



# بررسی خواص ساختاری و مکانیکی اتصال غیرهمجنس ورق آلومینیم 5052 به آلیاژ تیتانیوم با فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

حسین رستمی<sup>1</sup>، سلمان نوروزی<sup>2\*</sup>، حامد جمشیدی اول<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

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

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

\*بابل، صندوق پستی 484، s-nourouzi@nit.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 دی 1394

پذیرش: 06 اسفند 1394

ارائه در سایت: 28 فروردین 1395

کلید واژگان:

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

آلیاژ آلومینیم 5052

آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V

ترکیبات بین فلزی

## چکیده

روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی مزایای بسیاری در اتصالات غیرهمجنس فلزات و آلیاژها نسبت به روش‌های جوش کاری ذوبی دارا است. در این مقاله اتصال لب به لب ورق آلیاژ آلومینیم 5052 به آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V توسط جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی مورد مطالعه قرار گرفته است. جوش کاری با استفاده از ابزار با پین هرم ناقص انجام شد. تاثیر سرعت چرخشی و خطی بر خواص مکانیکی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که انتخاب مناسب پارامترهای جوش کاری باعث بوجود آمدن اتصال با خواص متالورژیکی و مکانیکی مناسب می‌شود. بیشترین استحکام کششی به میزان 260 مگاپاسکال در سرعت چرخشی 500 دور در دقیقه و سرعت خطی 40 میلی‌متر بر دقیقه بدست آمد که این مقدار حدود 94 درصد استحکام کششی آلیاژ آلومینیم است. با افزایش سرعت چرخشی از 500 به 1000 دور در دقیقه به دلیل افزایش بیش از حد حرارت ورودی باعث ایجاد ترک در محل اتصال شد. با افزایش سرعت خطی از 40 به 56 میلی‌متر بر دقیقه و در سرعت چرخشی 1000 دور در دقیقه اتصال سالم با استحکام کششی 192 مگاپاسکال حاصل شد که دلیل کاهش استحکام می‌تواند ناشی از تشکیل ترکیبات بین فلزی مانند  $TiAl_3$  در مقطع اتصال دو آلیاژ باشد.

## The investigation of structure and mechanical properties Dissimilar joining of aluminum 5052 sheet to titanium alloy by friction stir welding

Hossein Rostami, Salman Nourouzi\*, Hamed Jamshidi Aval

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

\* P.O.B 484, Babol, Iran, s-nourouzi@nit.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 02 January 2016  
Accepted 25 February 2016  
Available Online 16 April 2016

### Keywords:

Friction stir welding  
Aluminum alloy  
Titanium alloy  
Intermetallic compounds

## ABSTRACT

Friction stir welding (FSW) has many advantages in welding dissimilar joints in comparison with fusion welding methods. In this study, weld ability of butt joint of 5052 aluminum alloy and Ti-6Al-4V titanium alloy by FSW process has been studied and discussed. The welding was successfully performed by using a tool with frustum pin. The influences of both rotational and traverse speed of welding tool on mechanical properties are investigated. The results show that the metallurgical and mechanical properties improve by choosing appropriate parameters. The highest tensile strength of 260 MPa was obtained at rotational speed of 500 rpm and a 40 mm/min traverse speed, which was ~ 94% of the aluminum base metal tensile strength. As a result of increasing the rotational speed from 500 to 1000 rpm, high heat input can form cracks at joint area. In rotational speed of 1000 rpm, increasing traverse speed from 40 to 56 mm/min leads to a sound joint with 192 MPa of tensile strength. This decrease in tensile strength can be related to the formation of intermetallic compounds such as  $TiAl_3$  along the entire interface between the two alloys.

## 1- مقدمه

فلز تیتانیوم و آلیاژهای آن دارای خواص منحصر بفردی از جمله استحکام بالا، سختی بالا، دانسیته نسبتاً پایین و مقاومت در برابر خوردگی هستند. این فلز در صنایع مهمی مانند صنایع نظامی، هوا و فضا و نفت و گاز بکار می‌رود ولی جوش‌پذیری پایینی در حالت ذوبی دارد [1]. آلومینیم و آلیاژهای آن بدلیل خواص مناسب از جمله انعطاف‌پذیری، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی به‌طور گسترده در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی، کشتی‌سازی و هوا و فضا مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما جوش-کاری ذوبی آلومینیم دارای مشکلات فروانی از جمله ترک ناشی از انجماد، تخلخل، حلالیت بالای هیدروژن در حالت مذاب می‌باشد [2]. در سال‌های اخیر اتصال آلیاژهای آلومینیم و تیتانیوم بدلیل بوجود آوردن خواص مکمل مناسب و کاهش هزینه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. اتصال این دو فلز توسط روش‌های معمول جوش کاری به‌دلیل به‌وجود آمدن عیوب مختلف از جمله ترکیبات ترد بین فلزی در فلز جوش امکان‌پذیر نیست [3-5]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تشکیل ترکیبات بین فلزی در جوش کاری این

فلز تیتانیوم و آلیاژهای آن دارای خواص منحصر بفردی از جمله استحکام بالا، سختی بالا، دانسیته نسبتاً پایین و مقاومت در برابر خوردگی هستند. این فلز در صنایع مهمی مانند صنایع نظامی، هوا و فضا و نفت و گاز بکار می‌رود ولی جوش‌پذیری پایینی در حالت ذوبی دارد [1]. آلومینیم و آلیاژهای آن بدلیل خواص مناسب از جمله انعطاف‌پذیری، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی به‌طور گسترده در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی، کشتی‌سازی و هوا و فضا مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما جوش-کاری ذوبی آلومینیم دارای مشکلات فروانی از جمله ترک ناشی از انجماد، تخلخل، حلالیت بالای هیدروژن در حالت مذاب می‌باشد [2]. در سال‌های اخیر اتصال آلیاژهای آلومینیم و تیتانیوم بدلیل بوجود آوردن خواص مکمل مناسب و کاهش هزینه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. اتصال این دو فلز توسط روش‌های معمول جوش کاری به‌دلیل به‌وجود آمدن عیوب مختلف از جمله ترکیبات ترد بین فلزی در فلز جوش امکان‌پذیر نیست [3-5]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تشکیل ترکیبات بین فلزی در جوش کاری این

Please cite this article using:

H. Rostami, S. Nourouzi, H. Jamshidi Aval, The investigation of structure and mechanical properties Dissimilar joining of aluminum 5052 sheet to titanium alloy by friction stir welding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 187-195, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Rostami, S. Nourouzi, H. Jamshidi Aval, The investigation of structure and mechanical properties Dissimilar joining of aluminum 5052 sheet to titanium alloy by friction stir welding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 187-195, 2016 (in Persian)

**Table 1** Chemical composition of 5052 aluminum and TiAl6V4 titanium alloys

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم 5052 و تیتانیوم TiAl6V4

| ترکیب شیمیایی (wt%) |      |      |      |     |      |                   |
|---------------------|------|------|------|-----|------|-------------------|
| V                   | Cr   | Fe   | Si   | Mg  | Ti   | Al                |
| -                   | 0.17 | 0.23 | 0.13 | 3.2 | -    | تراز              |
| 3.92                | -    | 0.13 | -    | -   | تراز | 6.62              |
|                     |      |      |      |     |      | AA5052<br>TiAl6V4 |

**Table 2** Mechanical properties of alloys

جدول 2 خواص مکانیکی آلیاژها

| آلیاژ   | استحکام کششی نهایی (MPa) | استحکام تسلیم (MPa) | درصد ازدیاد طول | سختی (VHN) |
|---------|--------------------------|---------------------|-----------------|------------|
| AA5052  | 275                      | 238                 | 10              | 70         |
| TiAl6V4 | 951                      | 880                 | 11              | 350        |

ورق‌ها به صورت لب به لب به هم جوش کاری شدند. آلیاژ تیتانیوم به دلیل تنش سیلان و نقطه ذوب بیشتر نسبت به آلیاژ آلومینیم در سمت پیشرو و آلیاژ آلومینیم در سمت پسرو فرایند قرار گرفت. در شکل 1 شمایی از فرایند جوش کاری و نحوه آفست‌دهی ابزار نشان داده شده است. ابزار با جنس کاربید تنگستن و با هندسه پین هرم ناقص برای جوش کاری استفاده شد. شکل 2 مشخصات هندسی و ابعادی ابزار مورد استفاده در جوش کاری را نشان می‌دهد. پارامترهای فرایند در جدول 3 درج شده است.

پس از فرایند جوش کاری، نمونه‌هایی با اندازه مناسب از مقاطع عرضی آن‌ها تهیه شد و با سمباده شماره 180 تا 3000 سمباده‌زنی و سپس پولیش شدند. برای تحلیل ریزساختاری و سیلان مواد در ناحیه اتصال سمت آلیاژ آلومینیم، نمونه‌ها با محلول حکاکی پولاتون اصلاح شده 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) حکاکی و توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفتند. از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای مشاهده و بررسی فصل مشترک اتصال و همچنین توزیع عناصر در مقطع اتصال استفاده شد. همچنین از طیف سنج پراش اشعه ایکس (XRD) برای آنالیز نوع ترکیبات بین فلزی به وجود آمده در سطح مقطع اتصال استفاده شد.

برای سنجش خواص مکانیکی اتصال، سنج‌های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8 [11] از مقاطع جوش کاری شده تهیه شد و توسط دستگاه کشش با سرعت 1 میلی‌متر بر دقیقه مورد سنجش قرار گرفت. از ریزسختی ویکرز برای تعیین سختی مناطق مختلف نمونه‌ها استفاده شد. میزان بار اعمالی 300 گرم و زمان آزمون 15 ثانیه در نظر گرفته شد.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- بررسی ظاهری اتصال

شکل 3 تصاویر مربوط به تاثیر سرعت خطی (سرعت چرخشی ثابت) بر روی ظاهر نمونه‌های جوش کاری را نشان می‌دهد. در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با انتخاب مناسب پارامترهای جوش کاری می‌توان به اتصال با کیفیت و عاری از عیب دست یافت ولی انتخاب نامناسب این پارامترها باعث بوجود آمدن عیوب مختلفی از جمله عیب تونل در خط جوش، ترک و عدم پر شدگی فلز جوش بدلیل جریان نامناسب مواد می‌شود [12].

دو فلز شدت وابسته به دما و زمان نگهداری در درجه حرارت‌های بالا می‌باشد [6]. فرایندهای جوش کاری حالت جامد بدلیل پایین بودن حرارت ورودی در حین فرایند روش مناسبی برای اتصال فلزات غیرهمجنس به شمار می‌روند [7]. فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)<sup>1</sup> یکی از روش‌های جوش کاری حالت جامد است که می‌توان از این فرایند برای اتصال این دو فلز بهره گرفت [8]. در سال‌های اخیر تحقیقاتی در مورد اتصال این دو فلز توسط روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی صورت گرفته است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

لی و همکاران [3] آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V را با استفاده از روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به آلیاژ آلومینیم Al-6Mg متصل کردند. آن‌ها اثر پارامترهای سرعت چرخشی، سرعت خطی، آفست ابزار و همچنین جهت چرخش ابزار را روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال بررسی کردند. آنان گزارش کردند زمانی که فلز تیتانیوم در سمت پیشرو فرایند قرار گرفت خواص مکانیکی بهبود پیدا کرده است. همچنین بالاترین استحکام کششی اتصال در سرعت چرخشی 1200 دور بر دقیقه، سرعت خطی 60 میلی‌متر بر دقیقه و میزان آفست ابزار 1 میلی‌متر به سمت آلیاژ تیتانیوم به اندازه 92 درصد استحکام فلز پایه آلیاژ آلومینیم حاصل شده است. درسلر و همکاران [9] آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V را با استفاده از روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به آلیاژ آلومینیم 2024 متصل کردند. در این تحقیق پین ابزار به -طور کامل داخل آلیاژ آلومینیم قرار گرفت. آن‌ها حداکثر استحکام کششی نهایی اتصال را حدود 72 درصد آلیاژ آلومینیم در سرعت چرخشی 800 دور بر دقیقه و سرعت خطی 80 میلی‌متر بر دقیقه گزارش کردند. چن و ناکاتا [10] در سال 2009 تیتانیوم خالص را توسط روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به آلیاژ آلومینیم ریخته‌گری ADC12 متصل کردند و خواص مکانیکی این اتصال را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که بهترین سرعت خطی در سرعت چرخشی ثابت 1500 دور بر دقیقه، 90 میلی‌متر بر دقیقه و میزان حداکثر نیروی شکست 62 درصد استحکام کششی فلز آلومینیم می‌باشد.

با توجه به کاربرد آلیاژهای آلومینیم سری 5xxx و تیتانیوم Ti-6Al-4V در صنایع خاص و حساس از جمله صنایع هوا و فضا و نظامی اتصال این دو آلیاژ نیز می‌تواند در صنایع فوق مورد توجه قرار گیرد. در پژوهش حاضر دو آلیاژ آلومینیم 5052 و تیتانیوم Ti-6Al-4V توسط فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر متصل شدند. به منظور بررسی ریزساختاری و نحوه سیلان مواد در موضع اتصال از تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی استفاده شد. ارزیابی خواص مکانیکی با استفاده از آزمون کشش و میکروسختی سنجی انجام شد.

### 2- روش آزمایش

در این تحقیق از ورق‌های آلیاژ آلومینیم AA5052-H32 و آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به ضخامت 2 میلی‌متر استفاده شد. ورق‌ها برای انجام جوش کاری با ابعاد 100x50 میلی متر 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 دو آلیاژ مورد استفاده در جدول 1 و 2 درج شده است.

1- Friction stir welding

Table 3 Friction stir welding process parameters

جدول 3 پارامترهای فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

| شماره نمونه | سرعت چرخشی (rpm) | سرعت خطی (mm/min) | سرعت خطی/سرعت چرخشی (rev/mm) |
|-------------|------------------|-------------------|------------------------------|
| 1           | 500              | 40                | 12.5                         |
| 2           | 500              | 56                | 8.92                         |
| 3           | 500              | 80                | 6.25                         |
| 4           | 710              | 40                | 17.75                        |
| 5           | 710              | 56                | 12.67                        |
| 6           | 710              | 80                | 8.87                         |
| 7           | 1000             | 40                | 25                           |
| 8           | 1000             | 56                | 17.85                        |
| 9           | 1000             | 80                | 12.5                         |

با توجه به شکل 3 مشاهده می‌شود نمونه شماره 1 دارای ظاهر اتصال مناسب و بدون عیب است. با بالا رفتن سرعت خطی از 40 به 56 و سپس به 80 میلی‌متر بر دقیقه عیب عدم پر شدگی فلز جوش ایجاد شده است. افزایش سرعت خطی ابزار باعث پایین آمدن حرارت ورودی به ازای واحد طول جوش، اغتشاش ناکافی مواد در حین تغییر شکل پلاستیک و همچنین کوتاه شدن زمانی که ابزار در ناحیه اغتشاش یافته قرار می‌گیرد شده و در نتیجه عیب عدم پرشدگی فلز جوش در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی را به همراه داشته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه 4 و 5 دارای ظاهر بدون عیب هستند. نمونه شماره 6 دارای عیب عدم پر شدگی فلز جوش می‌باشد. در نمونه شماره 7 ترک طولی در فلز جوش مشاهده می‌شود. این ترک بلافاصله پس از اتمام جوش کاری بوجود آمده است، دلیل اصلی به‌وجود آمدن ترک در اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم و تیتانیوم تشکیل بیش از حد ترکیبات بین فلزی از جمله آلومینیدهای تیتانیوم  $TiAl_3$  و  $Ti_3Al$  در فلز جوش بدلیل بالا بودن حرارت ورودی، حضور تنش‌های ناشی از انقباض فلز جوش و همچنین تفاوت در ضریب انبساط حرارتی دو آلیاژ گزارش شده است [5]. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌های 8 و 9 بدون عیب می‌باشند.

شکل 4 محدوده بهینه پارامترهای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی و تأثیر آن‌ها بر ایجاد عیوب ظاهری جوش‌ها در این تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بالا بودن سرعت چرخشی به همراه سرعت خطی کم باعث بالا رفتن حرارت ورودی و ایجاد عیوبی مانند ترک در فلز جوش می‌شود. پایین بودن سرعت چرخشی به همراه سرعت خطی بالا باعث کم شدن حرارت ورودی و ایجاد عیوبی از جمله عدم پرشدگی فلز جوش می‌شود. بالا بودن هم زمان این دو پارامتر باعث به‌وجود آمدن عیوب پیش‌بینی نشده در فلز جوش می‌شود [13].

### 2-3- بررسی ماکروساختاری

شکل 5 تصاویر ماکروساختار مقطع عرضی نمونه‌های جوش کاری شده بدون عیب را نشان می‌دهد. آلیاژ تیتانیوم در سمت پیشرو (سمت راست) و آلیاژ آلومینیوم سمت پسرو (سمت چپ) فرایند قرار داشته است. با توجه به این‌که آلیاژ تیتانیوم در سمت پیشرو فرایند قرار دارد و وجود گرادیان سرعت بالا نسبت به سمت پسرو در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، حرکت ابزار باعث کندن ذرات تیتانیوم از سمت پیشرو و هدایت آن‌ها به سمت پسرو می‌شود. از آن‌جایی که قسمت عمده پین ابزار در سمت آلیاژ آلومینیوم قرار دارد و قدرت سیلان بالای آلومینیوم نسبت به تیتانیوم حرکت چرخشی ابزار باعث پخش شدن ذرات تیتانیوم در موضع اتصال می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان سیلان آلیاژ تیتانیوم داخل آلیاژ آلومینیوم با افزایش سرعت چرخشی و بالا رفتن حرارت ورودی، افزایش داشته است.

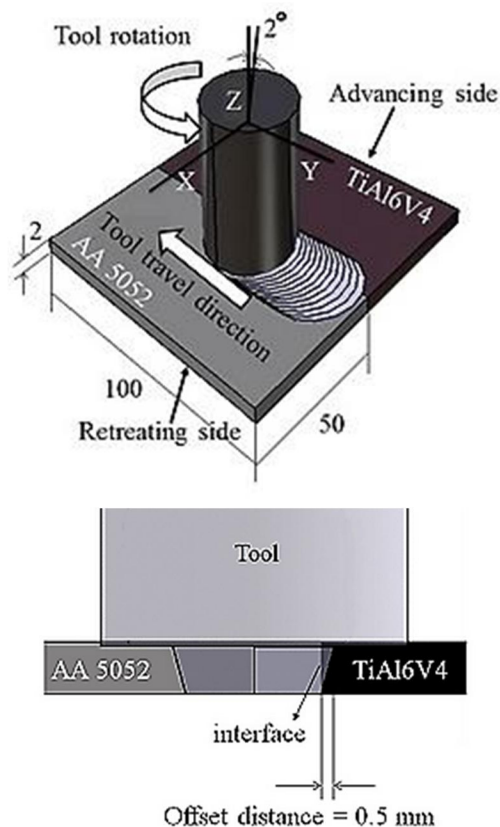


Fig. 1 Schematic illustration of friction stir butt welding

شکل 1 تصویر شماتیک جوش کاری لب به لب اصطکاکی اغتشاشی

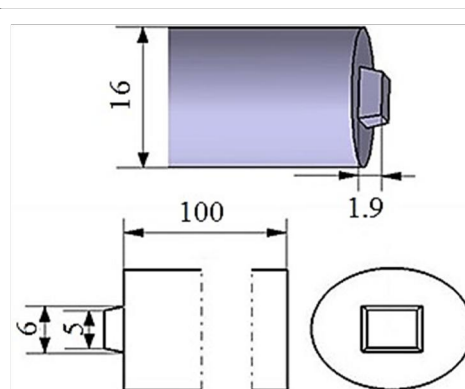


Fig. 2 Tool geometrical characteristics

شکل 2 مشخصات هندسی و ابعادی ابزار جوش کاری

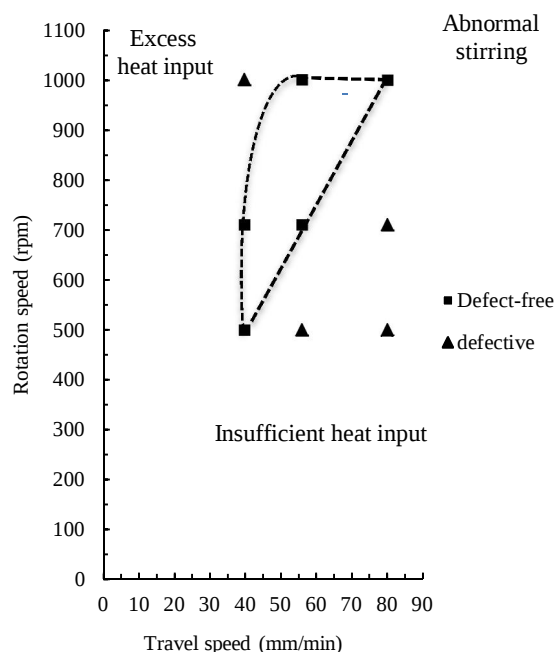


Fig. 4 Range of optimum FSW parameters

شکل 4 محدوده بهینه پارامترهای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

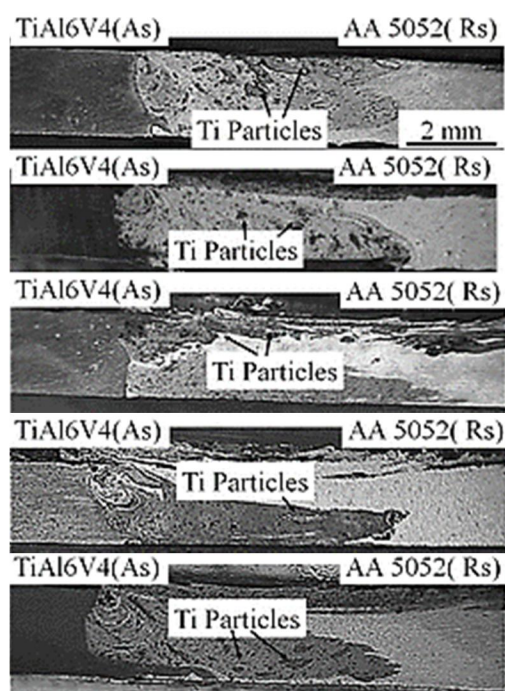


Fig.5 Cross-section macrostructure of welded samples

شکل 5 ماکروساختار مقطع عرضی نمونه‌های جوش کاری شده

می‌آید [13]. با محاسبه این مقدار و مقایسه آن با نتایج حاصل در فرایند اصطکاکی اغتشاشی به اطلاعات مفیدی می‌توان دست یافت. شکل 6 (الف) مقادیر میانگین استحکام کششی نهایی نمونه‌های جوش کاری شده را برحسب نسبت سرعت چرخشی بر سرعت خطی  $(\omega/v)$  و شکل 7 نمودارهای تنش کرنش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بیشترین میزان میانگین استحکام کششی

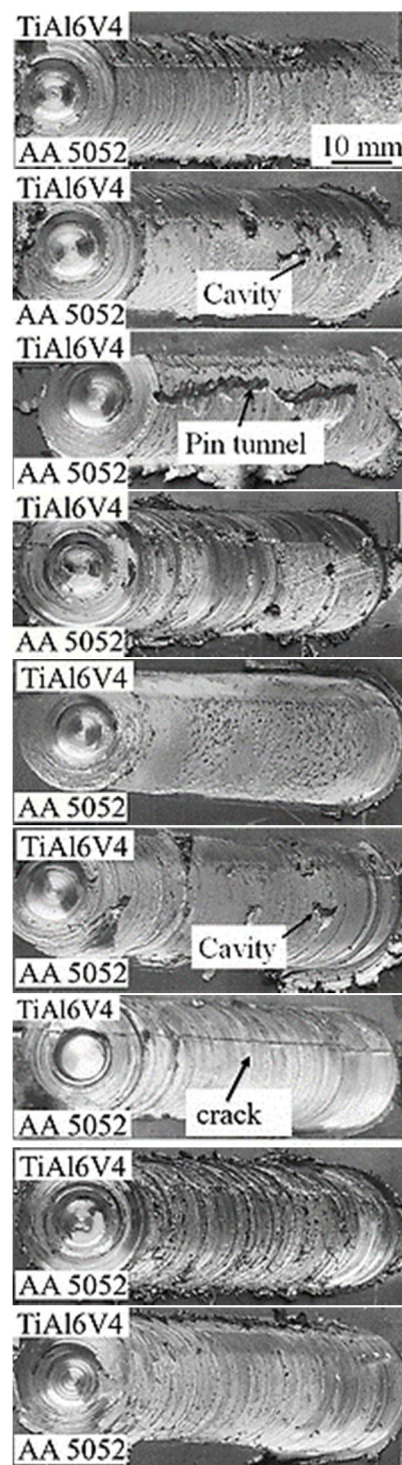


Fig. 3 Surface appearance of welded samples

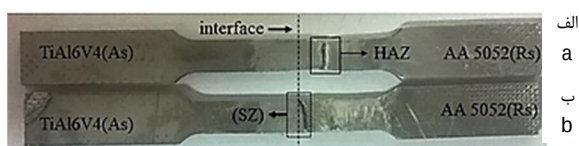
شکل 3 تصویر ظاهری نمونه‌های جوش کاری شده

### 3-3- استحکام کششی

استحکام کششی در فرایند اصطکاکی اغتشاشی به عوامل مختلفی از جمله ترکیب فلز جوش، عیوب جوش کاری و شکل و اندازه رسوبات و دانه‌ها وابسته است. نسبت سرعت چرخشی  $(\omega)$  به سرعت خطی  $(v)$  در فرایند اصطکاکی اغتشاشی شاخصی برای حرارت ورودی برحسب مسافت طی شده بشمار

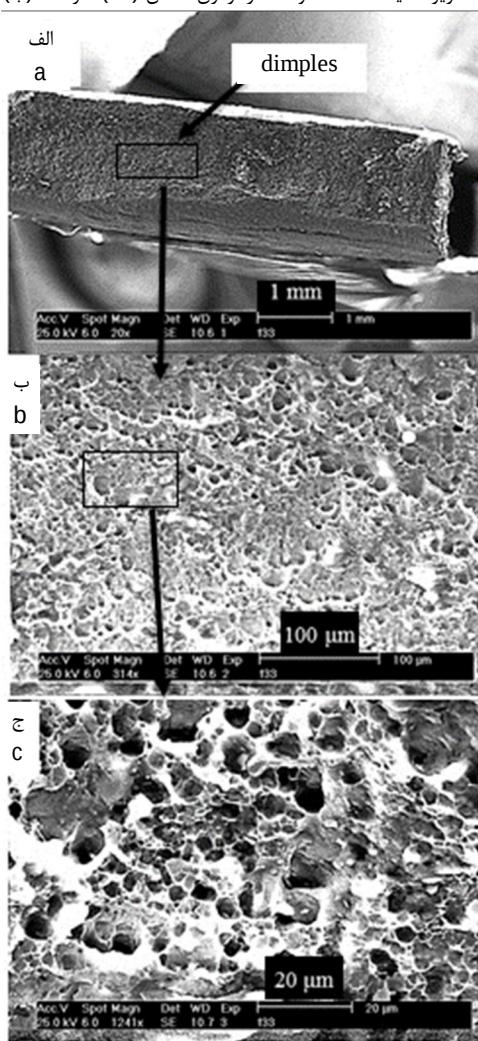
حرارت احتمال شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی افزایش یافته که می‌تواند باعث کاهش استحکام این نمونه شود. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود با افزایش حرارت ورودی به اتصال، استحکام کششی اتصال کاهش می‌یابد. شکل 8 مقطع شکست سنجه کشش نمونه 1 و 8 را نشان می‌دهد همان‌گونه که مشاهده می‌شود محل شکست نمونه 1 ناحیه متأثر از حرارت و نمونه 8 از منطقه اغتشاشی است.

پس از انجام آزمون کشش، سطح مقطع شکست نمونه‌های سمت فلز تیتانیوم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شکل 9 (الف) مربوط به مقطع شکست نمونه 1 و شکل 9 (ب) و شکل 9 (ج) بزرگنمایی بالاتر شکل 9 (الف) می‌باشند. همان‌گونه که



**Fig. 8** The image of fracture of the fractured specimens in tensile test (a) sample 1 (b) sample 8

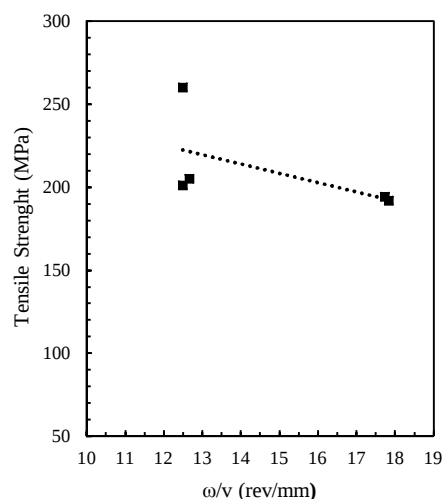
شکل 8 تصویر ناحیه شکست نمونه‌ها در آزمون کشش (الف) نمونه 1 (ب) نمونه 8



**Fig.9** The SEM image of fracture surface of sample No.1 at Ti alloy side (a) fracture surface (b),(c) fracture surface with higher magnification

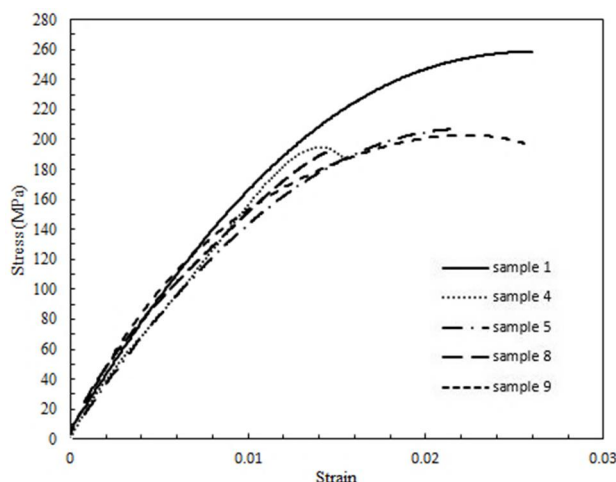
شکل 9 تصویر (SEM) از سطح شکست نمونه شماره 1 در سمت آلیاژ تیتانیوم با بزرگ‌نمایی زیاد و کم

نهایی در نمونه 1 بدست آمد که میزان آن 260 مگاپاسکال است. این مقدار برابر 94 درصد استحکام کششی فلز پایه آلیاژ آلومینیومی است. نمونه 8 در بین نمونه‌های سالم جوش کاری شده دارای بالاترین حرارت ورودی بوده است. نسبت سرعت چرخشی به سرعت خطی در این نمونه 17.85 rev/mm می‌باشد و میزان استحکام کششی در این نمونه 192 مگاپاسکال است. مهمترین عامل کاهش استحکام کششی در اتصال غیرهمجنس دو فلز آلومینیوم و تیتانیوم، تشکیل ترکیبات بین فلزی از جمله  $Ti_3Al$ ،  $TiAl_3$  و دیگر ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال آن‌ها است [3]. نمونه شماره 9 میزان نسبت سرعت چرخشی بر سرعت خطی یکسانی با نمونه 1 دارد، اما مشاهده می‌شود استحکام کششی نهایی در این نمونه به میزان 197 مگاپاسکال رسیده است. کاهش استحکام کششی در این نمونه به این دلیل است که با افزایش هم‌زمان سرعت چرخشی و سرعت خطی اگرچه نسبت سرعت چرخشی به سرعت خطی ثابت می‌ماند ولی حجم حرارتی که به موضع اتصال اعمال می‌شود به دلیل افزایش سرعت خطی ابزار فرصت کمتر برای اتلاف پیدا می‌کند و این مساله باعث افزایش درجه حرارت در منطقه اغتشاشی نمونه شماره 9 نسبت به نمونه شماره 1 می‌شود. با افزایش درجه



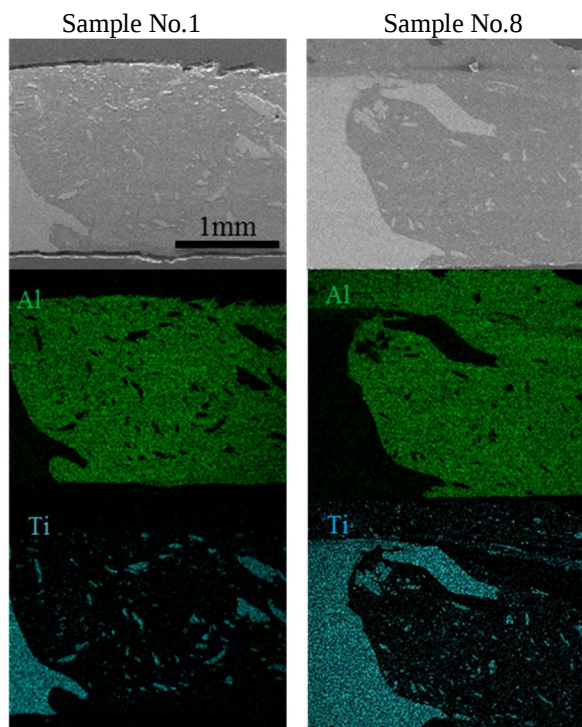
**Fig.6** The tensile strength of joints as a function of welding heat input

شکل 6 استحکام کششی اتصال برحسب حرارت ورودی جوش کاری



**Fig. 7** Strain-Stress curve of samples

شکل 7 نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها



**Fig. 11** Element mapping results of cross-section of sample No.1 and 8

شکل 11 نتایج مکان‌نگاری عنصری مقطع عرضی نمونه شماره 1 و 8

تغییر شکل پلاستیک به همراه تغییر شکل شدید مواد در منطقه اغتشاش، احتمال نفوذ عناصر و تشکیل ترکیبات بین فلزی در محل اتصال را افزایش می‌دهد. تصویر SEM فصل مشترک نمونه 8 در شکل 12 نشان داده شده است. مناطق با رنگ‌های تیره آلیاژ آلومینیوم و مناطق با رنگ‌های روشن آلیاژ تیتانیوم می‌باشد. برای آنالیز دقیق‌تر تغییرات عناصر آلیاژی، از 5 نقطه مختلف مشخص شده در تصویر (ب) آنالیز EDS گرفته شد. در جدول 4 میزان این تغییرات برحسب درصد اتمی درج شده است. با توجه به آنالیز بدست آمده از این نقاط مشخص می‌شود که در نقطه 2 و 3 احتمال شکل‌گیری ترکیب بین فلزی  $TiAl_3$  وجود دارد.

### 3-5- میکروسختی سنجی

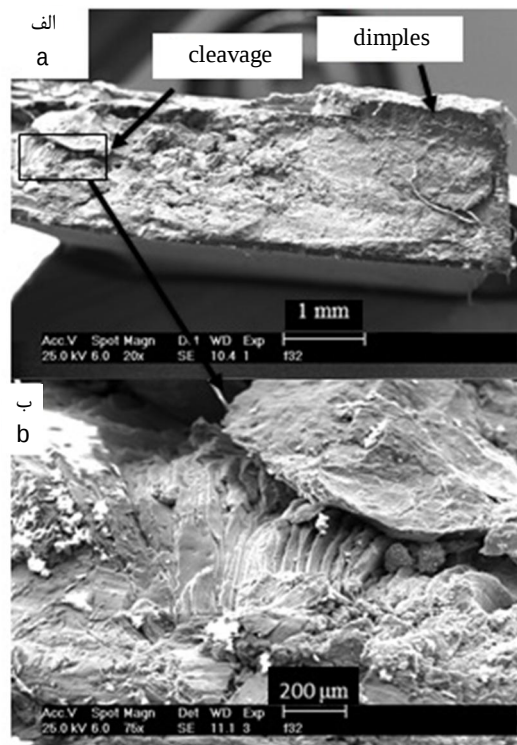
شکل 13 پروفیل سختی حاصل از نمونه‌های 1 و 8 را نشان می‌دهد. مقطع اتصال حاصل از فرایند اصطکاکی اغتشاشی شامل مناطق مختلف: منطقه اغتشاشی، منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی، منطقه متأثر از حرارت می‌باشد. تغییر شکل پلاستیک شدید و حرارت حاصل از اصطکاک ابزار در فرایند اصطکاکی اغتشاشی شدت بر روی خواص مکانیکی مواد تحت جوش-کاری از جمله سختی منطقه جوش تأثیرگذار است. ریزساختار منطقه اغتشاشی در فرایند اصطکاکی اغتشاشی بدلیل قرار گرفتن تحت تغییر شکل پلاستیک شدید و اغتشاش ناشی از چرخش پین ابزار، دارای دانه‌بندی هم‌محور و ریزتر نسبت به فلز پایه است. قسمت عمده منطقه اغتشاش از آلیاژ آلومینیومی تشکیل شده است و از آن‌جایی که آلیاژ 5052 عملیات حرارتی پذیر نمی‌باشد، افزایش استحکام از طریق کار مکانیکی اتفاق می‌افتد. طبق رابطه هال-پیچ میزان سختی با اندازه دانه رابطه عکس دارد کاهش اندازه دانه باعث افزایش میزان سختی می‌شود.

$$H_v = H_0 + \frac{K}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

مشاهده می‌شود سطح مقطع شکست این نمونه همراه با تغییر شکل پلاستیک و حفره‌های ریز و یکنواخت در سطح آن است که حاکی از شکست نرم در این نمونه است. شکل 10 (الف) مقطع شکست نمونه 9 را نشان می‌دهد. شکل 10 (ب) تصویر با بزرگنمایی بیشتر ناحیه مشخص شده در شکل 10 (الف) می‌باشد همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقطع شکست این نمونه شکست ترد کلیواژ همراه با تغییر شکل پلاستیک اندک را نشان می‌دهد. بنابراین شکست نرم و ترد توأماً در این نمونه اتفاق افتاده است. به احتمال فراوان حضور ترکیبات بین فلزی بدلیل بالا بودن حرارت ورودی در این نمونه باعث بوجود آمدن شکست ترد کلیواژ در این نمونه شده است. لی و همکاران [3] گزارش دادند که همراه شدن شکست نرم و ترد در اتصال غیرهمجنس آلومینیوم و تیتانیوم بدلیل وجود ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال دو فلز است.

### 3-4- توزیع عناصر در مقطع اتصال

شکل 11 تصاویر مکان‌نگاری عنصری مربوط به نمونه‌های 1 و 8 را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش سرعت چرخشی در نمونه 8 باعث اغتشاش و همچنین خردایش بیشتر آلیاژ تیتانیوم توسط ابزار جوش-کاری در محل اتصال و در نتیجه ریزتر شدن و ازدیاد ذرات تیتانیوم در داخل آلیاژ آلومینیوم شده است. تیتانیوم و آلیاژهای آن واکنش‌پذیری و میل ترکیبی زیادی در دماهای بالا با سایر عناصر شیمیایی دارند [14]. توزیع تیتانیوم در منطقه اغتشاشی نشان می‌دهد که مقدار تیتانیوم در این منطقه با مقدار این عنصر در هریک از فلزات پایه متفاوت است. این مورد در نمونه شماره 8 با وضوح بیشتری مشاهده می‌شود. وجود حرارت بالا ناشی از اصطکاک و



**Fig. 10** The SEM image of fracture surface of sample No.8 at Ti alloy side (a) fracture surface (b),(c) fracture surface with higher magnification

شکل 10 تصویر (SEM) از سطح شکست نمونه شماره 8 در سمت آلیاژ تیتانیوم (الف) سطح شکست (ب) و (ج) سطح شکست با بزرگنمایی بالاتر

می‌باشد، مقدار سختی در منطقه اغتشاشی با اندازه دانه طبق رابطه هال-پچ نسبت عکس دارد، انتظار می‌رفت نمونه شماره 8 به دلیل سختی بالاتر در منطقه اغتشاشی، دانه‌های ریزتری نسبت به نمونه 1 داشته باشد. شکل 14 تصویر میکروسکوپی ناحیه اغتشاشی نمونه‌های 1 و 8 را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه شماره 1 دارای منطقه اغتشاشی ریز دانه‌تری نسبت به نمونه شماره 8 می‌باشد، به‌طوری‌که نمونه شماره 8 دارای متوسط اندازه دانه  $33 \pm 5$  میکرون و نمونه شماره 1 دارای متوسط اندازه دانه  $16 \pm 3$  می‌باشد.

این پدیده به این دلیل است که در طی فرایند اصطکاکی اغتشاشی درجه حرارت و سرعت تغییر شکل دو عامل هستند که اثر معکوس بر اندازه دانه منطقه اغتشاش دارند، به گونه‌ای که افزایش سرعت تغییر شکل باعث کاهش اندازه دانه منطقه اغتشاشی اما افزایش درجه حرارت باعث افزایش اندازه دانه منطقه اغتشاشی می‌شود. بنابراین در نمونه شماره 8 اثر دما بر اثر سرعت تغییر شکل غلبه کرده و باعث افزایش اندازه دانه منطقه اغتشاشی نسبت به نمونه شماره 1 می‌شود. عامل اصلی بالاتر بودن سختی ناحیه اغتشاشی نمونه شماره 8 بدلیل اغتشاش بیشتر و در نتیجه افزایش خردایش و همچنین سیلان بیشتر آلیاژ تیتانیوم در آلیاژ آلومینیم بدلیل حرارت ورودی بالاتر در این نمونه است. شکل 15 اثر نسبت سرعت چرخشی بر سرعت خطی را بر روی اندازه دانه منطقه اغتشاشی سمت آلومینیم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با بالا رفتن حرارت ورودی میانگین اندازه دانه در نمونه‌های جوش کاری شده نیز افزایش داشته است. حرارت تولید شده در فرایند بر روی سختی مناطق دورتر از ناحیه اغتشاشی بخصوص منطقه متأثر از حرارت تأثیرگذار است. همان‌گونه که مشخص است ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه نمونه شماره 8 بدلیل حرارت ورودی بالاتر سختی پایین‌تری نسبت به نمونه شماره 1 دارا است.

### 3-6- طیف سنج پراش اشعه ایکس (XRD)

بالا بودن درصد وزنی دو عنصر آلومینیم و تیتانیوم و همچنین حضور حرارت ناشی از اصطکاک تشکیل ترکیبات بین فلزی از جمله آلومینیدهای تیتانیوم را در مقطع اتصال امکان‌پذیر می‌کند. نتایج بدست آمده از آنالیز XRD نمونه 8 با حداکثر حرارت ورودی که در شکل 16 نشان داده شده است حضور

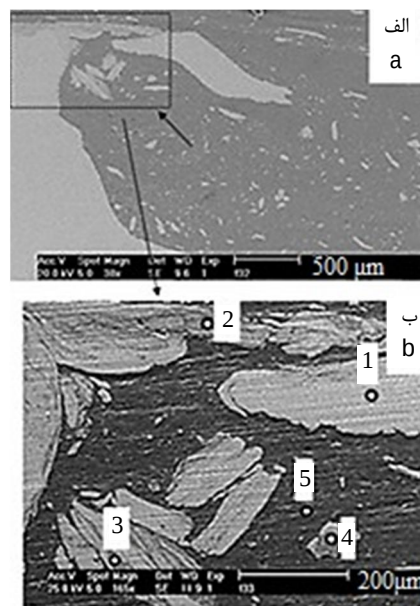


Fig. 12 (a) Cross-section SEM image of sample 8 (b) selected region with higher magnification

شکل 12 الف) تصویر (SEM) مقطع عرضی نمونه شماره 8 ب) منطقه مشخص شده با بزرگنمایی بالاتر

Table 4 Elements content of several marked regions in figure 12

| جدول 4 مقدار عناصر مناطق مشخص شده در شکل 12 |      |       |       |      |
|---------------------------------------------|------|-------|-------|------|
| نقطه                                        | Mg   | Al    | Ti    | V    |
| 1                                           | 1.49 | 8.51  | 87.12 | 3.89 |
| 2                                           | 4.56 | 68.69 | 25.68 | 1.07 |
| 3                                           | 0.18 | 76.2  | 23.3  | 0.32 |
| 4                                           | 3.56 | 39.62 | 55.5  | 1.67 |
| 5                                           | 5.24 | 93.44 | 0.68  | 0.64 |

حضور ذرات تیتانیوم در زمینه آلیاژ آلومینیم باعث بوجود آمدن کامپوزیت از دو فلز می‌شود که به نوبه خود باعث بالا رفتن سختی آلیاژ آلومینیم شده است. ناحیه اغتشاشی آلیاژ آلومینیم در نمونه 8 نسبت به نمونه 1 دارای میانگین سختی بالاتری است. با توجه به این که آلیاژ آلومینیم 5052 کارپذیر

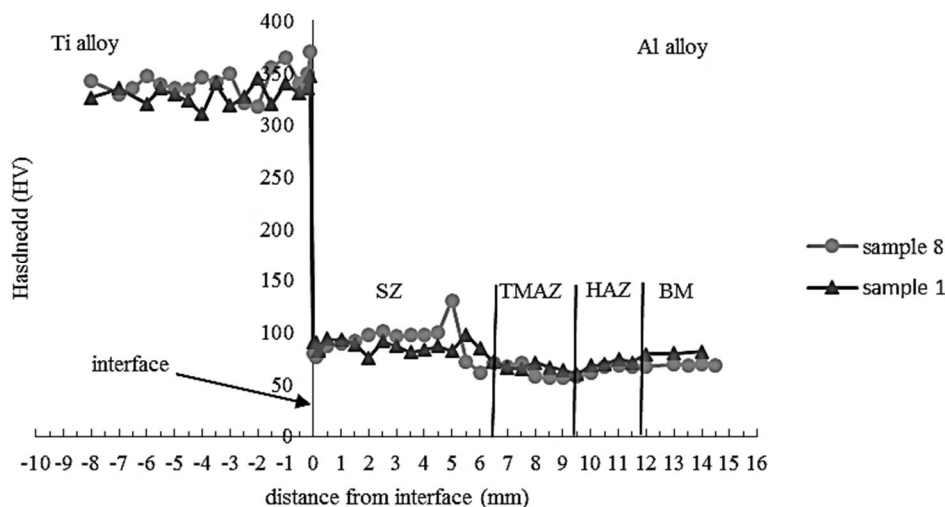


Fig. 13 Hardness distributions of sample 1 and 8

شکل 13 پروفیل سختی نمونه شماره 1 و 8

ترکیبات بین فلزی از نوع  $TiAl_3$  را در فصل مشترک اتصال تایید می‌کند. این نوع ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده بوده و عاملی برای کاهش استحکام شناخته می‌شوند.

#### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق اتصال غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم 5052 به آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V توسط روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با موفقیت انجام و نتایج زیر حاصل شد.

1- بالاترین استحکام کششی اتصال در سرعت چرخشی 500 دور در دقیقه و سرعت خطی 40 میلی‌متر بر دقیقه به میزان 260 مگاپاسکال معادل 94 درصد استحکام آلیاژ آلومینیوم 5052 حاصل شد. این نمونه در بین تمامی نمونه دارای کمترین حرارت ورودی بوده است.

2- با افزایش سرعت چرخشی به 1000 دور در دقیقه و سرعت خطی به 56 میلی‌متر بر دقیقه، میانگین استحکام کششی به میزان 192 مگاپاسکال کاهش یافت. مهمترین عامل کاهش استحکام تشکیل ترکیبات بین فلزی بدلیل بالا بودن حرارت ورودی در این نمونه است.

3- نتایج میکروسختی سنجی نشان داد که حضور ذرات تیتانیوم و ترکیبات بین‌فلزی تاثیر بیشتری نسبت به اثر اندازه دانه بر سختی ناحیه اغتشاشی دارد.

4- نتایج XRD تشکیل ترکیب بین فلزی  $TiAl_3$  در فصل مشترک اتصال را نشان داد.

#### 5- فهرست علائم

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| D           | اندازه دانه ( $\mu m$ ) |
| $H_0$       | تنش اصطکاکی             |
| $H_v$       | سختی ویکرز              |
| k           | ثابت هال پیچ            |
| v           | سرعت خطی (mm/min)       |
| $\omega$    | سرعت چرخشی (rpm)        |
| حروف یونانی |                         |

#### 6- مراجع

- [1] S. Yoon, R. Ueji, H. Fujii, Effect of initial microstructure on Ti-6Al-4V joint by friction stir welding, *Materials & Design*, Vol. 88, No. 20, pp. 1269-1276, 2015.
- [2] M. I. Costa, D. Verdera, C. Leitão, 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, No. 11, pp. 721-731, 2015.
- [3] B. Li, Z. Zhang, Y. Shen, W. Hu, L. Luo, Dissimilar friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy and aluminum alloy employing a modified butt joint configuration: Influences of process variables on the weld interfaces and tensile properties, *Materials & Design*, Vol. 53, No. 5, pp. 838-848, 2014.
- [4] Y. h. Zhao, S.-b. Lin, L. Wu, F.-x. Qu, The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy, *Materials Letters*, Vol. 59, No. 23, pp. 2948-2952, 2005.
- [5] Y. Chen, C. Liu, G. Liu, Study on the Joining of Titanium and Aluminum Dissimilar Alloys by Friction Stir Welding, *Open Materials Science Journal*, Vol. 5, No 11, pp. 256-261, 2011.
- [6] A. Chularis, A. Kolpachev, O. Kolpacheva, V. Tomashevskii, Electron structure and properties of intermetallic compounds in titanium-metal dissimilar joints, *Welding international*, Vol. 9, No. 10, pp. 812-814, 1995.

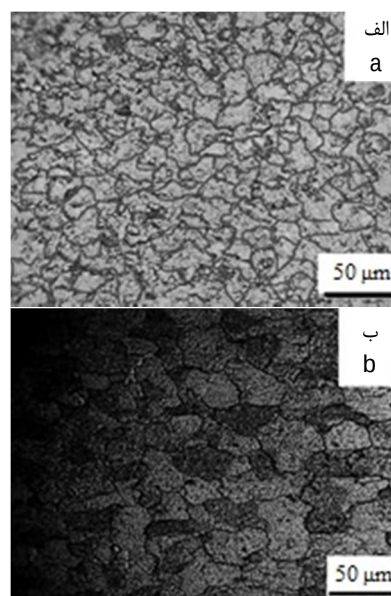


Fig.14 microstructures of stir zone (a) simple 1 (b) simple 8

شکل 14 میکروساختار ناحیه اغتشاشی (الف) نمونه شماره 1 (ب) نمونه شماره 8

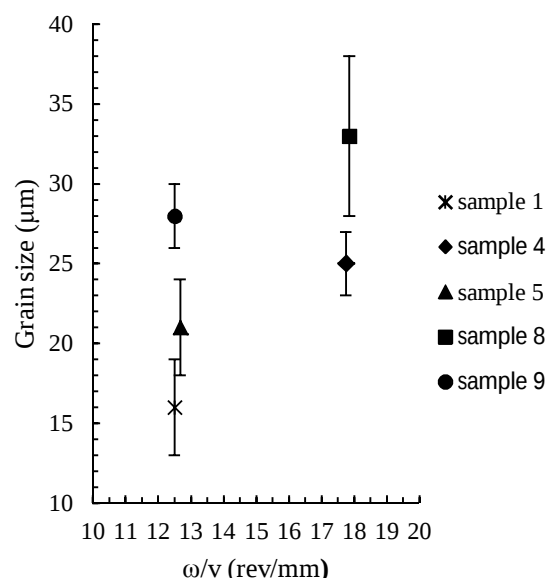


Fig. 15 Variations of grain size with the heat input index

شکل 15 تغییرات اندازه دانه برحسب شاخص حرارت ورودی

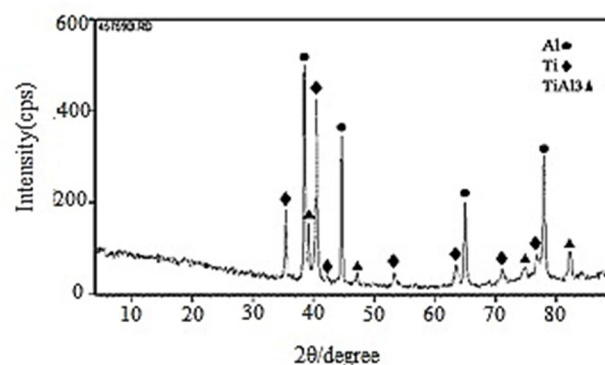


Fig. 16 XRD spectra from cross-section of sample 8

شکل 16 طیف XRD از مقطع اتصال نمونه شماره 8

- Eighth Edition, pp. 16-21, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003.
- [12] A. Azizi, M. V. Zakeri, A. Mostafizadeh, R. Azarafza, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminum alloy joints, *Modares Mechanical Engineering Journal*, Vol. 13, No. 12, pp. 56-66, 2014. (in Persian فارسی)
- [13] P. Podržaj, B. Jerman, D. Klobčar, Welding defects at friction stir welding, *Metalurgija*, Vol. 54, No. 2, pp. 387-389, 2015.
- [14] J. Su, J. Wang, R. S. Mishra, R. Xu, J. A. Baumann, Microstructure and mechanical properties of a friction stir processed Ti-6Al-4V alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 573, No. 6, pp. 67-74, 2013.
- [7] M. Aonuma, K. Nakata, Dissimilar metal joining of 2024 and 7075 aluminium alloys to titanium alloys by friction stir welding, *Materials transactions*, Vol. 52, No. 5, pp. 948-952, 2011.
- [8] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Friction stir welding and processing, *ASM international*, Vol. 5, No 3, pp. 123-154, 2007.
- [9] U. Dressler, G. Biallas, U. A. Mercado, Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 526, No. 1, pp. 113-117, 2009.
- [10] Y. Chen, K. Nakata, Microstructural characterization and mechanical properties in friction stir welding of aluminum and titanium dissimilar alloys, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 3, pp. 469-474, 2009.
- [11] W. F. Gale, T. C. Totemeier, *Smithells metals reference book*: