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

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

Volume 9, Number 2, 2024



Microstructural and mechanical properties of dissimilar joining of AA5052 and AA6061 by friction stir welding

M. Hajiha, A. Farzadi*, S. A. Samadani Agdam, A.Shabanzadeh, S. Ramezani
Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

Received 21 February 2023 ; Accepted 18 June 2023

Abstract

5xxx and 6xxx series alloys are among the most widely used aluminum alloys in various industries, including automobile, shipbuilding and aviation industries. In this research, the joint of two alloys AA6061-T6 and AA5052-H12 was investigated at 4 transmission speeds of 60, 90, 120 and 180 mm/min and 3 rotation speeds of 600, 800 and 1000 rpm. These investigations were carried out in the condition that each of the two alloys was placed in two progressive and regressive sides. The results of these studies showed that the highest tensile strength is when the AA5052 sample is placed on the advancing side and the transfer speed is 90 mm/min and the rotation speed is 600 rpm, and in this case, the final tensile strength value is equal to 197 MPa. In addition, the results showed that, generally, the tensile strength decreases with an increase in the transmission speed at a constant rotational speed, and with an increase in the rotational speed at a constant transmission speed, the tensile strength increases. In addition, microscopic and macroscopic examination of the sections of all samples was performed and various areas and defects were examined. According to the investigations carried out on the microstructure, the grain size in the weld nugget compared to the base metal, HAZ and TMAZ decreases. The grain size in HAZ is the largest in all samples, and this causes a decrease in weld strength in this zone.

Keywords:Friction stir welding, Aluminum alloys, 5000 series, 6000 sries, Mechanical properties.

Corresponding Author: farzadi@aut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره2، پاییز و زمستان 1402



ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال نامشابه آلیاژهای AA5052 و AA6061 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

محمدرضا حاجیها، علی فرزادی*، سیدعلی صمدانی اقدم، امیرحسین شعبان زاده، سحر رمضانی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1401/12/02 ؛ پذیرش مقاله: 1402/03/28

چکیده

آلیاژهای سری 5xxx و 6xxx از پرکاربردترین آلیاژهای آلومینیوم در صنایع مختلف از جمله صنایع خودرو، کشتی‌سازی و هواپیمایی است. در این پژوهش اتصال دو آلیاژ AA6061-T6 و AA5052-H12 در چهار سرعت انتقالی 60، 90، 120 و 180 میلی‌متر بر دقیقه و سه سرعت چرخشی 600، 800 و 1000 دور بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی‌ها در شرایطی انجام شد که هر کدام از دو آلیاژ در دو سمت پیشرونده و پسرونده قرار گرفته باشد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که بیشترین استحکام کششی در شرایطی است که نمونه AA5052 در سمت پیشرونده قرار گرفته و سرعت انتقالی 90 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخشی 600 دور بر دقیقه باشد و در این حالت مقدار استحکام نهایی کششی برابر با 197 مگاپاسکال است. علاوه بر این نتایج این تحقیق نشان داد که به طور کلی با افزایش سرعت انتقالی در سرعت چرخشی ثابت استحکام کششی کاهش و با افزایش سرعت چرخشی در سرعت انتقالی ثابت، استحکام کششی افزایش می‌یابد. علاوه بر این از مقاطع تمام نمونه‌ها بررسی میکروسکوپی و ماکروسکوپی به عمل آمد و نواحی و عیوب مختلف بررسی شد. با توجه به بررسی‌های انجام شده بر ریزساختار، اندازه دانه‌ها در دکمه جوش نسبت به فلز پایه، HAZ و TMAZ کاهش یافت. اندازه دانه در HAZ در تمامی نمونه‌ها بیشترین مقدار را نسبت به مناطق دیگر دارد و این سبب کاهش استحکام جوش در این منطقه شود.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصکاکی اغتشاشی، آلیاژهای آلومینیم، سری 5000، سری 6000، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: farzadi@aut.ac.ir

1- مقدمه

استفاده از آلیاژهای آلومینیوم برای کاهش وزن در وسایل نقلیه هوایی، دریایی و زمینی به سرعت به دلیل چگالی کم، مقاومت در برابر خوردگی عالی، خواص شکل دهی خوب و خواص مکانیکی قابل ارتقا در حال افزایش است [1]. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، اتصال حالت جامد نسبتا جدیدی است که در سال 1991 توسط انجمن جوشکاری انگلستان (TWI) توسعه داده شد.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از تکنیک‌های امیدوارکننده برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم غیر مشابه است [2]. این روش اصولا برای اتصال آلیاژهایی از آلومینیم که جوشکاری آن‌ها با روش‌های جوشکاری ذوبی با عیوبی از قبیل ترک انجمادی، تخلخل، اعوجاج همراه است، مناسب است. در این روش به دلیل حرارت ورودی کم، عدم ذوب و انجماد فلز پایه حین جوشکاری، این عیوب حذف می‌شوند و استحکام اتصال به طور چشمگیری بهبود می‌یابد. این خصوصیات برای آلیاژهای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

آلومینیم استحکام بالای گروه‌های 2000 و 7000 که جوش‌پذیری ضعیفی دارند، حائز اهمیت است [3،4]. ورما و همکاران در پژوهشی به بررسی اتصال آلومینیم 1100 و 6061 مورد استفاده در صنایع هوافضا پرداختند. آن‌ها در این آزمایش دو قطعه‌کار از جنس‌های یاد شده و به ضخامت 5 میلی‌متر را با استفاده از ابزاری با پین استوانه‌ای جوش دادند، نتایج تست کشش آن‌ها نشان داد که استحکام جوش بدست آمده کمتر از استحکام ورق آلیاژ 6061 است ولی به استحکام ورق آلیاژ 1100 بسیار نزدیک است [5]. راج‌کومار و همکاران به بررسی جوش انجام شده روی اتصال نامشابه آلومینیم 6061 و 5052 در شرایط سرعت چرخشی 710 rpm و سرعت‌های انتقالی 20 و 28 mm/min پرداختند. نتایج نشان داد که در شرایطی که سرعت انتقالی پایین باشد، اختلاط در منطقه اغتشاش به خوبی اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج تست کشش نشان داد که جوش‌ها با سرعت جوشکاری (انتقالی) کمتر، استحکام بالاتری دارند [6]. جمشیدی اول و همکاران در تحقیقی به بررسی تنش باقیمانده و ریزساختار در جوش نامشابه آلومینیم AA7075-T6 و AA6082-T6 پرداختند. مشاهدات آن‌ها نشان داد که در ناحیه اغتشاشی و فصل مشترک دو آلیاژ نفوذ اتمی اتفاق می‌افتد. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش حرارت ورودی بیشینه تنش باقیمانده کاهش و اندازه این ناحیه افزایش پیدا می‌کند. همچنین پیرسازی طبیعی ناحیه اغتشاشی باعث کاهش 15 تا 20 مگاپاسگالی تنش پسمانده می‌شود [7]. بوفا و همکاران در تحقیقی به بررسی اتصال آلیاژهای AZ31 و AA6061-T6 پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیبات بین‌فلزی اصلی‌ترین دلیل افت کیفیت اتصال‌های انجام شده است. آن‌ها همچنین به بررسی تاثیر جابجایی قطعه کار نیز پرداختند و نتیجه گرفتند که اتصالات سالم تنها زمانی که آلیاژ پایه منیزیم در سمت پیشرونده باشد اتفاق می‌افتد [8]. خانا و همکاران در تحقیقی به بررسی اتصال AA6061-T6 و AA8011-H14 و تاثیر جابجایی آلیاژها در طرفین جوش و همچنین انحراف ابزار از خط مرکزی جوش پرداختند. این بررسی در شرایطی‌که دیگر پارامترهای جوش ثابت هستند، اتفاق می‌افتد و برای اطمینان از کیفیت جوش و نواحی زیر سطح، رادیوگرافی روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج توزیع دمایی نشان داد، در شرایطی که از 1 mm آفست در فلز نرم‌تر استفاده شود، دما در سمت پیشرونده کمی بیشتر و گراف دمایی بدست آمده نامتقارن است. همچنین تحلیل‌های ریزساختاری نشان داد که در شرایطی فلز نرم‌تر در سمت پیشرونده باشد و آفست روی آن قرار گیرد جوش‌های بهتری به دست خواهد آمد [9]. زمانخان و همکاران در تحقیقی به بررسی خواص ریزساختاری در اتصال مشابه و نامشابه AA2219 و AA7475 پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در تمامی شرایط جوشکاری کمترین مقدار سختی در TMAZ و در سمت پسرونده اتفاق افتاده است [10]. اینفانته و همکاران در تحقیقی به بررسی رفتار خستگی در اتصال نامتجانس AA6082 و AA5754 پرداختند. نتایج تست خستگی نشان داد که خستگی در حالت اتصال مشابه و نامشابه نسبت به خود فلزات پایه کمتر است [11]. ابولوسورو و همکاران در تحقیقی به بررسی اثر سرعت چرخشی ابزار در سرعت انتقالی ثابت روی توزیع دما، خواص مکانیکی و ریزساختار جوش‌های AA6101-T6 و AA7075-T651 پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دما با گذشت زمان افزایش می‌یابد و در سمت پیشرونده نسبت به پسرونده بیشتر است. همچنین نتایج تست کشش نشان داد که استحکام نهایی با افزایش دما کاهش یافته است و شواهد ریزساختاری نشان داد که در ناحیه اغتشاشی ناپیوستگی، و بیشترین نفوذ و درهم‌گسیختگی در سرعت‌های میانی اتفاق افتاده است [12]. ایلانگوان و همکاران در تحقیقی بر اتصال مشابه و نامشابه AA5083 و AA6061 به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش حاصل پرداختند. در آزمایش آن‌ها نواحی مختلف جوش را با میکروسکوپ نوری و روبشی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند بیشترین سختی در اتصالات نامشابه 115 ویکرز و بازدهی اتصال 56% است که وابسته به ماهیت بدون عیب ناحیه جوش و دانه‌های ریز این ناحیه است [13]. جرارد و همکاران در تحقیقی به بررسی اتصال نامشابه AA7020-T651 و AA6060-T6 پرداختند. آزمایش‌ها در شرایط سرعت انتقالی 1100 mm/min تا 300 و سرعت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

چرخشی 1000 تا 2000 rpm مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد با اینکه تجهیزات اندازه‌گیری بسیار حساس به دما بودند ولی اختلاف دمایی خاصی بین دو سمت جوش مشاهده نشده است. همچنین نتایج آزمون کشش و سختی سنجی نشان داد که صرف نظر از قرارگیری هر آلیاژ در هر سمت، شکست از ناحیه با سختی کمتر اتفاق می‌افتد [14]. ساندارام و همکاران در تحقیقی به بررسی جوشکاری آلیاژهای مشابه AA2024 و AA5083 پرداختند. آن‌ها در این پژوهش تاثیر پارامترهایی همچون شکل پین، سرعت چرخشی ابزار، نیروی محوری ابزار را روی خواص مکانیکی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جوش‌هایی با ابزاری با شکل شش‌گوشه بیشترین مقدار تنش کششی و ازدیاد طول و ابزار با شکل استوانه‌ای کمترین استحکام کششی و ازدیاد طول را داشته است [15]. کتاوات کومار و همکاران در بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غیرمشابه بر جریان مواد به این نتیجه رسیدند که سرعت‌های چرخشی بالاتر باعث اختلاط بهتر و بهبود خواص مکانیکی می‌شود. مقادیر استحکام کششی بریدگی با اختلاط مواد در منطقه هم‌زن همبستگی داشت و بالاترین مقدار مقاومت کششی بریدگی در 1400 rpm و 60 mm/min به‌دست آمد [16]. تورژوسکی و همکاران در بررسی تأثیر سرعت حرکت و سرعت چرخش ابزار بر ساختار ماکروساختی، ریزسختی و خواص مکانیکی اتصالات غیر مشابه آلیاژهای آلومینیوم 7020-T651 و 5083-H111، نمونه‌های ساخته شده با پارامترهای 800 rpm و 200 mm/min بهترین خواص مقاومتی را داشتند [17]. لاسکا و همکاران در مطالعه اتصالات غیرمشابه آلیاژهای AA5083 و AA6060 دریافتند با افزایش سرعت ابزار، سختی در ناحیه قطعه جوش افزایش می‌یابد که دلیل آن گرمای ورودی بیشتر و تبلور مجدد مؤثرتر است [18]. وانگ و همکاران در بررسی مکانیسم‌های جریان مواد در جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی غیرمشابه سه آلیاژ کارشده T351-2024، 6061-T651 و 7075-T735، مشخص شد که کاهش سرعت چرخش ابزار کیفیت جوش را بهبود می‌بخشد، در حالی که افزایش سرعت حرکت منجر به استحکام جوش بالاتر می‌شود [19]. همانطور که در بررسی‌های انجام شده نشان داده شد، اتصال آلیاژهای نامشابه آلومینیم یکی از موضوعات پرکاربرد صنایع و جالب در زمینه‌های تحقیقاتی است، به همین منظور هدف از انجام این پروژه تاثیر متغیرهایی نظیر سرعت انتقالی، سرعت چرخشی، و محل قرارگیری آلیاژها در سمت‌های پیشرونده و پسرونده روی موروفولوژی ریزساختار و خواص مکانیکی حاصله از اتصال است. بدین منظور در این پژوهش جوش‌های مورد نظر در هشت حالت مختلف انجام شد و بررسی‌های مکانیکی و ریزساختاری روی آن‌ها انجام شد.

2- روش آزمایش

در این تحقیق از ورق‌های آلومینیم 5052 و از آلیاژ 6061 استفاده شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژهای یادشده در جدول(1) نشان داده شده است. روش اندازه‌گیری ترکیب، طیف سنجی نشر نوری یا کوانتومتری بود. ورق‌های 5052 در شرایط H38 و ورق‌های 6061 در شرایط T6 مورد استفاده قرار گرفتند. طول و عرض ورق‌ها به ترتیب 200 و 120 و ضخامت آن‌ها 5 میلی‌متر در نظر گرفته شد. سطح ورق‌ها با استفاده از برس سیمی و محلول استون اکسید و چربی زدایی شد و برای جوشکاری آماده گردید. در ضمن انجام جوشکاری اثر پارامترهای مختلف جوشکاری بررسی شد. پارامترهای جوشکاری مورد بررسی عبارتند از سرعت انتقالی، سرعت چرخشی ابزار و تاثیر محل قرارگیری هرکدام از آلیاژها در سمت پیش یا پسرونده. در این تحقیق از یک ابزار از جنس فولاد گرم کار (H13) که به دو قسمت شانه و پین تقسیم شده است، استفاده شد. قطر شانه ابزار 15 mm و پین آن استوانه‌ای رزوه‌دار به قطر 5 و طول 4/8 mm بود. برای جوش، ورق‌ها به صورت طرح اتصال سر به سر در کنار هم قرار داده شدند و سپس اجزا توسط قید و بند فولادی محکم شدند و آماده جوشکاری گردیدند. در تمام آزمایش‌های انجام شده میزان فرورفتن ابزار 0/1 mm و زاویه ابزار با قطعه کار 3 درجه بود. از آنجا که رزوه‌های پین ابزار راست گرد بودند، جهت چرخش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

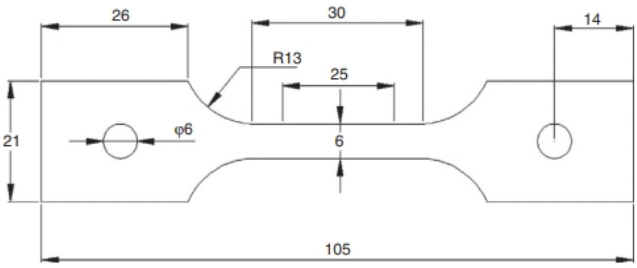
ابزار پادساعتگرد بود. در جدول(2) سرعت‌های چرخشی و انتقالی استفاده شده برای هر جوش ذکر شده است. در این پژوهش، از دستگاه کشش اینسترون M200 با حداکثر نیروی 20 نیوتن و نرخ کشش 0/5 میلی‌متر بر دقیقه و دقت اندازه‌گیری 0/1 نیوتن استفاده گردید. نمونه‌ها در این آزمون تحت بار عمودی در جهتی عمود بر جهت جوشکاری قرار گرفتند. سپس مطابق شکل 1 بر اساس استاندارد E8M/ASTM E8-11 توسط دستگاه وایرکات، از هر نمونه جوش 2 نمونه آزمون کشش تهیه شد که در مجموع 16 نمونه آزمون کشش به دست آمد [20].

جدول1-ترکیب شیمیایی مواد پایه استفاده شده در این تحقیق.

آلیاژ	Mg	Mn	Cu	Cr	Si	Fe	Zn	Ti
AA5052	2/5	0/1	0/1	0/25	0/25	0/4	0/1	-
AA6061	1	-	0/25	0/19	0/6	0/7	0/25	0/15

جدول2-شرایط جوشکاری نمونه‌ها.

شماره آزمایش	فلز پسرونده	فلز پیشرونده	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)
1	AA5052	AA6061	60	600
2	AA5052	AA6061	90	600
3	AA5052	AA6061	120	600
4	AA5052	AA6061	180	600
5	AA5052	AA6061	90	800
6	AA5052	AA6061	90	1000
7	AA6061	AA5052	90	600
8	AA6061	AA5052	90	1000



شکل1-طرح نقشه استفاده شده برای نمونه‌های آزمون کشش [20].

بررسی کیفی جوش‌ها با مقطع زدن اتصالات و انجام بررسی‌های متالوگرافی انجام شد. درشت‌ساختار و ریزساختار مناطق مختلف TMAZ و HAZ و دکمه جوش توسط میکروسکوپ نوری Olympus BH2 مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تهیه نمونه‌های متالوگرافی نمونه‌ها در جهت عمود بر جوش برش خوردند و سپس مطابق استاندارد ASTM E3، سطح مقطع مورد نظر توسط کاغذ سمباده 120 تا 5000 آماده‌سازی و پولیش شد. سپس برای اچ کردن نمونه‌های متالوگرافی محلول ذکر شده در جدول(3) مورد استفاده قرار گرفت. زمان هر مرحله بر اساس استاندارد تعیین شد [21].

جدول3- ترکیب محلول‌های اچانت و روش استفاده از آن‌ها [21].

اچانت	ترکیب
پلوتون (Poulton reagent) درشت ساختار	12میلی‌لیتر هیدروکلریدریک اسید + 6 میلی‌لیتر نیتریک اسید + 1 میلی‌لیتر هیدروفلوئوریک اسید + 1 میلی‌لیتر آب مقطر
پلوتون اصلاح شده	50 میلی‌لیتر محلول پلوتون+ 25 میلی‌لیتر نیتریک اسید + 40 میلی‌لیتر از محلول کرومیک 3 گرم کرومیک اسید در 10میلی‌لیتر آب مقطر

3- نتایج و بحث

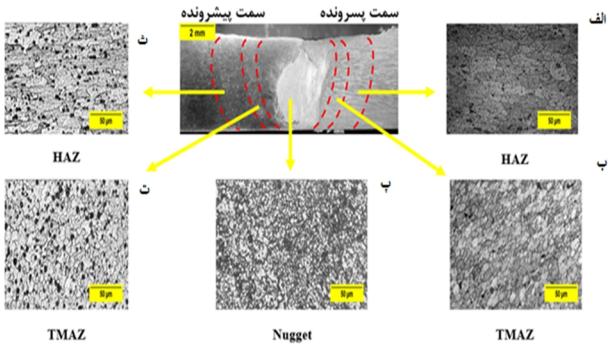
3-1- بررسی‌های میکروسکوپی

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از بررسی‌های ریزساختاری و درشت ساختاری انجام شده بر نمونه‌های جوشکاری شده پرداخته شده است. در شکل‌های(2 الی 5) تصاویر درشت ساختار در کنار تصاویر ریزساختار مربوط به هر یک از مناطق جوش آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، کلیه نمونه عاری از عیب و سالم هستند. تصاویر درشت ساختاری حاصل از مقاطع عرضی جوش‌ها شامل 4 منطقه اغتشاش (دکمه جوش)، ناحیه متاثر از حرارت، ناحیه متاثر از حرارت و کار مکانیکی و فلز پایه است.

در نمونه‌های 1، 2، 3 و 4 هدف بررسی اثر سرعت پیشروی در سرعت چرخشی ثابت (600 دور بر دقیقه) است. همان طور که در تصاویر درشت ساختاری شکل‌های(2 تا 5) می‌توان مشاهده نمود، در سرعت پیشروی 60 و 90 میلی‌متر بر دقیقه سطح

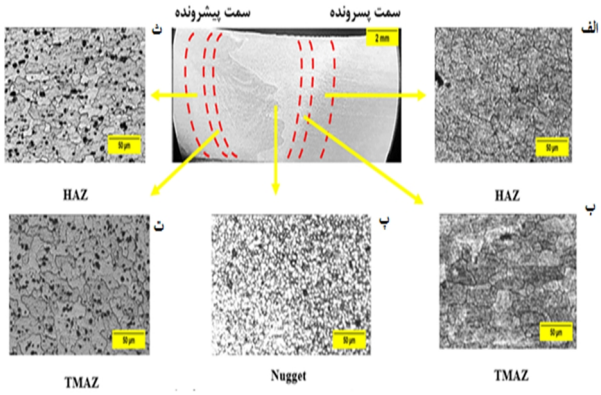
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

مقطع جوش عاری از حفره و عیب تونل است، اما در عین حال می‌توان در سطح مقطع آن‌ها عیب باند بوسه (KB) را مشاهده کرد. همانطور که در مرجع [22] گفته شده است این عیب ناشی از به داخل کشیده شدن لایه اکسیدی از سطح و قرارگرفتن آن در لابه‌لای مواد در خط اتصال است. همچنین تشخیص این عیب با ریزساختار بسیار دشوار است و برای اطمینان بیشتر باید از آزمون‌های ترکیب شیمیایی مانند EDS برای مشخصه‌یابی ذرات اکسیدی استفاده کرد [23]. ژو و همکاران در پژوهشی به بررسی اثر KB روی استحکام خستگی اتصالات AA5083 پرداختند و نتیجه گرفتند وجود این لایه اکسیدی می‌تواند عمر خستگی این اتصالات را 0/05 تا 0/025 برابر حالت بدون عیب گرداند [24]. در مقاطع نمونه‌های 3 و 4 حفراتی مشاهده می‌شود که به اصلاح به آن‌ها عیب تونلی و حفرات کرمی شکل می‌گویند. علت پدید آمدن این حفرات می‌تواند ناشی از انتخاب نادرست پارامترهای جوشکاری همچون سرعت چرخشی، سرعت انتقالی، نیروی عمودی ابزار، آفست ابزار و شکل نامناسب ابزار باشد [25]. حال با توجه به این که در نمونه‌های 1 و 2 این حفرات مشاهده نشده است، می‌توان نتیجه گرفت افزایش سرعت انتقالی باعث ایجاد این عیب شده است. در واقع افزایش سرعت انتقالی باعث کاهش حرارت ورودی و در نتیجه عدم سیلان مواد در بعضی نقاط و ایجاد تونل شده است [26]. لذا با توجه به این مسئله می‌توان گفت که حرارت ورودی در نمونه 1 و 2 نسبت به نمونه‌های 3 و 4 میزان بالاتری داشته اند و حد بیشینه افزایش سرعت انتقالی برای عدم وجود عیب تونل در سرعت چرخشی 600 دور بر دقیقه، چیزی در حدود 90 میلی‌متر بر دقیقه است. همچنین با بررسی دقیق‌تر دو نمونه 3 و 4 مشاهده می‌شود که عیب تونل در سمت پسرونده و در بخشی که آلیاژ AA5052 قرار داشته است، اتفاق افتاده است. همانطور که پیش‌تر گفته شد، عملیات حرارتی آلیاژ AA5052 از نوع H38 و آلیاژ AA6061 از نوع T6 است. به طور کلی سختی AA5052 حدود 77 برینل و برای AA6061 در حدود 95 برینل گزارش شده است [27]. خان و همکاران در تحقیقی روی AA5083-H116 و AA6061-T6 نشان دادند که عیب تونلی در شرایط بدون آفست و به سمتی که ماده مستحکم‌تر قرار دارد اتفاق می‌افتد [25]. این موضوع با مشاهدات خان در تضاد است. دلیل این موضوع می‌تواند به پارامترهای جوشکاری نظیر سرعت انتقالی و سرعت چرخشی و همچنین مقدار انرژی ذخیره شده از طریق کار سرد مربوط باشد. همانطور که در تصاویر ریزساختار شکل(4) مشاهده می‌شود با مقایسه تصاویر بدست آمده از ناحیه HAZ و TMAZ از دو سمت پیشرونده و پسرونده می‌توان نتیجه گرفت در سمت پیشرونده جهت‌گیری دانه‌ها در بخش TMAZ نسبت به HAZ به شدت تغییر کرده است. به عبارتی می‌توان گفت در ناحیه HAZ دانه‌ها در جهت نورد کشیده شده‌اند، ولی در بخش TMAZ به واسطه تبلور مجدد دینامیکی، دانه‌هایی جدید شکل گرفته‌اند. این موضوع باعث کاهش استحکام در ناحیه پیشرونده می‌شود. اما در سمت پسرونده و در ناحیه TMAZ دانه‌ها هنوز شکل کشیده حاصل از نورد را حفظ کرده اند و در نتیجه می‌توان گفت در این ناحیه تبلور یا انجام نشده است و یا به طور کامل انجام نشده است. همچنین در تمام شکل‌های(2 تا 5) ذرات سیاه رنگ و مدور شکلی در مرز دانه دیده می‌شود که به احتمال زیاد مربوط به رسوب Mg_2Si است که در AA6061 وجود دارد [28].

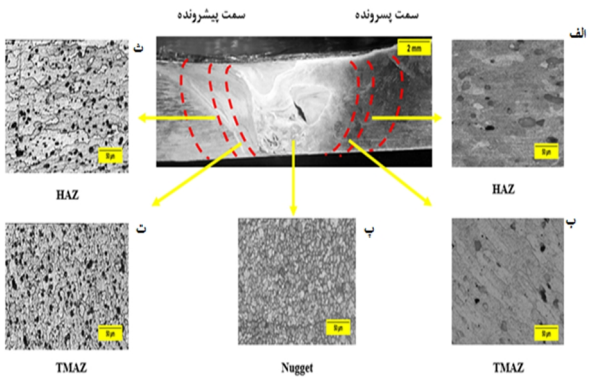


شکل2-مقطع عرضی نمونه شماره 1
(سرعت چرخشی 600 rpm و سرعت پیشروی 60 mm/min) و تصویر
میکروسکوپی منطقه الف- متاثر از حرارت در سمت پسرونده،
ب- متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پسرونده،
پ- اغتشاشی دکمه جوش،
ت- متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پیشرونده،
ث- متاثر از حرارت در سمت پیشرونده.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

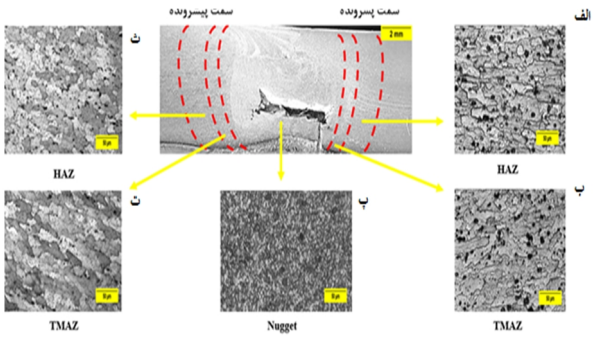


شکل3-مقطع عرضی نمونه شماره 2 (سرعت چرخشی 600 rpm و سرعت پیشروی 70 mm/min) و تصویر میکروسکوپی منطقه الف) ناحیه متاثر از حرارت در سمت پسرونده، ب- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پسرونده، پ-ناحیه اغتشاشی دکمه جوش، ت- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پیشرونده، ث- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پیشرونده.



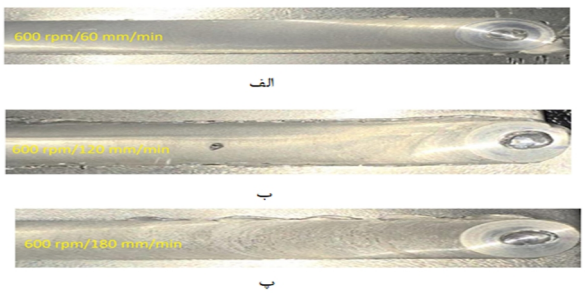
شکل4-مقطع عرضی نمونه شماره 3 (سرعت چرخشی 600 rpm و سرعت پیشروی 80 mm/min) و تصویر میکروسکوپی منطقه الف-ناحیه متاثر از حرارت در سمت پسرونده، ب- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پسرونده، پ- ناحیه اغتشاشی دکمه جوش، ت-ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پیشرونده، ث-ناحیه متاثر از حرارت در سمت پیشرونده.

در شکل(6) کیفیت سطحی سه نمونه 1، 3 و 4 را مشاهده می‌کنیم. همان‌گونه که از این تصویر پیداست نمونه 1 دارای سطحی صاف‌تر با زبری کمتر و بدون زائده فلش است و لذا تاثیر سرعت انتقالی در سطح این نمونه‌ها نیز پیداست. لازم به توضیح است که فلش لزوما ماهیتی منفی ندارد و معمولا به خاطر عمق فروروی است و گاهی برای اطمینان از نفوذ کامل مخصوصا در اتصالاتی که قید و بند ضعیف است به وجود می‌آید [23].



شکل5- مقطع عرضی نمونه شماره 4 (سرعت چرخشی 600 rpm و سرعت پیشروی 90 mm/min) و تصویر میکروسکوپی منطقه الف- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پسرونده، ب- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پسرونده، پ- ناحیه اغتشاشی دکمه جوش، ت- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پیشرونده، ث- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پیشرونده.

در شکل(6) کیفیت سطحی سه نمونه 1، 3 و 4 را مشاهده می‌کنیم. همان گونه که از این تصویر پیداست نمونه 1 دارای سطحی صاف‌تر با زبری کمتر و بدون زائده فلش است و لذا تاثیر سرعت انتقالی در سطح این نمونه‌ها نیز پیداست. لازم به توضیح است که فلش لزوما ماهیتی منفی ندارد و معمولا به خاطر عمق فروروی است و گاهی برای اطمینان از نفوذ کامل مخصوصا در اتصالاتی که قید و بند ضعیف است به وجود می‌آید [23].

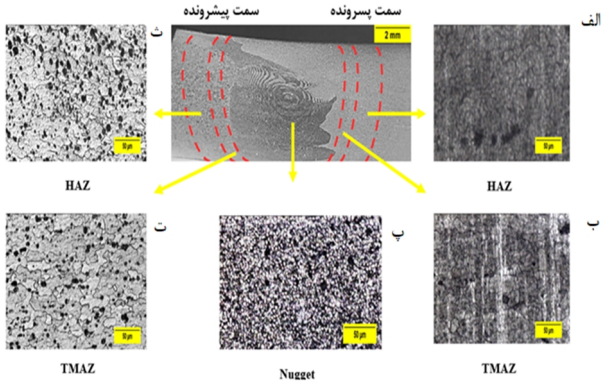


شکل6-کیفیت سطح (سرعت چرخشی 600 rpm و سرعت پیشروی به ترتیب 60،80 و 90 mm/min) الف- نمونه شماره 1، ب- نمونه شماره 3 و پ- نمونه شماره 4.

بعد از اثر سرعت انتقالی، اثر سرعت چرخشی در نمونه‌های 5 و 6 مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش سرعت چرخشی در

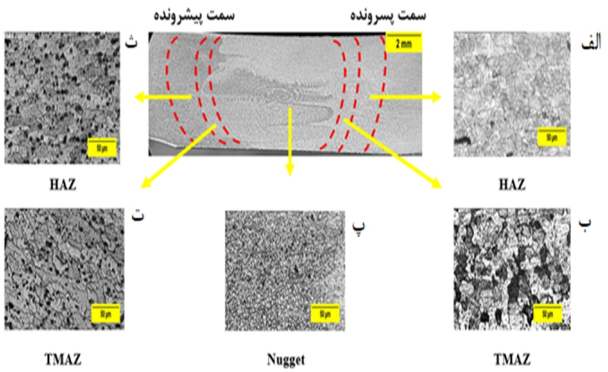
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

سرعت انتقالی ثابت (90mm/min) دانه‌های تبلور مجدد یافته در منطقه دکمه جوش به دلیل دریافت حرارت بیشتر، بیشتر رشد می‌کنند [26]. همچنین با افزایش سرعت چرخشی، الگوی سیلان ماده دچار تحول شده و کم کم به الگوی لایه‌ای (از سرعت چرخشی 600 rpm تا 1000 rpm) تبدیل شده است. بدین صورت که در منطقه اختلاط یک لایه از آلیاژ AA6061 و یک لایه از آلیاژ AA5052 را می‌توان مشاهده نمود [29]. در شکل‌های(7 و 8) به ترتیب نمونه‌های 5 و 6 الگوی سیلان حلقه‌های پیازی شکل نیز در قسمت مرکزی جوش به چشم می‌خورد.



شکل7-مقطع عرضی نمونه شماره 5 (سرعت چرخشی 800 rpm و سرعت پیشروی 90 mm/min) و تصویر میکروسکوپی منطقه الف- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پسرونده،
ب- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پسرونده،
پ- ناحیه اغتشاشی دکمه جوش،
ت- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پیشرونده،
ث- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پیشرونده.

در نمونه‌های 2، 6، 7 و 8 نیز به بررسی اثر نحوه قرارگیری نمونه‌ها در سمت پیشرونده و پسرونده در سرعت انتقالی ثابت و سرعت چرخشی متغیر پرداخته شده است. همان طور که در شکل‌های 3، 8، 9 و 10 مشخص است، الگوی سیلان مواد در سرعت‌های چرخشی یکسان تقریبا مشابه یکدیگر است. همچنین مشاهده می‌شود که الگوی پیازی شکل با افزایش سرعت چرخشی واضح‌تر شده است [30]. علاوه بر این با توجه به افزایش حرارت ورودی در نمونه‌های 6 و 8 رشد دانه بیشتری در مناطق مختلف جوش مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه دیگر درصد تاثیر سرعت چرخشی روی مقدار تبلور مجدد در شکل‌های(9 و 10) است. در نمونه 7 (شکل 9) دانه‌ها در ناحیه TMAZ و در سمت پسرونده جایی که آلیاژ AA6061 قرار دارد، تا حدودی شکل کشیده ناشی از عملیات نورد خود را حفظ کرده است. این در حالی است که در سمت پیشرونده به دلیل وجود نرخ برش بیشتر پتانسیل تبلور مجدد بیشتر است و دانه‌هایی با جهت گیری جدید شکل گرفته است. همچنین با افزایش سرعت چرخشی از 600 به 1000 دور بر دقیقه برای نمونه 8 مورفولوژی دانه‌ها در هر دو سمت پیشرونده و پسرونده تغییر می‌کند و دانه‌هایی جدید تشکیل می‌شود.

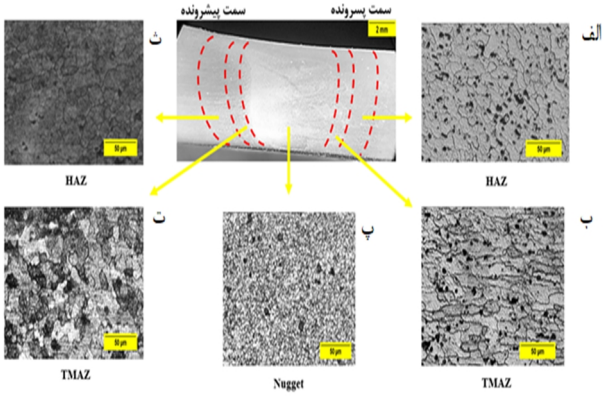


شکل8-مقطع عرضی نمونه شماره 6 (سرعت چرخشی 1000 و سرعت انتقالی 90 mm/min) و تصویر میکروسکوپی منطقه الف- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پسرونده،
ب- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پسرونده،
پ- ناحیه اغتشاشی دکمه جوش،
ت- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پیشرونده،
ث- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پیشرونده.

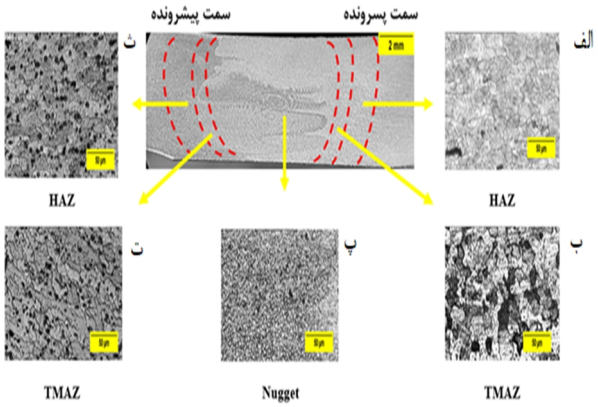
در نهایت با توجه به بررسی‌های انجام شده بر ریزساختار و تصاویر بدست آمده می‌توان گفت که ریز ساختار آلومینیم بعد از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دچار تغییر می‌شود و اندازه دانه‌ها در دکمه جوش نسبت به فلزپایه و HAZ و TMAZ تقریبا در همه نمونه‌ها کاهش یافته است. همچنین به نظر می‌رسد که در تمامی نمونه‌ها اندازه دانه در HAZ از اندازه دانه در TMAZ، دکمه جوش و همچنین از فلزپایه هم بزرگتر است که این موضوع با نتایج بدست آمده توسط دیگر محققان همخوانی دارد [31]. لذا اندازه دانه در HAZ در تمامی نمونه‌ها

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

بیشترین مقدار را نسبت به مناطق دیگر دارد و پیش‌بینی می‌شود که همین مسئله هم سبب کاهش استحکام جوش در این منطقه شود.



شکل9- مقطع عرضی نمونه شماره 7 (سرعت چرخشی 600 و سرعت انتقالی 90 mm/min) و تصویر میکروسکوپی منطقه ، الف- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پسرونده، ب- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پسرونده،
پ- ناحیه اغتشاشی دکمه جوش،
ت- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پیشرونده،
ث- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پیشرونده



شکل10-نمونه شماره 8 (سرعت چرخشی 1000 rpmو سرعت پیشروی 90 mm/min)، الف- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پسرونده،
ب- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پسرونده،
پ- ناحیه اغتشاشی دکمه جوش، ت- ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی در سمت پیشرونده، ث- ناحیه متاثر از حرارت در سمت پیشرونده.

3-2- بررسی خواص مکانیکی

3-2-1-آزمایش کشش

به منظور تعیین استحکام و محل شکست نمونه‌ها، از آزمون کشش تک‌محوره استفاده شد. نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌ها در جدول(4) و شکل خلاصه شده است.

با توجه به نتایج آزمون کشش می‌توان بیان کرد که نمونه جوشکاری شده در سرعت دورانی 600 دور در دقیقه و سرعت انتقالی 90 میلی‌متر بر دقیقه به گونه‌ای که آلیاژ AA5052 در سمت پیشرونده قرار دارد، دارای بالاترین استحکام UTS نسبت به بقیه نمونه‌ها است. دلیل این امر را می‌توان در ریزساختار و درشت ساختار این نمونه در شکل(9) بررسی کرد. همانطور که مشاهده می‌شود، در این نمونه هیچ اثری از KB و عیب تونل وجود ندارد. علاوه بر این، همانطور که گفته شد در سمت پیشرونده که آلیاژ AA5052 قرار دارد، تبلور مجدد اتفاق می‌افتد و دانه‌های جدید ایجاد می‌شود و در نتیجه شکل‌پذیری این بخش افزایش می‌یابد. از طرفی در سمت پسرونده با توجه به این مطلب که آلیاژ AA6061-T6 آلیاژی رسوب سخت شونده است، درشت شدن این رسوبات باعث کاهش استحکام (به دلیل اینکه انرژی فصل مشترک رسوب و پس زمینه در این حالت نسبت به رسوب ریز بیشتر می‌شود، یعنی انرژی کمتری برای جدا کردن این دو از هم لازم است) شده و جوانه ترک از این مناطق شروع شود و در نتیجه شکست از این بخش اتفاق افتاده است [31].

جدول4- نتایج حاصل از آزمون کشش.

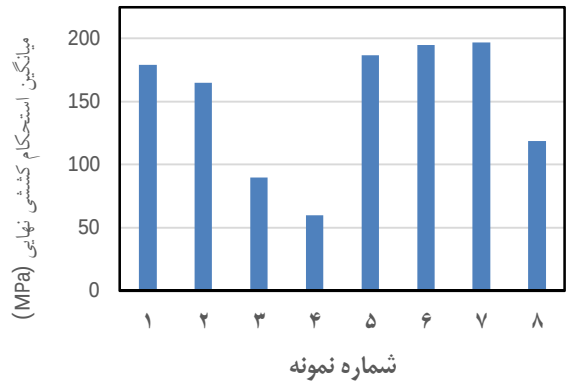
شماره نمونه	میانگین استحکام کششی نهایی (Mpa)	محل شکست
1	179	جوش
2	165	جوش
3	90	جوش
4	60	جوش
5	187	آلیاژ 6061
6	195	آلیاژ 6061
7	197	آلیاژ 6061
8	119	جوش

نمودار شکل(11) با نتایج بدست آمده از ریزساختار و درشت ساختار نمونه‌های 1 تا 4 مطابقت دارد. همانطور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های 3 و 4 که عیب تونل وجود داشت مقادیر استحکام نهایی بسیار پایین و به ترتیب در حدود 90 و

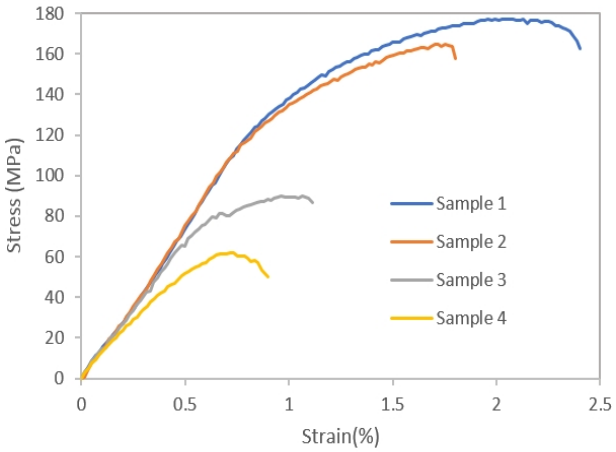
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

60 مگاپاسکال است که علت آن وجود عیوب تونلی ناشی از افزایش سرعت انتقالی و کاهش مقدار حرارت تولیدی است [30]. همانطور که در شکل(11) ملاحظه می‌شود، استحکام نهایی نمونه شماره 1 در حدود 179 مگاپاسکال و در نمونه شماره 2 در حدود 165 مگاپاسکال است. در بخش‌های قبل گفته شد که با افزایش سرعت انتقالی مقدار حرارت تولید شده در ناحیه اغتشاشی کاهش و اختلاط مواد به طور کامل انجام نمی‌شود. این موضوع باعث افزایش استحکام و افزایش چقرمگی (سطح زیر منحنی تنش کرنش) در نمونه شماره 1 نسبت به نمونه شماره 2 است. در نمونه‌های شماره 3 و 4 با افزایش سرعت انتقالی از 120 به 180 میلی‌متر بر دقیقه، استحکام نهایی از 90 به 60 مگاپاسکال افت کرده است و نمونه شماره 4 در کرنش کمتری (0/9%) نسبت به نمونه شماره 3 (1/1%) شکسته است.

شکل 12 مقایسه آزمون کشش نمونه‌های 2، 5 و 6 (مقایسه سرعت‌های چرخشی متفاوت در سرعت انتقالی ثابت 90 میلی‌متر بر دقیقه) را نشان می‌دهد. از مقایسه نمودارهای نمونه‌های 2، 5 و 6 در شکل(12) می‌توان مشاهده کرد که به ترتیب استحکام نهایی کششی نمونه‌های یاد شده برابر 165، 187 و 195 مگاپاسکال بدست آمده است و نشان دهنده این است که در سرعت انتقالی ثابت با افزایش سرعت دورانی، استحکام نهایی کششی افزایش می‌یابد [24]. همچنین کرنش شکست در نمونه شماره 5 بیشترین و در نمونه شماره 2 کمترین مقدار است. در نتیجه می‌توان گفت که چقرمگی (ناحیه زیر منحنی تنش و کرنش) نمونه 5 بیشتر از نمونه 6 و نمونه 6 بیشتر از نمونه 2 است. دلیل این موضوع احتمالا به خاطر افزایش اندازه دانه در نمونه شماره 6 نسبت به نمونه شماره 5 به دلیل تولید حرارت بیشتر در این نمونه است. البته از مقایسه ریزساختار و درشت ساختار این نمونه تفاوت چندانی ملاحظه نمی‌شود، در نتیجه احتمال می‌رود که این افت استحکام ناشی از وجود تغییرات ریزساختاری باشد که در بخشی غیر از مقطع متالوگرافی وجود داشته است.



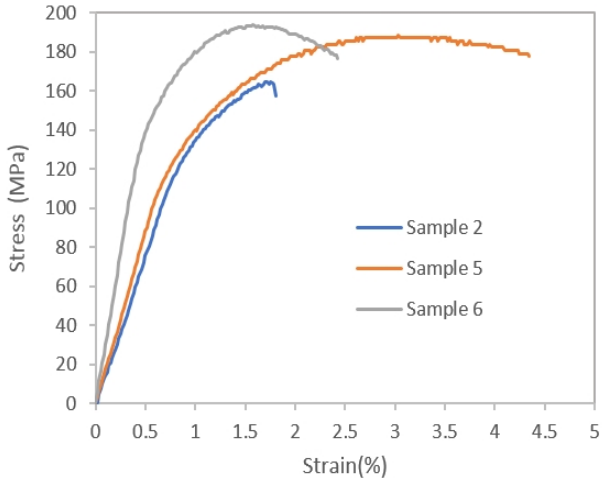
شکل ۱۱-نتایج آزمون کشش نمونه‌ها.



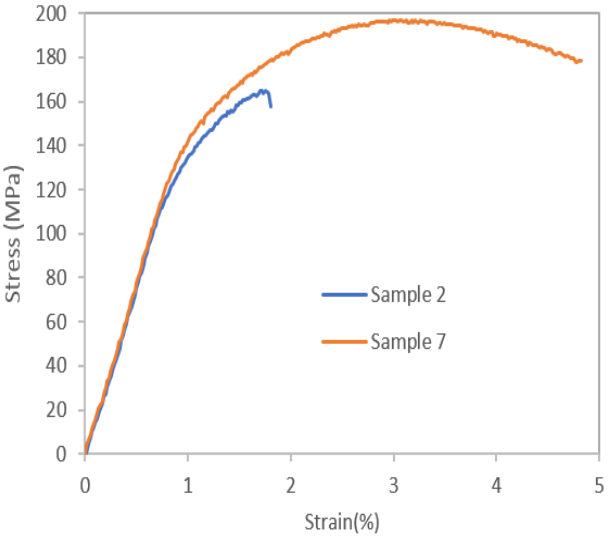
شکل12-مقایسه آزمون کشش در نمونه‌های 1، 2، 3 و 4.

با توجه به نمودار موجود در شکل(13)، از مقایسه نمونه‌های 2 و 7 که در آن‌ها شرایط سرعت چرخشی و سرعت انتقالی یکسان است و فقط نوع آلیاژها در سمت پیشرونده و پسرونده عوض شده است، می‌توان نتیجه گرفت که هنگامی که آلیاژ 5052 در طرف پیشرونده قرار گرفته است، استحکام به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. استحکام نهایی کششی در نمونه شماره 2، حدود 165 مگاپاسکال و در نمونه شماره 7 چیزی در حدود 197 مگاپاسکال است. همچنین چقرمگی (سطح زیر منحنی تنش کرنش) در نمونه 7 نسبت به نمونه 2 به مقدار قابل توجهی بیشتر است. دلیل این موضوع را می‌توان در افت استحکام دو آلیاژ در HAZ بررسی کرد. دمای HAZ در سمت پیشرونده حین جوشکاری به نزدیک دمای سالیدوس می‌رسد [26].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]



شکل13-مقایسه آزمون کشش در نمونه‌های 2، 5 و6.



شکل14-مقایسه آزمون کشش در نمونه‌های 2 و 7.

در این دما (حدود 550 درجه سانتیگراد) در شرایطی که آلیاژ AA5052 در سمت پیشرونده باشد، از آنجا که این آلیاژ، آلیاژی کار سخت شونده است تنها فرایند تبلور مجدد داریم. اما همانطور که پیشتر گفته شد، از آنجا که آلیاژ AA6061 یک آلیاژ رسوب سخت شونده است تنها بخشی از نواحی TMAZ دچار تبلور مجدد مکانیکی شده و در نواحی HAZ رشد رسوب اتفاق می‌افتد. در نتیجه افت استحکام در شرایطی که آلیاژ AA6061 در سمت پیشرونده است نسبت به حالت دیگر که AA5052 در سمت پیشرونده است، بیشتر است. همچنین نرخ برش و کار مکانیکی که در این حالت انجام می‌شود، بیشتر است. این موضوع با یافته‌های ابولسورو نیز همخوانی دارد [12]. بنابراین می‌توان استدلال کرد پتانسیل این حالت برای فرایند تبلور مجدد نسبت به حالت دیگر که آلیاژ AA6061 در سمت پیشرونده قرار دارد بیشتر است و دانه‌های جدید شکل گرفته و انعطاف‌پذیری و استحکام افزایش می‌یابد [32].

4- نتیجه گیری

-اندازه دانه در منطقه متاثر از حرارت به دلیل وارد شدن حرارت نسبت به سایر مناطق جوش بزرگتر است و در منطقه تحت تاثیر حرارت و کار مکانیکی دانه‌ها بسته به میزان کرنش تحمیلی دچار تبلور مجدد شده اند.

-در سرعت چرخشی ثابت و در سرعت‌های انتقالی کم، کیفیت سطحی مناسب و سطح مقطع عرضی جوش آن عاری از عیب تونل است. و در تصاویر درشت ساختار اثراتی از عیب KB مشاهده شد همچنین با افزایش سرعت انتقالی کیفیت ظاهری سطح جوش پایین‌تر و همچنین عیب تونل در سطح مقطع عرضی جوش بوجود آمد. با افزایش سرعت چرخشی در سرعت پیشروی ثابت پهنای منطقه متاثر از حرارت افزایش یافت و همچنین دانه‌های تبلور مجدد یافته در منطقه دکمه جوش به دلیل دریافت حرارت بیشتر، بیشتر رشد کردند.

-استحکام کششی نمونه‌های 1 تا 4 که در شرایط سرعت چرخشی ثابت 600 دور بر دقیقه و به ترتیب سرعت انتقالی 60، 90، 120 و 180 میلی‌متر بر دقیقه انجام شده‌اند به ترتیب برابر 179، 165، 90 و 60 مگاپاسکال بدست آمد و در نتیجه آن با افزایش سرعت انتقالی در سرعت چرخشی ثابت استحکام نهایی کششی کاهش یافت.

-افزایش سرعت دورانی، الگوی سیلان ماده را دچار تحول نمود و رفته رفته به الگوی لایه‌ای (از سرعت دورانی 600 rpm تا 1000) تبدیل شده است و در منطقه اختلاط یک لایه از آلیاژ AA6061 و یک لایه از آلیاژ AA5052 مشاهده شد.

-استحکام کششی نمونه‌های 2، 5 و 6 که در سرعت انتقالی ثابت 90 میلی‌متر بر دقیقه و به ترتیب در سرعت‌های چرخشی 600، 800 و 1000 دور بر دقیقه، به ترتیب برابر 165، 187 و 195 مگاپاسکال بدست آمد. نتیجه آن که با افزایش سرعت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

چرخشی استحکام افزایش یافته است.

-با قرار گرفتن AA5052 در سمت پیشرونده حرارت ورودی افزایش یافت و استحکام نهایی کششی این حالت در مقایسه با حالت دیگر 197 در مقابل 165 مگاپاسکال است. این امر متاثر از افت استحکام شدیدتر آلیاژ AA6061 نسبت به AA5052 در دمای جوشکاری قطعات است.

منابع

1-Srikanth C, Vignesh RV, Padmanaban R. Investigations on the Effect of Cyclic Heat Treatment on the Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminum Alloys (AA5052 & AA6061). Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2021 Nov;62:692-707. doi: https://doi.org/10.3103/S1067821221060079

2-Yürük A, Çevik B, Kahraman N. Analysis of mechanical and microstructural properties of gas metal arc welded dissimilar aluminum alloys (AA5754/AA6013). Materials Chemistry and Physics. 2021 Nov 15;273:125117. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125117

3-Zadpoor AA, Sinke J, Benedictus R, Pieters R. Mechanical properties and microstructure of friction stir welded tailor-made blanks. Materials Science and Engineering: A. 2008 Oct 25;494(1-2):281-90. https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.042

4-Chen YC, Komazaki T, Kim YG, Tsumura T, Nakata K. Interface microstructure study of friction stir lap joint of AC4C cast aluminum alloy and zinc-coated steel. Materials Chemistry and Physics. 2008 Oct 15;111(2-3):375-80. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.04.038

5-Verma S, Misra JP. Experimental investigation on friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2021 Oct;235(5):1545-54. https://doi.org/10.1177/09544089211008694

6-RajKumar V, VenkateshKannan M, Sadeesh P, Arivazhagan N, Ramkumar KD. Studies on effect of tool design and welding parameters on the friction stir welding of dissimilar aluminium alloys AA 5052–AA 6061. Procedia Engineering. 2014 Jan 1;75:93-7. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.11.019

7-Aval HJ. Microstructure and residual stress distributions in friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. Materials & Design. 2015 Dec 15;87:405-13. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.050

8-Buffa G, Baffari D, Di Caro A, Fratini L. Friction stir welding of dissimilar aluminium–magnesium joints: sheet mutual position effects. Science and Technology of Welding and Joining. 2015 May 11;20(4):271-9. https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000016

9-Khanna N, Sharma P, Bharati M, Badheka VJ. Friction stir welding of dissimilar aluminium alloys AA 6061-T6 and AA 8011-h14: a novel study. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020 Jan;42:1-2. https://doi.org/10.1007/s40430-019-2090-3

10-Khan NZ, Siddiquee AN, Khan ZA, Mukhopadhyay AK. Mechanical and microstructural behavior of friction stir welded similar and dissimilar sheets of AA2219 and AA7475 aluminium alloys. Journal of Alloys and Compounds. 2017 Feb 25;695:2902-8. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.389

11-Infante V, Braga DF, Duarte F, Moreira PM, De Freitas M, De Castro PM. Study of the fatigue behaviour of dissimilar aluminium joints produced by friction stir welding. International Journal of Fatigue. 2016 Jan 1;82:310-6. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.06.020

12-Abolusoro OP, Akinlabi ET, Kailas SV. Tool rotational speed impact on temperature variations, mechanical properties and microstructure of friction stir welding of dissimilar high-strength aluminium alloys. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020 Apr;42:1-2. https://doi.org/10.1007/s40430-020-2259-9

13-Ilangovan M, Boopathy SR, Balasubramanian V. Microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA6061–AA5086 aluminium alloy joints. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2015 Apr 1;25(4):1080-90. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63701-3

14-Giraud L, Robe H, Claudin C, Desrayaud C, Bocher P, Feulvarch E. Investigation into the dissimilar friction stir welding of AA7020-T651 and AA6060-T6. Journal of Materials Processing Technology. 2016 Sep 1; 235:220-30. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.020

15-Sundaram NS, Murugan N. Tensile behavior of dissimilar friction stir welded joints of aluminium alloys. Materials & Design. 2010 Oct 1;31(9):4184-93. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.035

16-Kumar KK, Kumar A, Satyanarayana MV. Effect of friction stir welding parameters on the material flow, mechanical properties and corrosion behavior of dissimilar AA5083-AA6061 joints. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2022 Mar; 236(6): 2901-17. https://doi.org/10.1177/09544062211036102

17-Torzewski J, Łazińska M, Grzelak K, Szachogłuchowicz I, Mierzyński J. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded joint aa7020/aa5083 with different joining parameters. Materials. 2022 Mar 4;15(5):1910. https://doi.org/10.3390/ma15051910

18-Laska A, Szkodo M, Cavaliere P, Perrone A. Influence of the Tool Rotational Speed on Physical and Chemical Properties of Dissimilar Friction-Stir-Welded

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]

26-Prabha KA, Putha PK, Prasad BS. Effect of tool rotational speed on mechanical properties of aluminium alloy 5083 weldments in friction stir welding. Materials Today: Proceedings. 2018 Jan 1;5(9):18535-43. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.196
27-Rooy EL. Introduction to aluminum and aluminum alloys. ASM International, Metals Handbook, Tenth Edition.. 1990;2:3-14.
28-María Abreu Fernández C, Rey RA, Julia Cristóbal Ortega M, Verdera D, Vidal CL. Friction stir processing strategies to develop a surface composite layer on AA6061-T6. Materials and Manufacturing Processes. 2018 Jul 27;33(10):1133-40 https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1415447
29-Lee CY, Lee WB, Kim JW, Choi DH, Yeon YM, Jung SB. Lap joint properties of FSWed dissimilar formed 5052 Al and 6061 Al alloys with different thickness. Journal of Materials Science. 2008 May;43:3296-304. https://doi.org/10.1007/s10853-008-2525-1
30-Alvarez P, Janeiro G, Da Silva AA, Aldanondo E, Echeverría A. Material flow and mixing patterns during dissimilar FSW. Science and Technology of Welding and Joining. 2010 Nov 1;15(8):648-53. https://doi.org/10.1179/136217110X12785889549543
31- Lee WB, Jung SB. The joint properties of copper by friction stir welding. Materials Letters. 2004 Feb 1; 58(6):1041-6 https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.08.014
32-Hajiha, M. 2021. Simulation of heat transfer and materials flow in friction stir welding of AA6061 and AA5052. Master Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
AA5083/AA6060 Joints. Metals. 2022 Sep 30;12(10): 1658. https://doi.org/10.3390/met12101658
19-Wang X, Lados DA. Understanding the Material Flow Mechanisms—Microstructure Evolution—Defect Formation Relationships and Effects on Mechanical Properties in Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloys. Metallurgical and Materials Transactions A. 2023 Feb;54(2):727-44. https://doi.org/10.1007/s11661-022-06921-w
20-American Society for Testing and Materials. ASTM E8/E8M-11: standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken: ASTM.
21-Vander VF. ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures; ASM International: Materials Park Ohio, OH, USA, 2004. Google Scholar.
22-Attallah MM, Salem HG. Friction stir welding parameters: a tool for controlling abnormal grain growth during subsequent heat treatment. Materials Science and Engineering: A. 2005 Jan 25;391(1-2):51-9. https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.08.059
23-Threadgill PL, Leonard AJ, Shercliff HR, Withers PJ. Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews. 2009 Mar 1;54(2): 49-93. doi: https://doi.org/10.1179/174328009X411136
24-Zhou C, Yang X, Luan G. Effect of kissing bond on fatigue behavior of friction stir welds on Al 5083 alloy. Journal of materials science. 2006 May;41:2771-7. https://doi.org/10.1007/s10853-006-6337-x
25-Khan NZ, Siddiquee AN, Khan ZA, Shihab SK. Investigations on tunneling and kissing bond defects in FSW joints for dissimilar aluminum alloys. Journal of alloys and Compounds. 2015 Nov 5;648:360-7. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.246

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.04]