



## بررسی تجربی تأثیر پارامترهای فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی روی اتصال آلیاژهای غیرمشابه آلومینیم AA2024-T351 و AA6061-T6

محمد مهدی مرادی<sup>1</sup>، حامد جمشیدی اول<sup>2\*</sup>، روح الله جماعتی<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

2- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

\*h.jamshidi@nit.ac.ir, 484 بابل صندوق پستی

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 21 خرداد 1395  
پذیرش: 16 شهریور 1395  
ارائه در سایت: 04 مهر 1395  
کلید واژگان:  
جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی  
آلیاژ آلومینیم  
سیلان مواد  
خواص مکانیکی

### چکیده

در این پژوهش فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی برای جوش کاری لبه‌لب آلیاژهای غیرمشابه آلومینیم AA2024-T351 و AA6061-T6 استفاده شد. جوش کاری توسط ابزار با پین هرم مربعی ناقص انجام شد. تأثیر سرعت چرخشی و سرعت خطی ابزار بر روی ریزساختار، ماکروساختار و خواص مکانیکی اتصال‌ها بررسی شد. آلیاژ آلومینیم AA2024 به دلیل داشتن تنش سیلان بالاتر نسبت به آلیاژ آلومینیم AA6061 در دماهای بالا، در جهت پیشرو و آلیاژ آلومینیم AA6061 در جهت پس‌رو قرار گرفت. در بررسی‌های ماکرو مشاهده شد که در نسبت سرعت چرخشی به خطی بالاتر از 31.25 دور بر میلی‌متر مقطع عرضی اتصال دارای عیب حفره تونلی است. با افزایش حجم حرارت ورودی سیلان مواد در سطوح مختلف در عمق اتصال همگن‌تر شد و میزان آلیاژ آلومینیم AA2024 در منطقه اغتشاشی افزایش یافت. همچنین در نسبت‌های سرعت چرخشی به خطی بالاتر از 40 دور بر میلی‌متر اثر سرعت تغییر شکل و در نسبت‌های کمتر اثر دما بر اندازه دانه منطقه اغتشاشی غالب شد. اعمال آفست به ابزار در حین جوش کاری به سمت پس‌رو باعث بهبود سیلان مواد در منطقه اغتشاشی و افزایش استحکام اتصال اصطکاکی اغتشاشی شد.

## Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in dissimilar joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 aluminum alloys

Mohammad Mahdi Moradi, Hamed Jamshidi Aval\*, Roohollah Jamaati

Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

\*P.O.B 484, Babol, Iran, h.jamshidi@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 10 June 2016  
Accepted 06 September 2016  
Available Online 25 September 2016

### Keywords:

Friction stir welding  
Aluminum alloy  
Material flow  
Mechanical properties

### ABSTRACT

In this research, the friction-stir welding (FSW) process was used for butt joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 dissimilar alloys. Welding was carried out using a tool with frustum of pyramid pin. The effects of rotational and linear speeds of the tool on microstructure, macrostructure, and mechanical properties of joints were examined. The AA2024 alloy was located in the advancing side due to higher flow stress at higher temperature than the AA6061 alloy, which was located in the retreating side. Macro analysis showed that with a rotational to linear speed ratio of higher than 31.25 revolutions per millimeter the transverse joint section demonstrated tunnel hole defect. With an increase in heat input material flow on different depth levels of joint it became more homogenous and the AA2024 alloy's amount in the stir zone increased. Moreover, with rotational to linear speed ratio of higher than 40 revolutions per millimeter, the effect of deformation rate was dominant, whereas with lower ratios the effect of temperature on grain size in the stir zone was dominant. Application of offset to the tool during welding in the retreating side led to improvement of flow of materials in the stir zone and an increase in friction stir joint strength.

### 1- مقدمه

استفاده آلومینیم در صنایع مختلف اتصال آلیاژهای آلومینیم بیش از پیش اهمیت می‌یابد [1].

آلیاژهای آلومینیوم سری 2XXX به‌عنوان آلیاژهای غیرقابل جوش کاری<sup>1</sup> و سری 6XXX به‌عنوان آلیاژهای با جوش‌پذیری ضعیف دسته‌بندی شده‌اند.

آلومینیم با نسبت استحکام به وزن بالا، فرم‌پذیری و مقاومت در برابر خوردگی بالا، جزء فلزات پرکاربرد به‌حساب می‌آید. آلیاژهای آلومینیوم سری 2XXX و 6XXX، به‌طور گسترده‌ای در بسیاری از زمینه‌های صنایع هوافضا و دریایی و در خطوط لوله و مخازن ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. با رشد

<sup>1</sup> Non-weld able

Please cite this article using:

M. M. Moradi, H. Jamshidi Aval, R. Jamaati, Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in dissimilar joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 aluminum alloys, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 394-402, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در جوش کاری ذوبی این نوع آلیاژها با مشکلاتی نظیر اکسیداسیون، انقباض، انقباض، حساسیت به ترک خوردگی، حلالیت هیدروژن و تخلخل مواجه می‌شود. به دلیل ساختار انجمادی ظریف و تخلخل در منطقه ذوب، از دست رفتن خواص مکانیکی در مقایسه با فلز پایه بسیار زیاد است [2]. این عوامل باعث شده است که اتصال این آلیاژها توسط فرایندهای جوش کاری معمول مناسب نباشد. در چندین سال اخیر استفاده از روش‌های جوش کاری حالت جامد آلیاژهای فلزی به‌ویژه آلومینیم رشد چشمگیری یافته است. برای بهبود جوش کاری این نوع آلیاژها از روش‌های غیرذوبی مثل جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده می‌شود. جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند اتصال حالت جامد<sup>1</sup> است که در سال 1991 در موسسه جوش (TWI) ثبت شده است [3]. در این روش از یک ابزار غیرمصرفی استفاده می‌شود که با چرخش خود تولید حرارت می‌کند. حرارت تولیدشده باعث تغییر شکل موضعی قطعه کار شده و سبب می‌شود تا پس از سرد شدن دو قطعه به هم اتصال پیدا کنند. در سال‌های اخیر تحقیقاتی در مورد اتصال این دو آلیاژ توسط روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی صورت گرفته است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

سادش و همکاران [4] اثر هندسه پین ابزار را در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژ AA2024-T4 و AA6061-T4 با ضخامت 5 میلی‌متر بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که بیشترین استحکام اتصال با استفاده از ابزار با پین بیچی و مربعی به‌دست آمده است. همچنین سختی مقطع جوش در اتصال ایجاد شده با پین مربعی بیشتر از سایر اتصال‌ها به‌دست آمد. بهترین خواص مکانیکی با استفاده از پین مربعی و سرعت چرخشی 1000 دور در دقیقه و سرعت خطی 40 میلی‌متر بر دقیقه به دست آمد. آمانکیو و همکاران [5] بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیم AA2024-T351 و AA6056-T4 با ضخامت 4 میلی‌متر مطالعه نمودند. آن‌ها بهینه‌ترین شرایط جوش کاری را در سرعت چرخشی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 150 میلی‌متر بر دقیقه گزارش نمودند. در اکثر نمونه‌های جوش داده‌شده، سختی اتصال در سمت آلیاژ AA2024-T351 بیشتر از سمت آلیاژ AA6056-T4 و سختی مقطع جوش کمتر از سختی هر دو فلز پایه گزارش شد. کاوالیر و همکاران [6] تأثیر پارامترهای جوش کاری را بر روی خواص مکانیکی و ریزساختاری جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای AA6082-T6 و AA2024-T3 با ضخامت 4 میلی‌متر بررسی کردند. در این تحقیق تأثیر محل قرار گرفتن صفحات فلز پایه نسبت به ابزار مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بهترین خواص کششی و خستگی در جوشی که آلیاژ AA6082 در سمت پیش‌رونده است به دست می‌آید. راجکومار و همکاران [7] تأثیر هندسه پین و سرعت خطی جوش کاری را در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیم AA6061 و AA5052 در سرعت چرخشی 710 دور در دقیقه بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که در سرعت خطی 28 میلی‌متر بر دقیقه حفره ایجاد شده است. خدیو و همکاران [8] جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای AA2024-T3 و AA7075-T6 با ضخامت 3 میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج این پژوهش گزارش شد که کمترین میزان سختی در HAZ هر دو طرف اتصال به وجود آمده است و با افزایش سرعت خطی جوش کاری افزایش می‌یابد. راویکومار و همکاران [9] اثر پارامترهای جوش کاری را بر خواص مکانیکی جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی

غیرمشابه آلیاژهای AA6061-T651 و AA7075-T651 با ضخامت 6 میلی‌متر بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که بیشترین استحکام کششی (205.3 مگا پاسکال) را اتصال ایجادشده با پین مخروط استوانه‌ای بیچی در سرعت چرخشی 900 دور در دقیقه و سرعت خطی 100 میلی‌متر بر دقیقه و کمترین استحکام کششی (178.01 مگا پاسکال) را اتصال ایجاد شده با پین مخروط مربعی بیچی در سرعت چرخشی 900 دور در دقیقه و سرعت خطی 90 میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهند. ایزدی و همکاران [10] تأثیر هندسه ابزار را در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای غیرمشابه آلومینیم AA2024-T351 و AA6061-T6 با ضخامت 6 میلی‌متر بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که وجود پین باعث بهبود حرکت عمودی ابزار و کاهش نیروی لازم برای جوش کاری می‌شود. همچنین برای تشکیل ساختارهای با اختلاط زیاد و ایجاد جریان حلقوی، لزومی به استفاده از ساختار بیچی در پین ابزار نیست. زمانی که سرعت ابزار کاهش می‌یابد، اختلاط مواد توسط افزایش زمان حضور در منطقه اغتشاش افزایش می‌یابد.

با توجه به اینکه آلیاژهای آلومینیم سری 2xxx و 6xxx به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند و از آنجاییکه این دو گروه آلیاژ جوش‌پذیری ضعیفی با فرایندهای جوش کاری ذوبی دارند، در این تحقیق اثر پارامترهای فرایند و هندسه پین بر خواص مکانیکی، ریزساختار و نحوه سیلان مواد در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای غیرمشابه AA2024-T351 و AA6061-T6 با استفاده از ابزار با پین هرم مربعی ناقص بررسی شده است. اثر پارامترهای جوش کاری بر ریزساختار، خواص مکانیکی اتصال و نحوه سیلان مواد در مقطع عرضی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مطالعه اثر متقابل شانه و پین ابزار، سیلان مواد در سطوح مختلف اتصال به کمک روش متالوگرافی بررسی شد. خواص مکانیکی توسط آزمون کشش و ریز سختی سنجی ارزیابی شد. میزان استحکام مناطق اغتشاشی<sup>2</sup>، متأثر از حرارت-کارمکانیکی<sup>3</sup> و متأثر از حرارت<sup>4</sup>، به‌طور موضعی تحلیل شده است. تأثیر اعمال آفست بر روی خواص مکانیکی اتصال از دیگر جنبه‌های مورد بررسی این تحقیق می‌باشد.

## 2- روش آزمایش

در این تحقیق از آلیاژهای آلومینیم AA2024-T351 و AA6061-T6 با ضخامت 6 میلی‌متر استفاده شد. ورق‌ها برای انجام جوش کاری با ابعاد 100×50 میلی‌متر مربع عمود بر راستای نورد بریده شدند. برای صاف و گونیا شدن لبه‌ها، ورق‌ها توسط ابزار فرز ماشین کاری شدند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی مربوط به هر دو آلیاژ در جدول 1 و 2 درج شده است. ورق‌ها به‌صورت لب‌به‌لب<sup>5</sup> و در راستای نورد به هم جوش کاری شدند. آلیاژ AA6061-T6 در سمت پس‌رو و آلیاژ AA2024-T351 در سمت پیش‌رو فرایند قرار گرفت. جوش کاری با یک دستگاه فرز مدل FP4M تبریز انجام شده است. برای این منظور یک فیکسچر مطابق "شکل 1" طراحی و ساخته شده است. میزان آفست برای انجام جوش کاری صفر و 0.5 میلی‌متر به سمت آلیاژ AA6061 لحاظ شده است. ابزار با زاویه کجی 2.5 درجه نسبت به راستای عمود بر سطح ورق در دستگاه فرز بسته شده است. شکل 2 مشخصات هندسی و ابعاد ابزار مورد استفاده در جوش کاری را نشان می‌دهد. پارامترهای فرایند در جدول 3 نشان داده شده است. پس از فرایند

<sup>2</sup> Stir zone

<sup>3</sup> Thermo-mechanically Affected Zone (TMAZ)

<sup>4</sup> Heat Affected Zone (HAZ)

<sup>5</sup> Butt

<sup>1</sup> Solid state

**Table 3** Friction stir welding process parameters

شماره نمونه	سرعت چرخشی (rpm)	سرعت خطی (mm/min)	سرعت خطی/سرعت چرخشی (rev/mm)
1	800	31.5	25.39
2	800	40	20
3	1250	31.5	39.68
4	1250	40	31.25
5	1600	31.5	50.79
6	1600	40	40
7	2000	31.5	63.49
8	2000	40	50

زمان آزمون 15 ثانیه در نظر گرفته شد. به منظور بررسی استحکام کششی ناحیه اتصال، نمونه‌های آزمون کشش در 2 حالت عمود بر خط جوش و موازی خط جوش مطابق با استاندارد ASTM E8-M03 آماده‌سازی شدند. آزمون کشش‌ها توسط دستگاه 25 تنی شرکت سنتم انجام شده است. سرعت انجام آزمون کشش 1 میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد و از هر ورق جوش کاری شده سه نمونه آزمون کشش توسط دستگاه برش سیمی به صورت عرضی مطابق "شکل 3 (الف)" بریده شده است. به منظور بررسی استحکام مناطق مختلف جوش، مجدد جوش کاری انجام شده و نمونه‌های تست کشش مطابق "شکل 3 (ب)" به صورت طولی و موازی خط جوش استخراج شده است. در این حالت ابتدا ورقی مستطیل شکل با ضخامت 1 میلی‌متر از مقطع مورد نظر خارج شد، سپس مطابق استاندارد نمونه تست کشش از آن ساخته شد. در "شکل 4 (الف) و (ب)" نقشه ابعادی سنج‌های آزمون کشش عرضی و طولی برحسب میلی‌متر به همراه سنج‌های تست کشش تهیه شده از نمونه‌های جوش کاری شده نشان داده شده است. پس از انجام آزمون کشش مورفولوژی سطح شکست توسط میکروسکوپ SEM آنالیز شد.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- ماکرو ساختار

عیب حفره در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی عمدتاً در سمت پیشرو اتصال اتفاق می‌افتد. این عیب به این دلیل است که پس از عبور ابزار از یک مقطع و در قسمت پشت ابزار، آلیاژ پس‌رو به سمت پیشرو حرکت می‌کند ولی به دلیل اینکه دیگر اغتشاشی در این ناحیه نیست، در نتیجه ماده به اندازه کافی برای پر کردن حفره در سمت پیشرو وجود ندارد و عیب حفره تونلی شکل می‌گیرد. نسبت سرعت چرخشی به سرعت خطی ابزار می‌تواند به عنوان معیاری برای میزان حرارت ورودی جوش کاری محاسبه شود. اگر حرارت ورودی خیلی کم باشد سبب افزایش عیب و بزرگ شدن حفرات می‌شود. ولی در حرارت‌های بالاتر افزایش میزان خمیری شدن سبب جبران عدم اغتشاش شده و باعث می‌شود این عیب برطرف شود. اما در حرارت ورودی‌های خیلی بالا به دلیل ایجاد جریان تلاطمی مجدداً عیب تونلی ظاهر می‌شود [11, 12]. "شکل 5" تأثیر حرارت ورودی را روی مقطع جوش نشان می‌دهد. نمونه شماره 2 کمترین میزان حرارت ورودی و نمونه شماره 7 بیشترین میزان حرارت ورودی را مطابق جدول 3 دارد. پس از نمونه شماره 2 نمونه‌های شماره 1 و 4 کمترین میزان حرارت ورودی را نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌های شماره 2 و 4 فاقد عیب می‌باشند اما در سایر نمونه‌ها عیب حفره تونلی مشاهده می‌شود. افزایش بیش‌ازحد حرارت

جوش کاری برای تحلیل ریزساختاری و سیلان مواد در اتصال‌ها، نمونه‌هایی با اندازه مناسب از مقاطع عرضی آن‌ها تهیه شد و با سمباده شماره 180 تا 3000 سنباده‌زنی و سپس پولیش شدند. از محلول پولاتون اصلاح‌شده که شامل دو محلول جدا از هم با ترکیب (25 میلی‌لیتر اسید نیتریک، 1 گرم اسید کرومیک محلول در 12 میلی‌لیتر آب) و (12 میلی‌لیتر اسید کلریدریک، 6 میلی‌لیتر اسید نیتریک، 1 میلی‌لیتر اسید فلوریدریک و 1 میلی‌لیتر آب) است برای اچ آلیاژ AA6061-T6 و محلول کلر با ترکیب (6 میلی‌لیتر  $\text{HNO}_3$ ، 3 میلی‌لیتر HCl، 6 میلی‌لیتر HF و 150 میلی‌لیتر آب مقطر) برای اچ آلیاژ AA2024-T351 استفاده شده است.

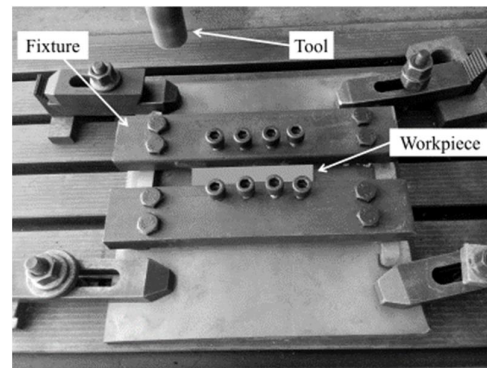
به منظور عکس‌برداری از سطح نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری استفاده شده است. سطح مقطع شکست توسط میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) بررسی شده است. از دستگاه میکروسختی ویکرز شرکت کوپا برای تعیین سختی مناطق مختلف نمونه‌ها استفاده شد. میزان نیروی اعمالی 100 گرم و

**Table 1** Chemical composition of alloys

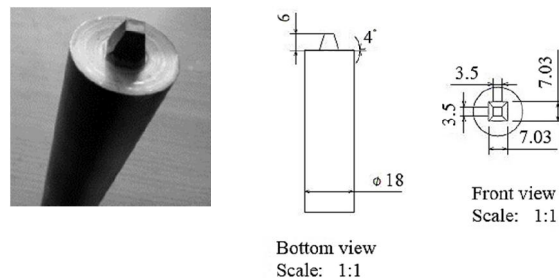
آلیاژ	عنصر شیمیایی					
	Mn	Cr	Cu	Fe	Si	Mg
AA6061	0.06	0.19	0.19	0.40	0.47	0.68
AA2024	0.30	0.10	3.80	0.50	0.50	1.2

**Table 2** Mechanical properties of alloys

آلیاژ	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	درصد ازدیاد سختی	
			طول (mm)	طول (mm)
AA2024-T351	469	324	19	137
AA6061-T6	310	278	12	107

**Fig. 1** Fixture designed to perform welding

شکل 1 فیکسچر طراحی شده برای انجام جوش کاری

**Fig. 2** Tool geometrical characteristics (dimension in mm)

شکل 2 مشخصات هندسی ابزار (ابعاد برحسب mm)

<sup>1</sup> Scanning Electron Microscope

عیب حفره تونلی در آن مشاهده می‌شود. با افزایش حرارت ورودی در نمونه شماره 1 نسبت به نمونه شماره 2، ماده در زیر ابزار نرم‌تر می‌شود اما سرعت کرنش ماده (تسهیل‌کننده اکستروژن ماده از جلوی ابزار به پشت ابزار) به دلیل سرعت خطی پایین‌تر ابزار به حدی نیست که بتواند جریان لایه‌ای ایجاد کرده و موضع اتصال را به‌طور کامل پر کند. این در حالی است که در نمونه شماره 4 به دلیل افزایش سرعت چرخشی، سرعت کرنش ماده بیشتر شده و در نتیجه جریان لایه‌ای راحت‌تر ایجاد و موضع اتصال کاملاً پر می‌شود. در نسبت‌های سرعت بالاتر از نمونه 4، افزایش سرعت کرنش ماده و هم‌زمان حرارت ورودی بالا باعث ایجاد جریان تلاطمی شده و موضع اتصال به‌طور کامل پر نمی‌شود.

آلیاژ AA2024-T351 به دلیل داشتن تنش سیلان بالاتر نسبت به آلیاژ AA6061-T6 در دماهای بالا [13، 14]، وقتی در سمت پیشرو قرار می‌گیرد، حرارت بیشتری در این منطقه دریافت کرده و سیلان آن بیشتر شده و می‌تواند جوش با اختلاط بیشتر دو ماده را فراهم کند.

"شکل 6" نمای سه‌بعدی از مقطع و سطح جوش در عمق‌های مختلف را نشان می‌دهد. این تصاویر با پولیش کاری از قسمت انتها و مقطع جوش دو نمونه 2 و 3 به‌دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سطح بالایی اتصال قسمت عمده منطقه اغتشاشی از آلیاژ AA6061 تشکیل شده است. با توجه به تنش سیلان کمتر آلیاژ AA6061 و وجود نیروی برشی گسترده در سطوح نزدیک شانه ابزار، بخش بیشتری از آلیاژ AA6061 از سمت پس‌رو کنده شده و به سمت پیشرو حرکت می‌کند. با افزایش حرارت ورودی، مقایسه نمونه‌های 2 و 3، مشاهده می‌شود که میزان حرکت آلیاژ AA6061 در سطح بالایی اتصال افزایش می‌یابد. در سطوح پایین‌تر اتصال دیده می‌شود که وسعت منطقه اغتشاش کاهش یافته و رفتار سیلانی دو ماده تغییر می‌کند و سهم آلیاژ AA2024 در منطقه اغتشاش افزایش می‌یابد. این پدیده نشان دهنده غالب شدن اثر سیلانی پین بر شانه ابزار در سطوح پایین اتصال می‌باشد.

در نمونه شماره 2 در عمق اتصال و با دور شدن از شانه ابزار آلیاژ AA6061 به‌صورت لایه‌های مجزا به درون منطقه اغتشاشی حرکت می‌کند. این مسئله به دلیل حرارت ورودی کمتر و زمان ماندگاری کمتر ابزار در یک نقطه مشخص است که ماده فرصت کافی برای خمیری شدن و سیلان یکنواخت را پیدا نمی‌کند. اما در نمونه شماره 3 با افزایش حرارت ورودی و زمان ماندگاری ابزار در یک نقطه مشخص هر دو ماده به‌اندازه کافی خمیری شده و سیلان یکنواختی را نشان می‌دهند به‌گونه‌ای که فصل مشترک لایه‌لایه مشاهده شده در نمونه شماره 2 دیده نمی‌شود. نتیجه دیگری که از مقایسه نمونه‌های شماره 2 و 3 به دست می‌آید، سهم بیشتر آلیاژ AA2024 در منطقه اغتشاشی اتصال نمونه شماره 3 نسبت به نمونه شماره 2 با حرارت ورودی کمتر می‌باشد. با افزایش حجم حرارت ورودی تنش سیلان آلیاژ AA2024 کاهش بیشتری داشته و سیلان بیشتری به سمت منطقه اغتشاشی خواهد داشت.

### 3-2- ریزساختار

تغییر شکل پلاستیک و افزایش دما در منطقه جوش منجر به تبلور مجدد دینامیکی و تغییر در ریزساختار، انحلال و درشت شدن رسوبات در اطراف منطقه اتصال می‌شود. بر این اساس سه منطقه مختلف با نام‌های منطقه اغتشاشی، منطقه متأثر از حرارت-کارمکانیکی و منطقه متأثر از حرارت قابل تشخیص است [1]. به علت تغییر شکل شدید پلاستیک و افزایش

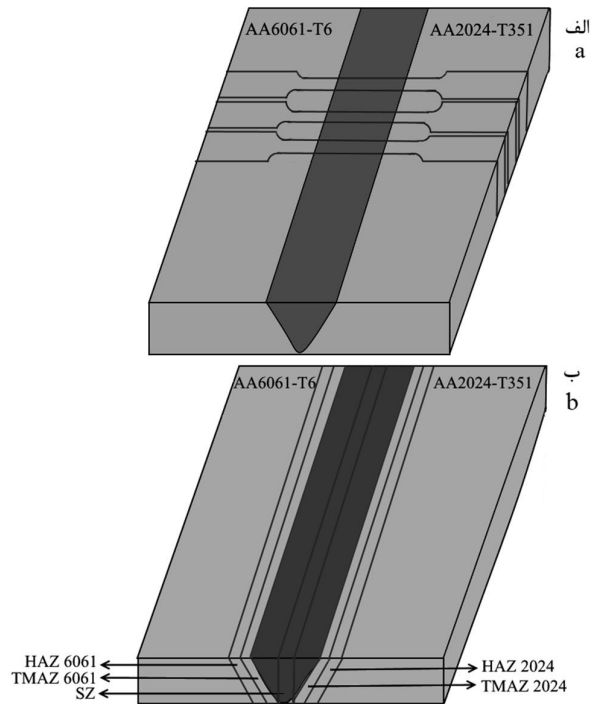


Fig.3 Location of tensile test specimens (a) transversal specimens (b) longitudinal specimens.

شکل 3 محل تهیه نمونه‌های تست کشش (الف) نمونه عرضی (ب) نمونه طولی.

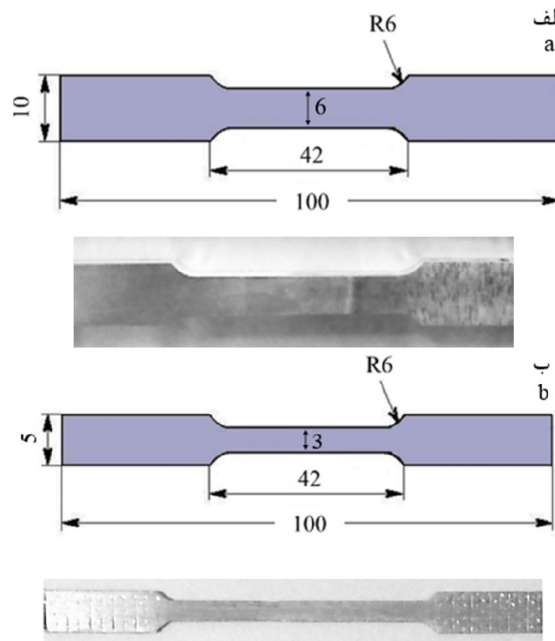


Fig. 4 Dimensions of tensile testing specimen (mm) and prepared sample from weld; (a) transversal specimen (b) longitudinal specimen

شکل 4 ابعاد نمونه آزمون کشش (mm) و نمونه تهیه شده از جوش (الف) نمونه عرضی (ب) نمونه طولی

ورودی در نسبت‌های سرعت بیشتر از 31.25 دور بر میلی‌متر، سیلان ماده به‌صورت تلاطمی درآمده و باعث شکل‌گیری عیب در موضع اتصال می‌گردد. نمونه شماره 1 میزان حرارت ورودی مابین دو نمونه شماره 2 و 4 دارد اما

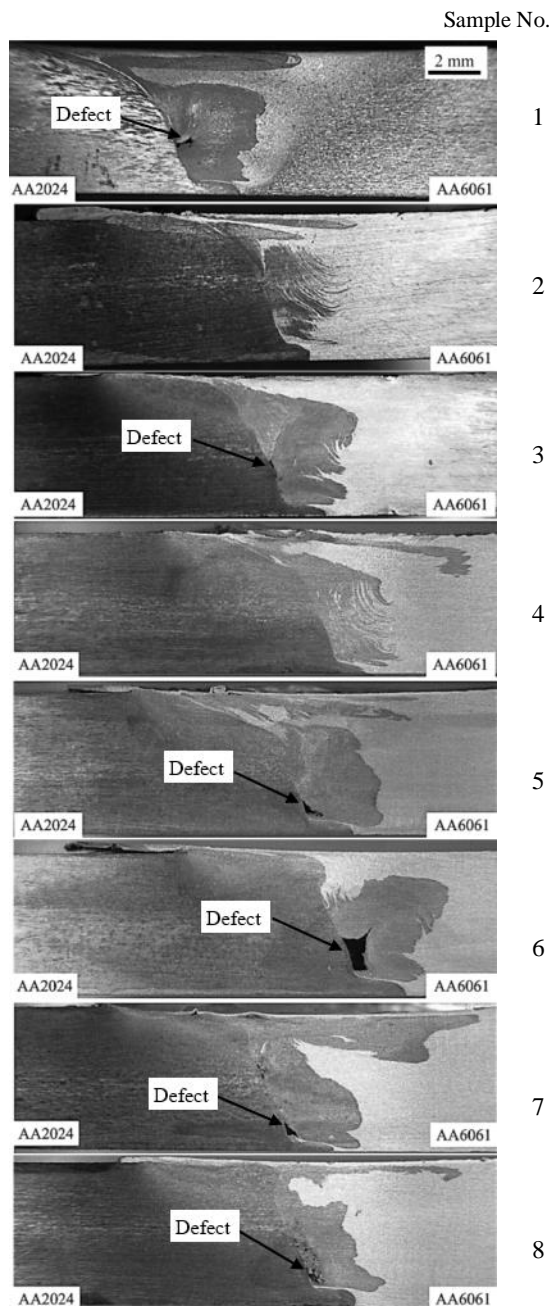


Fig.5 Cross-section macrostructure of welded samples

شکل 5 ماکرو ساختار مقطع عرضی نمونه‌های جوش کاری شده

دماهای نسبتاً بالا قرار می‌گیرد، تغییرات ریزساختاری از قبیل تبلور مجدد و درشت شدن رسوبات در موضع اتصال قابل پیش‌بینی است. در منطقه اغتشاشی جوش تغییر شکل زیاد به همراه حرارت اعمالی باعث تبلور مجدد و تشکیل دانه‌های ریز در این ناحیه می‌شود. در مورد آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر آلومینیم، وجود دماهای کاری بالا حین فرایند در ناحیه اغتشاشی و نیز در ناحیه متأثر از حرارت -کار مکانیکی موجب انحلال بخشی از فازهای رسوبی می‌شوند. در نتیجه مقداری نرم شدگی در ناحیه جوش در فلزات عملیات حرارتی پذیر انتظار می‌رود.

سختی موضع اتصال در نمونه شماره 2 در "شکل 9" نشان داده شده

ناگهانی دما در منطقه اغتشاشی دانه‌ها شکسته می‌شوند و مرز دانه‌هایی با زاویه کم ایجاد می‌شوند [15]. این نقاط، مکان‌های مناسبی برای جوانه‌زنی هستند. در این نقاط تبلور مجدد رخ می‌دهد که موجب ایجاد یک ساختار ریزدانه‌تر در منطقه اغتشاشی می‌شود [16].

درجه حرارت و سرعت تغییر شکل دو عامل مهم در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی هستند که اثر معکوس روی اندازه دانه منطقه اغتشاشی دارد [17,18]. افزایش سرعت تغییر شکل باعث کاهش و افزایش درجه حرارت باعث افزایش اندازه دانه در این منطقه می‌شود. "شکل 7" تصویر ریزساختار ناحیه اغتشاشی نمونه شماره 2، که دارای کمترین حرارت ورودی می‌باشد، را نشان می‌دهد. اندازه دانه در سمت آلیاژ AA2024 به نسبت کوچک‌تر ( $4 \pm 0.5 \mu\text{m}$ ) از اندازه دانه در سمت آلیاژ AA6061 ( $8 \pm 2 \mu\text{m}$ ) است.

براساس مطالعات ژانگ و همکارانش [19] سرعت تغییر شکل مواد در حین جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی در سمت پیشرو به مراتب بیشتر از سمت پس‌رو می‌باشد. اگرچه سمت پیشرو دمای بیشتری را نسبت به سمت پس‌رو تحمل می‌کند، کمتر بودن اندازه دانه در سمت پیشرو مشخص می‌کند که اثر سرعت کرنش بر اثر دما بر اندازه دانه منطقه اغتشاشی سمت پیشرو غالب می‌باشد. این رفتار همان‌طور که در "شکل 8" نشان داده شده است در سایر نمونه‌ها نیز مشاهده می‌شود. براساس "شکل 8" با افزایش حرارت ورودی، اندازه دانه در منطقه اغتشاشی افزایش می‌یابد اما از نسبت سرعت بیشتر از 40 دور بر میلی‌متر اندازه دانه کاهش می‌یابد. این رفتار را می‌توان به برتری اثر سرعت کرنش بر اثر دما در نسبت‌های سرعت بالا مرتبط ساخت.

نکته مهم دیگر اعداد اندازه دانه متفاوت در نسبت سرعت‌های نزدیک هم (39.68 و 40 دور بر میلی‌متر) و (50 و 50.79 دور بر میلی‌متر) می‌باشد. در این نمونه‌ها اگرچه نسبت سرعت چرخشی به سرعت خطی تقریباً ثابت می‌ماند ولی با توجه به سرعت چرخشی بالاتر در نمونه با نسبت سرعت 40 دور بر میلی‌متر (1600 دور در دقیقه) در مقایسه با نمونه با نسبت سرعت 39.68 دور بر میلی‌متر (1250 دور در دقیقه) و همچنین بالاتر بودن سرعت چرخشی در نمونه با نسبت سرعت 50 دور بر میلی‌متر (2000 دور در دقیقه) در مقایسه با نمونه با نسبت سرعت 50.79 دور بر میلی‌متر (1600 دور در دقیقه)، می‌توان گفت که سرعت کرنش بالاتر در سرعت چرخشی بالا ممکن است بر کوچکتر شدن اندازه دانه تاثیر گذار باشد. به عبارت دیگر تاثیر سرعت کرنش نسبت به دما در این نمونه‌ها غالب است.

همچنین میزان عناصر آلیاژی در این دو آلیاژ بر روی اندازه دانه مؤثر می‌باشد. عناصر آلیاژی سبب ایجاد رسوبات در منطقه جوش می‌شوند. وجود رسوبات در منطقه اغتشاشی می‌تواند به‌عنوان مانعی در برابر رشد دانه عمل کند. از آنجایی که آلیاژ AA2024-T351 حدوداً 6.4 و آلیاژ AA6061-T6 حدوداً 2 درصد عناصر آلیاژی دارد، اندازه دانه در آلیاژ AA2024-T351 ریزتر از اندازه دانه در آلیاژ AA6061-T6 است.

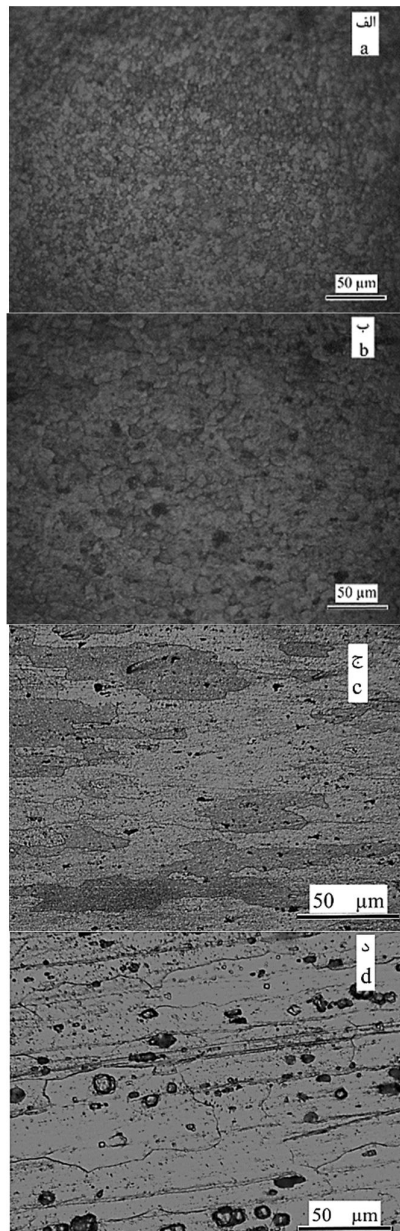
اندازه دانه فلز پایه نیز عاملی تأثیرگذار در اندازه دانه مناطق مختلف جوش پس از انجام جوش کاری می‌باشد [20]. در "شکل 6" قسمت ج و د مشاهده می‌شود که اندازه دانه فلز پایه آلیاژ AA2024-T351 ریزتر از آلیاژ AA6061-T6 می‌باشد، که دلیل دیگری بر ریزتر بودن اندازه دانه منطقه اغتشاشی آلیاژ AA2024-T351 نسبت به آلیاژ AA6061-T6 می‌باشد.

### 3-3- میکرو سختی

از آنجایی که ماده در فرایند جوش کاری تحت تغییر شکل بسیار زیاد و



میزان سختی در منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی به عواملی از جمله رشد شدید رسوبات و احتمالاً انحلال موضعی آن‌ها و کاهش چگالی نابجایی‌ها مرتبط می‌باشد [21,5]. مقدار حداقل سختی در منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی نمونه شماره 2 و 4 که نمونه‌های جوش کاری بدون عیب بودند به ترتیب، 61 و 59 ویکرز به دست آمده است. دلیل کمتر بودن سختی در نمونه شماره 4، حرارت ورودی بالاتر این نمونه می‌باشد که باعث افزایش سرعت انحلال و درشت شدن رسوبات استحکام‌بخش و همچنین کاهش چگالی نابجایی‌ها می‌شود.



**Fig. 7** Microstructures of (a) stir zone AA2024 side (b) stir zone AA6061 side (c) base metal AA2024 (d) base metal AA6061

شکل 7 میکرو ساختار (الف) ناحیه اغتشاشی سمت آلیاژ AA2024 (ب) ناحیه اغتشاشی سمت آلیاژ AA6061 (ج) فلز پایه آلیاژ AA2024 (د) فلز پایه آلیاژ AA6061



**Fig.6** 3D Cross-section macrostructure of welded samples at different thickness

شکل 6 میکرو ساختار سه بعدی نمونه‌های جوش کاری شده در عمق‌های مختلف

است. سختی سنجی در عمق 3 میلی‌متری مقطع عرضی اتصال انجام شده است. مناطق مختلف اتصال با مقایسه تصاویر میکروسکوپی سطح مقطع اتصال مشخص شده‌اند. حداقل سختی در منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی سمت آلیاژ AA6061 مشاهده می‌شود. در ناحیه اغتشاشی سمت آلیاژ AA2024 نسبت به سایر مناطق افزایش پیدا می‌کند. از مهم‌ترین عوامل افزایش سختی در این منطقه را می‌توان رسوب مجدد رسوبات استحکام‌بخش و اندازه دانه کوچک دانست. میزان افزایش سختی در این منطقه در سمت آلیاژ AA2024 بیشتر می‌باشد. اندازه دانه کوچک‌تر در سمت پیشرو می‌تواند به افزایش بیشتر سختی منطقه اغتشاشی در سمت آلیاژ AA2024 کمک کند. در منطقه متأثر از حرارت سختی کمی نسبت به فلز پایه کاهش می‌یابد که این مسئله به دلیل از بین رفتن مناطق G.P و رشد رسوبات می‌باشد. کاهش

سرعت چرخشی 800 دور در دقیقه و سرعت خطی 40 میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب 124 و 194 مگا پاسکال به دست آمده است. کمترین میزان استحکام تسلیم و کششی در نمونه شماره 8 با سرعت چرخشی 2000 دور در دقیقه و سرعت خطی 40 میلی‌متر بر دقیقه به دست آمده است. در کلیه نمونه‌ها شکست در منطقه متأثر از حرارت-کارمکانیکی سمت آلیاژ AA6061 اتفاق افتاده است. نکته قابل توجه در مورد تغییرات استحکام اتصال این است که تنها دو نمونه شماره 2 و 4 به ترتیب با نسبت سرعت‌های 20 و 31.25 دور بر میلی‌متر، بدون عیب و سایر نمونه‌ها دارای عیب تونلی در منطقه اغتشاشی بودند. روند کلی تغییرات استحکام و موضع شکست یکسان در کلیه نمونه‌های جوش کاری نشان می‌دهد که حضور عیب در رفتار کلی استحکام تأثیری نداشته و روند تغییرات استحکام اتصال بیشتر تابع میزان حرارت ورودی جوش کاری می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش حرارت ورودی (افزایش نسبت سرعت چرخشی به خطی) استحکام اتصال کاهش می‌یابد.

پس از انجام آزمون کشش، سطح مقطع شکست نمونه‌های تست کشش عرضی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. شکل 11 مقطع شکست نمونه شماره 2 و 7 به ترتیب با کمترین و بیشترین حرارت ورودی را نشان می‌دهد. بر اساس طرح شکست این نوع را گسیختگی گود شده (دیپیل) می‌گویند، که حاکی از شکست نرم می‌باشد. با توجه به شکل 11 مشاهده می‌شود که در سطح شکست نمونه 2 حفرات ایجاد شده تا حدودی ریزتر و یکنواخت‌تر می‌باشند. در تصاویر مشاهده می‌شود که نمونه 2 دارای رسوبات درشت در داخل حفرات (برخی از رسوبات با پیکان در شکل نشان داده شده است) و نمونه 7 فاقد این رسوبات می‌باشند. دلیل آن رشد شدید رسوبات در منطقه متأثر از حرارت-کارمکانیکی نمونه 2 است در حالی که در نمونه 7 به دلیل حرارت ورودی بالاتر رسوبات حل می‌شوند و حفرات کم‌عمق‌تری ایجاد می‌شوند. رسوبات با ایجاد حفره‌های بسیار ریز در محدوده گلویی حالت تنش سه محوری برقرار می‌کنند که منجر به ایجاد ترک و شکست می‌شود [22]. "شکل 12" میزان استحکام مناطق مختلف جوش نمونه شماره 2 که از طریق نمونه‌های تست کشش طولی بدست آمده‌اند را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار تنش- کرنش مشخص می‌شود که میزان استحکام جوش (نمونه جهت عرضی در "شکل 12") بیشتر تحت تأثیر منطقه متأثر از حرارت-کارمکانیکی آلیاژ AA6061-T6 می‌باشد. به عبارتی ضعیف‌ترین موضع اتصال تعیین‌کننده استحکام کلی اتصال می‌باشد. مقایسه پروفیل سختی (شکل 9) و نمودار تنش-کرنش مناطق مختلف اتصال (شکل 12) در نمونه شماره 2، نشان می‌دهد که استحکام مکانیکی مناطق مختلف با

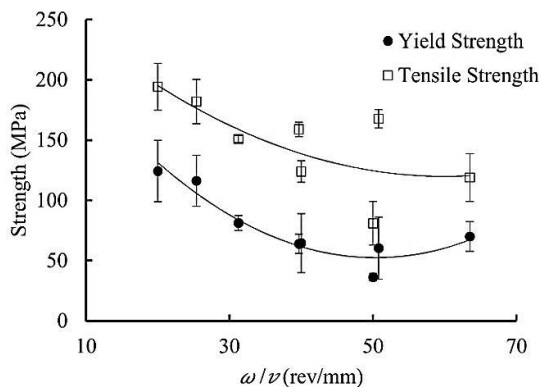


Fig.10 The yielding strength of joints as a function of rotational speed  
شکل 10 استحکام تسلیم اتصال برحسب سرعت چرخشی

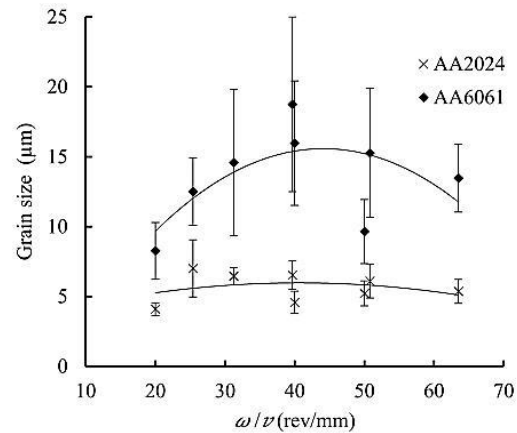


Fig. 8 Variations of grain size with the heat input index  
شکل 8 تغییرات اندازه دانه برحسب شاخص حرارت ورودی

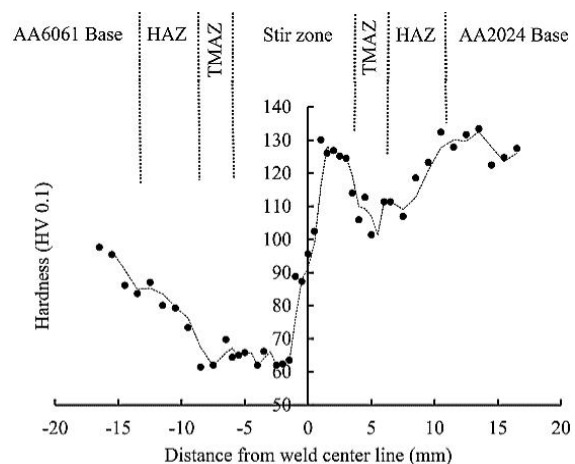
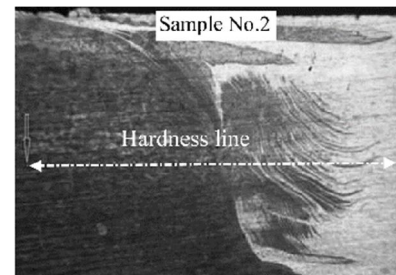


Fig. 9 Hardness distributions of sample 2.  
شکل 9 پروفیل سختی نمونه شماره 2

#### 4-3- استحکام

عواملی نظیر اندازه دانه‌ها، چگالی ناپیچایی‌ها، اندازه و مورفولوژی رسوبات و کامل بودن اتصال در آلیاژهای آلومینیم عملیات حرارتی‌پذیر بر روی استحکام کششی تأثیر می‌گذارند. خواص مکانیکی فلز پایه در جدول 2 آورده شده است. استحکام تسلیم و کششی نمونه‌های تست کشش عرضی برحسب نسبت سرعت چرخشی به خطی در "شکل 10" نشان داده شده است. با افزایش نسبت سرعت، میزان حرارت ورودی در موضع اتصال افزایش یافته و استحکام اتصال کاهش می‌یابد.

بیشترین میزان استحکام تسلیم و کششی متوسط در نمونه شماره 2 با

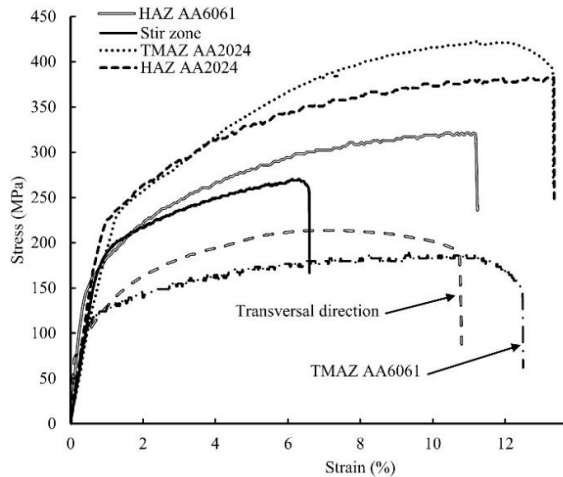


Fig. 12 Strain-Stress curve of weld zones in sample No.2

شکل 12 نمودار تنش- کرنش مناطق جوش در نمونه شماره 2

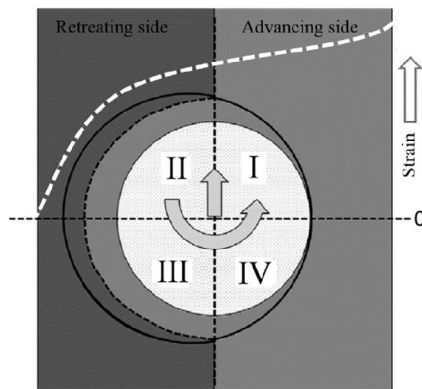


Fig. 13 Degree of deformation during friction stir welding [23]

شکل 13 میزان تغییر شکل در ضمن جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی [23]

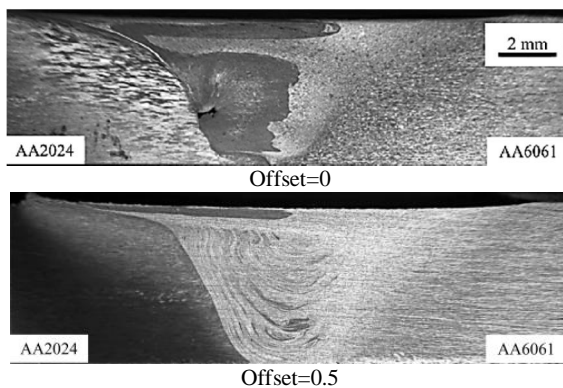


Fig. 14 Effect of offset on material flow in weld cross section

شکل 14 اثر آفست بر سیلان ماده در سطح مقطع جوش

سطح بالایی اتصال با توجه به تنش سیلان کمتر آلیاژ AA6061 و وجود نیروی برشی گسترده در سطوح نزدیک شانه ابزار، بخش بیشتری از آلیاژ AA6061 از سمت پس رو کنده شده و به سمت پیشرو حرکت می کند. در سطوح پایین تر اتصال دیده می شود که

سختی مناطق متناظر خود ارتباط نزدیکی دارد به نحوی که با افزایش سختی میزان استحکام افزایش و ازدیاد طول کاهش می یابد. منطقه اغتشاشی با توجه به اینکه هر دو آلیاژ را شامل شده است، رفتار منحنی تنش- کرنش آن را با برآیند سختی می توان توجیه کرد. برآیند سختی منطقه اغتشاشی مقداری نزدیک به سختی منطقه متأثر از حرارت AA6061 دارد و مشاهده می شود که رفتار منحنی تنش- کرنش این دو منطقه نزدیک به همدیگر می باشد.

### 3-5- اثر آفست

یکی از عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی و نحوه سیلان مواد در منطقه جوش در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی میزان آفست اعمالی ابزار نسبت به فصل مشترک دو قطعه می باشد. براساس مطالعات لانگ و همکارانش [23] همان طور که در "شکل 13" مشخص شده است میزان کرنش در سمت پیشرو بیشتر از سمت پس رو است. براین اساس ماده در یک چهارم اول (منطقه I) نسبت به یک چهارم دوم (منطقه II) تحت تأثیر کار مکانیکی و نیروی برشی بیشتری قرار می گیرد. بنابراین اگر فصل مشترک دو قطعه به سمت پیشرو انتقال داده شود، یا به عبارتی محور ابزار را به سمت پس رو انتقال دهیم، اختلاط بهتری از دو ماده را شاهد خواهیم بود. همان طور که در "شکل 14" مشاهده می شود با اعمال آفست ابزار در حین جوش کاری به سمت پس رو در نمونه شماره 1، ضمن حذف عیب در مقطع اتصال اختلاط دو ماده بیشتر انجام شده است به گونه ای که لایه های مختلف دو ماده به خوبی در هم سیلان یافته اند. براساس آزمون کشش، پس از اعمال آفست استحکام تسلیم و کششی به ترتیب از 116 به 204 مگا پاسکال و 182 به 245 مگا پاسکال افزایش یافته اند.

### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق اتصال غیر هم جنس آلیاژهای آلومینیم AA2024-T351 و AA6061-T6 توسط روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از ابزار با پین هرم مربعی ناقص با موفقیت انجام و نتایج زیر حاصل شد:

1- بررسی نحوه سیلان مواد در عمق های مختلف اتصال نشان داد که در

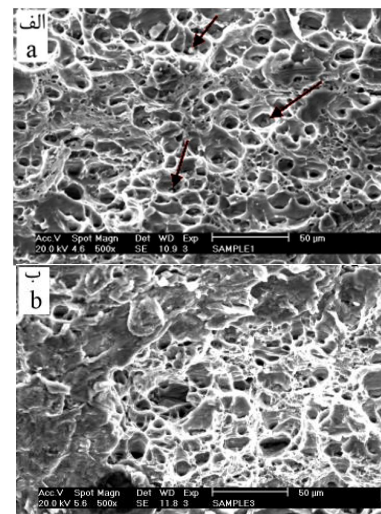


Fig. 11 The SEM image of fracture surface of (a) sample No.2 (b) sample No.7

شکل 11 تصویر (SEM) از سطح شکست (الف) نمونه شماره 2، (ب) نمونه شماره 7



- geometry in microstructure and mechanical properties of AA7075/SiC nanocomposite fabricated by friction stir welding technique, *Materials and Design*, Vol.53, pp. 519-527, 2014 .
- [4] P. Sadeesh, M. Venkatesh Kannan, V. Rajkumar, P. Avinash, N. Arivazhagan, K. Devendranath Ramkumar, S. Narayanan, Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals, *Procedia Engineering*, Vol.75, pp.145-149, 2014 .
- [5] S. T. Amancio-Filho, S. Sheikhi, J. F. dos Santos, C. Bolfarini, Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminum alloys 2024-T351 and 6056-T4, *materials processing technology*, Vol. 206, pp. 132-142, 2008.
- [6] P. Cavaliere, A. De Santis, F. Panella, A. Squillace, Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of dissimilar AA6082-AA2024 joints produced by friction stir welding, *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 609-616, 2009.
- [7] V. RajKumar, M. VenkateshKannan, P. Sadeesh, Arivazhagan, K.D.Ramkumar, Studies on effect of tool design and welding parameters on the friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA 5052 – AA 6061, *Procedia Engineering*, Vol. 75, pp. 93-97, 2014.
- [8] S. A. Khodir, T. Shibanagi, Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys, *Materials Science and Engineering B*, Vol. 148, pp. 82-87, 2008.
- [9] S. Ravikumar, V. SheshagiriRao, R. V. Pranesh, Effect of Welding Parameters on Macro and Microstructure of Friction Stir Welded Dissimilar Butt Joints between AA7075-T651 and AA6061-T651, *Procedia Materials Science*, Vol.5, pp. 1726-1735, 2014.
- [10] H. Izadi, J. Fallu, A. Abdel-Gwad, T. Liyanage, A. P. Gerlich, Analysis of tool geometry in dissimilar Al alloy friction stir welds using optical microscopy and serial sectioning, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 18, No. 4, pp. 307-313, 2013.
- [11] A. M. Gafer, T. S. Mahmoud, E. H. Mansour, Microstructural and mechanical characteristics of AA7020-O Al plates joined by friction stir welding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 27-28, pp. 7424-7429, 2010 .
- [12] H. Zhang, H. Liu, Characteristics and formation mechanisms of welding defects in underwater friction stir welded aluminum alloy, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, Vol. 1, No. 6, pp. 269-281, 2012 .
- [13] J. G. Kaufman, *Properties of aluminum alloys: tensile, creep, and fatigue data at high and low temperatures*, pp.16-25, Materials Park, OH, ASM International, 1999 .
- [14] Y. V. R. K. Prasad, S. Sasidhara, *Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps*, pp.25-38, Materials Park, OH, ASM International, 1997 .
- [15] Z. Y. Ma, R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Superplastic deformation behaviour of friction stir processed 7075Al alloy, *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 17, pp. 4419-4430, 2002 .
- [16] F. J. Humphreys, P. B. Prangnell, R. Priestner, Fine-grained alloys by thermomechanical processing, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 15-21, 2001 .
- [17] L. Fratini, G. Buffa, CDRX modelling in friction stir welding of aluminum alloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 1188-1194, 2005 .
- [18] G. Buffa, L. Fratini, R. Shivpuri, CDRX modelling in friction stir welding of AA7075-T6 aluminum alloy: Analytical approaches, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, pp. 356-359, 2007 .
- [19] Z. Zhang, Q. Wu, Numerical studies of tool diameter on strain rates, temperature rises and grain sizes in friction stir welding, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 10, pp. 4121-4128, 2015 .
- [20] H. J. Aval, Microstructure and residual stress distributions in friction stir welding of dissimilar aluminum alloys, *Materials and Design*, Vol. 87, pp. 405-413, 2015 .
- [21] J. F. Guo, H. C. Chen, C. N. Sun, G. Bi, Z. Sun, J. Wei, Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters, *Materials and Design*, Vol. 56, pp. 185-192, 2014 .
- [22] *ASM Handbook: Fractography*, pp. 166-178: ASM International, 1987 .
- [23] T. Long, W. Tang, A. P. Reynolds, Process response parameter relationships in aluminum alloy friction stir welds, *Science and technology of welding and joining*, Vol. 12, No. 4, pp. 311-317, 2007

وسعت منطقه اغتشاش کاهش یافته و رفتار سیلانی دو ماده تغییر می کند و سهم آلیاژ AA2024 در منطقه اغتشاشی افزایش می یابد.

2- با افزایش حرارت ورودی و زمان ماندگاری ابزار در یک نقطه مشخص ماده به اندازه کافی خمیری شده و سیلان یکنواختی را در عمق های مختلف نشان می دهند به گونه ای که فصل مشترک اتصال از حالت لایه لایه به صورت یکنواخت تبدیل می شود. همچنین با افزایش حرارت ورودی سهم آلیاژ AA2024 در موضع اتصال افزایش می یابد.

3- اثر متقابل سرعت کرنش و دما باعث ایجاد رفتارهای متفاوت در اندازه دانه منطقه اغتشاشی می شود. اندازه دانه در سمت پیشرو در کلیه اتصال ها کمتر از سمت پس رو می باشد. اثر سرعت کرنش بر اثر دما بر اندازه دانه منطقه اغتشاشی سمت پیشرو غالب می باشد. با افزایش نسبت سرعت تا 40 دور بر میلی متر اندازه دانه در سمت پیشرو و پس رو افزایش و در نسبت های فراتر از آن به دلیل برتری اثر سرعت کرنش بر اثر دما کاهش پیدا می کند.

4- بررسی استحکام موضعی مناطق مختلف اتصال نشان داد که منطقه متأثر از حرارت-کار مکانیکی آلیاژ AA6061-T6 با کمترین میزان تنش تسلیم، تعیین کننده استحکام کلی اتصال می باشد. همچنین استحکام مکانیکی مناطق مختلف با سختی مناطق متناظر خود ارتباط نزدیکی دارد به نحوی که با افزایش سختی میزان استحکام افزایش و ازدیاد طول کاهش می یابد.

5- اعمال آفست به ابزار در حین جوش کاری به سمت پس رو، به دلیل قرار گرفتن فصل مشترک دو آلیاژ در سمت پیشرو با میزان کرنش بیشتر، موجب حذف عیب در مقطع اتصال، بهبود اختلاط دو ماده در موضع اتصال و افزایش استحکام اتصال می شود.

## 5- فهرست علائم

سختی ویکرز	HV
علائم یونانی	
سرعت خطی (mm/min)	v
سرعت چرخشی (rpm)	$\omega$

## 6- مراجع

- [1] M. Nazari, M. Besharati, M. R. Farahani, J. M. Milani, H. M. Jamaljan, Investigation on the effects of using Nano-size Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder on the mechanical and microstructural in the multi-passes continuous friction stir welding of the 2024-T6, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 85-90, 2014. (in Persian)
- [2] D. Trimble, G.E. O'Donnell, J. Monaghan, Characterisation of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.14, pp. 141-150, 2015 .
- [3] M. Bahrami, M.K. Besharati Givi, K. Dehghani, N. Parvin, On the role of pin