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

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

Volume 12, Number 1, 2026

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.

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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دوازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1405

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.

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 آزمون های اولیه جهت بهینه سازی 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 جوشکاری‌شده به روش FSW شکست عمدتاً در ناحیه جوش رخ داده است، اما در نمونه‌های جوشکاری‌شده به روش تیگ شکست در فلز پایه اتفاق افتاده است. نتایج تست های 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 آزمون های 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

فلز آلومینیوم به‌دلیل وزن کم، مقاومت به خوردگی بالا، رسانایی حرارتی‌والکتریکی مناسب جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا، ساختمان‌سازی وبسته‌بندی یافته است.باگسترش‌نیازبه‌تولید قطعاتی‌باخواص‌مکانیکی وعملکردی متفاوت‌دربخش‌های مختلف‌صنعت، اتصال نمونه‌های دوجنسی از آلیاژهای مختلف آلومینیوم ازاهمیت خاصی برخوردار شده است. این نوع اتصالات امکان ترکیب خواص‌گوناگون مانند استحکام بالا، شکل‌پذیری مطلوب یا مقاومت به خوردگی را در یک قطعه واحد فراهم می‌سازد و موجب بهینه‌سازی عملکرد،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]

کاهش وزن وصرفه‌جویی‌در هزینه‌ها می‌گردد[2]. یکی ازروش های متداول جوشکاری ذوبی،جوشکاری به روش‌قوسی گازتنگستن یاتیگ می‌باشد. این روش به دلیل دقت بالا، کیفیت سطحی مناسب ونرخ پایین ایجاد عیوب، بسیار پرکاربرد می باشد. در این فرایندجوشکاری توسط حرارت جوشکاری قوسی گاز تنگستن بین‌یک الکترود مصرف نشدنی ازجنس تنگستن (یا آلیاژ آن) وقطعه کارصورت می‌پذیرد. الکترود، قوس الکتریکی و منطقه حوضچه مذاب توسط یک گاز محافظ (آرگون، هلیم، مخلوط هردو گاز یا مخلوط هریک از دوگاز باگاز هیدروژن) در برابر اتمسفر محافظت می‌شود[2]. از سوی دیگر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از متداول ترین روش های جوشکاری حالت جامد برای فلزات با ضخامت پایین(از ضخامت0/7 تا2 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 مانندH13 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 یکدیگرمتصل شوند، در کنار هم محکم قرار می‌دهند و پین وارد خط اتصال این دو فلز می‌شود و همراه با چرخش، طول خط اتصال را طی می‌کند. حرارت متمرکز شده باعث نرم شدن مواد اطراف پین شده که با دوران پین، باعث حرکت مواد ازجلوی پین به سمت عقب پین می‌شود 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 ومصرف انرژی پایین نسبت به سایر روش‌های جوشکاری و قابلیت جوشکاری فلزات با ضخامت بسیار پایین اشاره نمود.باتوجه به اینکه دراین فرایند هیچ گاز محافظ و فلز پر کننده ای استفاده نمی‌شود به عنوان تکنولوژی سبز شناخته می شود[3].

بسیاری ازمحققان به بررسی وارزیابی خواص مکانیکی و ساختار متالورژیکی نمونه های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی پرداخته اند[13-4]. در پژوهشی که با هدف بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی بر خواص مکانیکی وریزساختار جوش‌های غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیومی AA6061 و AA5052، انجام شد تاثیر پارامترهای مختلفی ازجمله سرعت دورانی ، سرعت پیشروی، نیروی محوری و زاویه انحراف بررسی گردیدکه نتایج مربوط به خواص مکانیکی نشان‌دهنده 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 روشFSW بر آلیاژهای AA5052-H32 و AA6061-T6 با لایه SC نشان داد که استفاده ازلایه میانی، جریان پلاستیک مواد را یکنواخت کرده و ریزساختار ناحیه جوش بهبود می‌یابد[10]. در پژوهش انجام شده در خصوص جوشکاری نمونه دوجنسیAA7075 & AA2024 به روشFSW مشخص گردید استحکام وسختی در ناحیه جوش از فلز های پایه کمترمی باشد [12]. نتایج مطالعات صورت گرفته درخصوص بررسی خواص مکانیکی نمونه های TWB شده با آلیاژ های AA1050-AA5083 با استفاده از ابزار جوشکاری با دو رزوه متفاوت(مثلثی واستوانه ای)نشان دادافزایش سرعت خطی باعث افزایشUTS وافزایش سرعت دورانی منجر به کاهش UTS می‌شود [13].

برخی ازپژوهشگران نیز به مطالعه خواص مکانیکی وساختار متالورژیکی نمونه های جوشکاری شده به روش قوسی گازتنگستن پرداخته‌اند[17-14].تحقیق انجام شده در خصوص تاثیر پارامترهای موثر بر جوش مانند شدت جریان در جوشکاری نمونه های آلومینیوم AA6061 به روشTIG نتایج نشان داد که درشدت جریان 160آمپر بیشترین مقاومت کششی ودر190 آمپر بیشترین مقاومت خمشی حاصل می گردد.همچنین ساختار ودانه بندی نیز در شدت جریان 160 آمپر بهتر از جریان های 180 و190 آمپر بوده است[14]. در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]

سال2020 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 روشTIG برروی آلیاژ AA2219 نشان داد که کنترل جریان قوس ومحافظت گازی مناسب باعث ایجادجوش‌های یکنواخت همراه با بهبود استحکام کششی و کاهش ترک‌ها و حفره‌ها می‌شود[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 وTIGوLBW برجوشکاری ورق آلومینومی آلیاژ AA2014-T6 نشان داد روش جوشکاریFSWنسبت به دو روش دیگردارای خواص مکانیکی مناسب تری می باشد[18]. در پژوهش صورت گرفته درخصوص خواص مکانیکی و تغییرات ریزساختاری اتصالات غیرمشابه آلیاژهای آلومینیومی AA5052وAA6082 که به روش‌های TIG،MIG وFSW جوشکاری شده بودند. نتایج نشان داد که فرایندFSW بهترین خواص مکانیکی(استحکام کششی بالاتر و ریزساختار یکنواخت‌تر) را در مقایسه با روش‌های ذوبیTIG وMIG ارائه می‌دهد[19]. درمقاله دیگری اتصال آلیاژهای آلومینیوم AA1050 و AA2024 وAA5083 با ضخامت‌های متفاوت با استفاده از روش های جوشکاریFSW وTIG وMIG مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد 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 وAA6082 به روش های جوشکاریFSW،TIGوMIG نتایج نشان دادکه فرایندFSWبیشترین استحکام کششی وسختی راداشته و ریزساختار یکنواخت و متراکم ایجاد می‌کند[21].

جوشکاری‌های قطعات دوجنسی درصنعت کاربردهای گسترده‌ای دارند زیرا امکان ترکیب خواص متفاوت دوماده را برای رسیدن به عملکرد بهینه فراهم می‌کنند؛ به‌عنوان مثال در صنایع خودروسازی، هوافضا و ریلی از اتصالات دوجنسی(مثلاً بین آلیاژهای آلومینیوم مانندAA5052 وAA1200)برای کاهش وزن سازه در کنار حفظ یا افزایش استحکام در نواحی بحرانی استفاده می‌شود، درساخت مبدل‌های حرارتی و الکترونیکی از ترکیب فلزات با رسانایی حرارتی یا الکتریکی متفاوت بهره می‌برند، در کشتی‌سازی و تأسیسات دریایی اتصالات دوجنسی برای افزایش مقاومت به خوردگی درسطوح درتماس با محیط‌های خورنده کاربرد دارد.

با توجه به اهمیت روز افزون‌استفاده ازقطعات دوجنسی در صنعت ونحوه اتصال ورق های فلزی به یکدیگر به روش های گوناگون جوشکاری به خصوص روش‌جوشکاری ذوبی و جامد، در این پژوهش به‌بررسی‌خواص‌مکانیکی‌مانند استحکام کشش و سختی‌سنجی و ریزساختار ورق‌های دو جنسی آلیاژ آلومینیوم AA5052-AA1200 که به روش‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و تیگ به یکدیگر متصل شده اند پرداخته می‌شود. برای این منظور ابتدا پارامترهای بهینه جوشکاری FSW وTIG تعیین می‌گردد. به این منظور با انجام آزمون های اولیه گوناگون سطوح بهینه پارامترهای مهم جوشکاری اصطکاکی‌اغتشاشی 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، نمونه‌ای ازآلیاژهای غیر همجنس آلومینیوم شامل AA5052 و AA3105 باضخامت 2میلیمتر انتخاب گردید. پس از آن جهت بررسی و مقایسه با آلیاژ های پایه، نمونه دو جنسی متشکل ازآلیاژ های AA5052 & AA3105 که به دو روش FSW و TIG جوشکاری شده اند نیز

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]

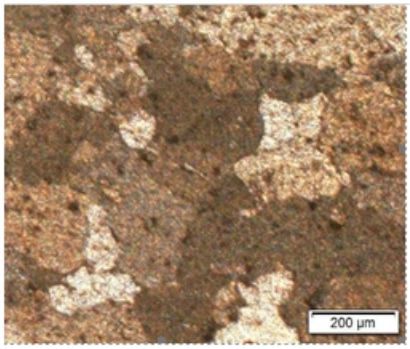
تهیه شد. درجداول 1و 2 ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیومی مورد استفاده و در شکل(1) ساختار متالورژیکی آن‌ها نشان داده شده است همانطور که مشاهده می‌شود متوسط اندازه دانه آلیاژ AA3105 حدود 40 میکرون و برای آلیاژAA5052 50 میکرون می باشد.

جدول1-ترکیب شیمیایی آلیاژ AA5052 (درصد وزنی).

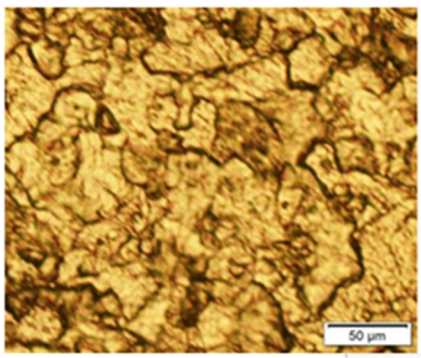
Mg	Cr	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
2.7	0.31	0.2	0.36	0.008	0.008	0.1	Rem

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

شکل1-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 الی120 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 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 دورانی1200، 1600 و2000 دور بر دقیقه و سرعت های خطی8، 12 و20 میلی متر بردقیقه 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 درفیکسچر ساخته شده و توسط ابزار جوشکاری(پین ماشین کاری شده)که جنس آن فولاد گرم H13 است صورت می پذیرد. جوشکاریFSW توسطدستگاه فرزساخت‌ایران‌مدل FP4M و جوشکاری TIG نیز توسط دستگاه جوش ساخت کره مدل TRIPLE500 انجام‌شد(شکل2). جهت‌جلوگیری‌از نامگذاری های طولانی نمونه های آزمون، از حروف و اعداد به صورت اختصاری استفاده شده است که درجدول(3) نام گذاری علائم مورد استفاده ارائه شده است.

شکل2-دستگاه مورد استفاده در جوشکاری TIG.

جدول3- 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**

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]

تست کشش از مهمترین نوعِ آزمون مکانیکی جهت دستیابی به خواص مکانیکی مواد می باشد. روش انجام این تست بر مبنای آزمـون کـشش 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 نمونه‌های 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.

شکل3- دستگاه تست کشش مورد استفاده.

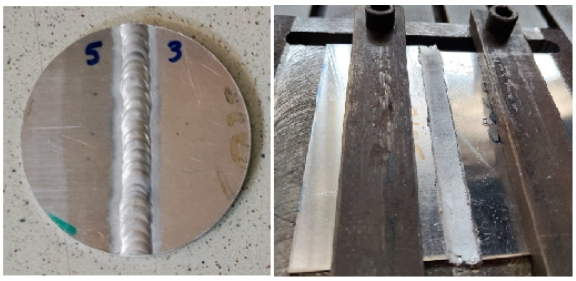
برای تعیین سختی نمونه‌ها از دستگاه میکروسختی‌سنج مدل INNOVATESTVickers و با تنظیمات Force: 100gf وDWELL:30 Sec صورت پذیرفت. این دستگاه براساس استانداردسختی‌سنجی ویکرز عمل کرده و با اعمال یک فرورونده الماسی چهاروجهی مربعی‌شکل تحت بار کنترل‌شده بر سطح نمونه، میزان مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک موضعی را اندازه‌گیری می‌کند.

ازآنجا که خواص مکانیکی وعملکرد نهایی یک اتصال تا حد زیادی به ساختار میکروسکوپی مناطق مختلف جوش، شامل فلز پایه، منطقه متاثر از حرارت و فلز جوش بستگی دارد، انجام متالوگرافی ضروری است. این روش امکان مشاهده و شناسایی عیوبی مانند تخلخل، ترک‌های ریز، ناپیوستگی‌ها و همچنین بررسی توزیع و اندازه دانه‌ها را فراهم می‌آورد.

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، فیلرآلومینیوم 5356 با قطر2/4 تعیین گردید. در شکل(5) نیز نمونه های نهایی جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی و تیگ نشان داده شده است.

شکل4- نمونه های FSW شده با سرعت های دورانی و خطی الف- 1600 rpm، 20 mm/min و ب- 2000rpm، 20 mm/min و ج- 1600 rpm، 12 mm/min.

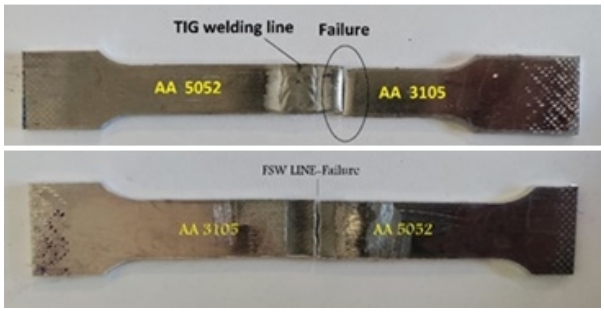


شکل5- نمونه جوشکاری شده به روش الف- FSW و ب- TIG.

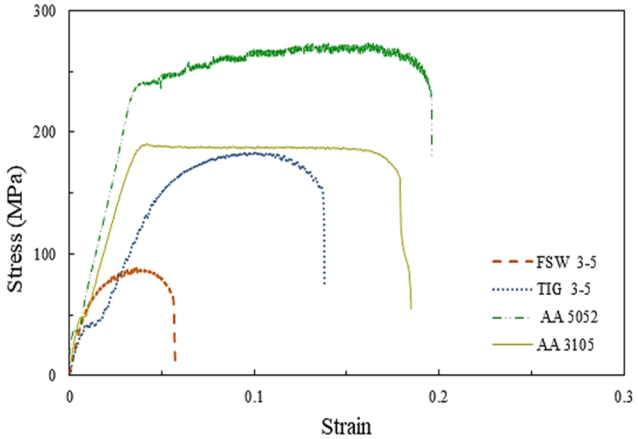
بررسی قطعات شکسته شده پس از آزمون کشش حاکی از شکست نمونه جوشکاری شده به روش FSW از ناحیه اتصال بوده است (شکل 6) به عبارتی استحکام مکانیکی نمونه جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]

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 می‌کند و کرنش شکست قابل توجهی را داراست. یعنی این ماده دارای چقرمگی و شکل‌پذیری بالایی است و استحکام آن نسبت به نمونه جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی یعنی F 3-5 بیشتر می باشد.

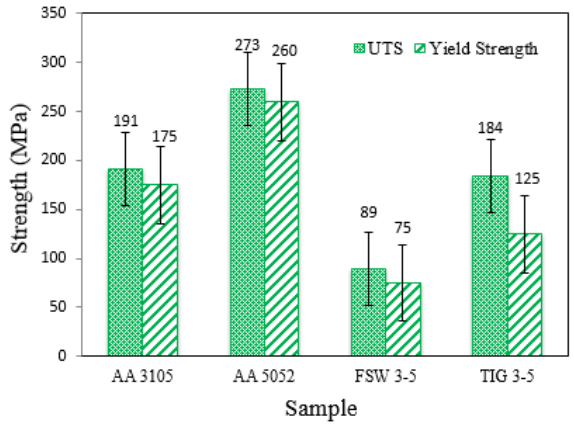


شکل6-محل گسیختگی نمونه های جوشکاری شده به روش FSW و TIG پس از انجام آزمون کشش.



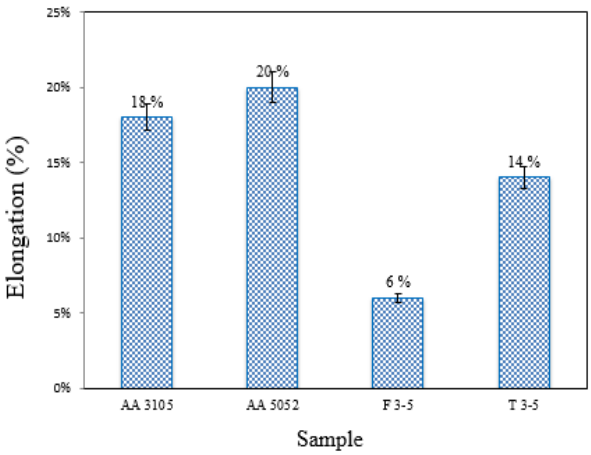
شکل7- بررسی نمودار های تنش کرنش نمونه های جوشکاری شده F 3-5 و T 3-5.

با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل(8)، نتایج نشان داد که آلیاژ پایه AA5052 دارای بالاترین مقدار استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم در بین کلیه نمونه‌ها بوده و به ترتیب مقادیر 273 مگاپاسکال و260 مگاپاسکال را نشان می‌دهد. در میان نمونه‌های جوشکاری شده، نمونه جوشکاری‌شده به روش T 3-5 عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های F 3-5 از خود نشان دادند.



شکل8- مقایسه میزان استحکام نمونه های جوشکاری شده به روش FSW و TIG با آلیاژ های پایه.

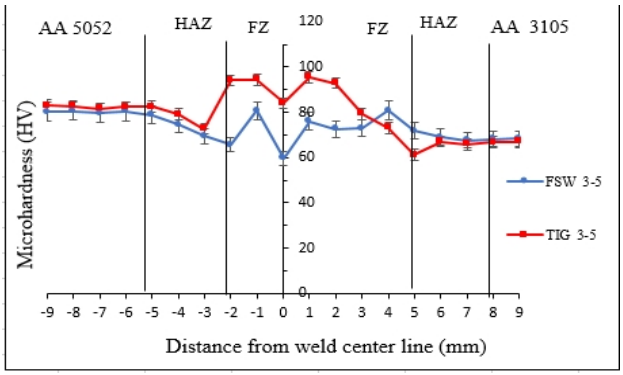
در شکل(9) نمودار مقایسه‌میزان‌شکل پذیری نمونه های جوشکاری شده به روش FSW و TIG و مقایسه آن با آلیاژ های پایه نشان داده شده است. نمونه AA5052 با داشتن 20% افزایش طول، دارای بیشترین میزان شکل پذیری بود، که نشان از برتری کامل آن نسبت به سایر نمونه ها مورد بررسی می باشد. کمترین میزان شکل پذیری هم برای نمونه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



شکل9- مقایسه میزان شکل پذیری نمونه های جوشکاری شده به روش FSW و TIG با آلیاژ های پایه.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]

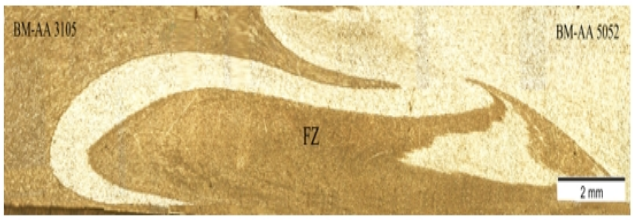
در شکل(10) تغییرات ریزسختی را در فواصل مختلف از مرکز جوش برای دو نمونه جوشکاری شده به روش های تیگ و اصطکاکی اغتشاشی نشان داده شده است. محور افقی فاصله از مرکز جوش را نشان می‌دهد و محور عمودی مقدار ریزسختی را بر حسب واحد ویکرز (HV) نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین سختی در نمونه T 3-5 دیده می‌شود که در منطقه جوش بدلیل استفاده از فیلر ER-AA5356 فیلر ER-AA5356 که دارای مقدار منیزیم بالاتری نسبت به فلزات پایه است، می‌باشد. حضور منیزیم باعث افزایش استحکام محلول جامد و در نتیجه افزایش سختی فلز جوش می‌شود. در فرایند TIG، ذوب و انجماد مجدد رخ می‌دهد. این فرایند می‌تواند منجر به تشکیل برخی ترکیبات و رسوبات غنی از منیزیم و منگنز شود که به افزایش سختی ناحیه جوش کمک می‌کنند. پایین‌ترین میزان سختی نیز در ناحیه مربوط به آلیاژ AA3105 مشاهده می‌شود. در نمونه‌های جوشکاری شده به روشFSW به دلیل عدم ذوب و وقوع تبلورمجدد، دانه‌های ریز و هم‌محور در ناحیه اختلاط تشکیل شده است که سبب افزایش یکنواختی در توزیع سختی شد. اگرچه FSW یک فرایند حالت جامد است و ساختار دانه‌ای ریز در ناحیه اختلاط ایجاد می‌کند، اما حرارت تولیدشده می‌تواند موجب بازیابی و کاهش چگالی نابجایی‌ها در آلیاژهای AA5052 و AA3105 شود (شکل های 11 و 12). این پدیده بخشی از اثر کارسختی اولیه را از بین می‌برد و سختی را کاهش می‌دهد. همچنین گرمای ورودی پایین این فرایند موجب ایجاد ناحیهHAZ باکاهش محدودتر سختی‌در مقایسه با روش TIG شده است. در نتیجه، منحنی سختی در کل ناحیه جوش به‌صورت یکنواخت‌تر مشاهده شد. در مقابل، در نمونه‌های جوشکاری شده به روش TIG به دلیل ماهیت ذوبی فرایند، ریزساختار ریختگی با دانه‌های 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 می‌باشد. وجود گرمای ورودی زیاد، منجر به افت سختی شدیدتر در ناحیه HAZ برای این ترکیبی جوشی شده است، به‌ویژه در سمت آلیاژهای سخت‌شده (مانند AA5052 وAA3105). 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 وسیع‌تر می‌باشد که می‌تواند به‌عنوان ناحیه بحرانی درعملکرد مکانیکی اتصال شناخته شود. درمجموع 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 دانه‌های ریز و هم‌محور می‌شود، اما کاهش اثر کارسختی اولیه و وقوع بازیابی دینامیکی سبب می‌شود سختی نهایی ناحیه جوش کمتر از اتصال TIG باشد.



شکل10- مقایسه میکروسختی نمونه های جوشکاری شده F 3-5 و T 3-5 با آلیاژهای پایه.

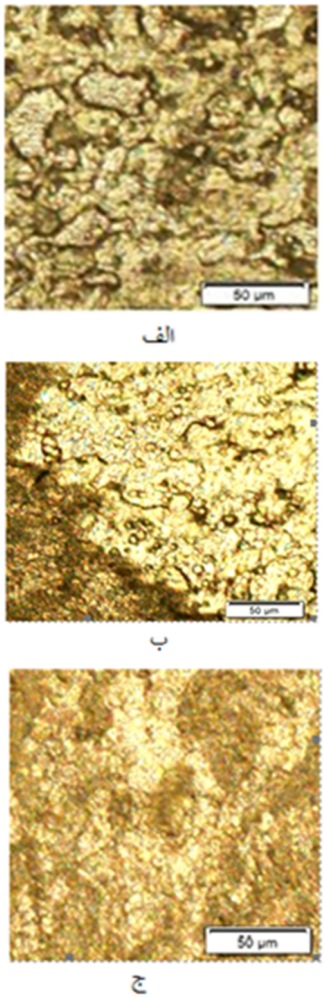
در شکل(11) تصویر کلی نمونه پس از جوشکاری FSW با نشان دادنمناطقBM، FZ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص تشکیل یک جوش پیوسته و یکنواخت بدون عیوب آشکاری نظیر ترک، حفره یا عدم اتصال است. در این تصویر، ناحیه فلز پایه (BM) ساختار اولیه آلیاژ را حفظ کرده و تحت تأثیر مستقیم ابزار قرار نگرفته است. 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 هم‌محور بوده و نسبت به فلز پایه از یکنواختی بیشتری برخوردار است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]



شکل11- تصویر میکروسکوپی نمونه FSW 3-5 و نمایش مناطق BM، FZ.

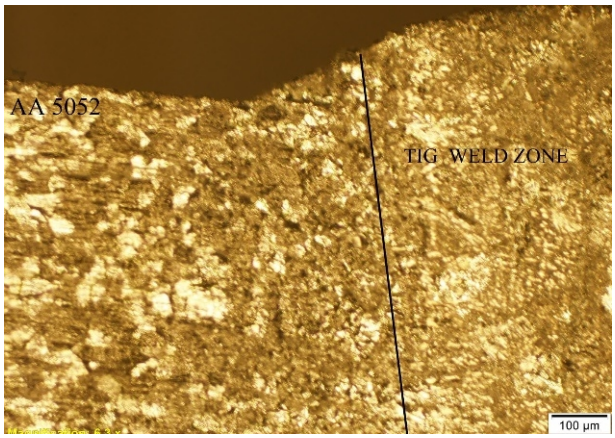
در شکل(12) تصویر میکروسکوپی مناطق مختلف در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ساختار ناحیه جوش ریزتر می شود و محل تلاقی دو آلیاژ، ناحیه‌ای با دانه‌های تغییر شکل‌یافته، ریزتر و به‌طور پیچیده‌ای مخلوط شده است. ساختار این ناحیه به شدت متاثر ازگرمای اصطکاک، کرنش پلاستیک شدید، نرخ سرمایش بعد از جوش به دلیل میکروحرکت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



شکل12- تصویر میکروسکوپی الف- آلیاژ AA5052 و ب- ناحیه اختلاط FSW 3-5 و ج) آلیاژ AA3105.

تصویر کلی اتصال پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نشان‌دهنده تشکیل یک جوش سالم و پیوسته بین آلیاژهای AA5052 و AA3105 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 می شود 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.



شکل13- تصویر میکروسکوپی از منطقه جوش تیگ و نواحی اطراف و ورق آلیاژ AA5052.

4- نتیجه‌گیری

در این‌تحقیق به بررسی و مقایسه رفتارمکانیکی و میکروساختاری‌جوش‌های ایجاد شده در ورق های دو جنسی به دو روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی و تیگ پرداخته

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]

شده است. برای این منظور ابتدا سطوح بهینه پارامترهای برای انجام جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی مناسب برای ورق های مدنظر با سرعت دورانی 1600 دور بر دقیقه، سرعت خطی 12 متر بردقیقه، زاویه انحراف ابزار 1/5 درجه و عمق فرورفتگی شولدر 0/1 میلی متر و برای انجام جوشکاری تیگ سطوح بهینه پارامترهای شدت جریان120 آمپر، فیلر آلومینیوم 5356 با قطر2/4 میلی متر 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 توجیه 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 متاثر از حرارت (HAZ) به‌ویژه در سمت آلیاژ AA3105، به دلیل دمای بالای فرایند TIG، کاهش سختی مشاهده شد که در 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-Senthamaraikannan, 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-ShivaKumar, 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-MohammadiSefat, 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-Senthamaraikannan, B., & Krishnamoorthy, J. Material flow and mechanical properties of friction stir welded AA 5052-H32 and AA6061-T6 alloys with Sc

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]

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),"
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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-06-21]