مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 20-30

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بهینه‌سازی پارامترهای جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی اتصال غیرمتشابه آلیاژهای AA5052 و AA6061 برای دستیابی به ریزساختار و خواص مکانیکی بهینه

علیرضا فلاحی‌آرزودار[1]، اکبر حسینی[2*]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران

2- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران

* تهران، 1388773567، hosini@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 فروردین 1396

پذیرش: 31 اردیبهشت 1396

ارائه در سایت: 16 تیر 1396

کلید واژگان:

جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی

شبیه‌سازی حرارتی

خواص مکانیکی

طراحی آزمایش تاگوچی

آلیاژهای غیرمشابه

چکیده

فرآیند جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرآیند حالت جامد است که در آن هیچ گونه ذوبی صورت نمی‌گیرد. از این روش برای فلزاتی که قابلیت جوش‌پذیری پایینی دارند و جوش حاصل از آن‌ها به وسیله روش‌های ذوبی کیفیت مناسبی ندارد، استفاده می‌شود. در این مقاله تأثیر پارامترهای جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی، قطر شانه و قطر پین ابزار بر اتصال غیرمشابه آلیاژهای آلومینیوم 5052 به 6061-T6 بررسی شد. این پارامترها با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی بهینه‌سازی شدند. در ادامه شبیه‌سازی حرارتی فرآیند به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شد که نتایج توزیع دمایی با نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی داشتند. نتایج متالوگرافی و آزمون ریزسختی‌سنجی مؤید نتایج به‌دست‌آمده از تست کشش نمونه‌ها بودند. حرارت ورودی با افزایش سرعت پیشروی و کاهش سرعت دورانی کاهش یافته و اندازه دانه‌ها در تمامی نواحی جوش کاسته شد. ناحیه پسرونده تمامی نمونه‌ها دارای اندازه دانه کوچک‌تری نسبت به ناحیه پیشرونده بود که مربوط به خواص حرارتی آلیاژ 6061 (ضریب رسانش بالاتر و ظرفیت گرمایی پایین‌تر آن) بود که منجر به پیک‌های دمایی پایین‌تر در این آلیاژ و نفوذ حرارتی بالاتر در آن شد. پارامترهای بهینه شامل سرعت دورانی برابر 1400 دور بر دقیقه، سرعت خطی برابر 80 میلی‌متر بر دقیقه، قطر شانه برابر 15 میلی‌متر و قطر پین برابر 3.5 میلی‌متر به‌دست آمد. بیشترین استحکام کششی (227.5 مگاپاسکال)، همان طور که انتظار می‌رفت در جوش با پارامترهای بهینه به‌دست آمد.

Optimization of friction stir welding parameters of dissimilar AA5052 and AA6061-T6 joint for achieving optimum microstructure and mechanical properties

Alireza Fallahi Arezoudar, Akbar Hosseini*

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 1388773567, Tehran, Iran, hosini@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 April 2017
Accepted 21 May 2017
Available Online 07 July 2017

Keywords:
Friction Stir Welding
Thermal Simulation
Mechanical Properties
Taguchi Method
Dissimilar Alloys

ABSTRACT

Friction stir welding is a solid state process in which no fusion occurs on it. This method of welding is using for metals that have low weldability or their fusion welds do not have good quality. The effect of friction stir welding parameters, including rotational speed, linear speed, shoulder diameter and pin diameter on AA5052 to AA6061 dissimilar joints was studied in this paper. These parameters were optimized Using Taguchi method of Design of Experiments. Then thermal simulation of process was done with ABAQUS software in which the temperature distribution results were in good agreement with the simulation results. The results of specimens tensile tests were confirmed by metallography and micro-hardness tests result. With increasing the linear speed and reducing the rotational speed, heat input reduced and grain size of all weld areas is decreased. The retreating side of all instances had a smaller grain size than advancing side. This is because of the thermal properties of 6061 alloy (higher conductivity and lower heat capacity), which leads to lower peak temperature and higher thermal diffusivity. The optimal parameters including rotational speed of 1400 rpm, linear speed of 80 mm/min, shoulder diameter of 15 mm and a pin diameter of 3.5 mm, were achieved. The maximum tensile strength of 228.3 MPa was achieved in rotation speed of 1400 RPM, linear speed of 80 mm/min, shoulder diameter of 15 mm and pin diameter of 3.5 mm.

1- مقدمه

جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی[1] (FSW) در سال 1991 و در مؤسسه جوش‌کاری انگلستان[2] به عنوان یکی از روش‌های جوش‌کاری حالت جامد ابداع شد [1]. نخستین شرکتی که توانایی این فرآیند جوش‌کاری را معرفی

[1] Friction Stir Welding

[2] The Welding Institute (TWI)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Fallahi Arezoudar, A. Hosseini, Optimization of friction stir welding parameters of dissimilar AA5052 and AA6061-T6 joint for achieving optimum microstructure and mechanical properties, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 20-30, 2017 (in Persian)

کرد، شرکت ایساب[1] در سوئد بود [2]. در این فرآیند ابزار غیرمصرفی با طراحی خاص و با حرکت چرخشی و تحت شرایطی تعریف شده وارد منطقه جوش‌کاری شده و با اعمال فشار و ایجاد اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار موجب بالارفتن دما در محل تماس می‌شود [3]. نیروی فشاری (نیروی فورج) به همراه حرارت ایجاد شده موجب تغییر شکل‌های کنترل شده و منظم گردابی و رو به بالای ماده می‌شود. مواد خمیری حاضر در محل اتصال با حرکت ابزار در امتداد درز جوش جابه‌جا می‌گردند و بدین ترتیب اختلاط این مواد در محل اتصال شرایط ایجاد اتصال را فراهم می‌آورد [4]. فرآیند FSW به صورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است.

تحقیق‌های بسیاری بر تکنولوژی جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی و شکل‌پذیری ورق‌های غیرمتجانس جوش‌کاری شده از طریق فرآیند نامبرده انجام گرفته است. مطالعه‌هایی نیز بر خواص مکانیکی، متالورژیکی و خستگی موضع نامتجانس اتصال یافته به روش جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی روی ورق‌های آلومینیوم نیز به انجام رسیده است.

ساندارام و موراگان [5] آلیاژهای آلومنیوم 2024 و 5083 را که به وسیله پنج شکل پین متفاوت ابزار تولید شده بودند را برای جوش‌کاری FSW آلیاژهای آلومنیوم مناسب دیدند. علاوه‌بر آن دریافتند که افزایش سرعت پیشروی یا دورانی ابزار سبب افزایش استحکام کششی می‌شود، که به یک مقدار بیشینه رسیده و سپس افت می‌کند. افزایش نیروی محوری ابزار موجب افزایش استحکام کششی اتصال FSW می‌شود که باز هم پس از رسیدن به یک بیشینه کاهش می‌یابد.

کاوالیر و همکارانش [6] تأثیر پارامترهای فرآیند FSW بر خواص مکانیکی و متالوژیکی اتصال نامشابه 6082-2024 را بررسی کردند. اتصالات با قرارگیری آلیاژهای متفاوت در سمت پیشرونده جوش به وجود آمدند. آن‌ها گزارش کردند هنگامی که در این جوش‌ها آلیاژ 2024 در سمت پیشرونده اتصال قرار می‌گرفت و سرعت پیشروی 115 میلی‌متر بر دقیقه[2] بود بالاترین مقادیر میکروسختی به‌دست می‌آمد؛ درحالی که با قرارگیری آلیاژ 6082 در سمت پیشرونده اتصال، پروفیل میکروسختی یکنواخت‌تری در ناحیه اختلاط به‌دست می‌آمد که نشان‌دهنده ترکیب بهتر مواد است. مقدار سختی در ناحیه دکمه جوش به مقدار اندکی بیشتر از ماده پایه بود، همچنین بیشینه مقدار سختی در ناحیه متأثر از حرارت- کارمکانیکی[3] و کمترین مقدار سختی در ناحیه متأثر از حرارت[4] (به دلیل پدیده پرپیری[5]) مشاهده شدند.

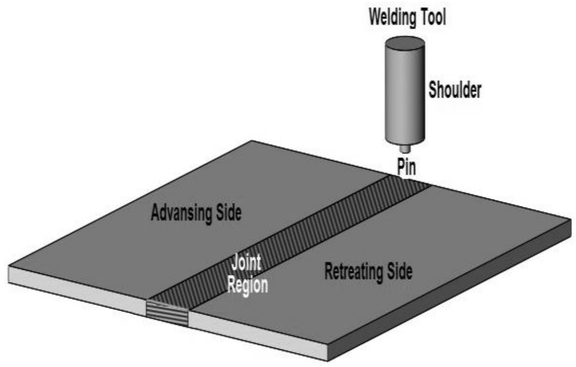

Fig.1 Schematics of friction stir welding process

شکل 1 شماتیک فرآیند جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی

غفارپور و همکاران [7] تأثیر پارامترهای فرآیند جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی را بر خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم AA5083 و AA6061-T6 را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از روش طراحی آزمایش متدولوژی سطح پاسخ به بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر فرآیند جوش‌کاری و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از آزمون تجربی پرداختند. پارامترهای بهینه شامل سرعت دورانی 1800 دور بر دقیقه، قطر پین 2.4 میلی‌متر، قطر شانه 10.3 میلی‌متر و سرعت پیشروی 30 میلی‌متر بر دقیقه به‌دست آمد که نشان‌دهنده تطابق مناسب نتایج حاصل با پیش‌بینی روش متدولوژی سطح پاسخ بود. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش مقادیر پارامترهای جوش‌کاری، تا مقدار معینی به ازاء هر پارامتر، مقدار استحکام کششی اتصال افزایش یافت و سپس افت کرد که دلیل اصلی برای چنین تغییرهایی را می‌توان در تغییر حرارت ورودی با توجه به پارامترهای مورد نظر دانست.

لئون و جایاکومار [8] تأثیر پارامترهای جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی را بر استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نسبی اتصال‌های آلیاژهای آلومینیوم 6061-T6 را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نسبی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بیشینه استحکام تسلیم به‌دست‌آمده برابر با 90% استحکام تسلیم پایه گزارش شد.

مرادی و همکاران [9] تأثیر پارامترهای فرآیند جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی را بر خواص مکانیکی و متالوژیکی اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم 2024 و 6061-T6 بررسی کردند. آن‌ها تأثیر سرعت چرخشی و سرعت خطی ابزار بر ریزساختار، ماکروساختار و خواص مکانیکی اتصال‌ها بررسی کردند. آلیاژ 2024 به دلیل داشتن تنش سیلان دمای بالای بالاتر نسبت به آلیاژ 6061 در جهت پسرو قرار گرفت. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که با افزایش حجم حرارت ورودی سیلان مواد در سطوح مختلف در عمق اتصال همگن‌تر شد و میزان آلیاژ آلومینیم 2024 در منطقه اغتشاشی افزایش یافت. 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. آن‌ها گزارش کردند که استحکام مکانیکی مناطق مختلف با سختی مناطق متناظر خود ارتباط نزدیکی دارد به گونه‌ایی که میزان استحکام با افزایش سختی افزایش و ازدیاد طول کاهش می‌یابد.

هدف از انجام پژوهش کنونی بررسی خواص مکانیکی و متالوژیکی جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 5052 به آلیاژ آلومینیوم 6061 است. ضخامت هر دو ورق استفاده شده با ضخامت 3 میلی‌متر است. با توجه به این‌که کیفیت جوش به‌دست‌آمده از این روش جوش‌کاری به متغیرهای این فرآیند وابسته است. طراحی آزمایش تاگوچی برای به‌دست آوردن پارامترهای بهینه جوش‌کاری، شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی، قطر شانه و قطر پین ابزار انجام می‌شود. برای بررسی تأثیر حرارت ورودی در حین عملیات جوش‌کاری بر استحکام کششی، بررسی میکروساختاری و میکروسختی بر نمونه‌های جوش داده شده انجام شده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و تحلیل دمایی این فرآیند انجام شده و مدلی برای توصیف حرارتی شار گذرا در زمان جوش‌کاری ارائه شود.

2- طراحی آزمایش‌ها

در این تحقیق برای انجام طراحی آزمایش‌ها و رسیدن به نتیجه مطلوب سعی بر آن شده است تا روند طراحی آزمایش تاگوچی گام به گام مورد بررسی و به

[1] ESAB
[2] mm/min
[2] Thermo-mechanical Affected Zone (TMAZ)
[3] Heat Affected Zone (HAZ)
[5] Over Aging

کار گرفته شود. در گام نخست پارامترهای فرآیند مطالعه شد و در گام بعدی تعیین کردن متغیرهای پاسخ که استحکام کششی ورق تولیدی است مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی در جدول 1 ارائه شده است. انتخاب پارامترها با توجه به میزان تأثیرگذاری آن‌هاست و محدوده‌ها با توجه به پژوهش‌های پیشین و امکانات آزمایشگاهی انتخاب شدند.

3- مواد و آزمایش‌های تجربی

با توجه اهمیت و محدودیت‌های موجود در زمینه جوش‌کاری آلومینیوم و جوش‌کاری آلیاژهای غیرهمجنس نیاز دیده شد که تحقیقات در این زمینه و با استفاده از دو جنس غیرمشابه انجام شود. آلیاژ AA5052-H18 و آلیاژ AA6061-T6 با ضخامت 3 میلی‌متر برای ورق‌های مورد آزمایش انتخاب شدند که از جمله موارد پرکاربرد در صنعت ایران و جهان است. نمونه‌های آزمون کشش برای اطمینان از جنس آلیاژهای تهیه شده از دو جنس یادشده ساخته شد که نتایج این آزمون در جدول 2 ارائه شده است. برای انجام عمل جوش‌کاری از ابزار با جنس فولاد گرم‌کار H13 استفاده شد.

هندسه‌های مختلفی از ابزارها را با توجه به نحوه اتصال ورق‌ها و ضخامت آن‌ها می‌توان استفاده کرد. در صورتی که ضخامت نمونه کمتر از 5 میلی‌متر باشد و اتصال مورد نظر به صورت لب به لب باشد، هندسه استوانه‌ایی برای پین مناسب خواهد بود [10]. برای صرفه‌جویی در میزان مواد مصرفی برای ساخت ابزار، طراحی آن مانند شکل 2 به صورت دوطرفه و ارتفاع پین با توجه به ضخامت ورق 2.7 میلی‌متر در نظر گرفته شد. میزان نفوذ پین برای انجام جوش‌کاری برابر 0.3 میلی‌متر انتخاب شد.

4- اندازه‌گیری دما به صورت تجربی

برای اندازه‌گیری دما نیاز بر آن شد که تغییراتی در فیکسچر صورت گیرد که بتوان ترموکوپل را ثابت کرد. از ترمومتر لوترون- تی‌ام-946 برای اندازه‌گیری دما استفاده شد که دارای دقت 1+٪0.5 ± درجه سانتی‌گراد است. شکل 3 محل اندازه‌گیری، موقعیت ترموکوپل‌ها و دستگاه یادشده را نشان می‌دهد.

برای مقایسه نتایج نمودارهای دما برای هر قطعه سعی بر آن شد که شرایط اندازه‌گیری یکسان باشد. نقطه‌هایی به فاصله 100 میلی‌متر از انتهای جوش و دقیقاً کنار لبه ابزار برای اندازه‌گیری دما در نظر گرفته شد.

Table 1 Designed experiments by Taguchi method

جدول 1 آزمایشات طراحی‌شده به روش تاگوچی

شماره نمونه	شماره آزمایش	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	قطر شانه ابزار (mm)	قطر پین ابزار (mm)
4	1	1000	60	15	7
6	2	1000	112	12	5
1	3	710	60	12	3.5
7	4	1400	60	17	5
9	5	1400	112	15	3.5
5	6	1000	80	17	3.5
2	7	1400	80	12	7
3	8	710	112	17	7
8	9	710	80	15	5

Table 2 The results of base metals tensile tests

جدول 2 نتایج تست کشش فلزهای پایه

نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
5052	193	220
6061	276	310

Fig. 2 Tools designed to welding

شکل 2 ابزارهای طراحی‌شده برای جوش‌کاری

Fig. 3 Temperature measuring mechanism

شکل 3 مکانیزم اندازه‌گیری دما

پارامترهایی که برای اندازه‌گیری تجربی دما مورد استفاده قرار گرفتند عبارت از سرعت پیشروی: 80 میلی‌متر بر دقیقه، سرعت دورانی: 710 دور بر دقیقه، قطر شانه: 15 میلی‌متر و قطر پین: 5 میلی‌متر است. توزیع دمایی به‌دست‌آمده با پارامترهای یادشده در شکل 4 ارائه شده است. توزیع دمایی ارائه شده در شکل 4 پس از دو بار اندازه‌گیری با شرایط یکسان و با فاصله زمانی لازم به منظور سرد شدن نمونه است تا از بروز خطا در نتایج آزمایش جلوگیری شود. به دلیل خطای بسیار اندک حاصل از تکرار آزمایش (بیشترین خطای مربوط به دو نمودار 4% بود)، نمودار آزمون دوم در شکل 4 ارائه شده است.

بیشینه دمای به‌دست‌آمده برای سمت پیشرونده اتصال برابر 201.3 درجه سانتی‌گراد و بیشینه دمای به‌دست‌آمده برای سمت پسرونده اتصال برابر 192.5 درجه سانتی‌گراد بود. بیشینه دمای بالاتر به‌دست‌آمده در سمت 5052 اتصال، می‌تواند به دلیل قرارگیری آن در سمت پیشرونده و همچنین خواص حرارتی آن باشد. نتایج نشان‌دهنده نرخ سرمایش و یا سرعت سرد شدن بالاتر آلیاژ 6061 پس از رسیدن به دمای بیشینه بود.

5- شبیه‌سازی فرآیند جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی

شبیه‌سازی از نوع حرارتی و برای توزیع شار حرارتی از مدل توزیع معرفی شده توسط کرال [11] استفاده شده است. نحوه انتقال حرارت و توزیع دمایی روی قطعه کار با استفاده از این شار و شرایط مرزی مناسب مورد بررسی قرار گرفته است. المان انتخابی از نوع DC_3D_8 انتخاب شد که المانی مخصوص انتقال حرارت بوده و دارای 8 گره است.

5-1- آنالیز منبع حرارتی

شکل 5 قسمت‌های مختلف ابزار را نشان می‌دهد که به عنوان منبع حرارتی

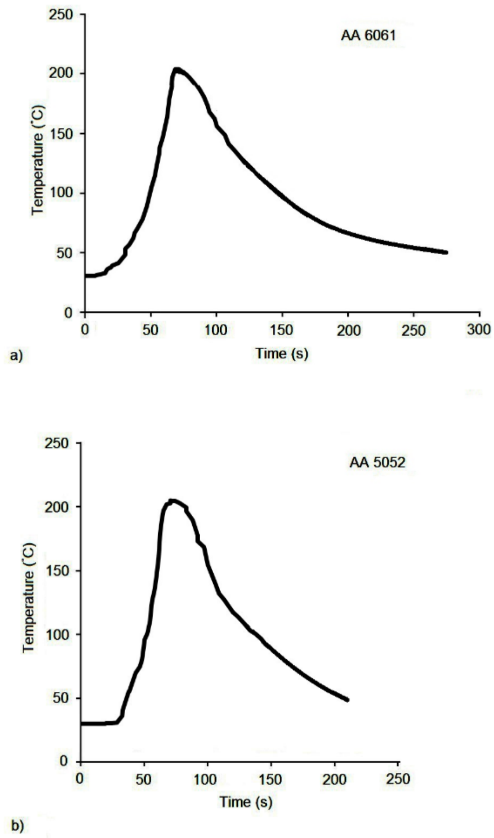

Fig. 4 Temperature history from experimental results in surface of workpiece on X=100 mm and Y= 15 mm. a) 5052 alloy, b) 6061 alloy

شکل 4 توزیع دمایی به‌دست‌آمده برای جوش‌کاری در نقطه X=100mm و Y=15mm از خط اتصال، الف- آلیاژ 6061، ب- آلیاژ 5052

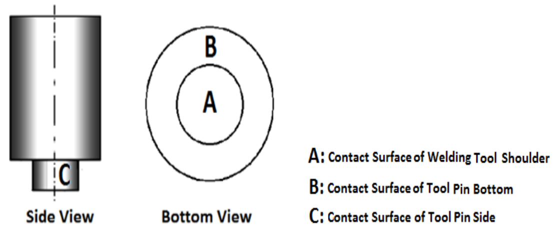

Fig. 5 Different contact surfaces of tool and workpiece [12]

شکل 5 سطوح تماسی مختلف ابزار با قطعه کار [12]

امکان تولید شار حرارتی را دارد.

برای محاسبه توزیع دمایی در قطعه‌کار باید یک مدل حرارتی تعریف کرد. این مدل حرارتی در جوش‌کاری از نوع گذراکه در هر سه بعد مکان و زمان متغیر که به صورت رابطه (1) است[12].

$$k\nabla^2 (T) + Q_{\text{in}} = C\rho \frac{dT}{dt} \tag{1}$$

در این‌جا فرض بر این است که کل گرمای ایجادشده حاصل از اصطکاک شانه ابزار و قطعه کار است. گشتاور مورد نیاز برای محاسبه توان خالص تولیدی و چرخاندن ابزار درون مواد به شکل رابطه (2) قابل محاسبه است.

$$\int_{M_{\text{p}}}^{M_s} dM = \int_{R_{\text{p}}}^{R_{\text{s}}} \mu P(r) 2\pi r^2 dr = \frac{2}{3}\mu\pi P\,(R_{\text{s}}^3 - R_{\text{p}}^3) \tag{2}$$

با فرض این که تمام کار انجام شده در سطح مشترک ابزار– قطعه‌کار به کار تبدیل گردد، گرمای اعمالی میانگین از روابط (4,3) به دست می‌آید.

$$Q_{in} = \int_{M_{\text{p}}}^{M_s} \omega dM = \int_{R_{\text{p}}}^{R_{\text{s}}} \omega 2\pi\mu P r^2 dr \tag{3}$$

$$Q_{in} = \frac{2}{3}\pi\omega\mu P\,(R_{\text{s}}^3 - R_{\text{p}}^3) \tag{4}$$

از آن‌جا که $\omega = 2\pi N/60$ و N سرعت دورانی به صورت روابط (6,5) است.

$$Q_{in} = \frac{4}{3}\pi\mu PN\,(R_{\text{s}}^3 - R_{\text{p}}^3) \tag{5}$$

$$r = \frac{R_{\text{p}} + R_{\text{s}}}{2} \tag{6}$$

حال برای محاسبه شارژ حرارتی وارد بر واحد سطح از رابطه (7) استفاده می‌کنیم.

$$q_0 = \frac{3Q_{\text{in}} r}{2\pi R_{\text{s}}^3} \tag{7}$$

5-2- شرایط مرزی

هنگام جوش‌کاری انرژی که از سطح بالایی تلف می‌شود ناشی از انتقال حرارت همرفت و تشعشعی است. همه سطوح به جز سطح زیرین دارای این دو نوع انتقال حرارت است. هدر رفت گرما به صورت رابطه (8) خواهد بود.

$$q_{s1} = h_{\text{up}}\,(T - T_0) + \varepsilon\sigma\,(T^4 - T_0^4) \tag{8}$$

از آن‌جا که ثابت استفان- بلتزمن بسیار کوچک است برای ساده‌سازی کار می‌توان از انتقال حرارت تشعشعی صرف نظر کرد و معادله را به صورت همرفت رابطه (9) در نظر گرفت.

$$q_{\text{s1}} = h_{\text{up}}\,(T - T_0) \tag{9}$$

انتقال حرارت بین سطح زیرین و سطوح قید را می‌توان با همرفت بالا مدل‌سازی کرد. حرارت از دست‌رفته از سطح زیرین از رابطه (10) به دست می‌آید.

$$q_{s2} = h_b\,(T - T_0) \tag{10}$$

که h_{b} ضریب همرفت فرضی در زیر قطعه‌کار است.

5-3- خواص مواد

خواص حرارتی مواد استفاده در جدول‌های 3 و 4 ارائه شده است.

5-4- نتایج به‌دست‌آمده

شبیه‌سازی عددی با همان پارامترهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری تجربی دما انجام شد تا بتوان آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرارتی در شکل 6 ارائه شده است.

براساس شکل 6 بیشینه دمای به‌دست آمده در سمت 5052 آلیاژ بالاتر از بیشینه دمای به‌دست‌آمده در سمت 6061 اتصال است، بطوری که بیشینه دمای به‌دست‌آمده برای آلیاژ 6061 برابر 201.3 درجه سانتی‌گراد و برای

Table 3 Thermal properties of AA5052 alloy [13]

جدول 3 خواص حرارتی آلیاژ 5052 [13]

دما (سانتی‌گراد)	ضریب هدایت حرارتی (وات بر متر درجه سانتی‌گراد)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ظرفیت حرارتی (ژول بر کیلوگرم درجه سانتی‌گراد)
20	164	2697	929
100	178	-	950
200	193	-	-
300	205	-	-
400	217	-	-

Table 4 Thermal properties of AA6061-T6 alloy [13]

جدول 4 خواص حرارتی آلیاژ 6061 [13]

دما (سانتی‌گراد)	ضریب هدایت حرارتی (وات بر متر درجه سانتی‌گراد)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ظرفیت حرارتی (ژول بر کیلوگرم درجه سانتی‌گراد)
25	167	2700	896
37.8	170	2685	920
93.3	177	2667	978
148.9	181	2657	1004
204.4	192	2657	1028
260	201	2657	1052
315	207	2630	1078
371.1	217	2620	1104
426.7	223	2610	1133

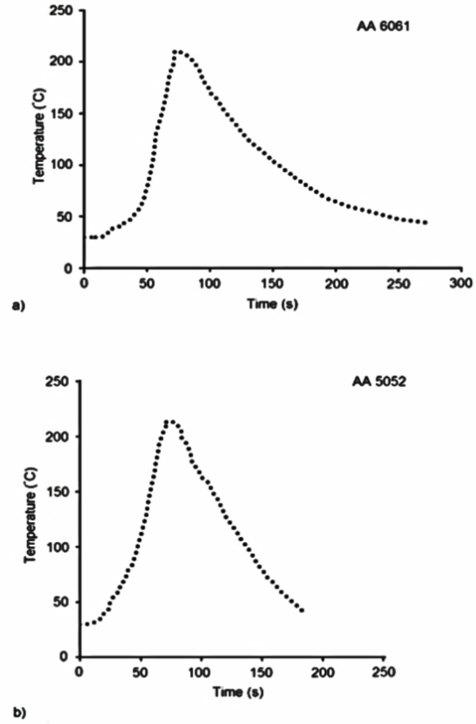

Fig. 6 Temperature history from simulation results in surface of workpiece on X=100 mm and Y= 15 mm. a) 5052 alloy and b) 6061 alloy

شکل 6 پیشینه دمایی در سطح قطعه‌کار در نقطه X=100mm و Y=15mm از خط اتصال، الف- آلیاژ 6061، ب- آلیاژ

آلیاژ 5052 برابر 210.6 درجه سانتی‌گراد است. دلیل این پدیده را می‌توان خواص حرارتی دو آلیاژ، جریان مواد در ناحیه اختلاط به سمت منطقه پیشرونده و تغییر شکل پلاستیکی در آن ناحیه دانست. کانتور دمایی نشان داده شده در شکل 7 نیز نشان‌دهنده بیشینه دمای ایجاد شده بالاتر در آلیاژ 5052 و نفوذ حرارتی بیشتر در آلیاژ 6061 است.

براساس شکل 7 دمای ناحیه HAZ در حین جوش‌کاری (در فاصله 100 میلی‌متری از ابتدای جوش)، در حدود 290 تا 311 درجه سانتی‌گراد است. از این روش می‌توان به عنوان راه‌کاری برای پیش‌بینی دمای ناحیه متأثر از حرارت و تغییرات میکروساختاری این ناحیه استفاده کرد.

6- مقایسه نتایج تجربی و تحلیل عددی

شکل 8 مقایسه توزیع دمای حاصل از شبیه‌سازی حرارتی و نتایج به‌دست‌آمده در شرایط آزمایشگاهی با پارامترهای سرعت پیشروی: 80

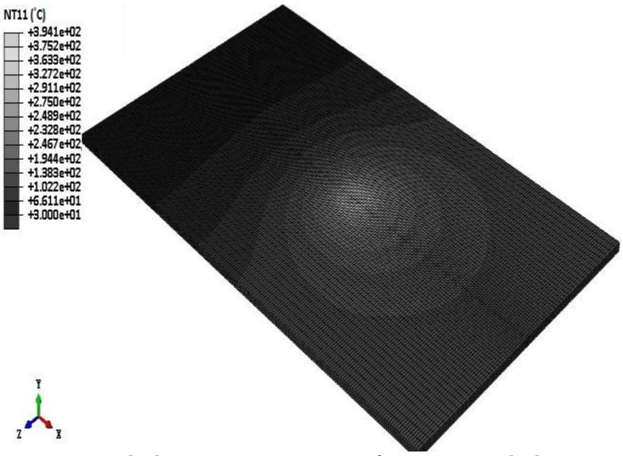

Fig. 7 Resulted temperature contour from FEM calculations in ABAQUS software

شکل 7 کانتور دمایی حاصل از محاسبات المان محدود در نرم‌افزار آباکوس

میلی‌متر بر دقیقه، سرعت دورانی 710 دور بر دقیقه، قطر شانه: 15 میلی متر و قطر پین: 5 میلی‌متر را نشان می‌دهد.

شکل 8 نشان‌دهنده تطابق قابل قبول دو نمودار به دست آمده از اندازه‌گیری تجربی دما و شبیه‌سازی حرارتی آن است؛ بنابراین می‌توان از نتایج به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی به عنوان مدلی قابل اعتماد برای پیش‌بینی دما در نقاط مختلف نمونه استفاده کرد. به طوری که با استفاده از این مدل

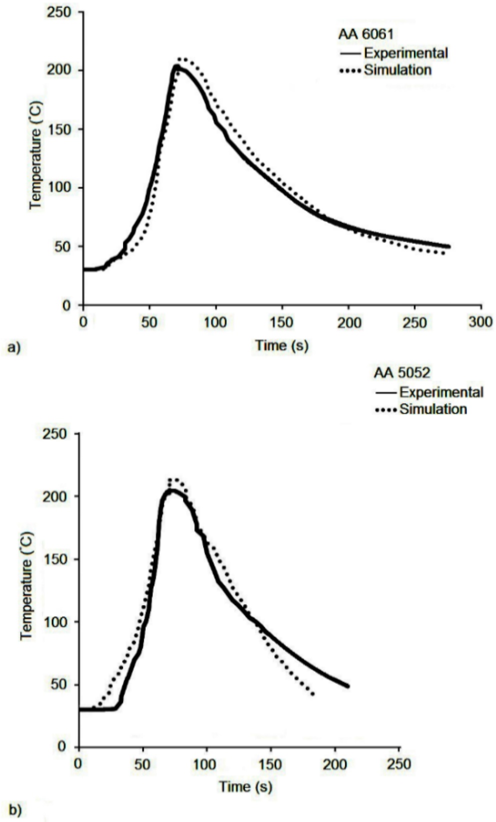

Fig. 8 Comparison of measured and simulated results, a- 6061 alloy, b- 5052 alloy

شکل 8 مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی، الف- آلیاژ 6061، ب- آلیاژ 5052

می‌توان دمای نقاط مختلف را در حین جوش‌کاری پیش‌بینی و از آن برای جلوگیری از افزایش بیش از حد دمای ناحیه جوش و رشد بیش از حد دانه‌ها استفاده کرد. برای صحه‌سنجی نتایج این بخش سعی بر آن شد که پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی و شرایط ازمایشگاهی یکسان باشند.

در نتایج شبیه‌سازی بیشینه دمای اندازه‌گیری شده برای آلیاژ 6061 برابر 203.3 درجه سانتی‌گراد و برای آلیاژ 5052 برابر 210.6 درجه سانتی‌گراد است و در نتایج تجربی بیشینه دمای به‌دست‌آمده برای سمت پسرونده اتصال برابر 201.3 درجه سانتی‌گراد و بیشینه دمای به‌دست‌آمده برای سمت پسرونده اتصال برابر 192.5 درجه سانتی‌گراد بودند.بیشینه دمای به‌دست‌آمده در این فرآیند توسط شبیه‌سازی حرارتی در سمت پیشرونده اتصال تمامی نمونه‌ها بیشتر از سمت پسرونده بود، این مشاهده را می‌توان با مشاهدات جمشیدی اول و همکاران [14] و اربگاست و همکاران [15] تأیید کرد. ضریب رسانش حرارتی آلیاژ 6061 نسبت به آلیاژ 5052 بیشتر بوده و ضریب ظرفیت گرمایی آلیاژ 5052 بیشتر است. میزان نفوذ حرارتی در آلیاژ 6061 بیشتر است، در نتیجه در آلیاژ 6061، توزیع حرارت در منطقه وسیع‌تری خواهد بود. شار حرارتی ایجادشده در حین جوش‌کاری در منطقه پسرونده سبب اعمال حرارت به نقاطی دورتر از فلز جوش می‌شود و بیشینه دمای پایین‌تری حاصل خواهد شد.

7- آزمون کشش

جهت بررسی خواص مکانیکی و چگونگی تأثیر پارامترهای جوش‌کاری بر استحکام تسلیم نمونه‌ها نیاز بر آن شد که آزمون کشش استاندارد انجام شود. در این آزمون از نمونه تست کشش ساب سایز براساس استاندارد ASTM-E8 استفاده شد و نتایج اختلاف چشمگیری با استحکام کششی ورق‌های پایه ندارد. محل پارگی نمونه‌ها از عمدتاً در منطقه HAZ مشاهده شده است. نحوه جداسازی و انتخاب نمونه‌های آزمون کشش به صورت شماتیک در شکل 9 نشان داده و نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌ها در جدول 5 ارائه شده است. برای اطمینان یافتن از نتایج به‌دست‌آمده در آزمون کشش از هر جوش سه نمونه تست کشش تهیه شد.

شکل 10 نشان‌دهنده نمونه‌های شکسته شده‌ای در آزمون کشش است که نزدیک‌ترین استحکام را به مقدار میانگین داشتند.

پس از انجام آزمایش‌ها و پیش از تخمین تابع ریاضی لازم است میزان معنی‌دار بودن اثر متغیرهای کنترلی بر پاسخ خروجی بررسی شود. آنالیز واریانس برای مطالعه اثرات پارامترها بر تابع هدف به کار گرفته شده است که در جدول 6 نتایج حاصل از آنالیز واریانس مشاهده می‌شود.

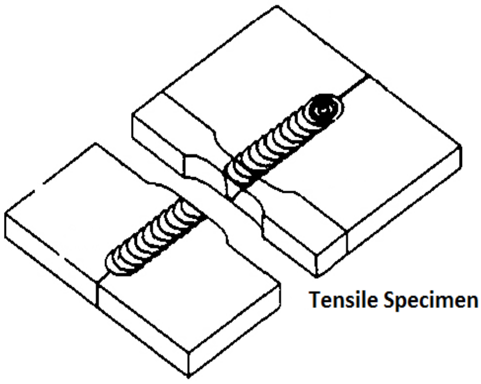

Fig. 9 manner of choosing the tensile test specimens

شکل 9 نحوه انتخاب نمونه‌های تست کشش

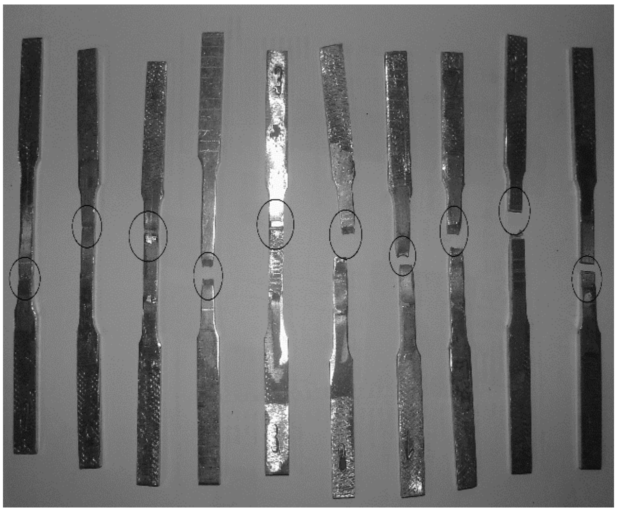

Fig. 10 Tensile test specimens

شکل 10 نمونه‌های آزمون کشش

جدول 5 نتایج تست کشش نمونه‌ها

Table 5 Tensile results of the samples

شماره آزمون	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام کششی (مگاپاسکال)
1	147.2	198.5
2	166.1	211.6
3	169.1	202.4
4	174.5	214.6
5	163.3	218.5
6	155.7	211.5
7	174.1	220.3
8	161.2	221.1
9	165.5	226.0
بهینه	169.4	227.5

نتایج آنالیز واریانس نشان‌دهنده این است که پارامترهای فرآیند به غیر از پارامتر قطر پین، بر استحکام کششی اتصال عواملی بسیار تأثیرگذار بوده‌اند، ولی میزان اثرگذاری پارامترها براساس روش طراحی آزمایش[1] تعیین شد. بدین منظور از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده و نتایج تحقیق در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت مورد تحلیل قرار گرفتند.

پین ابزار بر نیروی فرآیند در مرحله پلانج ابزار و در تولید اصطکاک نقش داشته و همچنین نقش مهمی را در همزدن مواد در ریشه جوش ایفا می‌کند.

جدول 6 میزان اثرگذاری هر متغیر را بر متغیر خروجی براساس تحلیل واریانس

Table 6 The ANOVA results for tensile strength of the joints

پارامتر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	597.41	6	99.57	61.42	0.0161
سرعت دورانی	443.16	2	221.58	136.68	0.0073
سرعت پیشروی	78.38	2	39.19	24.17	0.0397
قطر شانه ابزار	75.87	2	37.93	23.40	0.0410
قطر پین ابزار	-	-	ادغام شده	-	-
باقی‌مانده	3.24	2	1.62		
مجموع	600.65	8			

[1] Design of Experiment (DOE)

رویه‌های رسم شده برای تخمین تأثیر پارامترهای جوش در شکل‌های 11 و 12 نشان داده شده است. همان‌گونه که از تمامی نمودارها می‌توان نتیجه گرفت قطر پین تأثیر چندانی بر تابع هدف که همان استحکام است ندارد، ولی می‌توان این نکته را بیان کرد که در تولید اصطکاک نقش داشته و همچنین نقش مهمی را در همزدن مواد در ریشه جوش ایفا می‌کند. شکل 11- الف بیانگر تأثیر پارامترهای سرعت دورانی و سرعت خطی به صورت متغیر و پارامتر قطر پین و قطر شانه ابزار به صورت ثابت و میانگین بر استحکام ورق جوش‌خورده است. با توجه به شکل هر میزان سرعت دورانی بالاتر باشد استحکام افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش حرارت ناشی از اصطکاک در فرآیند و به تبع آن اختلاط بهتر مواد است. افزایش سرعت خطی سبب افزایش استحکام شده، ولی این افزایش نباید از حد مجاز بیشتر شود؛ بنابراین حالت بهینه سرعت خطی در این فرآیند سرعت 80 میلی‌متر بر دقیقه معرفی می‌شود. شکل 11- ب نیز تأثیر دمای ورودی را به وضوح بیان می‌کند که مستقیماً متأثر از قطر شانه و سرعت دورانی است. در این حالت نیز حالت بهینه‌ای برای قطر شانه تعریف می‌شود و با در نظر گرفتن آن در مقدار 15 میلی‌متر بیشینه استحکام کششی را خواهیم داشت. شکل 11-ج و شکل‌های 12- الف تا 12- ج تأثیر دو به دوی پارامترهای سرعت پیشروی، سرعت دورانی و قطر شانه ابزار در ارتباط با قطر پین ابزار بر استحکام را نشان می‌دهند. در شکل 12- ج با افزایش بیش از حد قطر شانه استحکام کم شده

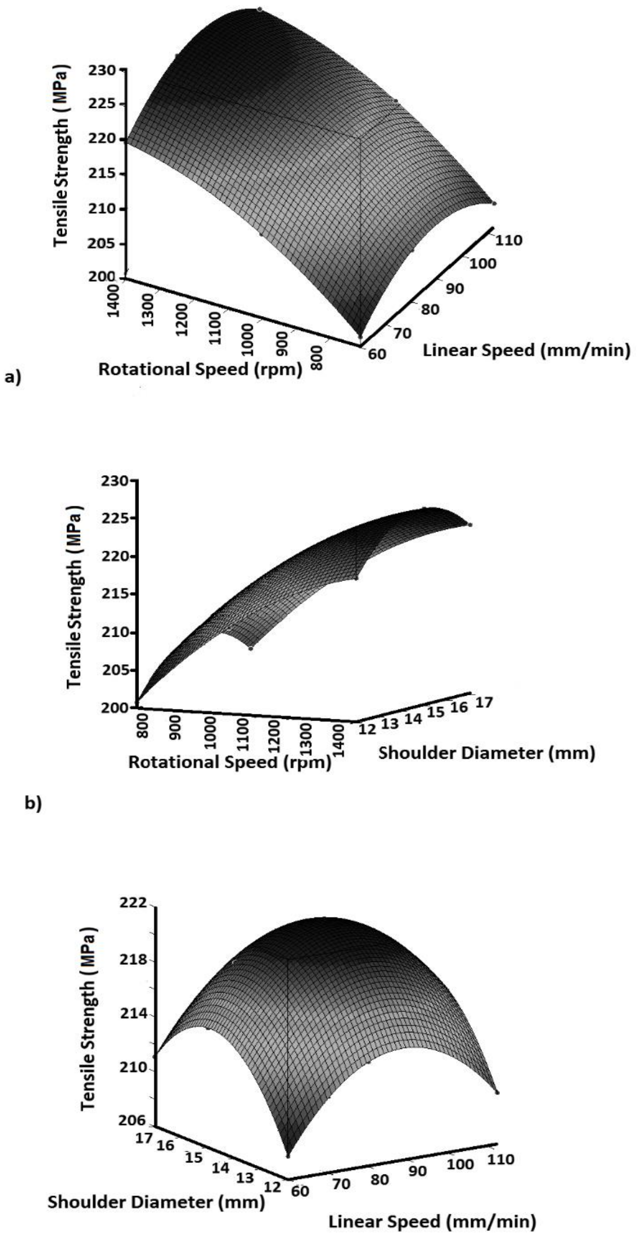

Fig. 11 3d-diagrams from the effect of welding parameters on tensile stress

شکل 11 رویه‌های رسم‌شده از تأثیر دو به دوی پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و قطر شانه ابزار بر استحکام کششی

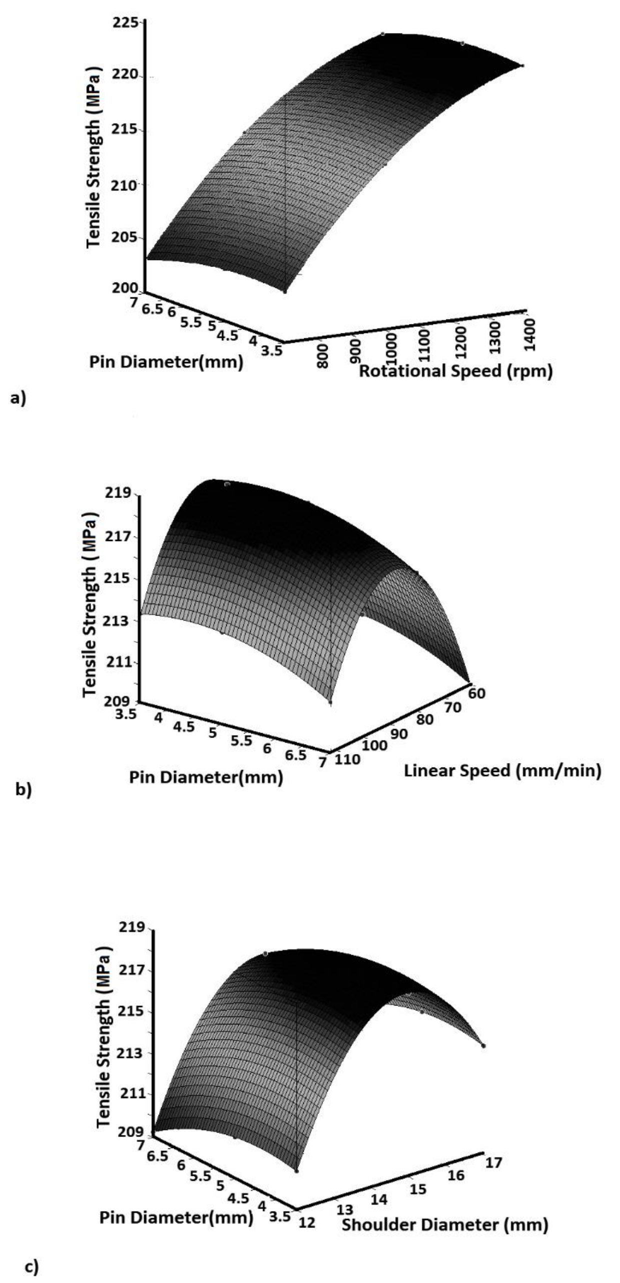

Fig. 12 3d-diagrams from the effect of welding parameters on tensile stress

شکل 12 رویه‌های رسم‌شده از تأثیر پارامترهای جوش‌کاری بر استحکام کششی

و دلیل آن را با بالا رفتن بیش از حد دمای قطعه و نرم‌شدگی بیش از حد فلز جوش در حین فرآیند می‌توان توجیه کرد.

با توجه به رویه‌های رسم شده سرعت دورانی و قطر شانه و سرعت حرکت خطی و قطر پین به ترتیب بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی دارند. جدول 7 پارامترهای بهینه به‌دست‌آمده از طریق طراحی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. تأثیر پارامترهای فرآیند بر استحکام کششی با نتایج به‌دست‌آمده توسط ساندارام و مورگان [5]، پایتل و سومن [16]، عزیزی و همکاران [17]، لطفی و نوروزی [18] و غفارپور و همکاران [7] قابل تأیید است. نتیجه به‌دست‌آمده توسط هرسه تحقیق یادشده و این مطالعه مؤید افزایش استحکام کششی با افزایش مقادیر پارامترهای سرعت چرخشی، سرعت دورانی و قطر شانه ابزار تا مقدار بهینه است.

با انجام تست در شرایط بهینه بیشترین استحکام حاصله برابر 228.3 مگاپاسکال است. با مقایسه این نتایج با نتیجه پیش‌بینی شده در جدول 7 مقدار درصد خطایی برابر 0.69% حاصل می‌شود که این درصد ناچیز خطا، کارآمدی مدل ارزیابی شده توسط طراحی آزمایش را بیان می‌کند. مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی روش طراحی آزمایش از مقدار استحکام کششی بهینه در این تحقیق و تحقیق انجام گرفته توسط کریشنا و همکارانش [19]، به روش تاگوچی با نتایج به‌دست‌آمده توسط غفارپور و همکارانش [7]، به روش متدولوژی سطح پاسخ، نشان‌دهنده کارآمد بودن این روش طراحی آزمایش جهت بهینه‌سازی فرآیند جوش‌کاری FSW است.

8- متالوگرافی

برای اطمینان از اغتشاش فلز جوش و بی‌عیب بودن ورق جوش داده شده با پارامترهای بهینه ابتدا تست ماکروگرافی و به دنباله آن تست میکروگرافی با اسکیل‌های مختلف انجام شد. با توجه به این‌که نتایج به‌دست‌آمده از تست کشش نمونه‌ها نشان‌دهنده ضعف از منطقه پسرونده اتصال بود این ناحیه مورد بررسی قرار گرفت. شکل 13 نشان‌دهنده میکروساختار ناحیه پسرونده قطعه 9 است که برای بررسی تغییرات اندازه دانه‌ها در طول اتصال مورد بررسی قرار گرفت.

ناحیه اختلاط[1] و ناحیه TMAZ با اندازه دانه‌های متفاوت به ترتیب در شکل 13 مشاهده می‌شوند. ناحیه SZ به صورت ریزدانه با متوسط اندازه دانه 9 میکرومتر است. به همین ترتیب در سمت آلیاژ 6061، رسوبات به صورت ریزدانه پراکنده شده‌اند. ساختار ناحیه SZ مربوط به تغییر فرم پلاستیکی شدید به همراه تبلور مجدد دینامیکی ایجاد شده در طی فرآیند ترمومکانیکی است.

منطقه پسرونده این نمونه برای ناحیه TMAZ متوسط اندازه دانه‌های به‌دست آمده در حدود 13 میکرومتر بود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود خواص اتصال مورد نظر با تغییر سرعت پیشروی اندازه ناحیه HAZ

جدول 7 اطلاعات پیش‌بینی شده توسط مدل تاگوچی

Table 7 Predicted Parameters by Taguchi model

پارامترها	مقادیر آزمایشگاهی	مقادیر پیش‌بینی‌شده
سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	1400	1400
قطر پین ابزار (میلی‌متر)	3.5	3.5
سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	80	80
قطر شانه ابزار (میلی‌متر)	15	15
استحکام کششی (مگاپاسکال)	228.3	229.9

[1] Stir Zone (SZ)

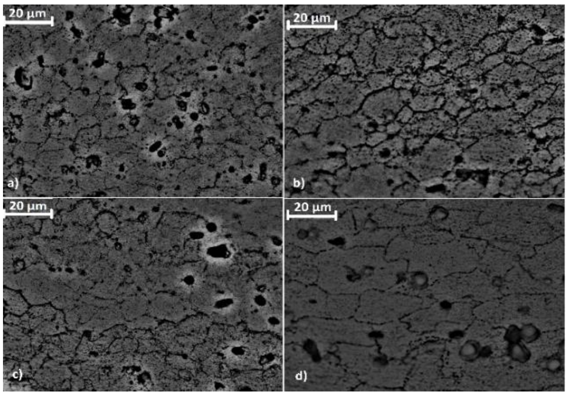

Fig. 13 Microstructure of retreating side of sample 9. a and b) stir zone, c) thermo-mechanical affected zone and d) heat affected zone

شکل **13** میکروساختار ناحیه پسرونده نمونه شماره 9، الف و ب- دکمه جوش، ج- ناحیه متاثر ترمومکانیکال، د- ناحیه متأثر از حرارت

تغییر می‌کند و با افزایش هر چه بیشتر اندازه دانه‌های این منطقه کاهش می‌یابد. از بین اتصالات مورد بررسی اندازه دانه‌ها در ناحیه متأثر از حرارت و در سمت پسرونده نمونه‌های 3، 8 و 9 به ترتیب برابر با 18، 23 و 25 است.

همچنین برای بررسی تأثیر پارامترهای جوش‌کاری بر میکروساختار اتصالات به‌دست آمده، تعدادی از جوش‌ها به صورت انتخابی مورد بررسی میکروساختاری قرار گرفتند. شکل 14 نواحی SZ، TMAZ و HAZ را برای جوش‌های شماره 3، 8 و بهینه را نشان می‌دهد اندازه دانه‌های به‌دست‌آمده برای ناحیه اختلاط نمونه‌های 3، 8 و بهینه در جدول 8 ارائه شده است.

اندازه پین ابزار تأثیر چندانی بر حرارت ایجاد شده در حین فرآیند ندارد، تأثیر اصلی پین ابزار بر جریان ماده در ناحیه جوش و عملیات مکانیکال است. براساس شکل 14 با افزایش مقدار حرارت ورودی دانه‌ها در هر دو سمت آلیاژ درشت می‌شوند. علاوه بر رشد دانه‌ها شاهد رشد اندازه رسوبات در سمت 6061 اتصال هستیم. به دلیل انجام عملیات مکانیکی توسط ابزار و پین چرخان در ناحیه اختلاط، حرارت به وجود آمده ناشی از آن با ساختار ریزدانه در هر دو سمت اتصال و همچنین با ریزشدگی رسوبات و پدیده تبلور مجدد روبه‌رو هستیم. اندازه دانه‌ها در ناحیه اختلاط با افزایش حرارت ورودی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده ادامه تبلور مجدد و ورود به مرحله رشد دانه است. به طور کلی اندازه دانه‌ها در این ناحیه با افزایش کرنش و یا نرخ کرنش کاهش یافته و با افزایش حرارت ورودی افزایش می‌یابد. پس اندازه دانه‌ها در فلز جوش با افزایش سرعت دورانی و قطر شانه ابزار و کاهش سرعت پیشروی افزایش می‌یابد. به بیان دیگر با افزایش حرارت ورودی متوسط اندازه دانه‌ها برای جوش‌های مورد نظر افزایش می‌یابد. هر چه نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی بزرگ‌تر باشد اتصال به‌دست آمده درشت ساختارتر است.

چگونگی تغییرات اندازه دانه‌ها با تغییر پارامترهای جوش‌کاری مشابه نتایج به‌دست آمده توسط مرادی و همکاران [9] بود. در تحقیق یادشده با افزایش نسبت سرعت تا 40 دور بر میلی‌متر، اندازه دانه در سمت پیشرونده و پسرونده افزایش و در نسبت‌های فراتر از آن به دلیل برتری اثر سرعت کرنش بر اثر دما کاهش می‌یافت. کومبار و بانومورسی [20]، نتایج حاصل از تست کشش بیانگر مقادیری نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده در مطالعه کنونی بود. مقدار استحکام کششی در نتایج حاصل از کار آن‌ها در سرعت دورانی 1400 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 100 میلی‌متر بر دقیقه حدود 221 مگاپاسکال به دست آمد که با نتایج حاصل از تست انجام شده در پروژه حاضر (226 مگاپاسکال) نزدیک است. این اختلاف کم در استحکام کششی

اندازه‌گیری شده را می‌توان به محل قرارگیری دو آلیاژ در تحقیق یادشده که آلیاژ 5052 در ناحیه پسرونده و آلیاژ 6061 در ناحیه پیشرونده قرار داشتند، مربوط دانست. آن‌ها اندازه دانه‌ها را برای ناحیه اختلاط نمونه جوش‌کاری شده در سرعت دورانی 1400 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 80 میلی‌متر بر دقیقه، در منطقه 6061 اتصال حدود 11 میکرومتر و برای منطقه 5052 اتصال حدود 20 میکرومتر به دست آوردند. این نتایج نزدیک به نتایج به‌دست‌آمده در پروژه کنونی است و اختلاف آن‌ها را می‌توان به تفاوت در اندازه شانه ابزار و تفاوت در محل قرارگیری آلیاژها نسبت داد. میکروساختار به‌دست‌آمده برای نمونه‌های جوش داده شده و مقایسه آن با کارهای شن و همکاران [21] نشان‌دهنده نتایج مشابه از پروژه‌های نامبرده است. میکروساختار اتصال در ناحیه اختلاط در هر دو کار شامل دانه‌های ریز در مقایسه با ماده پایه است. علاوه‌بر آن تغییر پلاستیکی شدید و تولید حرارت اصطکاکی در حین جوش‌کاری در به وجود آمدن میکروساختار ریزدانه به صورت دینامیکی تبلور مجدد یافته داخل ناحیه اختلاط نتیجه داده می‌شود. نواحی مختلف جوش در نمونه‌های مورد بررسی مشابه کارهای جمشیدی اول و همکاران [14] که نشان‌دهنده توزیع ریزتر دانه‌ها در آلیاژ 6061 با نرخ کرنش بالاتر بود است. ایشان نشان دادند که بیشینه دمای به‌دست‌آمده در سمت 6061 اتصال که دارای ضریب رسانش حرارتی بالاتر و ظرفیت گرمای ویژه پایین‌تر بود کمتر از سمت دیگر اتصال و موافق با نتایج کار حاضر است.

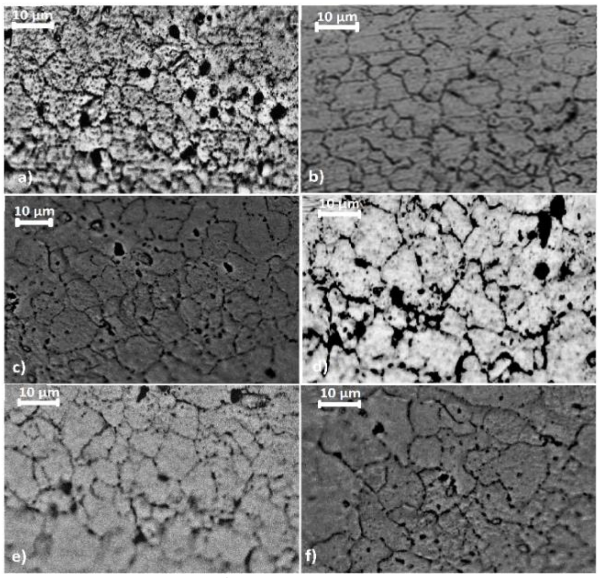

Fig. 14 Microstructure of the selected joints. a) retreating side of sample 3, b) advancing side of sample 3, c) retreating side of sample 8, d) advancing side of sample 8, e) retreating side of optimized sample, f) advancing side of optimized sample

شکل 14 میکروساختار ناحیه اختلاط. الف- ناحیه پسرونده 3، ب- ناحیه پیشرونده 3، ج- ناحیه پسرونده 8، د- ناحیه پیشرونده 8، هـ- ناحیه پسرونده بهینه، ی- ناحیه پیشرونده بهینه

جدول 8 اندازه دانه به دست آمده برای ناحیه اختلاط نمونه های 3، 8 و بهینه.

Table 8 Stir zone grain size of the samples number 3, 8 and optimized sample.

نمونه	حدود اندازه دانه‌ها	
	ناحیه پیشرونده	ناحیه پسرونده
3	11-12	6.5-7.5
8	13.5-14.5	8-9
بهینه	14.5-15.5	8.5-9.5

9- تست ریزسختی‌سنجی

این تست برای سنجیدن مقدار سختی در مناطق مختلف فلز جوش و به روش ویکرز انجام شده است. شکل 15 نمودار میکروسختی به‌دست‌آمده برای نمونه‌های شماره 1-3 و نمونه بهینه جوش داده شده را نشان می‌دهد. مقادیری که در شکل 15 به عنوان مقدار سختی هر نقطه ارائه شده میانگین سه بار اندازه‌گیری میکروسختی در نمونه‌های یک جوش است تا میزان خطا به حداقل برسد. حداکثر تلرانس بین مقادیر اندازه‌گیری شده برابر ٪6 بود. در صورتی که مقدار اندازه‌گیری‌شده دارای اختلاف چشمگیری نسبت به مقادیر دیگر بود به عنوان خطای آزمایش در نظر گرفته و دوباره تست شد.

براساس شکل 15 منطقه HAZ نسبت به دیگر مناطق فلز جوش از سختی کمتری برخوردار است. این نتیجه با نتیجه حاصل از آزمون کشش متناسب است که کمترین استحکام در ناحیه HAZ مشاهده شد و محل پارگی قطعات از این ناحیه بود. به بیان دیگر با توجه به نمودار سختی و محل شکست نمونه‌ها، تست ریزسختی‌سنجی و تست کشش نمونه‌ها مؤید یکدیگر است. این نتیجه در تحقیق ارائه شده تسط مرادی و همکاران نیز مشاهده شد که بررسی استحکام موضعی مناطق مختلف اتصال نشان داد که منطقه متأثر از حرارت آلیاژ 6061 با کمترین میزان تنش تسلیم تعیین‌کننده استحکام کلی اتصال بود. در نمونه جوش داده‌شده با پارامترهای بهینه کمترین سختی اندازه‌گیری شده در منطقه متأثر از حرارت، برای ناحیه پسرونده ٪60 فلز پایه و برای ناحیه پیشرونده ٪62 فلز پایه بود. بیشترین افت سختی در ناحیه متأثر از حرارت نمونه 7 و کمترین افت سختی در ناحیه متأثر از حرارت نمونه‌های 1 و 2 مشاهده شد. این نتیجه به دلیل دماهای بالاتر ایجاد شده در نمونه 7 نسبت به نمونه‌های دیگر و دماهای پایین‌تر ایجاد شده در نمونه‌های 1 و 2 است.

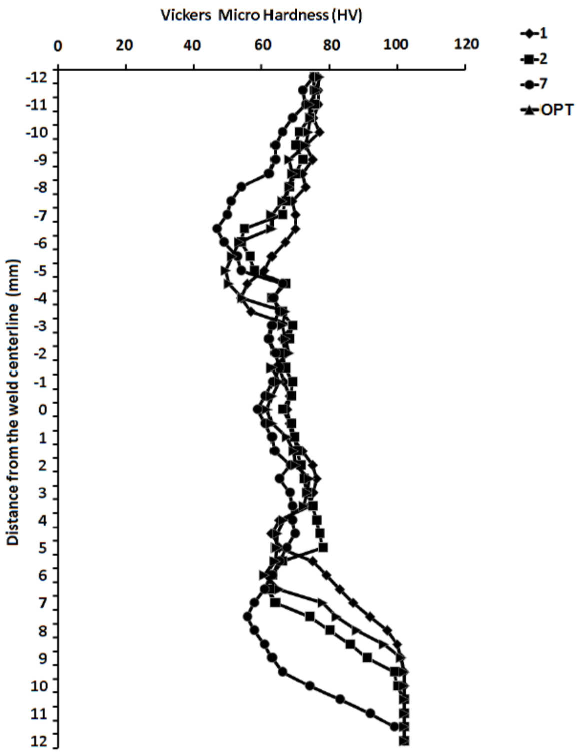

Fig. 15 Vickers microhardness profiles of the cross-section of dissimilar joints

شکل 15 پروفیل میکروسختی ویکرز از سطح مقطع اتصالات نامشابه

درنمونه 7 کمترین سختی اندازه‌گیری شده برای منطقه متأثر از حرارت در ناحیه پسرونده، ٪55 فلز پایه و در ناحیه پیشرونده ٪57 فلز پایه مشاهده شد. این منطقه ٪43 کل جوش را شامل می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از پروفیل میکروسختی و استحکام کششی مؤید نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق ارائه شده توسط مرادی و همکاران [9] بود که 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 می‌یابد. مقدار سختی در پروفیل میکروسختی به‌دست‌آمده در این تحقیق مشابه با تغییرات میکروسختی به‌دست‌آمده در کار پارک و همکاران است. در تمام موارد یادشده پروفیل میکروسختی با روندی به شکل W برای نمونه‌های جوش‌کاری شده به‌دست‌آمده و میزان افت سختی در سمت 5052 اتصال بیشتر و ناحیه HAZ در سمت 6061 اتصال گسترده‌تر بود. مشابه کارهای انجام شده توسط کومبار و بانومورسی [21] و پارک و همکاران [22] محل شکست نمونه‌های جوش داده شده بیشتر از منطقه HAZ سمت 5052 آلیاژ بود.

10- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اتصال اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم 5052 به 6061-T6 با موفقیت انجام شده و نتایج زیر به دست آمدند:

1- با تحلیل نمودارهای نسبت سیگنال به نویز و پاسخ میانگین استحکام کششی مشخص شد که به ترتیب سرعت دورانی، سرعت پیشروی و قطر شانه ابزار بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی داشته و قطر پین ابزار بیشتر بر جریان ماده تأثیرگذار است.

2- پارامترهای بهینه شامل سرعت دورانی برابر 1400 دور بر دقیقه، سرعت خطی برابر 80 میلی‌متر بر دقیقه، قطر شانه برابر 15 میلی‌متر و قطر پین برابر 3.5 میلی‌متر به‌دست آمد. استحکام نهایی به‌دست‌آمده برای نمونه جوش‌کاری شده در حالت بهینه برابر 228.3 مگاپاسکال بود. خطای ناچیز مشاهده شده میان استحکام کششی پیش‌بینی شده و به‌دست‌آمده در شرایط آزمایشگاهی نشان‌دهنده کارآمد بودن مدل ارائه شده است.

3- با افزایش سرعت دورانی مواد در ناحیه اختلاط به طور همگن‌تری ترکیب می‌شوند و استحکام کششی در تناسب با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت پیشروی حرارت ورودی از یک مقدار مشخصی به یک مقدار بهینه‌ای کاهش می‌یابد و در طی آن ترکیب مواد و اختلاط آن‌ها به صورت مناسب‌تری انجام شده و میکروساختار نواحی مختلف به صورت ریزدانه‌تری درمی‌آیند. با افزایش بیشتر سرعت پیشروی حرارت ورودی برای ایجاد اختلاط به صورت مناسب کافی نیست و استحکام کششی کاهش می‌یابد. با افزایش قطر شانه ابزار نیز ابتدا حرارت ورودی تا یک مقدار بهینه افزایش می‌یابد تا عملیات اختلاط به صورت مناسب‌تری انجام شود. با افزایش بیشتر قطر شانه ابزار حرارت ورودی بیشتر از حد بهینه می‌شود به طوری که در نواحی مختلف با ساختار درشت‌دانه، افت بیش از حد سختی، گسترش منطقه متأثر از حرارت و در نتیجه با افت استحکام کششی روبه‌رو هستیم. تأثیر قطر پین بر استحکام کششی بسیار کم بو بیشتر بر جریان مواد ایجاد شده در حین اختلاط است.

4- ازدیاد طول نسبی اندازه‌گیری شده از نتایج تست کشش ٪15.6 بود که با توجه با ازدیاد طول نسبی فلز پایه که در حدود ٪12 است. افزایش 3.6% در فلز جوش به دست آمد.

اندازه دانه‌های به‌دست آمده برای منطقه پسرونده آلیاژ در تمامی نمونه‌ها کوچک‌تر از اندازه آن‌ها در ناحیه پیشرونده بودند. دلیل آن را می‌توان با خواص حرارتی آلیاژهای مورد مطالعه مرتبط دانست.

5- نتایج تست سختی نشان می‌دهد که ناحیه اختلاط نسبت به فلز پایه سختی کمتری دارد، و بیشترین افت سختی در ناحیه متأثر از حرارت دو آلیاژ است.

6- کمترین سختی اندازه‌گیری شده در منطقه متأثر از حرارت در نمونه جوش داده شده با پارامترهای بهینه برای ناحیه پسرونده ٪60 فلز پایه و برای ناحیه پیشرونده ٪62 فلز پایه بود. با توجه به حرارت مناسب در شرایط بهینه اندازه دانه‌ها در ناحیه پسرونده 8.5-9.5 میکرومتر و در ناحیه پیشرونده در حدود 14.5-15.5 میکرومتر اندازه‌گیری شد.

7- درنمونه 7 کمترین سختی اندازه‌گیری‌شده برای منطقه متأثر از حرارت در ناحیه پسرونده، ٪55 فلز پایه و در ناحیه پیشرونده ٪57 فلز پایه مشاهده شد. این منطقه ٪43 کل جوش را شامل می‌شود.

8- بیشینه دمای به‌دست‌آمده در نقطه‌ای با مختصات 100 میلی‌متری از لبه قطعه و 15 میلی‌متری از خط جوش برای منطقه پسرونده و پیشرونده یکسان نبوده و این مقدار برای ناحیه 5052 اتصال دارای مقادیر بیشتری است؛ بنابراین نمودار توزیع دمای اتصال متقارن نیست. دلیل این پدیده را می‌توان در خواص حرارتی دو آلیاژ دانست. در نتایج شبیه‌سازی بیشینه دمای اندازه‌گیری شده برای آلیاژ 6061 برابر 203.3 درجه سانتی‌گراد و برای آلیاژ 5052 برابر 210.6 درجه سانتی‌گراد بود و در نتایج تجربی بیشینه دمای به‌دست‌آمده برای سمت پسرونده اتصال برابر 201.3 درجه سانتی‌گراد و بیشینه دمای به‌دست‌آمده برای سمت پسرونده اتصال برابر 192.3 درجه سانتی‌گراد بود. خطای ناچیز مشاهده شده بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی اندازه‌گیری دما نشان‌دهنده این مطلب است که می‌توان از مدل ارائه شده برای پیش‌بینی دمای نواحی مختلف جوش استفاده کرد.

9- ضریب رسانش حرارتی آلیاژ 6061 نسبت به آلیاژ 5052 بیشتر و ضریب ظرفیت گرمایی آلیاژ 5052 بیشتر و میزان نفوذ حرارتی در آلیاژ 6061 بیشتر است. در نتیجه در آلیاژ 6061 توزیع حرارت در منطقه وسیع‌تری خواهد بود. به بیان دیگر شار حرارتی ایجاد شده در حین جوش‌کاری در منطقه پسرونده سبب اعمال حرارت به نقاطی دورتر از فلز جوش می‌شود. در نتیجه منطقه متأثر از حرارت در آلیاژ 6061 و یا منطقه پسرونده اتصال گسترده‌تر می‌شود.

11- فهرست علائم

P	فشار (kgm^{-2})
M	گشتاور سطح مشترک ($mkgf$)
k	ضریب جابه‌جایی حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
C	گرمای ویژه ($Jkg^{-1}{}^{\circ}C^{-1}$)
h	ضریب همرفت ($Wm^{-2}K^{-1}$)
Q	توان خالص (Ws^{-1})
q	شار حرارتی (Wm^{2})

N سرعت دورانی (rpm)

T دما (K)

R_p شعاع پین ابزار (m)

R_s شعاع شانه ابزار (m)

r متوسط شعاع پین و شانه ابزار (m)

علائم یونانی

ρ چگالی (kgm^{-3})

μ ضریب اصطکاک

ω سرعت زاویه‌ای ($rads^{-1}$)

ε قابلیت نشر

σ ثابت استفان- بولتزمن ($Wm^{-2}°C^{-1}$)

زیرنویس‌ها

in ورودی

up بالا

p پین ابزار

s شانه ابزار

b فرض‌شده

12- مراجع

[1] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, *Friction Stir Welding and Processing*, *ASM International*, Materials Park, Ohio 44073-0002, 2007.

[2] W. Thomas, E. Nicholas, Friction stir welding for the transportation industries, *Materials & Design*, Vol. 18, No. 4, pp. 269-273, 1997.

[3] K. Kumar, S. V. Kailas, On the role of axial load and the effect ofinterface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminium alloy, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 791-797, 2008.

[4] M. Guerra, C. Schmidt, J. McClure, L. Murr, A. Nunes, Flow patterns during friction stir welding, *Materials Characterization*, Vol. 49, No. 2, pp. 95-101, 2002.

[5] N. Shanmuga Sundaram, N. Murugan, Tensile behavior of dissimilar friction stir welded joints of aluminum alloys, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4184–4193, 2010.

[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, No. 3, pp. 609–616, 2009.

[7] M. Ghaffarpour, S. Kolahgar, B. Mollaei Dariani, K. Dehghani, Evaluation of dissimilar welds of 5083-H12 and 6061-T6 produced by friction stir welding, *Metallurgical and Materials Transactions A* , Vol. 44, No. 8, pp. 3697-3707, 2013.

[8] J. Stephen Leon, V. Jayakumar, Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding, *International Journal of Students' Research in Technology & Management*, Vol. 2, pp. 140-144, 2014.

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

[10] E. T. Akinlabi, *Characterisation Of Dissimilar Friction Stir Welds between 5754 Aluminum Alloy and C11000 Copper*, PhD Thesis, Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elizabeth, 2010.

[11] B. G. Kıral, M. Tabanoglu, H. T. Serindag, Finite element modeling of friction stir welding in aluminum alloys joint, *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 18, No. 2, pp. 122-131, 2013.

[12] S. Rajakumar, V. Balasubramanian, Establishing relationships between mechanical properties of aluminium alloys and optimised friction stir welding process parameters, *Materials & Design*, Vol. 40, No. 1, pp. 17-35, 2012.

[13] C. Hamilton, A. Sommers, S. Dymek, A thermal model of friction stir welding applied to Sc-modified Al–Zn–Mg–Cu alloy extrusions, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, No. 3, pp. 230–238, 2009.

[14] H. Jamshidi Aval, S. Serajzadeh, A. H. Kokabi, Evolution of microstructures and mechanical properties in similar and dissimilar friction stir welding of AA5086 and AA6061, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 28, pp. 8071– 8083, 2011.

[15] W. Arbegast, P. Hartley, Friction stir weld technology development at Lockheed Martin Michoud Space System—an overview, *ASM International, Trends in Welding Research(USA)*, Vol. 14, No. 1, pp. 541-546, 1999.

[16] H. S. Patil, S. N. Soman, Effect of weld parameter on mechanical and metallurgical properties of dissimilar joints AA6082–AA6061 in T6 condition produced by FSW, *Fracture and Structural Integrity*, Vol. 24, No.1, pp. 151-160, 2013.

[17] A. Azizi, V. Z. Mehrabad, A. Mostofizadeh, R. Azarafza, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminum alloy joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 56-66, 2014. (In Persian فارسی)

[18] A. Lotfi, S. Nourouzi, The microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy by use of design of experiment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 17-26, 2014. (In Persian فارسی)

[19] P. Murali Krishna, N. Ramanaiah, K. Prasada Rao, Optimization of process parameters for friction Stir welding of dissimilar Aluminum alloys (AA2024 -T6 and AA6351-T6) by using Taguchi method, *Industrial Engineering Computations*, Vol. 4, No.1 ,pp. 71-80, 2013.

[20] N. T. Kumbhar, K. Bhanumurthy, Friction Stir Welding of Al 5052 with Al 6061 Alloys, *Metallurgy*, Vol. 2012, No.1, pp. 1-7, 2012.

[21] C. Shen, J. Zhang, J. Ge, Microstructures and electrochemical behaviors of the friction stir welding dissimilar weld, *Environmental Sciences*, Vol. 23, No.13, pp. 32–35, 2011.

[22] S. K. Park, S. T. Hong, J. H. Park, K. Y. Park, Y. J. Kwon, H. J. Son, Effect of material locations on properties of friction stir welding joints of dissimilar aluminium alloys, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 15, No. 4, pp. 331–336, 2010.