 تشکیل تخلخل‌های بسیار در ناحیه فلزجوش است.

کلمات کلیدی: جوش غیرهمنام، کامپوزیت، فصل مشترک، گردابه، سختی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: a.rabiezadeh@gmail.com

1- مقدمه

صنایع مختلف به طور پیوسته در حال ارزیابی راه‌های نوین برای کاهش وزن و قیمت و از طرف دیگر کاهش اثرات زیست‌محیطی و میزان مصرف انرژی هستند. در عین حال، بسیاری از بخش‌ها نظیر صنایع دریایی، هوافضا، دفاع و ماشین‌سازی در جست و جوی کاهش میزان نشر دی‌اکسید کربن نیز می‌باشند [1و2]. از آنجایی که بررسی‌های به عمل آمده در خصوص کاهش مصرف انرژی معمولا با استفاده از مواد سبک همراه می‌باشد، اینگونه ارزیابی‌ها سبب پر رنگ‌تر شدن نقش فلزات سبک در پیشرفت تکنولوژی و صنایع شده‌اند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]

از این میان، آلومینیم و آلیاژهای آن پرکاربردترین و مقبول‌ترین گزینه برای کاهش وزن سازه‌ها می‌باشند [3و4]. ویژگی‌هایی نظیر چگالی پایین، رسانایی الکتریکی و حرارتی خوب، خواص مکانیکی قابل افزایش، شکل‌پذیری عالی و مقاومت به خوردگی سبب افزایش روزافزون استفاده از آلومینیم و آلیاژهایش در کاربردهای مختلف شده است. علاوه بر موارد گفته شده، تقاضا برای مواد با خواص مکانیکی خوب سبب شده است که آلومینیم به عنوان دومین فلز پر کاربرد بعد از آهن مطرح شود. بنابراین، چگالی کم و استحکام تسلیم بالای آلیاژهای آلومینیم منجر به استفاده گسترده از آن‌ها برای کاهش وزن در ساخت وسایل نقلیه هوایی، دریایی و زمینی شده است. براساس این توسعه گسترده و نیاز روزافزون، توجه بسیاری به اتصال آلومینیم و آلیاژهای آن معطوف گردیده است [8-5].

عناصر اصلی آلیاژ آلومینیم 5083، آلومینیم و منیزیم (Al-Mg) می‌باشد که از این آلیاژ به دلیل چگالی کم و مقاومت عالی به خوردگی اتمسفری، به طور عمده در ساخت وسایل نقلیه دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین از این آلیاژ در معماری، ساخت مخازن تحت فشار و مخازن نگهداری سوخت، و سازه‌های جوشکاری شده در صنایع هسته‌ای و شیمیایی استفاده می‌شود. آلیاژ آلومینیم 6061 از عناصر آلومینیم، منیزیم و سیلیسیم (Al-Mg-Si) ساخته شده است و به دلیل چگالی کم و استحکام بالا به طور گسترده در ساخت هواپیما استفاده می‌شود [11-9].

اگرچه آلومینیم و آلیاژهای آن با روش‌های جوشکاری ذوبی متعددی قابل اتصال هستند، معمولا جوش‌پذیری آن‌ها ضعیف است. در دو دهه گذشته، راه‌حل‌های موثری برای جوشکاری برخی آلیاژهای آلومینیم توسعه یافته است، با این‌حال، همچنان مشکلاتی نظیر تخلخل، تبخیر عناصر آلیاژی، و ترک گرم برای جوشکاری برخی آلیاژهای آلومینیم حل نشده باقی مانده است [12و13]. علاوه بر این، اگرچه اتصالاتی با خواص مکانیکی بهتر توسط روش حالت- جامد نوینی به نام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد شده است، این روش نیز با مشکلاتی مانند نیاز به فیکسچر دقیق و محدودیت جوشکاری تنها در وضعیت افقی همراه است [17-14]. برخی خواص ویژه آلومینیم و اثرات آن‌ها باید در حین جوشکاری لحاظ گردد. از جمله ضریب هدایت حرارتی بالاتر آلومینیم نسبت به فولاد است که تاثیری منفی بر جوش‌پذیری آن دارد [18،2و19].

جوشکاری قوس تنگستن با گاز محافظ (GTAW) یک روش جوشکاری ذوبی است که برای اتصال با کیفیت دسته وسیعی از مواد استفاده می‌شود. در این روش، حرارت لازم برای جوشکاری توسط قوس الکتریکی پایدار میان الکترود تنگستنی و فلزپایه تامین می‌شود. برای حفاظت از گرده جوش از گازهای خنثی مانند آرگون و هلیم استفاده می‌شود. در این فرایند کنترل حرارت ورودی برای تولید اتصالی سالم از اهمیت کلیدی برخوردار می‌باشد.

جوشکاری همواره به عنوان روشی بسیار رایج و تکنولوژی کلیدی برای اتصال مواد سنتی و پیشرفته با کیفیت بالا مطرح می‌باشد. با این‌حال، رشد تعداد مواد مورد استفاده در صنعت و از طرفی خواص متفاوت آن‌ها، نیاز به روش‌ها و تکنیک‌های مختلف اتصال را در بر دارد. به ویژه در سال‌های اخیر، افزایش اهمیت فاکتورهای اقتصادی منجر به لزوم ترکیب مواد مختلف با خواص متفاوت شده است. از این رو، برای جوشکاری مواد با خواص مختلف لازم است که بهترین و مناسب‌ترین روش جوشکاری و مواد مصرفی استفاده گردد. در جدول (1)، خلاصه‌ای از تلاش‌های به عمل آمده توسط پژوهشگران برای ایجاد اتصال غیرهمجنس میان آلیاژهای آلومینیم سری 5xxx و 6xxx ارائه شده است.

لازم به ذکر است که برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیم که دسته وسیعی با خواص متفاوت می‌باشند، نیاز به روش‌های مختلف و متفاوتی می‌باشد و نمی‌توان یک روش کلی را برای جوشکاری اتصال همجنس یا غیرهمجنس این آلیاژها معرفی کرد. بدین منظور، برای کاربردهای مختلف، باید قبل از ورود به فرایند تولید، روش و پارامترهای مناسب جوشکاری برای اتصال هر زوج غیرهمجنس مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد تا متناسب با نیاز، خواص و کیفیت مطلوب حاصل گردد. لذا، در این پژوهش تلاش‌هایی در خصوص ارزیابی کیفیت اتصال

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]

جدول 1- خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در زمینه اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم سری 5xxx و 6xxx.

ماده	اتصال	توضیحات	سال	مرجع
AA5083/AA6061	GTAW	امکان سنجی اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم سری 5xxx و 6xxx	2000	[۲۴]
AlMg/AlMgSi	PPAW	ارزیابی جوشکاری غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم به روش قوس پلاسمای پودری	2005	[۲۵]
AA5754/AA6060	LBW	جوشکاری غیرهمجنس به روش دسته پرتو لیزر و استفاده از فیلر	2010	[۲۶]
AA5083/AA6061	GMAW GTAW FSW	مقایسه کیفیت اتصال غیرهمجنس ایجاد شده به روش‌های ذوبی و حالت جامد	2013	[۲۷]
AA5083/AA6061	LBW	ارزیابی اثر پارامترهای جوشکاری با دسته پرتو لیزر بر خواص ناحیه اتصال	2013	[۲۸]
AA5754/AA6082	FSW	اثر شکل ابزار و خواص مواد بر استحکام اتصال در جوشکاری در حالت روی هم	2015	[۲۹]
AA5083/AA6061	GTAW FSW	ارزیابی اثر روش جوشکاری بر خواص ناحیه اتصال	2015	[۳۰]
AA5052/AA6014	RSW	بررسی جوشپذیری آلیاژهای آلومینیم به روش جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی	2020	[۳۱]
AA5754/AA6082	FSW	تاثیر مکانیزم‌های نرم شدگی بر خواص شکل پذیری و تشکیل عیوب در اتصال روی هم	2020	[۳۲]
AA5754/AA6013	GMAW	ارزیابی خواص اتصال	2022	[۳۳]
AA5251/AA6082	LBW/EBW	ارزیابی شکل پذیری و تغییرفرم سرد مقاطع جوشکاری شده	2021	[۳۴]
AA5754/AA6013	GMAW	ارزیابی خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال غیرهمجنس	2021	[۳۵]
AA5083/AA6061	FSW	ارزیابی افزودن ذرات تقویت کننده و اجرای فرآیند جوشکاری در چند پاس بر خواص مکانیکی و ریزساختاری ناحیه اتصال	2022	[۳۶]
AA5083/AA6061	FSW	بررسی تاثیر نیروی محوری و گشتاور ابزار بر کیفیت اتصال	2022	[۳۷]

غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم سری 5xxx و 6xxx با استفاده از روش جوشکاری قوس تنگستنی به عمل آمده است. ضمن اجرای آزمون‌های مختلف مخرب و غیرمخرب، ارتباط میان خواص مکانیکی و ویژگی‌های ریزساختاری نظیر توپوگرافی فازها، دانه‌بندی و شکل آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- مواد و روش‌ها

روش اجرای پژوهش به نحوی طراحی شد که اتصالی موفق عاری از عیب و با خواص مطلوب از آلیاژهای آلومینیم به دست آید. بدین ترتیب، ورق‌های نورد شده از آلیاژهای آلومینیم غیرهمجنس AA5083-H321 و AA6061-T6 با ضخامت 3 mm به عنوان فلزپایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژها در جدول(2) نشان داده شده است، با انجام آزمون کوانتومتری بدست آمد و با مقادیر موجود در استانداردها مقایسه گردید. به منظور امکان مقایسه بهتر و دقیق‌تر نتایج، این ورق‌ها به صورت همجنس و غیرهمجنس AA5083/AA5083، AA5083/AA6061 و AA6061/AA6061) با روش جوشکاری قوس تنگستنی، جوشکاری شدند.

ابعاد فلزپایه 200 mm × 100 انتخاب شد تا پس از جوشکاری سر به سر قطعاتی به ابعاد 200 mm × 200 حاصل شود. بدین ترتیب بعد از جوشکاری می‌توان قطعات مختلف برای آزمون‌های گوناگون را استخراج نمود. در شکل (1)، نقشه و ابعاد نمونه‌ها نشان داده شده است. به منظور ایجاد اتصالی با نفوذ کامل، لبه‌های ورق‌ها به صورت V یک طرفه و دو طرفه با زاویه 45° آماده سازی شدند. جوشکاری قوس تنگستنی با متغیرهایی نظیر نوع جریان، میزان جریان، سرعت جوشکاری، و فیلر اجرا شد تا بتوان قطعاتی قابل قبول از اتصال همجنس و غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم به دست آورد. لازم به ذکر است که پارامترهای جوشکاری بر اساس آنچه در پژوهش‌های سایر محققین بیان شده بود انتخاب گردید و به منظور اثربخشی بالاتر، نکات موجود در استانداردها نیز بهره گرفته شد. کلیه پارامترهای جوشکاری انتخاب شده در جدول (3) نمایش داده

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]

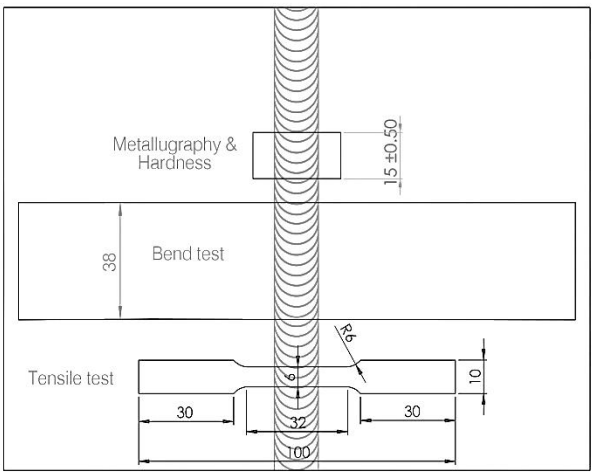
جدول 2- ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیم و فیلرهای استفاده شده در این پژوهش بر اساس آزمون کوانتومتری.

آلیاژ	عناصر آلیاژی								
	Mg	Zn	Cu	Mn	Cr	Ni	Fe	Si	Al
AA5083-H321	4.4	0.107	0.049	0.545	0.063	0.009	0.333	0.134	Bal.
AA6061-T6	0.809	0.064	0.252	0.038	0.199	0.034	0.296	0.559	Bal.
فیلر									
ER5183	4.5	0.25	0.10	0.80	0.45	0.02	0.40	0.40	Bal.
ER5356	5	0.10	0.10	0.12	0.15	0.02	0.40	0.25	Bal.

جدول 3- متغیرهای جوشکاری.

شماره نمونه	فلز پایه	نوع جریان	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (Cm/Min)	فیلر	توضیحات
F551	5083-5083	پالسی	80-120	20	15	5356	دوطرفه - ناموفق – LOP
F552	5083-5083	پالسی	80-160	20	18	5356	یک طرفه – ناموفق
F553	5083-5083	پالسی	70-140	20	18	5356	دوطرفه – موفق
F661	6061-6061	پالسی	80-120	20	15	5356	دوطرفه - ناموفق – LOP
F662	6061-6061	مداوم	80-160	20	18	5183	دوطرفه – موفق
F663	6061-6061	پالسی	70-140	20	18	5183	دوطرفه – ناموفق - LOP
F664	6061-6061	پالسی	80-120	20	18	5183	دوطرفه – موفق
F561	5083-6061	پالسی	80-120	20	15	5356	دوطرفه – موفق
F562	5083-6061	مداوم	80-160	20	18	5183	دوطرفه – ناموفق

شده‌اند. لازم به ذکر است که در همه فرایند جوشکاری از گاز خنثی آرگون جهت محافظت از ناحیه جوشکاری استفاده گردید و نرخ دمش گاز در حدودLt/min 7-6 تنظیم گردید. پس از جوشکاری، برای اطمینان از سلامت قطعات جوشکاری شده و عاری از عیب بودن آن‌ها، آزمون‌های غیرمخرب بازرسی چشمی و پرتونگاری با استفاده از اشعه ایکس بر روی نمونه‌ها انجام شد. به منظور بررسی‌های ریزساختاری آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از سمباده‌های 400 تا 2000 انجام شد. حکاکی نمونه‌ها توسط محلول وک با ترکیب 100 ml آب، $4g\ KMnO_4$ و 1g NaOH به مدت 20 ثانیه در دمای اتاق انجام شد. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها به‌منظور بررسی ریزساختاری، با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد تصویربرداری قرار گرفتند. خواص مکانیکی نمونه‌ها از طریق آزمون‌های کشش عرضی و ریزسختی ارزیابی شد. آزمون استحکام کششی عرضی با استفاده از دستگاه کشش universal مطابق با استاندارد ASTM E8-M انجام شد. سرعت فک دستگاه در این آزمون 2mm/minانتخاب گردید. برای تعیین استحکام خمشی نمونه‌ها، آزمون خمش سه نقطه‌ای براساس استاندارد ASME Sec. IX با استفاده از دستگاه یونیورسال 2 تن بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای تعیین استحکام خمشی نمونه‌ها، آزمون خمش سه نقطه‌ای بر اساس استاندارد ASTM E190 با استفاده از دستگاه یونیورسال 2 تن بر روی نمونه ها انجام شد.



شکل 1- تصویر شماتیک نمونه جوشکاری شده و ابعاد نمونه‌های آزمون‌ها.

سختی نمونه‌ها از طریق آزمون ریزسختی ویکرز و با استفاده از دستگاه سختی‌سنج مدل DHV-1000 تعیین گردید. در این آزمون از نمونه‌های تهیه شده در مرحله متالوگرافی که دارای

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]

صافی سطح مناسبی بودند استفاده شده است. به منظور تعیین پروفیل سختی ناحیه اتصال، ریزسختی سنجی بر روی مقطع عرضی انجام شد. برای این کار، میزان نیروی و مدت زمان اعمال نیرو توسط دستگاه به ترتیب 1 کیلوگرم و 15 ثانیه انتخاب شد.

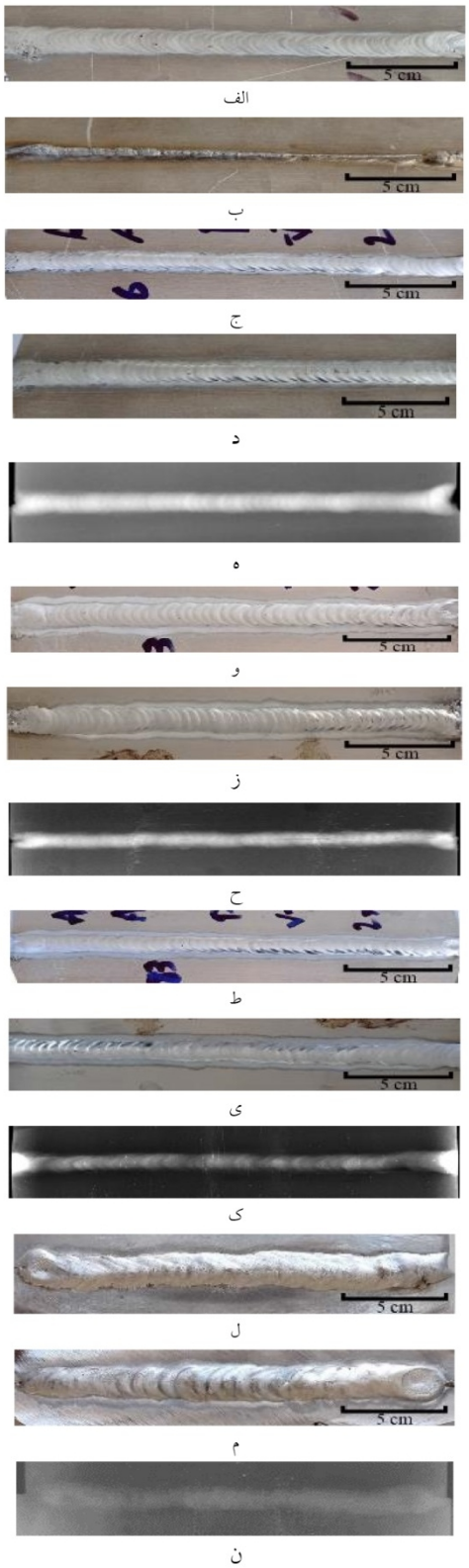
3- نتایج و بحث

ساده‌ترین و الزامی‌ترین روش ارزیابی نمونه‌های جوشکاری شده، بازرسی چشمی است که از طریق آن می‌توان به بسیاری از عیوب ظاهری نمونه‌ها پی برد. لذا قبل از نمونه برداری جهت انجام آزمون‌های مکانیکی، نمونه‌های جوشکاری شده مورد بازرسی چشمی قرار گرفتند. در جوشکاری قوس تنگستنی با گاز محفظ که یک جوشکاری با کیفیت و عمق نفوذ بالا به شمار می‌رود، اثری از پاشش بر روی قطعات جوشکاری شده دیده نمی‌شود. علاوه بر این، با انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری، قطعه دارای ظاهر مطلوبی خواهد بود. عیب متداول جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیم، تشکیل ترک گرم در حین جوشکاری و بر جای ماندن تخلخل پس از جوشکاری می‌باشد. در انجماد غیرتعادلی آلیاژها که به صورت متداول در قطعات جوشکاری شده شاهد آن هستیم، فرصت کافی برای توزیع مجدد عناصر آلیاژی در حین رشد و پیشروی جبهه انجماد وجود ندارد و لذا عناصر آلیاژی پس‌زده می‌شوند. این پس‌زدگی عناصر آلیاژی تا آنجا ادامه خواهد داشت که آخرین ناحیه انجمادی غنی از عناصر آلیاژی خواهد بود. اختلاف ترکیب شیمیایی فلزجوش جامد شده در قسمت‌های مختلف و تجمع فازها با دمای ذوب پایین‌تر در نواحی اتصال جبهه‌های انجمادی (عمدتا مرزدانه‌ها)، سبب می‌شود که در حضور اجتناب ناپذیر تنش‌های انقباضی ناشی از جوشکاری ذوبی، ریزساختار حاصل به شدت مستعد به تشکیل ترک‌های گرم باشد. از طرف دیگر، اختلاف شدید حلالیت گازها به ویژه هیدروژن در فاز مذاب و فاز جامد آلیاژهای آلومینیم، سبب می‌شود که مقدار قابل توجهی گاز در حین انجماد جوش از ساختار خارج شود. در حین خروج گازها، احتمال حبس شدن آن‌ها در میانه مسیر بسیار محتمل بوده و منجر به تشکیل تخلخل در فلزجوش می‌شود. انتظار می‌رود که با بررسی‌های غیرمخرب اولیه می‌توان تا حدی این موارد را تشخیص داد [20]. در شکل (2) تصاویر برخی از نمونه‌ها بعد از فرایند جوشکاری مشاهده می‌شود.

در شکل‌های (2-الف و 2-ب)، تصاویر پشت و روی قطعه جوشکاری شده نمونه F552 نشان داده شده است. این جوشکاری به صورت یک طرفه اجرا شده است همانطوری که دیده می‌شود، نفوذ جوش در راستای ضخامت به صورت کامل نمی‌باشد و عیب عدم نفوذ بوجود آمده است. این عیب در جوشکاری آلیاژهای آلومینیم به دلیل ضریب انتقال حرارت بالای آن‌ها متداول است. برای برطرف کردن این معضل، جوشکاری به صورت دوطرفه اجرا شد. بدین ترتیب نمونه F553 به صورت موفق جوشکاری شد و حتی در رادیوگراف آن اثری از عیوب داخلی نیز دیده نمی‌شود (تصاویر2-ج، 2-د و 2-ه). مسیر مشابهی برای جوشکاری همجنس آلیاژهای سری 6xxx پیش گرفته شد و همگی به صورت دو طرفه جوشکاری شدند. از لحاظ ظاهری کلیه جوش‌ها مورد قبول بودند (شکل‌های 2-و و 2-ز)، اما در تصاویر رادیوگرافی نمونه‌های F661 و F663 عیب نفوذ ناکافی مشاهده گردید (شکل2-ح). اما با تغییر متغیرهای جوشکاری، نمونه‌های F662 و F664 به صورت سالم و عاری از عیب متصل شدند (شکل‌های2-ط، 2-ی و 2-ک). به همین ترتیب اتصال کاملی برای جوشکاری غیرهمجنس انجام شد که هم از لحاظ ظاهری و هم از لحاظ درونی عاری از عیب است (شکل‌های 2-ل، 2-م و 2-ن).

یکی از راه‌های ارزیابی کیفی قطعات جوشکاری شده، اجرای آزمون خمش می‌باشد. بر اساس این آزمون، زاویه خم شدن قطعه پیش از شکست، معیاری از میزان نرمی، صحت و سلامت قطعه و به نحوی بیانگر کیفیت اتصال است. در شکل (3)، تصاویر نمونه‌های خمش برای اتصال‌های موفق همجنس و غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم 5xxx و 6xxx نمایش داده شده است. همانطور که پیشتر بیان شد، صحت و سلامت این قطعات در آزمون‌های‌غیرمخرب بازرسی‌چشمی ورادیوگرافی تایید شده

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]



شکل 2- تصاویر نمونه‌های جوشکاری شده؛ الف و ب- اتصال ناموفق F552، ج، د و ه- اتصال موفق F553، و، ز و ح- اتصال ناموفق F663، ط، ی و ک- اتصال موفق F664، ل، م و ن- اتصال موفق F651.

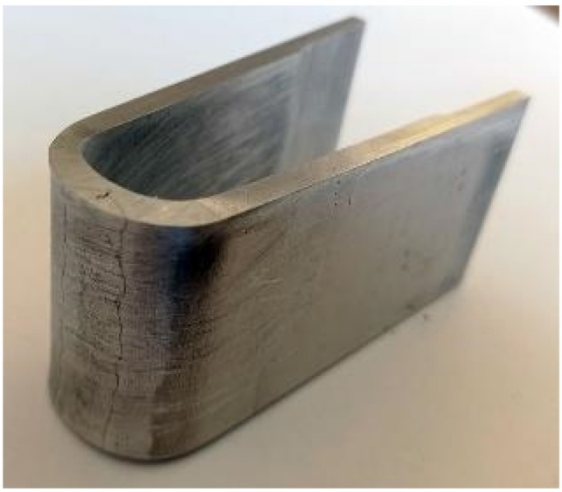
است و عاری از هرگونه عیب سطحی یا درونی در ابعاد حد تفکیک این روش‌ها می‌باشند. اما شکست غیرمنتظره اتصال همجنس F553 در مراحل اولیه آزمون خمش، بیانگر این موضوع است که اگرچه این قطعه توسط روش‌های بازرسی چشمی و رادیوگرافی بدون عیب شناخته شد، احتمالا در ابعاد میکروسکوپی حاوی عیوبی است. شرایط مشابهی برای اتصال همجنس F664 انتظار می‌رود. از این رو، انتظار می‌رود با بررسی‌های متالوگرافی بتوان به دلایل رفتار مکانیکی ضعیف این قطعات پی برد. از طرفی، نمونه اتصال غیرهمجنس F561، آزمون خمش را بدون تخریب با موفقیت به پایان رسانیده است که بدون شک بیانگر موفقیت ماکروسکوپی و میکروسکوپی این اتصال است. برای جستجوی دلایل موفقیت و عدم موفقیت اتصال‌های همجنس و غیرهمجنس در آزمون خمش، بررسی‌های متالوگرافی بر روی نمونه‌ها انجام شد. همانطور که در شکل (4-الف) دیده می‌شود، ساختار فلزپایه، یک ساختار نورد شده است که دانه‌های کشیده‌شده به همراه رسوبات ریز قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس مراجع، این رسوبات عمدتا $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$ یا Mg_2Si می‌باشند [21, 22]. در ناحیه متاثر از حرارت، رشد دانه‌ها نسبت به فلزپایه به وضوح دیده می‌شود. علاوه بر این، رشد اپیتکسیال بر اساس مکانیزم انجماد فلزجوش در جوشکاری‌های ذوبی در شکل (4-ب) قابل تشخیص است. رشد اپیتکسیال زمانی رخ می‌دهد که ترکیب شیمیایی جوش و فلزپایه، اختلاف چندانی نداشته باشند. در این صورت، دانه‌هایی که در مرز ناحیه متاثر از حرارت و فلزجوش به طور جزئی ذوب شده‌اند، به عنوان جوانه اولیه برای انجماد ساختار جوش عمل کرده و رشد در امتداد دانه‌های پیشین صورت می‌پذیرد. بدین ترتیب، دسته‌ای از دانه‌های ستونی در مرز فلزجوش مشاهده می‌شوند که موازی یکدیگر و در خلاف جهت انتقال حرارت به درون گرده جوش امتداد می‌یابند. این پدیده به وضوح در میانه شکل (4-ب) قابل تشخیص می‌باشد. در ناحیه جوش (شکل‌های4-ج و 4-د)، رشد دندریتی و عدم یکنواختی ترکیب شیمیایی در ریزساختار انجمادی دیده می‌شود.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]

در حین انجماد آلیاژهای آلومینیم، در حضور گرادیان دمایی و فراتبرید ترکیبی، رشد جبهه انجمادی را از سلوله به دندریتی تغییر می‌دهد [23].

الف

ب



ج

شکل 3- تصاویر نمونه‌های جوشکاری شده بعد از آزمون خمش؛ الف- F553، ب- F664 و ج- F651.

ساختار دندریتی ایجاد شده که در شکل (4-د) به خوبی قابل تشخیص است، عدم پیوستگی و ریزتخلخل‌های بسیاری را علاوه بر ریزجدایش در میان بازوهای دندریتی دیده می‌شود که عامل اصلی افت خواص مکانیکی می‌باشند. در عین حال، همانطور که پیشتر اشاره شد، ماهیت ساختار انجمادی فلز جوش و جدایش عناصر آلیاژی، این ناحیه را مستعد به تشکیل ترک گرم می‌کند. با بررسی‌های بیشتر، همان گونه که در شکل(4-ج) دیده می‌شود، ترک انجمادی مشاهده می‌شود که ابعادی در حد چند صد میکرومتر داشته که با استفاده از روش رادیوگرافی نیز تشخیص داده نشده است.

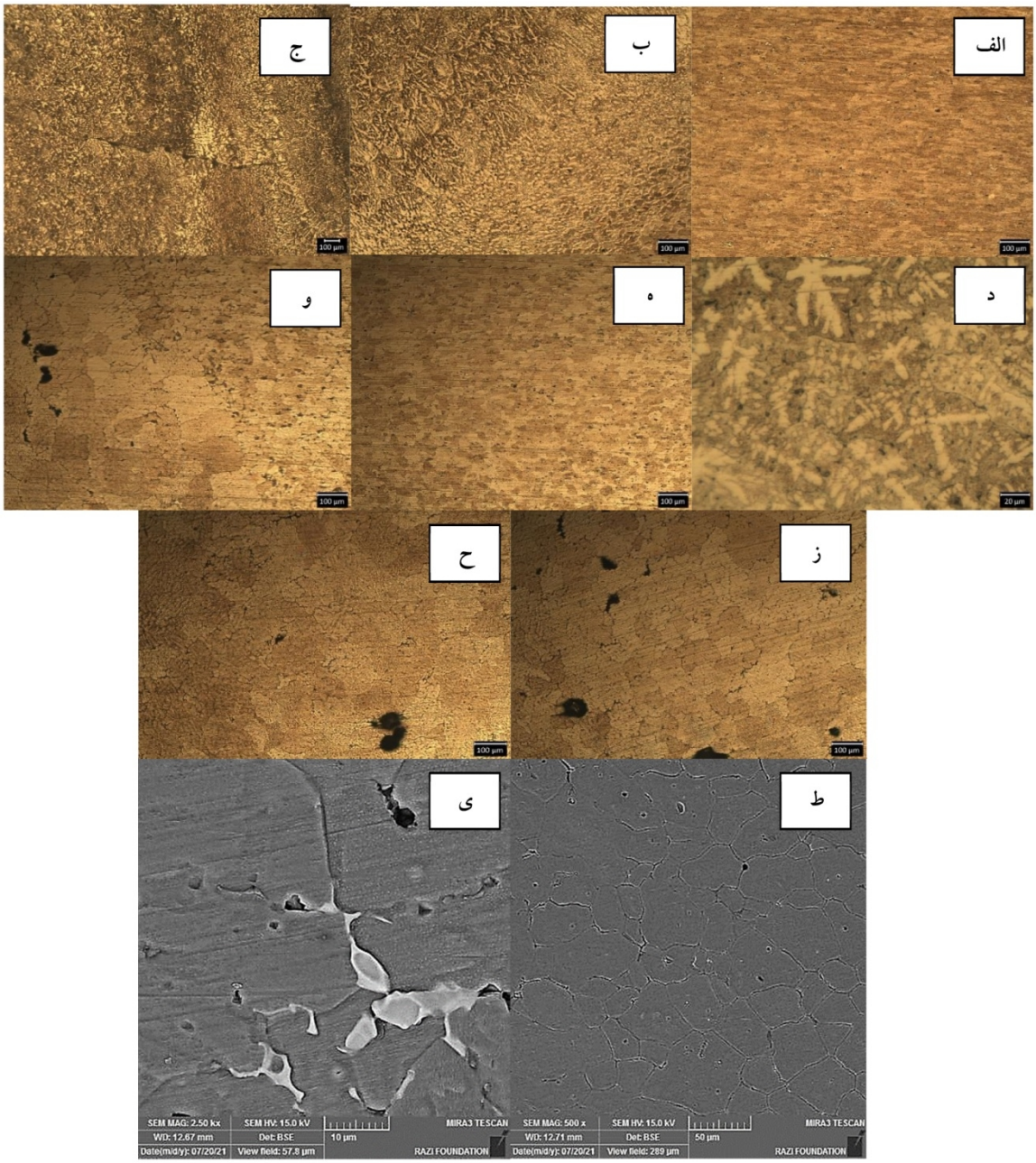
ریزساختار فلزپایه AA6061، از محلول جامد سیلیسیم و منیزیم در آلومینیم تشکیل شده است که حاوی رسوبات ریز و پراکنده Fe_3SiAl_{12} و Mg_2Si است (شکل4-ه). رشد واضح اندازه دانه در ناحیه متاثر از حرارت در شکل(4) و دیده می‌شود. در شکل(4-ز) نشان می‌دهد که در فلزجوش، علاوه بر تشکیل ساختار انجمادی و اندازه دانه بزرگتر نسبت به فلزپایه، تخلخل نیز دیده می‌شود. در تصویر ریزساختاری نمونه جوشکاری غیرهمجنس (شکل4-ح)، مشخصات اصلی و ساختار متداول جوشکاری ذوبی به خوبی دیده می‌شود.

تشکیل تخلخل و تشکیل ریزساختار دندریتی از ویژگی‌های بارز جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیم است که به خوبی در ساختار دیده می‌شود. اما تخلخل کمتر و عدم تشکیل ترک انجمادی سبب می‌شود که اتصال غیرهمجنس ایجاد شده خواص مکانیکی بهتری از خود نشان بدهد که موید موفقیت آزمون خمش این نمونه می‌باشد.

بهره‌مندی از تصاویر میکروسکوپ الکترونی جهت ارزیابی بهتر ریزساختار این ناحیه نشان داد که ریزساختار ناحیه اتصال متشکل از دانه‌های هم محور می‌باشد (شکل4-ط). علاوه بر آن، تشکیل فاز دوم در نواحی مرزدانه‌ای نیز در جهت بهبود استحکام موثر می‌باشد (شکل4-ی).

جهت ارزیابی بهتر خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده، آزمون کشش عرضی بر روی آن‌ها اجرا شد که نمودارهای تنش کرنش آن‌ها در شکل (5) نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، راندمان اتصال برای اتصال‌های همجنس AA5083-AA5083 و AA6061-AA6061 به ترتیب 38% و 54/6% بدست آمد. درحالی‌که راندمان اتصال برای اتصال غیرهمجنس AA5083-AA6061 63/5% محاسبه شد. لازم به ذکـر است که دلیل اصلی افت راندمان اتصال همجنس آلیـــاژ

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]



شکل 4- ریزساختار نمونه‌ها؛ F553: الف- فلز پایه، ب- HAZ، ج و د- فلز جوش؛ F664: ه- فلز پایه، و- HAZ، ز- فلز جوش F561؛ ح-میکروسکوپ نوری، ط و ی-تصاویر میکروسکوپ الکترونی.

آلومینیم- منیزیم، تشکیل ترک گرم در ناحیه جوش می‌باشد و لذا راندمان اتصال بدست آمده کمتر از انتظار است. در خصوص اتصال همجنس آلیاژ آلومینیم 5083، سیکل حرارتی وارد شده به فلزجوش سبب آنیل آن می‌شود و افتی در خواص مکانیکی در مقایسه با فلزپایه ایجاد می‌کند. علاوه بر آن تشکیل ساختار دندریتی (شکل4-د) اساسا خواص مکانیکی ضعیف‌تری را به دلیل جدایش، حضور ریزترک‌ها و ریزتخلخل‌ها به همراه خواهد داشت. تشکیل ترک گرم انجمادی (شکل4-ج) در ناحیه جوش این آلیاژ شرایط را بدتر کرده و سبب افت‌شدید استحکام کششی این اتصال همجنس شده است. به نحوی که، علیرغم اینکه این اتصال در بررسی‌های غیرمخرب اولیه دارای ظاهری مطلوب بوده (شکل‌های3-ج و 3-د) و در تصویر رادیوگرافی هیچگونه اثر یا آثاری از عیوب داخلی نظیر ترک یا ناپیوستگی مشاهده نشده است (شکل3-ه)، به دلایل مشکلات

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]

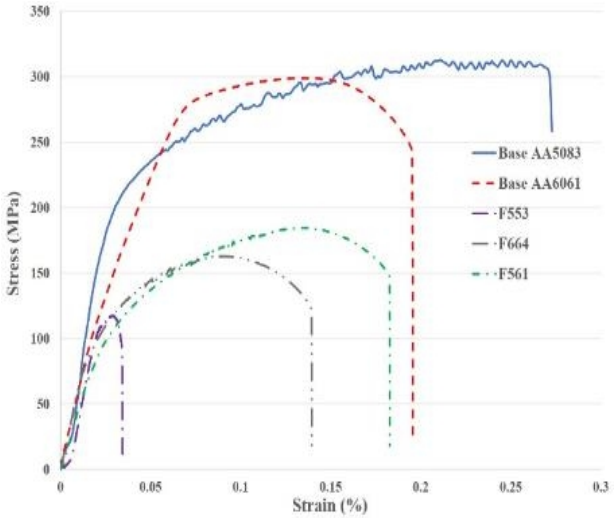
جدول 4- خلاصه خواص مکانیکی پژوهش‌های پیشین در زمینه اتصال همجنس و غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم 5xxx و 6xxx.

فلز پایه	روش جوشکاری	استحکام کششی فلز پایه (MPa)	استحکام کششی جوش (MPa)	کرنش شکست جوش (%)	راندمان اتصال (%)	مرجع
AA5083-AA5083	FSW TIG	320	229 70	-	71.5 22	[۳۸]
AA5083-AA5083	TIG	320	261.304	17	81.66	[۳۹]
AA6061-AA6061	TIG	358	196	7	54.7	[۴۰]
AA6061-AA6061	GMAW GTAW FSW	337	163 211 224	8.4 11.8 14.2	48.8 62.57 74.25	[۴۱]
AA5083-AA6061	GTAW GTAW FSW	280	166 189 200	-	59 67.5 71.4	[۲۷]
AA5083-AA6061	GTAW	438.19/301.2	199	-	66	[۳۰]

ریزساختاری اشاره شده، اتصال همجنس AA5083 راندمان اتصال پایینی از خود نشان داده است. بر خلاف اتصال همجنس AA5083، اتصال همجنس AA6061 راندمان اتصال بالاتری نشان داد. در آلیاژهای رسوب‌سخت شونده مانند AA6061، عوامل مختلفی سبب کاهش خواص مکانیکی ناحیه اتصال در مقایسه با فلزپایه می‌باشند. از این دسته عوامل می‌توان به آنیل شدن ساختار کارسرد شده، رشد چشمگیر اندازه دانه در ناحیه اتصال (شکل‌های 3-ه و 3-ز)، انحلال رسوبات استحکام‌ده و تشکیل تخلخل اشاره کرد. با اینحال، برخلاف حالت قبل، شواهدی مبنی بر تشکیل ترک گرم در ریزساختار فلزجوش مشاهده نگردید و در مجموع سبب شد که راندمان اتصال بهتری بدست آید. در اتصال غیرهمجنس AA5083-AA6061، به دلیل ترکیب دو آلیاژ، شرایط بهتری بدست آمده است.

ریزساختار با دانه‌های هم محور و تشکیل رسوبات استحکام‌ده (شکل‌های 4-ط و 4-ی) از عوامل اصلی راندمان مطلوب این اتصال است. از طرفی، راندمان اتصال بدست آمده برای اتصال همجنس آلیاژ آلومینیم- منیزیم- سیلیسیم نسبت به نتایج سایر پژوهشگران قابل قبول و منطقی است. بهترین نتیجه مربوط به اتصال غیرهمجنس است که علاوه بر اینکه نسبت به پژوهش‌های پیشین بهتر است، در حد راندمان اتصال این آلیاژها با روش‌های حالت جامد، به خصوص روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، می‌باشد. در جدول (4)، خلاصه‌ای از نتایج پژوهش‌های سایر محققین در زمینه اتصال همجنس و غیرهمجنس این آلیاژها ارائه شده است.

به منظور ارزیابی بهتر کیفیت اتصال، محل شکست نمونه‌های تهیه شده برای آزمون کشش مورد بررسی قرار گرفت (شکل6).

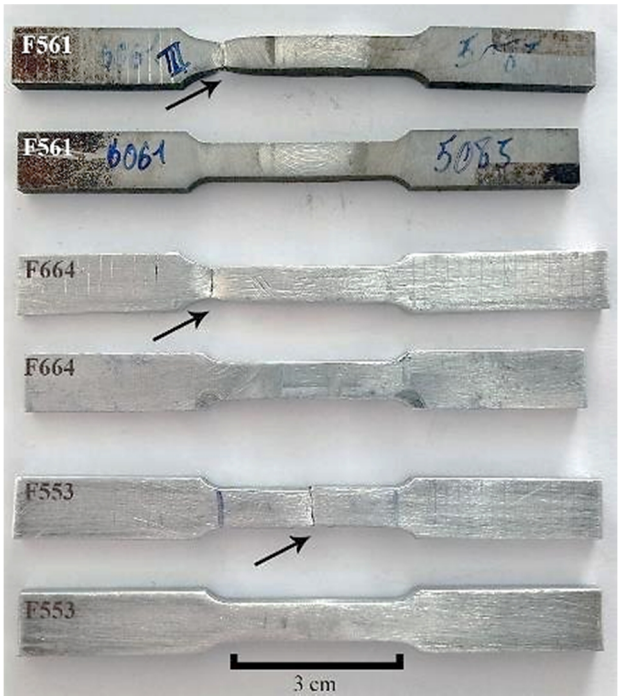


شکل 5 – نمودار تنش کرنش اتصال‌های همجنس و غیرهمجنس AA5083/AA6061.

همانطورکه دیده می‌شود، اتصال همجنس آلیاژ آلومینیم- منیزیم به دلیل نقص ریزساختاری در ناحیه جوش، از این ناحیه دچار شکست گردیده است. برای اتصال همجنس آلیاژ آلومینیم- منیزیم- سیلیسیم که اتصال قابل قبولی از لحاظ استحکام و ریزساختار است و ریزساختار مطلوبی در ناحیه اتصال بوجود آمده است، شکست نمونه در ناحیه متاثر از حرارت رخ داد که موید استحکام بالاتر ناحیه جوشکاری شده نسبت به منطقه متاثر از حرارت می‌باشد. برای این اتصال، شکست از ناحیه متاثر از حرارت رخ می‌دهد که به دلیل رشد دانه، انحلال

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]

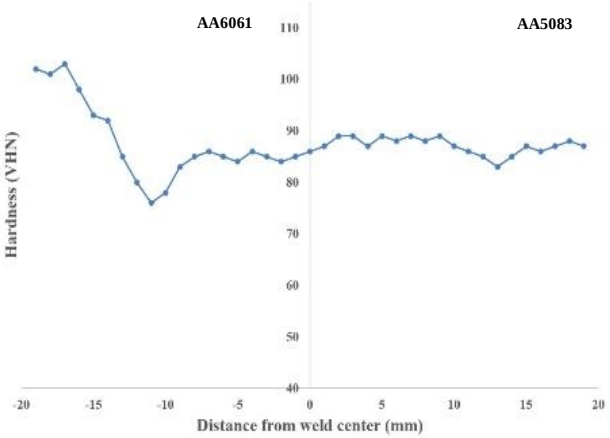
رسوبات استحکام‌ده و آنیل شدن به ضعیف‌ترین ناحیه اتصال تبدیل شده است.



شکل 6 – تصاویر نمونه‌های آزمون کشش قبل و بعد از اجرای آزمون.

شکست اتصال غیرهمجنس نیز از ناحیه متاثر از حرارت در سمت آلیاژ آلومینیم- منیزیم- سیلیسیم رخ داد. یکی از مواردی که آلیاژهای آلومینیم سری 6xxx جوشکاری شده با آن مواجه هستند، علاوه بر رشد دانه در ناحیه متاثر از حرارت، رشد یا انحلال رسوبات استحکام‌ده نیز رخ می‌دهد که افت خواص مکانیکی در این ناحیه را تشدید می‌کند. از این رو، در خصوص اتصال غیرهمجنس مشاهده می‌شود که افت استحکام در ناحیه متاثر از حرارت در سمت آلیاژ آلومینیم 6xxx در مقایسه با آلیاژ آلومینیم 5xxx بیشتر بوده و شکست قطعه در این ناحیه رخ می‌دهد.

پروفیل ریزسختی می‌تواند درک بهتری نسبت به تغییرات بوجود آمده در امتداد ناحیه جوش ارائه بدهد که برای اتصال غیرهمجنس در شکل(7) نشان داده شده است. همانطور که پیشتر گفته شد، افت استحکام در ناحیه متاثر از حرارت برای آلیاژ 6xxx (در سمت چپ تصویر) شدیدتر از آلیاژ 5xxx است و لذا به عنوان ضعیف‌ترین ناحیه در این نوع اتصال شناخته می‌شود و مکانی مستعد برای شکست قطعه به شمار می‌رود.



شکل 7 – پروفیل ریزسختی سطح مقطع عرضی اتصال غیرهمجنس AA5083/AA6061

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اتصال همجنس و غیرهمجنس آلیاژهای AA5083-H321 و AA6061-T6 به روش جوشکاری قوس تنگستنی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور ارزیابی کیفیت اتصال، آزمون‌های مخرب و غیرمخرب انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

- عدم مشاهده عیوب در آزمون‌های غیرمخرب، الزاما نشان‌دهنده موفقیت فرایند جوشکاری نمی‌باشد. در خصوص جوشکاری همجنس آلیاژ آلومینیم- منیزیم به دلیل اینکه اندازه ترک گرم تشکیل شده در ناحیه جوش کوچکتر از قدرت تفکیک روش رادیوگرافی بود، تشخیص داده نشد. از دلایل تشکیل ترک گرم می‌توان به توسعه ساختار دندریتی در ناحیه جوش اشاره کرد که منجر به ریزجدایش و پس زدگی عناصر آلیاژی به مرزها می‌شود.
- موفقیت اتصال غیرهمجنس در آزمون خمش، تخمینی برای استحکام قابل قبول این اتصال می‌باشد. بررسی‌های ریزساختاری و آزمون کشش نیز مؤید آن می‌باشد.
- راندمان اتصال غیرهمجنس 63/5% به دست آمد که در مقایسه با نتایج پژوهش‌های پیشین قابل توجه است.
- در نتیجه انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری، ریزساختار جوش عاری از عیوب متالورژیکی متداول جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیم نظیر ترک گرم بود و تنها درصد اندکی تخلخل در آن مشاهده گردید. با این حال، استحکام قابل قبول

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]

آن سبب گردید که در حین آزمون کشش، شکست از ناحیه متاثر از حرارت رخ دهد.

منابع

1- Z. Huda, N. I. Taib, and T. Zaharinie, "Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy," *Materials Chemistry and Physics,* vol. 113, no. 2, pp. 515-517, 2009.

2-B. Çevik and B. Gülenç, "The effect of welding speed on mechanical and microstructural properties of 5754 Al (AlMg₃) alloy joined by laser welding," *Materials Research Express,* vol. 5, no. 8, p. 086520, 2018.

3-D. Varshney and K. Kumar, "Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization," *Ain Shams Engineering Journal,* vol. 12, no. 1, pp. 1143-1152, 2021.

4- P. Emadi, B. Andilab, and C. Ravindran, "Engineering Lightweight Aluminum and Magnesium Alloys for a Sustainable Future," *Journal of the Indian Institute of Science,* vol. 102, no. 1, pp. 405-420, 2022.

5-J.-Y. Zhang *et al.*, "Microalloying Al alloys with Sc: a review," *Rare Metals,* vol. 39, no. 6, pp. 636-650, 2020.

6- A. A. Luo, "Recent advances in light metals and manufacturing for automotive applications," *CIM Journal,* vol. 12, no. 3, pp. 79-87, 2021.

7-J. S. de Andrade, M. R. S. Vieira, S. H. Oliveira, S. K. de Melo Santos, and S. L. Urtiga Filho, "Study of microbiologically induced corrosion of 5052 aluminum alloy by sulfate-reducing bacteria in seawater," *Materials Chemistry and Physics,* vol. 241, 2020.

8-R. A. Michi, A. Plotkowski, A. Shyam, R. R. Dehoff, and S. S. Babu, "Towards high-temperature applications of aluminium alloys enabled by additive manufacturing," *International Materials Reviews,* vol. 67, no. 3, pp. 298-345, 2021.

9- E. Georgantzia, M. Gkantou, and G. S. Kamaris, "Aluminium alloys as structural material: A review of research," *Engineering Structures,* vol. 227, 2021.

10-M. C. Santos, A. R. Machado, W. F. Sales ,M. A. S. Barrozo, and E. O. Ezugwu, "Machining of aluminum alloys: a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 86, no. 9-12, pp. 3067-3080, 2016.

11-G. Langelandsvik, O. M. Akselsen, T. Furu, and H. J. Roven, "Review of Aluminum Alloy Development for Wire Arc Additive Manufacturing," *Materials (Basel),* vol. 14, no. 18, 2021.

12-R. D. Ardika, T. Triyono, N. Muhayat, and Triyono, "A review porosity in aluminum welding," *Procedia Structural Integrity,* vol. 33, pp. 171 ,۱۸۰-.۲۰۲۱

13-R. P. Verma and M. Kumar Lila, "A short review on aluminium alloys and welding in structural applications," *Materials Today: Proceedings,* vol. 46, pp. 10687-10691, 2021.

14-Y. Sun, W. Gong, J. Feng, G. Lu, R. Zhu, and Y. Li, "A Review of the Friction Stir Welding of Dissimilar Materials between Aluminum Alloys and Copper," *Metals,* vol. 12, no. 4, 2022.

15-A. Rabiezadeh, F. Arghavani, and M. Mokhtari, "Effect of Adding CNT on Dissimilar Welding of Aluminium Alloys by FSW," *Transactions of the Indian Institute of Metals,* vol. 74, no. 8, pp. 1883-1894, 2021.

16-S. Pakdaman and A. Rabiezadeh, "Joining of Commercial Pure Copper via Self-reacting Friction Stir Welding," *Iranian Journal of Materials Forming,* vol. 7, no. 2, pp. 44-55, 2020.

17-A. Salafzon and A. Rabiezadeh, "Dissimilar welding of 5xxx and 7xxx aluminum alloy by self-reacting friction stir welding method," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering,* vol. 8, no. 1, pp. 1-13, 2021.

18-P. Kah, R. Rajan, J. Martikainen, and R. Suoranta, "Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering,* vol. 10, no. 1, 2015.

19-J. Stephen Leon, G. Bharathiraja, and V. Jayakumar, "A review on Friction Stir Welding in Aluminium Alloys," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* vol. 954, no. 1, p. 012007, 2020.

20-Q. Li *et al.*, "Segregation in fusion weld of 2219 aluminum alloy and its influence on mechanical properties of weld," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* vol. 27, no. 2, pp. 258-271, 2017.

21-H. Nikbakht1, M. Khanzadeh, and H. Bakhtiari, "Investigation of the effect of explosive welding variables on the corrosion behavior of the joint of two explosive layers of 5000 series copper-copper sheets," (in eng), *IRANIAN JOURNAL OF Science and Technology of Welding,* Research vol. 7, no. 2, pp. 13-24, 2022.

22-N. Taheri Moghaddam, A. Rabiezadeh, A. Khosravifard, and L. Ghalandari, "Joining of the

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]

32-S. Sabari, I. Galvão ,C. Leitão, and D. M. Rodrigues, "Influence of Softening Mechanisms on Base Materials Plastic Behaviour and Defects Formation in Friction Stir Lap Welding," *Journal of Manufacturing and Materials Processing,* vol. 4, no. 4, 2020.

33-E. Mercan, Y. Ayan, and N. Kahraman, "Investigation on joint properties of AA5754 and AA6013 dissimilar aluminum alloys welded using automatic GMAW," *Engineering Science and Technology, an International Journal,* 2019.

34-H. Lalvani and P. Mandal, "Cold forming of Al-5251 and Al-6082 tailored welded blanks manufactured by laser and electron beam welding," *Journal of Manufacturing Processes,* vol. 68, pp. 1615-1636, 2021. (Article in Press)

35-A. Yürük, B. Çevik, and N. Kahraman, "Analysis of mechanical and microstructural properties of gas metal arc welded dissimilar aluminum alloys (AA5754/AA6013)," *Materials Chemistry and Physics,* vol. 273, 2021.

36-P. Rani and R. S. Mishra, "Influence of Reinforcement with Multi-Pass FSW on the Mechanical and Microstructural Behavior of Dissimilar Weld Joint of AA5083 and AA6061," *Silicon,* 2022. (Article in Press)

37-H. Jia, K. Wu, Y. Sun, F. Hu, and G. Chen, "Evaluation of axial force, tool torque and weld quality of friction stir welded dissimilar 6061/5083 aluminum alloys," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,* vol. 37, pp. 267-277, 2022.

38-A. K. Bodukuri, K. Eswaraiah, K. Rajendar, and S. A, "Comparison of Aluminum Alloy 5083 properties on TIGW and FSW Processes," *Materials Today: Proceedings,* vol. 4, no. 9, pp. 10197-10201, 2017.

39-M. Samiuddin ,J.-l. Li, M. Taimoor, M. N. Siddiqui, S. U. Siddiqui, and J.-t. Xiong, "Investigation on the process parameters of TIG-welded aluminum alloy through mechanical and microstructural characterization," *Defence Technology,* vol. 17, no. 4, pp. 1234-1248, 2021.

40-Y. Liang, J. Shen, S. Hu, H. Wang, and J. Pang, "Effect of TIG current on microstructural and mechanical properties of 6061-T6 aluminium alloy joints by TIG–CMT hybrid welding," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 255, pp. 161-174, 201.

41-A. K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian, and K. Elangovan, "Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 40, no. 3-4, pp. 286-296, 2009.

5083 aluminum alloy using the bobbin tool friction stir welding technique," (in eng), *IRANIAN JOURNAL OF Science and Technology of Welding,* Research vol. 7, no. 2, pp. 25-37, 2022.

23-A. Faye, Y. Balcaen, L. Lacroix, and J. Alexis, "Effects of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the AA6061 aluminium alloy joined by a Yb: YAG laser beam," *Journal of Advanced Joining Processes,* vol. 3, 2021.

24-T. Luijendijk, "Welding of dissimilar aluminium alloys," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 103, no. 1, pp. 29-35, 2000.

25-J. Wilden and J.-P. Bergmann, "Mechanised Plasma-Powder-Arc-Welding (PPAW) of Aluminium Sheets," *Advanced Materials Research,* vol. 6-8, pp. 225-234, 2005.

26-L. A. Pinto, L. Quintino, R .M. Miranda, and P. Carr, "Laser Welding of Dissimilar Aluminium Alloys with Filler Materials," *Welding in the World,* vol. 54, no. 11, pp. R333-R341, 2010.

27-S. Jannet, P. K. Mathews, and R. Raja, "Comparative investigation of friction stir welding and fusion welding of 6061 T6 – 5083 O aluminum alloy based on mechanical properties and microstructure," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences,* vol. 62, no. No 4, pp. 791-795, 2014.

28-B. Srinivas, K. Sivaprasad, N. K. Babu, V. Muthupandi, and P. Susila, "Studies on Dissimilar Welding of AA5083 and AA6061 Alloys by Laser Beam Welding," *Advanced Materials Research,* vol. 626, pp. 701-705, 2012.

29-M. I. Costa, D. Verdera, C. Leitão, and D. M. Rodrigues, "Dissimilar friction stir lap welding of AA 5754-H22/AA 6082-T6 aluminium alloys: Influence of material properties and tool geometry on weld strength," *Materials & Design,* vol. 87, pp. 721-731, 2015.

30-M. Ghaffarpour, M. Kazemi, M. J. Mohammadi Sefat, A. Aziz, and K. Dehghani, "Evaluation of dissimilar joints properties of 5083-H12 and 6061-T6 aluminum alloys produced by tungsten inert gas and friction stir welding," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications,* vol . ,۲۳۱no. 3, pp. 297-308, 2015.

31-T. Lee, "Resistance spot weldability of heat-treatable and non-heat-treatable dissimilar aluminium alloys," *Science and Technology of Welding and Joining,* vol. 25, no. 7, pp. 543-548, 2020.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-15]