



علوم و فناوری جوئکاری ایران



Comparison of mechanical and microstructural properties of parts welded with dissimilar alloys AA5052-AA3105 using friction stir welding and TIG

H.R. Rezaei Ashtiani*, D. Bagheri

School of Mechanical Engineering, Arak university of technology, Arak, Iran.

Received 21 April 2026 ; Accepted 11 June 2026

Abstract

The joining of dissimilar aluminum sheets is an important issue in the optimization of industrial joints due to the differences in physical, mechanical and metallurgical properties. In this study, the mechanical behavior and microstructural changes of bimetallic joints made of AA5052 and AA3105 alloys joined by two methods of TIG welding (TIG) and friction stir welding (FSW) were investigated and compared. First, preliminary experiments were carried out to optimize the parameters of the friction stir welding and TIG welding processes and to select appropriate levels of the process parameters. The results of mechanical experiments showed that in the FSW welded samples, the failure occurred mainly in the weld zone, but in the TIG welded samples, the failure occurred in the base metal. The tensile test results showed that the AA5052 sample had the highest tensile strength (273 MPa) and the highest elongation percentage (20%), and the F 3-5 welded sample with a strength of 89 MPa and 6% elongation performed worse than the T 3-5 welded sample and fractured in the weld area. The microhardness test results showed that the TIG welded sample had a higher hardness in the weld area than the FSW method due to the use of 5356 ER filler. Finally, by analyzing and comparing the results obtained from the tests related to the mechanical properties obtained from each method, it was found that the TIG method performed better than FSW in joining some alloys.

Keywords: Friction stir welding (FSW), TIG, Mechanical and microstructural properties, AA5052-AA3105.



*Corresponding Author: H.R. Rezaei Ashtiani, hr_rezaei@arakut.ac.ir.



مقایسه خواص مکانیکی و ریزساختاری قطعات جوشکاری شده با آلیاژهای

غیرمشابه AA5052-AA3105 به روش اصطکاکی اغتشاشی و تیگ

حمیدرضا رضایی آشتیانی^{*}، داود باقری

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

دریافت مقاله: 1405/02/01؛ پذیرش مقاله: 1405/03/21

چکیده

اتصال ورق‌های آلومینیومی غیرهمنام به دلیل تفاوت در خواص فیزیکی، مکانیکی و متالورژیکی، از موضوعات مهم در بهینه‌سازی اتصالات صنعتی به شمار می‌رود. در این پژوهش، رفتار مکانیکی و تغییرات ریزساختاری اتصالات دوجنسی حاصل از آلیاژهای AA5052 و AA3105 که به دو روش جوشکاری تیگ (TIG) و اصطکاکی-اغتشاشی (FSW) به یکدیگر متصل شده‌اند، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. ابتدا آزمون‌های اولیه جهت بهینه‌سازی پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی و جوشکاری تیگ و همچنین انتخاب مناسب سطوح پارامترهای فرایندی انجام شد. بررسی نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان داد که در نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW شکست عمدتاً در ناحیه جوش رخ داده است، اما در نمونه‌های جوشکاری شده به روش تیگ شکست در فلز پایه اتفاق افتاده است. نتایج تست‌های کشش نشان داد نمونه AA5052 بالاترین استحکام کششی (273 مگاپاسکال) و بالاترین درصد ازدیاد طول (20%) را داراست، و نمونه جوشکاری شده آلیاژها به روش اصطکاکی-اغتشاشی (F 3-5) با داشتن استحکام 89 مگاپاسکال و 6% ازدیاد طول عملکرد ضعیف تری نسبت به نمونه جوشکاری شده آلیاژها به روش تیگ (T 3-5) از خود نشان داده است و در ناحیه جوش شکست خورده‌اند. نتایج آزمون ریزسختی نشان داد نمونه جوشکاری شده به روش TIG به دلیل استفاده از فیلر ER 5356 دارای سختی بالاتری در ناحیه جوش نسبت به روش FSW است. نهایتاً با تحلیل و مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون‌های مربوط به خواص مکانیکی به‌دست‌آمده از هر دو روش، مشخص گردید که روش TIG در اتصال برخی از آلیاژها عملکرد بهتری نسبت به FSW از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، تیگ، خواص مکانیکی و میکروساختاری، AA5052-AA3105.

^{*} نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: حمیدرضا رضایی آشتیانی، hr_rezaei@arakut.ac.ir.

1- مقدمه

تفاوت‌در بخش‌های مختلف صنعت، اتصال نمونه‌های دوجنسی از آلیاژهای مختلف آلومینیوم از اهمیت خاصی برخوردار شده است. این نوع اتصالات امکان ترکیب خواص گوناگون مانند استحکام بالا، شکل‌پذیری مطلوب یا مقاومت به خوردگی را در یک قطعه واحد فراهم می‌سازد و موجب بهینه‌سازی عملکرد،

فلز آلومینیوم به‌دلیل وزن کم، مقاومت به خوردگی بالا، رسانایی حرارتی و الکتریکی مناسب جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا، ساختمان‌سازی و بسته‌بندی یافته است. با گسترش نیاز به تولید قطعاتی با خواص مکانیکی و عملکردی

کاهش وزن و صرفه جویی در هزینه ها می گردد [2]. یکی از روش های متداول جوشکاری ذوبی، جوشکاری به روش قوسی گاز تنگستن یا تیگ می باشد. این روش به دلیل دقت بالا، کیفیت سطحی مناسب و نرخ پایین ایجاد عیوب، بسیار پرکاربرد می باشد. در این فرایند جوشکاری توسط حرارت جوشکاری قوسی گاز تنگستن بین یک الکترود مصرف نشدنی از جنس تنگستن (یا آلیاژ آن) و قطعه کار صورت می پذیرد. الکترود، قوس الکتریکی و منطقه حوضچه مذاب توسط یک گاز محافظ (آرگون، هلیوم، مخلوط هردو گاز یا مخلوط هریک از دو گاز با گاز هیدروژن) در برابر اتمسفر محافظت می شود [2]. از سوی دیگر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از متداول ترین روش های جوشکاری حالت جامد برای فلزات با ضخامت پایین (از ضخامت 0/7 تا 2 میلی متر) می باشد. این روش جوشکاری جهت اتصال قطعات در حالت جامد به کار می رود که در آن می توان از یک فولاد ابزار گرم کار مانند H13 با حرکت دورانی، برای تولید اصطکاک و حرارت حاصل از آن و نیز تغییر شکل پلاستیکی در موضع جوشکاری بهره برد. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دو فلزی که قرار است به یکدیگر متصل شوند، در کنار هم محکم قرار می دهند و بین وارد خط اتصال این دو فلز می شود و همراه با چرخش، طول خط اتصال را طی می کند. حرارت متمرکز شده باعث نرم شدن مواد اطراف پین شده که با دوران پین، باعث حرکت مواد از جلوی پین به سمت عقب پین می شود و اتصال صورت می پذیرد. جوش بدست آمده از این روش کیفیت بالایی دارد و برای تولیدات انبوه مقرون به صرفه است. از مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می توان به بازده انرژی بالا و مصرف انرژی پایین نسبت به سایر روش های جوشکاری و قابلیت جوشکاری فلزات با ضخامت بسیار پایین اشاره نمود. با توجه به اینکه در این فرایند هیچ گاز محافظ و فلز پر کننده ای استفاده نمی شود به عنوان تکنولوژی سبز شناخته می شود [3].

بسیاری از محققان به بررسی و ارزیابی خواص مکانیکی و ساختار متالورژیکی نمونه های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی پرداخته اند [4-13]. در پژوهشی که با

هدف بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی بر خواص مکانیکی و ریزساختار جوش های غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیومی AA6061 و AA5052، انجام شد تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله سرعت دورانی، سرعت پیشروی، نیروی محوری و زاویه انحراف بررسی گردید که نتایج مربوط به خواص مکانیکی نشان دهنده بهبود خواص مکانیکی در ناحیه جوش نسبت به نواحی مجاور بود [7]. در مطالعه دیگری که بر روی نمونه دوجنسی AA6056 - AA2024 که با روش FSW به یکدیگر متصل شده بودند انجام گردید، مشخص شد استحکام جوش حاصل به میزان 90% فلز پایه AA6056 و 56% آلیاژ AA2024 می باشد [9]. نتایج حاصل از بررسی جریان ماده و خواص مکانیکی نمونه های جوشکاری شده به روش FSW بر آلیاژهای AA5052-H32 و AA6061-T6 با لایه SC نشان داد که استفاده از لایه میانی، جریان پلاستیک مواد را یکنواخت کرده و ریزساختار ناحیه جوش بهبود می یابد [10]. در پژوهش انجام شده در خصوص جوشکاری نمونه دوجنسی AA7075 & AA2024 به روش FSW مشخص گردید استحکام و سختی در ناحیه جوش از فلز های پایه کمتر می باشد [12]. نتایج مطالعات صورت گرفته در خصوص بررسی خواص مکانیکی نمونه های TWB شده با آلیاژ های AA1050-AA5083 با استفاده از ابزار جوشکاری با دو رزوه متفاوت (مثلی و استوانه ای) نشان داد افزایش سرعت خطی باعث افزایش UTS و افزایش سرعت دورانی منجر به کاهش UTS می شود [13].

برخی از پژوهشگران نیز به مطالعه خواص مکانیکی و ساختار متالورژیکی نمونه های جوشکاری شده به روش قوسی گاز تنگستن پرداخته اند [14-17]. تحقیق انجام شده در خصوص تأثیر پارامترهای موثر بر جوش مانند شدت جریان در جوشکاری نمونه های آلومینیوم AA6061 به روش TIG نتایج نشان داد که در شدت جریان 160 آمپر بیشترین مقاومت کششی و در 190 آمپر بیشترین مقاومت خمشی حاصل می گردد. همچنین ساختار و دانه بندی نیز در شدت جریان 160 آمپر بهتر از جریان های 180 و 190 آمپر بوده است [14]. در

سال 2020 نتایج مطالعه انجام شده در خصوص بررسی خواص مکانیکی، خوردگی و میکروساختار نمونه های دوجنسی با آلیاژهای AA2024 و AA6063 با ضخامت 10 میلی متر که به روش جوشکاری TIG به یکدیگر متصل شده بودند نشان داد با افزایش شدت جریان، نرخ گاز خروجی و ولتاژ مورد استفاده، مقاومت کششی افزایش می یابد [16]. ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه جوشکاری شده به روش TIG بر روی آلیاژ AA2219 نشان داد که کنترل جریان قوس و محافظت گازی مناسب باعث ایجاد جوش های یکنواخت همراه با بهبود استحکام کششی و کاهش ترک ها و حفره ها می شود [17].

برخی از محققان نیز به مطالعه و مقایسه نتایج جوشکاری تیگ و اصطکاکی اغتشاشی برخواص مکانیکی وساختار متالورژیکی نمونه های جوشکاری شده پرداختند [18-21]. ارزیابی نتایج در خصوص بررسی تاثیر سه روش جوشکاری FSW و TIG و LBW بر جوشکاری ورق آلومینیومی آلیاژ AA2014-T6 نشان داد روش جوشکاری FSW نسبت به دو روش دیگر دارای خواص مکانیکی مناسب تری می باشد [18]. در پژوهش صورت گرفته درخصوص خواص مکانیکی و تغییرات ریزساختاری اتصالات غیرمشابه آلیاژهای آلومینیومی AA5052 و AA6082 که به روش های MIG، TIG و FSW جوشکاری شده بودند، نتایج نشان داد که فرایند FSW بهترین خواص مکانیکی (استحکام کششی بالاتر و ریزساختار یکنواخت تر) را در مقایسه با روش های ذوبی TIG و MIG ارائه می دهد [19]. درمقاله دیگری اتصال آلیاژهای آلومینیوم AA1050 و AA2024 و AA5083 با ضخامت های متفاوت با استفاده از روش های جوشکاری FSW و TIG و MIG مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می دهد که روش جوشکاری FSW اتصالات یکنواخت با ریزساختار متراکم وبدون حفره ایجاد کرده وخواص مکانیکی بالاتری نسبت به دو روش دیگر دارد [20]. درتحقیق انجام شده در خصوص مقایسه خواص اتصال آلیاژهای آلومینیوم AA5052 و AA6082 به روش های جوشکاری FSW، TIG و MIG نتایج نشان داد که

فرایند FSW بیشترین استحکام کششی وسختی راداشته و ریزساختار یکنواخت و متراکم ایجاد می کند [21]. جوشکاری های قطعات دوجنسی درصنعت کاربردهای گسترده ای دارند زیرا امکان ترکیب خواص متفاوت دوماده را برای رسیدن به عملکرد بهینه فراهم می کنند؛ به عنوان مثال در صنایع خودروسازی، هوافضا و ریلی از اتصالات دوجنسی (مثلاً بین آلیاژهای آلومینیوم مانند AA5052 و AA1200) برای کاهش وزن سازه در کنار حفظ یا افزایش استحکام در نواحی بحرانی استفاده می شود، در ساخت مبدل های حرارتی و الکترونیکی از ترکیب فلزات با رسانایی حرارتی یا الکتریکی متفاوت بهره می برند، در کشتی سازی و تأسیسات دریایی اتصالات دوجنسی برای افزایش مقاومت به خوردگی درسطوح در تماس با محیط های خورنده کاربرد دارد.

با توجه به اهمیت روز افزون استفاده از قطعات دوجنسی در صنعت ونحوه اتصال ورق های فلزی به یکدیگر به روش های گوناگون جوشکاری به خصوص روش جوشکاری ذوبی و جامد، در این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی مانند استحکام کشش و سختی سنجی و ریزساختار ورق های دو جنسی آلیاژ آلومینیوم AA5052-AA1200 که به روش های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و تیگ به یکدیگر متصل شده اند پرداخته می شود. برای این منظور ابتدا پارامترهای بهینه جوشکاری FSW و TIG تعیین می گردد. به این منظور با انجام آزمون های اولیه گوناگون سطوح بهینه پارامترهای مهم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری تیگ انتخاب می شود و سپس رفتار مکانیکی و ریزساختاری به صورت مقایسه ای مورد بررسی قرار می گیرد.

2- مواد و روش انجام آزمایش

برای انجام آزمایش، نمونه ای از آلیاژهای غیر همجنس آلومینیوم شامل AA5052 و AA3105 با ضخامت 2 میلی متر انتخاب گردید. پس از آن جهت بررسی و مقایسه با آلیاژ های پایه، نمونه دو جنسی متشکل از آلیاژ های AA5052 & AA3105 که به دو روش FSW و TIG جوشکاری شده اند نیز

موثر بر جوش اصطکاکی اغتشاشی مانند سرعت دورانی، سرعت خطی و زاویه قرار گیری ابزار مورد بررسی قرار گرفت. درآزمون های اولیه انجام شده سرعت های دورانی 1200، 1600 و 2000 دور بر دقیقه و سرعت های خطی 8، 12 و 20 میلی متر بر دقیقه و زاویه های انحراف قرارگیری ابزار از 1 الی 2 درجه مورد بررسی قرار گرفت. اتصال نمونه ها به روش اصطکاکی - اغتشاشی، پس از قرار گیری ورق ها در فیکسچر ساخته شده و توسط ابزار جوشکاری (پین ماشین کاری شده) که جنس آن فولاد گرم H13 است صورت می پذیرد. جوشکاری FSW توسط دستگاه فرساخت ایران مدل FP4M و جوشکاری TIG نیز توسط دستگاه جوش ساخت کره مدل TRIPLE500 انجام شد (شکل 2). جهت جلوگیری از نامگذاری های طولانی نمونه های آزمون، از حروف و اعداد به صورت اختصاری استفاده شده است که در جدول (3) نام گذاری علائم مورد استفاده ارائه شده است.



شکل 2- دستگاه مورد استفاده در جوشکاری TIG.

جدول 3- نامگذاری نمونه های تهیه شده برای آزمون.

ردیف	نماد استفاده شده	تفسیر نماد
1	AA5052	نمونه ورق آلومینیوم AA5052
2	AA3105	نمونه ورق آلومینیوم AA3105
3	F 3-5	نمونه جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی با آلیاژ های AA3105-AA5052
4	T 3-5	نمونه جوشکاری شده به روش تیگ با آلیاژ های AA3105-AA5052

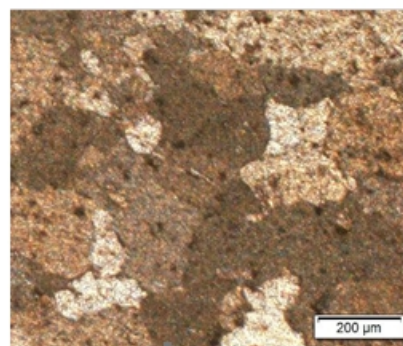
تهیه شد. در جداول 1 و 2 ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیومی مورد استفاده و در شکل (1) ساختار متالورژیکی آنها نشان داده شده است همانطور که مشاهده می شود متوسط اندازه دانه آلیاژ AA3105 حدود 40 میکرون و برای آلیاژ AA5052 50 میکرون می باشد.

جدول 1- ترکیب شیمیایی آلیاژ AA5052 (درصد وزنی).

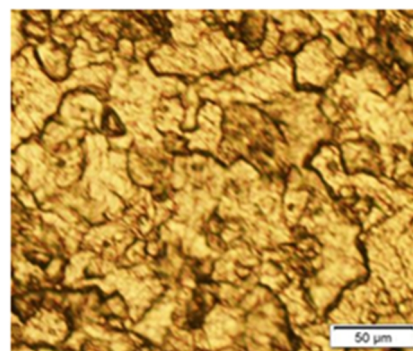
Mg	Cr	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
2.7	0.31	0.2	0.36	0.008	0.008	0.1	Rem

جدول 2- ترکیب شیمیایی آلیاژ AA3105 (درصد وزنی).

Mg	Cr	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
0.7	0.11	0.5	0.76	0.23	0.44	0.32	Rem



الف



ب

شکل 1- ساختار متالورژیکی الف) آلومینیوم AA3105 و ب- آلومینیوم AA5052.

جوشکاری نمونه ها به روش TIG به صورت دستی صورت گرفته است. در انجام این فرایند تاثیر پارامترهایی مانند شدت جریان از 100 الی 120 آمپر و قطر فیلر مورد استفاده مورد تست و بررسی قرار گرفت. همچنین با توجه به نتایج مطالعات گوناگون و انجام تست های کارگاهی مختلف تاثیر پارامترهای

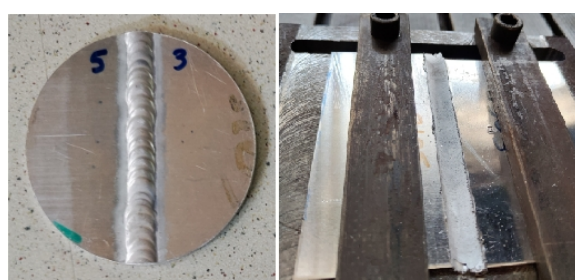
3- نتایج و بحث

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر کیفیت جوش در روش اصطکاکی اغتشاشی (شکل 4)، آزمایش‌های اولیه به منظور تعیین سطوح بهینه پارامترها و با تغییر سطوح پارامترهای موثر مانند سرعت دروانی، سرعت خطی، زاویه انحراف ابزار و عمق فرو روندگی ابزار انجام شد و در نهایت سطوح بهینه پارامترهای این جوشکاری به صورت سرعت دورانی 1600 دور بر دقیقه، سرعت خطی 12 میلی متر بر دقیقه و زاویه انحراف قرار گیری ابزار 1/5 درجه تعیین گردید. به منظور بررسی پارامترهای تاثیر گذار بر کیفیت جوش در روش TIG نیز شدت جریان، فیلر و قطر آن نیز مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت که در نهایت پارامترهای بهینه به صورت: شدت جریان 120 آمپر، فیلر آلومینیوم 5356 با قطر 2/4 تعیین گردید. در شکل (5) نیز نمونه های نهایی جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی و تیگ نشان داده شده است.



شکل 4- نمونه های FSW شده با سرعت های دورانی و خطی

الف - 1600 rpm، 20 mm/min و ب - 2000rpm، 20 mm/min و ج - 12 mm/min، 1600 rpm



شکل 5- نمونه جوشکاری شده به روش الف - FSW و ب - TIG.

بررسی قطعات شکسته شده پس از آزمون کشش حاکی از شکست نمونه جوشکاری شده به روش FSW از ناحیه اتصال بوده است (شکل 6) به عبارتی استحکام مکانیکی نمونه جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با

تست کشش از مهمترین نوع آزمون مکانیکی جهت دستیابی به خواص مکانیکی مواد می باشد. روش انجام این تست بر مبنای آزمون کشش تک محوری مطابق با استاندارد ASTM E8 می باشد که بر اساس آن نمونه هایی با طول 200 میلیمتر استفاده گردید. جهت تست و ارزیابی خواص مکانیکی نمونه های مورد پژوهش تست کشش توسط دستگاه SANTAM و با سرعت 1 میلی متر بر دقیقه انجام شد. در شکل (3) دستگاه استفاده شده نشان داده شده است.

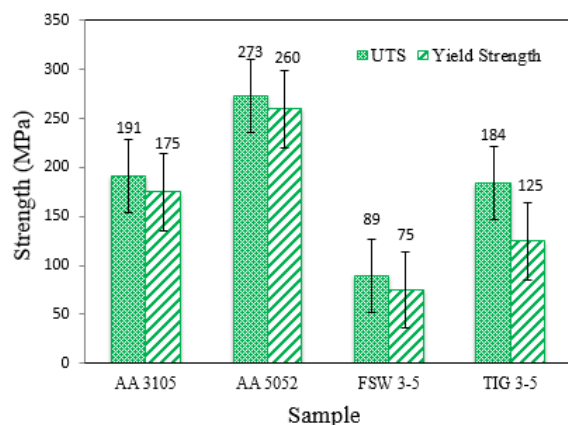


شکل 3- دستگاه تست کشش مورد استفاده.

برای تعیین سختی نمونه ها از دستگاه میکروسختی سنج مدل Force: 100gf INNOVATEST Vickers و با تنظیمات DWELL:30 Sec و استاندارد سختی سنجی ویکرز عمل کرده و با اعمال یک فرورونده الماسی چهاروجهی مربعی شکل تحت بار کنترل شده بر سطح نمونه، میزان مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک موضعی را اندازه گیری می کند.

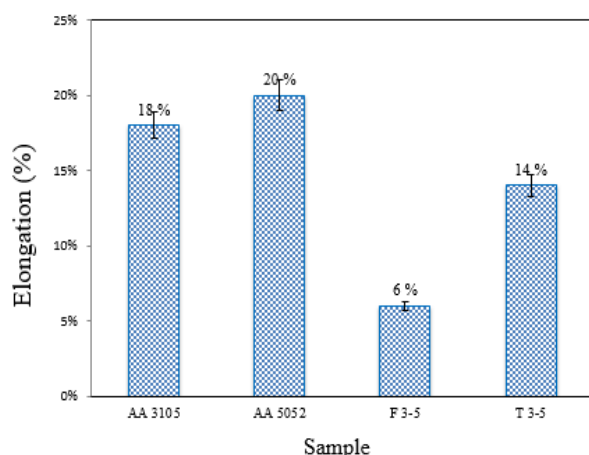
از آنجا که خواص مکانیکی و عملکرد نهایی یک اتصال تا حد زیادی به ساختار میکروسکوپی مناطق مختلف جوش، شامل فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش بستگی دارد، انجام متالوگرافی ضروری است. این روش امکان مشاهده و شناسایی عیوبی مانند تخلخل، ترک های ریز، ناپیوستگی ها و همچنین بررسی توزیع و اندازه دانه ها را فراهم می آورد.

نهایی و استحکام تسلیم در بین کلیه نمونه‌ها بوده و به ترتیب مقادیر 273 مگاپاسکال و 260 مگاپاسکال را نشان می‌دهد. در میان نمونه‌های جوشکاری شده، نمونه جوشکاری شده به روش T 3-5 عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های F 3-5 از خود نشان دادند.



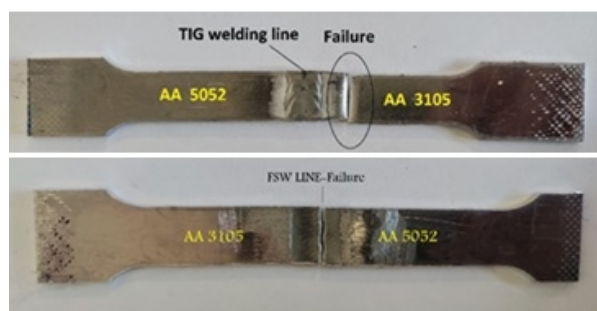
شکل 8- مقایسه میزان استحکام نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW و TIG با آلیاژ های پایه.

در شکل (9) نمودار مقایسه میزان شکل پذیری نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW و TIG و مقایسه آن با آلیاژ های پایه نشان داده شده است. نمونه AA5052 با داشتن 20% افزایش طول، دارای بیشترین میزان شکل پذیری بود، که نشان از برتری کامل آن نسبت به سایر نمونه‌ها مورد بررسی می باشد. کمترین میزان شکل پذیری هم برای نمونه جوشکاری شده F 3-5 ثبت شد.

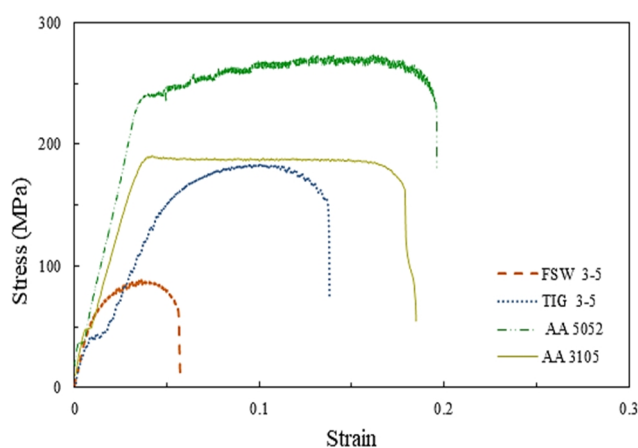


شکل 9- مقایسه میزان شکل پذیری نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW و TIG با آلیاژ های پایه.

آلیاژهای پایه تا حدودی پایین تر می باشد. همچنین بررسی نمونه جوشکاری شده به روش تیگ پس از آزمون کشش نشان می دهد که گسیختگی از محل اتصال و آلیاژ 5052 نبوده و از ناحیه مربوط به آلیاژ 3105 بوده است که نشان از استحکام قابل قبول ناحیه جوش و آلیاژ 5052 به عنوان فیلر در منطقه جوش در مقایسه با آلیاژ AA3105 می باشد. با توجه به نمودار تنش - کرنش نشان داده شده در شکل (7) می توان مشاهده نمود که نمونه AA5052 بیشترین تنش که معادل 273 مگاپاسکال است را تحمل می کند و کرنش شکست قابل توجهی را داراست. یعنی این ماده دارای چقرمگی و شکل پذیری بالایی است و استحکام آن نسبت به نمونه جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی یعنی F 3-5 بیشتر می باشد.



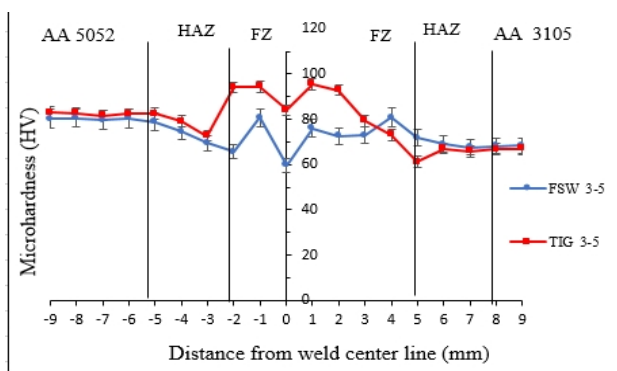
شکل 6- محل گسیختگی نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW و TIG پس از انجام آزمون کشش.



شکل 7- بررسی نمودار های تنش کرنش نمونه‌های جوشکاری شده F 3-5 و T 3-5.

با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل (8)، نتایج نشان داد که آلیاژ پایه AA5052 دارای بالاترین مقدار استحکام کششی

به ویژه در سمت آلیاژهای سخت شده (مانند AA5052 و AA3105)، هرچند استفاده از فیلر آلیاژی AA5356 سبب افزایش سختی در فلز جوش و ایجاد قله سختی بالاتر نسبت به FSW شد، اما در مقابل افت سختی در ناحیه HAZ شدیدتر و وسیع تر می باشد که می تواند به عنوان ناحیه بحرانی در عملکرد مکانیکی اتصال شناخته شود. در مجموع سختی بالاتر اتصال TIG نسبت به FSW در آلیاژهای AA5052 و AA3105 عمدتاً ناشی از استفاده از فیلر ER5356 و افزایش استحکام محلول جامد ناشی از منیزیم است. در مقابل، در فرایند FSW اگرچه تبلور مجدد دینامیکی موجب تشکیل دانه های ریز و هم محور می شود، اما کاهش اثر کارسختی اولیه و وقوع بازیابی دینامیکی سبب می شود سختی نهایی ناحیه جوش کمتر از اتصال TIG باشد.



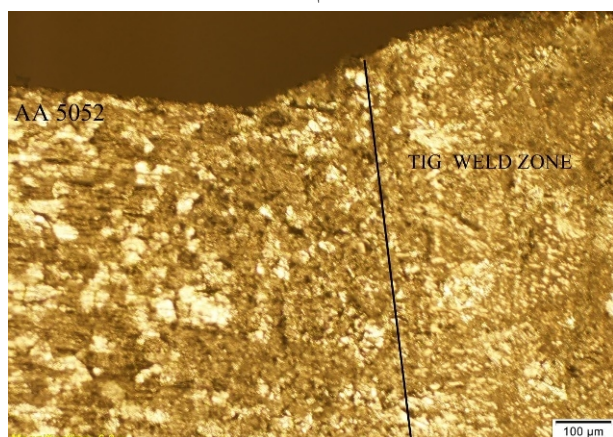
شکل 10- مقایسه میکروسختی نمونه های جوشکاری شده F 3-5 و T 3-5 با آلیاژهای پایه.

در شکل (11) تصویر کلی نمونه پس از جوشکاری FSW با نشان دادن مناطق BM، FZ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص تشکیل یک جوش پیوسته و یکنواخت بدون عیوب آشکاری نظیر ترک، حفره یا عدم اتصال است. در این تصویر، ناحیه فلز پایه (BM) ساختار اولیه آلیاژ را حفظ کرده و تحت تأثیر مستقیم ابزار قرار نگرفته است. در مقابل، ناحیه اختلاط یا ناحیه جوش (FZ) در اثر ترکیب همزمان حرارت اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک شدید ایجاد شده است. این ناحیه به دلیل تبلور مجدد دینامیکی دارای ساختاری ریزدانه و هم محور بوده و نسبت به فلز پایه از یکنواختی بیشتری برخوردار است.

در شکل (10) تغییرات ریزسختی را در فواصل مختلف از مرکز جوش برای دو نمونه جوشکاری شده به روش های تیگ و اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است. محور افقی فاصله از مرکز جوش را نشان می دهد و محور عمودی مقدار ریزسختی را بر حسب واحد ویکرز (HV) نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، بیشترین سختی در نمونه T 3-5 دیده می شود که در منطقه جوش بدلیل استفاده از فیلر ER-AA5356 که دارای مقدار منیزیم بالاتری نسبت به فلزات پایه است، می باشد. حضور منیزیم باعث افزایش استحکام محلول جامد و در نتیجه افزایش سختی فلز جوش می شود. در فرایند TIG، ذوب و انجماد مجدد رخ می دهد. این فرایند می تواند منجر به تشکیل برخی ترکیبات و رسوبات غنی از منیزیم و منگنز شود که به افزایش سختی ناحیه جوش کمک می کنند. پایین ترین میزان سختی نیز در ناحیه مربوط به آلیاژ AA3105 مشاهده می شود. در نمونه های جوشکاری شده به روش FSW به دلیل عدم ذوب و وقوع تبلور مجدد، دانه های ریز و هم محور در ناحیه اختلاط تشکیل شده است که سبب افزایش یکنواختی در توزیع سختی شد. اگرچه FSW یک فرایند حالت جامد است و ساختار دانه های ریز در ناحیه اختلاط ایجاد می کند، اما حرارت تولید شده می تواند موجب بازیابی و کاهش چگالی نابجایی ها در آلیاژهای AA5052 و AA3105 شود (شکل های 11 و 12). این پدیده بخشی از اثر کارسختی اولیه را از بین می برد و سختی را کاهش می دهد. همچنین گرمای ورودی پایین این فرایند موجب ایجاد ناحیه HAZ با کاهش محدودتر سختی در مقایسه با روش TIG شده است. در نتیجه، منحنی سختی در کل ناحیه جوش به صورت یکنواخت تر مشاهده شد. در مقابل، در نمونه های جوشکاری شده به روش TIG به دلیل ماهیت ذوبی فرایند، ریزساختار ریختگی با دانه های ستونی و درشت در ناحیه جوش تشکیل شد. بدلیل وجود آلیاژ آلومینیوم AA5356 در منطقه جوش سختی این بخش بخصوص در سمت ورق AA5052 بالاتر می باشد. وجود گرمای ورودی زیاد، منجر به افت سختی شدیدتر در ناحیه HAZ برای این ترکیبی جوشی شده است.

تصویر کلی اتصال پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نشان‌دهنده تشکیل یک جوش سالم و پیوسته بین آلیاژهای AA3105 و AA5052 است. در نواحی فلز پایه (BM)، ساختار و ویژگی‌های اولیه هر دو آلیاژ حفظ شده است، در حالی که در ناحیه اختلاط (FZ) به دلیل اعمال همزمان حرارت اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک شدید، مواد دو آلیاژ به‌خوبی با یکدیگر مخلوط شده‌اند. تشکیل ناحیه FZ یکنواخت و عاری از عیوبی نظیر ترک و حفره نشان‌دهنده انتخاب مناسب پارامترهای جوشکاری و کیفیت مطلوب اتصال است.

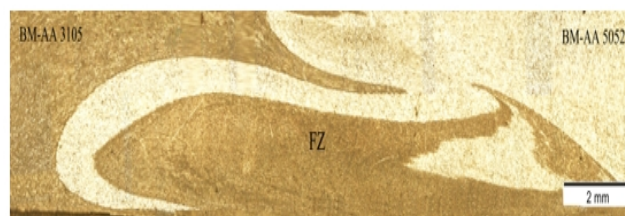
همانطور که در شکل (13) ملاحظه می‌شود اتصال پس از جوشکاری TIG نشان‌دهنده تشکیل فلز جوش در اثر ذوب و انجماد مجدد فلزات پایه و فلز پرکننده است. ناحیه جوش دارای پهنای بیشتری نسبت به اتصالات FSW بوده و در دو طرف آن ناحیه متأثر از حرارت مشاهده می‌شود که تحت تأثیر سیکل حرارتی جوشکاری قرار گرفته است. عدم مشاهده عیوبی نظیر ترک، تخلخل و عدم نفوذ، بیانگر کیفیت مناسب اتصال و انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری است. حضور منیزیم در فیلر ER-AA5356 منجر به تشکیل فازهای Al_3Mg_2 و در نتیجه افزایش سختی و استحکام موضعی شده است.



شکل 13- تصویر میکروسکوپی از منطقه جوش تیگ و نواحی اطراف و ورق آلیاژ AA5052.

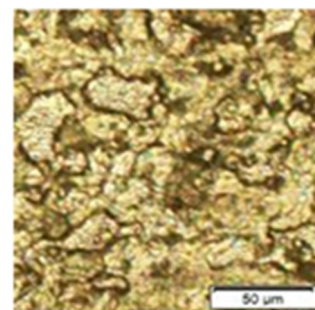
4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی و مقایسه رفتار مکانیکی و میکروساختاری جوش‌های ایجاد شده در ورق‌های دو جنسی به دو روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی و تیگ پرداخته

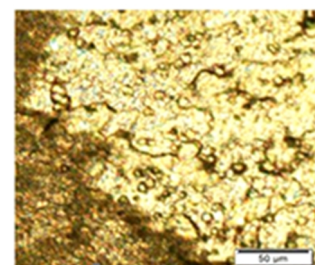


شکل 11- تصویر میکروسکوپی نمونه FSW 3-5 و نمایش مناطق BM، FZ.

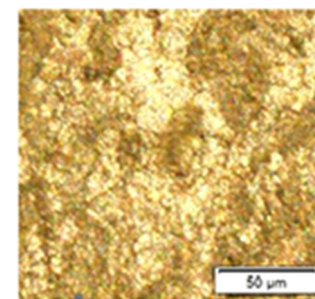
در شکل (12) تصویر میکروسکوپی مناطق مختلف در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ساختار ناحیه جوش ریزتر می‌شود و محل تلاقی دو آلیاژ، ناحیه‌ای با دانه‌های تغییر شکل‌یافته، ریزتر و به‌طور پیچیده‌ای مخلوط شده است. ساختار این ناحیه به شدت متأثر از گرمای اصطکاک، کرنش پلاستیک شدید، نرخ سرمایش بعد از جوش به دلیل میکروحرکت مکانیکی ابزار جوشکاری می‌باشد.



الف



ب



ج

شکل 12- تصویر میکروسکوپی الف - آلیاژ AA5052 و ب - ناحیه اختلاط FSW 3-5 و ج) آلیاژ AA3105.

بارگذاری‌های طولانی‌مدت می‌تواند محل تمرکز تنش و شروع شکست باشد.

منابع

- 1-E.Georgantzia, M. Gkantou, and G. S. Kamaris, "Aluminium alloys as structural material: A review of research *Engineering Structures*, vol. 227, Art. no. 111372, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111372.
- 2-N.Radhika, N.H.Deepak Kumar, and B.Sivasailam, "A review on welding techniques: properties, characterisations and engineering applications," *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 10, no. 2, pp. 1126-1181, 2023, doi: 10.1080/2374068x.2023.2186638.
- 3-R. S. Mishra, P. S. De, and N. Kumar, *Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering*. Cham, Switzerland: Springer, 2014.
- 4-Senthamarai Kannan, B., & Krishnamoorthy, J. Material flow and mechanical properties of friction stir welded AA 5052-H32 and AA6061-T6 alloys with Sc interlayer. *Materials Testing*, 65(7), (2023). <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0352>
- 5-Shiva Kumar, G. N., & Rajamurugan, G. Friction stir welding of dissimilar alloy combinations—A Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(12), (2022).
- 6-ang, J., Ling, X., Zhang, W., Lu, X., & Chen, C. (2022). Microstructures and mechanical properties of friction stir welded butt joints of 3003-H112 aluminum alloy to 304 stainless steel used in plate-fin heat exchanger. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 3086–3097. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.161>
- 7-Davidson, "Friction stir welding parameters and their influence on mechanical properties of welded AA6061 and AA5052 aluminium plates," *Materials Research Express*, vol. 8, no. 10, 2021, doi: 10.1088/2053-1591/ac2daf.
- 8-Mohammadi Sefat, H. Ghazanfari, and C. Blais, "Friction Stir Welding of 5052-H18 Aluminum Alloy: Modeling and Process Parameter Optimization," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, no. 3, pp. 1838-1850, 2021, doi: 10.1007/s11665-021-05499-5.
- 9-T.Amancio-Filho, S. Sheikhi, J. F. dos Santos, and C. Bolfarini, "Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 206, no. 1-3, pp. 132-142, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.008.
- 10-Senthamarai Kannan, B., & Krishnamoorthy, J. Material flow and mechanical properties of friction stir welded AA 5052-H32 and AA6061-T6 alloys with Sc

شده است. برای این منظور ابتدا سطوح بهینه پارامترهای برای انجام جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی مناسب برای ورق‌های مدنظر با سرعت دورانی 1600 دور بر دقیقه، سرعت خطی 12 متر بر دقیقه، زاویه انحراف ابزار 1/5 درجه و عمق فرورفتگی شولدر 0/1 میلی‌متر و برای انجام جوشکاری تیگ سطوح بهینه پارامترهای شدت جریان 120 آمپر، فیلر آلومینیوم 5356 با قطر 2/4 میلی‌متر تعیین گردید و نتایج زیر حاصل شد:

- بررسی نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان داد که در نمونه‌های جوشکاری‌شده به روش اصطکاکی اغتشاشی شکست عمدتاً در ناحیه جوش رخ داده است، که بیانگر آن است که این ناحیه ضعیف‌ترین بخش اتصال محسوب می‌شود. این موضوع به دلیل تمرکز تغییر شکل پلاستیک شدید و ریزساختار دانه‌های تغییر یافته در ناحیه اختلاط قابل توجه است. در مقابل، در نمونه‌های جوشکاری‌شده به روش تیگ شکست در فلز پایه اتفاق افتاده است که نشان می‌دهد استحکام ناحیه جوش از فلز پایه بیشتر بوده و کیفیت اتصال در این روش مطلوب‌تر است. از این رو، برای آلیاژهای مورد بررسی، فرایند تیگ به دلیل تأمین استحکام کافی و پیوستگی مناسب اتصال، گزینه‌ی بهتری ارزیابی می‌شود.

- نمونه AA5052 بالاترین استحکام کششی (273 مگاپاسکال) و بالاترین درصد ازدیاد طول (20%) را نشان داد. نمونه جوشکاری‌شده آلیاژها به روش اصطکاکی-اغتشاشی (F 3-5) با داشتن استحکام 89 مگاپاسکال و 6% ازدیاد طول عملکرد ضعیفی تری نسبت به نمونه جوشکاری شده آلیاژها به روش تیگ (T 3-5) از خود نشان داده است و در ناحیه جوش دچار شکست شده‌اند.

- نتایج ریزسختی نشان داد نمونه جوشکاری شده به روش تیگ به دلیل استفاده از فیلر ER5356 دارای سختی بالاتری در ناحیه جوش نسبت به اصطکاکی هستند. حضور منیزیم در این فیلر منجر به تشکیل فازهای Al_3Mg_2 و در نتیجه افزایش سختی و استحکام موضعی شده است. با این حال، در نواحی متأثر از حرارت (HAZ) به‌ویژه در سمت آلیاژ AA3105، به دلیل دمای بالای فرایند TIG، کاهش سختی مشاهده شد که در

- Materials Today: Proceedings, vol. 21, pp. 384-391, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.136.
- 17-Ahmadi, A. R. Ebrahimi, and A. Hoseinzadeh, "Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 2219 Aluminum Alloy A-TIG Welds," *Physics of Metals and Metallography*, vol. 121, no. 5, pp. 483-488, 2020, doi: 10.1134/s0031918x20050026.
- 18-Rajendran, K. Srinivasan, V. Balasubramanian, H. Balaji, and P. Selvaraj, "Feasibility study of FSW, LBW and TIG joining process to fabricate light combat aircraft structure," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 4, no. 4, pp. 480-490, 2021, doi: 10.1016/j.ijlmm.2021.07.001.
- 19-B.Yelamasetti, M. Sridevi, N. Santhi Sree, and C. Prakash, "Comparative Studies on Mechanical Properties and Microstructural Changes of AA5052 and AA6082 Dissimilar Weldments Developed by TIG, MIG, and FSW Techniques," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Jul. 29, 2024, doi: 10.1007/s11665-024-09867-9.
- 20-P.Vilaça, J. P. Santos, A. Góis, and L. Quintino, "Joining aluminium alloys dissimilar in thickness by friction stir welding and fusion processes," *Welding in the World*, vol. 49, pp. 56-62, 2005, doi: 10.1007/BF03266476
- 21-B.Yelamasetti, M. Sridevi, N. Santhi Sree, and C. Prakash, "Comparative Studies on Mechanical Properties and Microstructural Changes of AA5052 and AA6082 Dissimilar Weldments Developed by TIG, MIG, and FSW Techniques," *Journal of Materials Engineering and Performance*, advance online, Jul. 29, 2024, doi: 10.1007/s11665-024-09867-9.
- interlayer. *Materials Testing*, 65(7),(2023). <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0352>.
- 11-Abbasi, B. Bagheri, A. Abdollahzadeh, and A. O. Moghaddam, "A different attempt to improve the formability of aluminum tailor welded blanks (TWB) produced by the FSW," *International Journal of Material Forming*, vol. 14, no. 5, pp. 1189-1208, 2021, doi: 10.1007/s12289-021-01632-w.
- 12-Avinash, M. Manikandan, N. Arivazhagan, K. D. Ramkumar, and S. Narayanan, "Friction Stir Welded Butt Joints of AA2024 T3 and AA7075 T6 Aluminum Alloys," *Procedia Engineering*, vol. 75, pp. 98-102, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2013.11.020.
- 13-Sarsılmaz and U.Çaydaş, "Statistical analysis on mechanical properties of friction-stir-welded AA 1050/AA 5083 couples," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 43, no. 3-4, pp. 248-255, 2008, doi: 10.1007/s00170-008-1716-x.
- 14-Bansal, M. Senthil Kumar, I. Shekhar, S. Chauhan, and S. Bhardwaj, "Effect of welding parameter on mechanical properties of TIG welded AA6061," *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, pp. 2126-2131, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.567.
- 15-Ahmadi, A. R. Ebrahimi, and A. Hoseinzadeh, "Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 2219 Aluminum Alloy A-TIG Welds," *Physics of Metals and Metallography*, vol. 121, no. 5, pp. 483-488, 2020, doi: 10.1134/s0031918x20050026.
- 16-Vijay, S. Rajanarayanan, and G. N. Ganeshan, "Analysis on mechanical properties of gas tungsten arc welded dissimilar aluminium alloy (Al2024 & Al6063),"