

(یادداشت مهندسی)

تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی

سلمان نوروزی^۱، محسن شاکری^۲ و مصطفی حبیب‌نیا^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی بابل

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۸/۰۳)

چکیده

در مقاله حاضر اتصال موفقیت‌آمیز دو فلز غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ به روش جوشکاری اصطکاکی مورد مطالعه قرار گرفته است. در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پارامترهای زیادی بر خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصال موثر می‌باشد. از این رو با هدف رسیدن به بالاترین استحکام ممکن، پارامترهای مهم این فرآیند از جمله: سرعت دورانی و خطی ابزار، افست و شکل پین ابزار مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج حاصل از خواص مکانیکی، بهترین شرایط برای به‌دست آوردن بالاترین استحکام در ناحیه اتصال، در سرعت خطی ۸۰ mm/min، سرعت دورانی ۵۰۰ rpm، با ابزار مخروطی و افست ۱/۸ mm بوده است. در این حالت مقدار استحکام برابر ۲۰۳/۹۴ Mpa به‌دست آمده که این مقدار برابر با ۹۷٪ استحکام فلز پایه آلیاژ آلومینیوم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، پارامترهای تأثیرگذار، ناحیه جوش

(Engineering Note)

Effect of Friction Stir Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Joint Al Alloy to Stainless Steel

S. Nourouzi, M. shakeri and M. Habibnia

Department of Mechanical Engineering

Babol University of Technology

(Received: 31 May, 2013; Accepted: 25 October, 2013)

ABSTRACT

In this research, successfully joint of dissimilar 5050 Al alloy to 304stainless steel by friction Stir Welding (FSW) has been studied. In FSW many parameters on the microstructure and mechanical properties is effective. Therefore, to achieve the highest strength possible, the important process parameters such as tool rotational speed, feedrate tool offset and pin profile have been investigated. Considering the results of the mechanical properties, the best condition to obtain the highest strength in weld nugget was 80mm/min feedrate, 500rpm tool rotational speed, with a conical pin profile and 1.8mm tool offset respectively. In this case the strength of the 94/203MPa is obtained that this value is equal to 97% strength aluminum alloy base metal.

Keywords: Friction Stir Welding, Effective Parameters, Weld Nugge

۱- دانشیار(نویسنده پاسخگو): s_nourouzi@nit.ac.ir

۲- استاد: shakeri@nit.ac.ir

۳- دانشجوی دکترا: m.habibnia@stu.nit.ac.ir

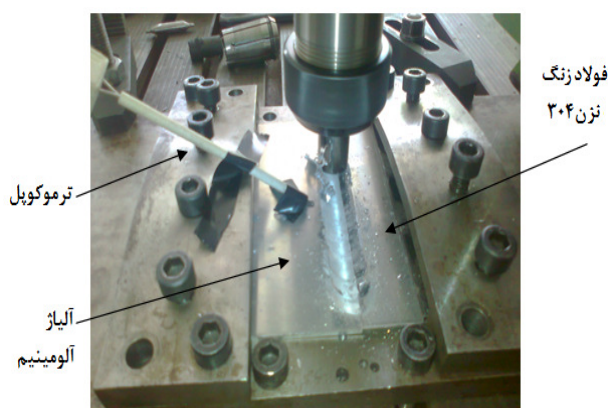
۱- مقدمه

کریمی و همکاران روی خواص اتصال آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ به فولاد کربنی تحقیقاتی کردند [۱۴-۱۲].

در این تحقیق به بررسی اتصال دو فلز غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ به‌وسیله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است. به‌همین منظور پارامترهای سرعت دورانی و خطی، افسست و شکل ابزار مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

ورق‌های آلیاژهای مورد استفاده به ضخامت ۳ mm بوده که آلیاژ آلومینیوم در قسمت پیشرو و فولاد زنگ‌نزن در قسمت پسرو قرار گرفتند. چگونگی انجام فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): مجموعه FSW مورد استفاده در تحقیق.

در جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده آمده است. برخی از خواص مکانیکی هر یک از آلیاژهای مورد بررسی نیز در جدول ۲، درج شده است.

کاهش مصرف سوخت و افزایش بازدهی از مهم‌ترین پارامترها در ساخت ماشین آلات صنعتی است. یکی از بهترین گزینه‌ها برای رسیدن به چنین هدفی اتصال فلزات غیرهمجنس است [۱]. امروزه اتصال فلزات غیرهمجنس یک ایده جالب در صنعت مهندسی می‌باشد. پژوهش‌های زیادی در مورد اتصال فلزات غیرهمجنس مانند آلومینیوم به مس، مس به برنج شده است [۴-۲]. اتصال دو فلز غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم به فولاد می‌تواند کاربرد وسیعی در بسیاری از صنایع از جمله صنایع خودروسازی و کشتی‌سازی به‌منظور کاهش در وزن قطعات و افزایش کارایی برای رسیدن به بازدهی بالاتر باشد [۷-۵].

اتصال ذوبی آلیاژ آلومینیوم به فولاد به‌دلیل خواص کاملاً متفاوت مکانیکی و حرارتی، با مشکلات زیادی همراه بود که تحقیق در این زمینه را محدود کرده است. اتصال این دو فلز به‌وسیله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌دلیل ماهیت این فرآیند، روش مناسبی می‌باشد چرا که انجام فرآیند در حالت جامد، عیوب جوشکاری ذوبی را به‌همراه نخواهد داشت. در این روش به‌دلیل دمای پایین، ضخامت لایه بین فلزی که منشأ تردی و شکست ترد می‌باشد بسیار کم بوده و عیب کمتری ایجاد خواهد شد [۸]. واتاناب^۱ و همکاران اتصال دو فلز، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به فولاد کربنی SS ۴۰۰ با ضخامت ۲ میلی‌متر را گزارش کردند [۹]. شنیز روی اتصال فولاد ۱۰۱۸ به آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ [۹]. مطالعاتی انجام داد [۱۰]. تاناکا^۲ و همکاران خواص جوش آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به فولاد را مورد مطالعه قرار دادند [۸]. بانک^۳ و همکاران روی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۶۰۱۳ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی مطالعاتی انجام دادند [۱۱].

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده.

ترکیب شیمیایی (wt%)							فلزات
Mg	Mn	Si	Cu	Ti	Cr	Al	آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۰
۱/۷۲	۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۹۷/۶	
Cr	Ni	Mn	Si	Cu	P	Fe	فولاد آستنیتی ۳۰۴
۱۹/۱	۱۱/۸	۱/۳۴	۰/۳۶	۰/۲۶	۰/۰۳	۷۰/۳	

1 -Watanabe
2 -Tanaka
3 -Bang

جدول (۲): برخی از خواص مکانیکی آلیاژهای مورد استفاده.

خواص مکانیکی				فلزات
تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	درصد ازدیاد طول (%)	سختی (Hv)	
۲۱۰	۱۱۷	۲۵	۶۱	آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۰
۶۲۸	۲۶۵	۵۵	۲۲۷	فولاد آستنیتی ۳۰۴

در جدول ۴ پارامترهای مورد بررسی در این مرحله درج شده است.

جدول (۴): پارامترهای مورد بررسی در افست ۱/۵mm

و سرعت دورانی ۷۱۰ rpm.

سرعت خطی (mm/min)			شکل ابزار
۲۸	۴۰	۵۶	
۲۸	۴۰	۵۶	استوانه‌ای
۲۸	۴۰	۵۶	شش‌ضلعی

در نمونه‌های انجام شده در سری دوم، مقدار حرارت تولید شده زیاد بوده که باعث ذوب شدگی آلیاژ آلومینیوم شده است. از همین رو سرعت دورانی را کاهش داده و به بررسی تأثیر سرعت خطی پرداخته شد. در جدول ۵ پارامترهای مورد نظر با ابزار مخروطی آمده است.

جدول (۵): پارامترهای مورد بررسی با ابزار مخروطی.

افست ابزار (mm)	سرعت دورانی (rpm)	سرعت خطی (mm/min)
۱/۵	۵۰۰	۴۰
۱/۵	۵۰۰	۵۶
۱/۵	۵۰۰	۸۰

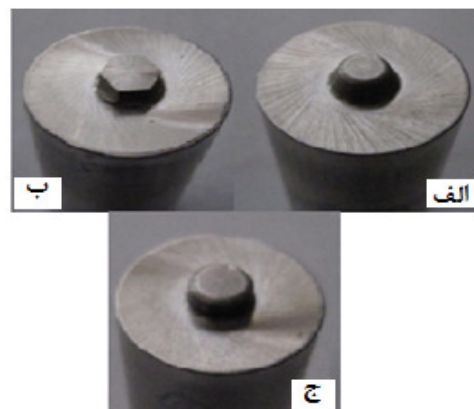
بهترین نتیجه در سرعت خطی ۸۰ mm/min و سرعت دورانی ۵۰۰ rpm با ابزار مخروطی به دست آمد. در ادامه به بررسی دقیق‌تر تأثیر افست ابزار پرداخته شد. در جدول ۶ پارامترهای مورد نظر درج شده است. برای بررسی تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر خواص مکانیکی از آزمایش‌های ریزسختی سنجی و کشش و برای مطالعه خواص متالورژیکی اتصال از میکروسکوپ نوری و الکترونی استفاده شد.

ابزار مورد استفاده از جنس کاربید تنگستن بوده و نسبت به محور عمودی با زاویه انحراف ۲ درجه موقعیت‌دهی شد. ابزار با قطر شولدر ۲۰ میلی‌متر و زاویه تقعر ۳ درجه انتخاب شد. در این تحقیق ۴ مرحله آزمایش جداگانه صورت گرفت و با توجه به نتایج حاصل از هر مرحله از آزمایش‌ها، آزمایش‌های بعدی تدوین شده است. در ابتدا با ابزار مخروطی و سرعت دورانی ثابت ۷۱۰ rpm، به بررسی تأثیر سرعت خطی و افست پرداخته شده است. در جدول ۳ پارامترهای مورد نظر آمده است.

جدول (۳): پارامترهای مورد بررسی با ابزار مخروطی و سرعت دورانی ۷۱۰ rpm.

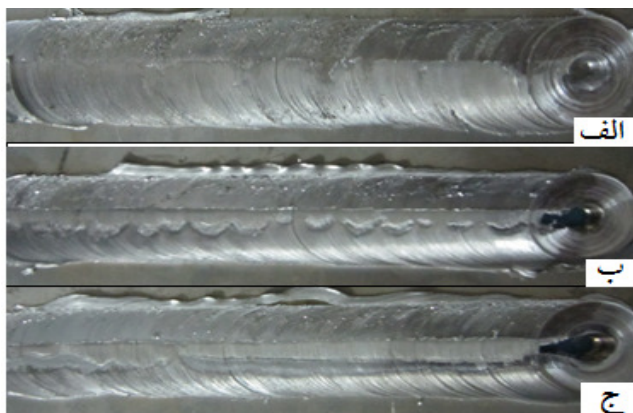
سرعت خطی (mm/min)		افست ابزار (mm)		
۲۸	۰	۰/۸	۱/۵	۱/۵
۴۰	۰	۰/۸	۱/۵	۱/۵
۵۶	۰	۰/۸	۱/۵	۱/۵

در ادامه با توجه به اینکه افست ۱/۵mm نتیجه بهتری داشته، در این افست و سرعت دورانی ۷۱۰ rpm به بررسی تأثیر شکل پین ابزار پرداخته شد. در مرحله دوم تحقیق، تأثیر هندسه پین ابزار مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، پین با شکل‌های مخروطی، استوانه‌ای و شش‌ضلعی مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۲ نمایی از ابزارها مورد استفاده نشان داده شده است.

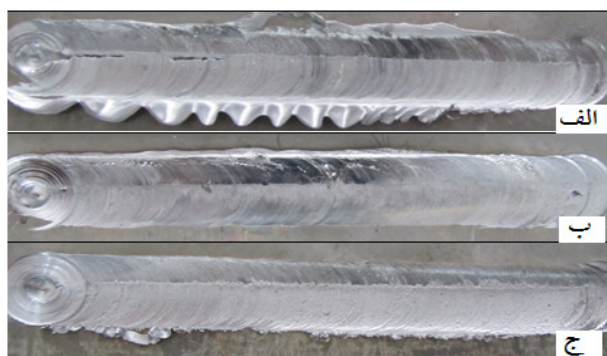


شکل (۲): تصویر ابزارهای مورد استفاده در تحقیق، (الف) مخروطی، (ب) شش‌ضلعی و (ج) استوانه‌ای.

این امر را می‌توان در کاهش حرارت ورودی، در واحد طول مربوط دانست.



شکل (۳): تأثیر افست ابزار بر کیفیت ظاهری جوش با شرایط سرعت دورانی و خطی ابزار به ترتیب 710 rpm و 28 mm/min و افست ابزار، الف (الف، $1/5$ ، ب) $0/8$ و ج) 2 mm .



شکل (۴): تأثیر سرعت خطی بر کیفیت ظاهری جوش با شرایط سرعت دورانی و افست ابزار به ترتیب 500 rpm و $1/5 \text{ mm}$ و سرعت خطی، الف (الف، 40 ، ب) 56 و ج) 80 mm/min .

۳-۲- ریزساختار ناحیه جوش

در افست صفر به دلیل اینکه ابزار مخروطی در وسط دو فلز قرار می‌گیرد و با توجه به جهت دوران ابزار، لایه‌ای از فولاد از لبه فولادی جدا می‌شود و با ادامه پیشروی ابزار، این لایه به صورت پیوسته در ناحیه جوش و در سمت دیگر ابزار قرار می‌گیرد. این امر موجب می‌شود که ۳ ناحیه جدا در جوش به وجود آید. در کنار این لایه‌ها ترک‌هایی به وجود می‌آید و باعث کاهش استحکام اتصال می‌شود. در افست $0/8 \text{ mm}$ ، ابزار تماس زیادی با قسمت فولادی داشته و باعث می‌شود ذرات جدا شده از لبه فولادی

جدول (۶): پارامترهای مورد بررسی با ابزار مخروطی برای بررسی تأثیر افست ابزار.

افست ابزار (mm)	سرعت دورانی (rpm)	سرعت خطی (mm/min)
۱/۵	۵۰۰	۸۰
۱/۸	۵۰۰	۸۰
۲	۵۰۰	۸۰

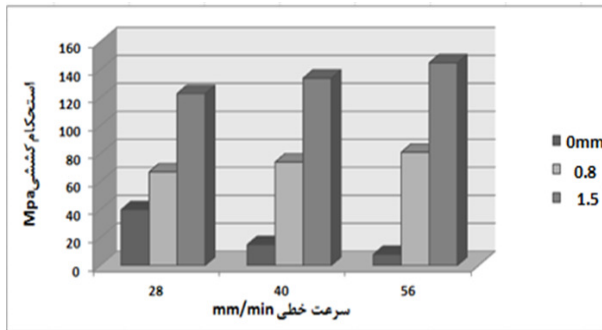
۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از تأثیر پارامترهای مهم این فرآیند نظیر سرعت دورانی و خطی، افست و شکل ابزار روی ساختار و خواص مکانیکی اتصال مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

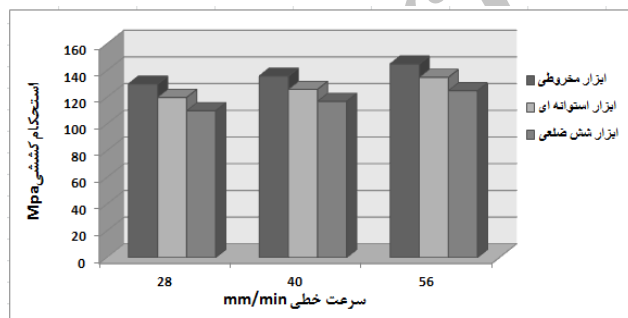
۳-۱- کیفیت ظاهری اتصال

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با کاهش مقدار افست، ذرات نسبتاً بزرگ فولادی به صورت پیوسته در ناحیه اغتشاش مشاهده می‌شوند. در افست صفر یک لایه پیوسته از فولاد در ناحیه اغتشاش به وجود آمده است، در محل این لایه پیوسته، ترک‌ها نمایان می‌باشد. در افست $0/8 \text{ mm}$ ذرات فولادی نسبتاً بزرگ و پیوسته می‌باشند و به همین دلیل عیوبی در کنار این ذرات پیوسته به وجود آمده است. در افست $1/5 \text{ mm}$ عیب ظاهری مشاهده نشده است ولی همان‌طور که از این شکل مشخص می‌باشد، مقدار حرارت تولیدی به دلیل سرعت بالای دورانی (710 rpm) زیاد بوده و باعث ذوب آلیاژ آلومینیوم شده است. دمای اندازه‌گیری شده به وسیله ترموکوپل در فاصله 20 mm از خط جوش در آلیاژ آلومینیوم عدد 370°C بوده است. با توجه به اینکه در افست $1/5 \text{ mm}$ ، سرعت دورانی 710 rpm و سرعت خطی 28 mm/min ، مقدار حرارت تولید شده زیاد بوده و باعث ذوب آلیاژ آلومینیوم شده بود. برای برطرف کردن این عیب، سرعت دورانی را کاهش داده و همچنین سرعت‌های خطی مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش سرعت خطی کیفیت ظاهری جوش بهتر شده است. در سرعت خطی 40 mm/min در ناحیه آلیاژ آلومینیوم ذوب‌شدگی این فلز مشاهده می‌شود ولی با افزایش سرعت خطی سطح جوش دارای کیفیت بهتری شده است. دلیل

افست صفر و $0/8$ میلی‌متر، به دلیل وجود عیوبی همچون ترک و حفره در ناحیه اغتشاش، افت کرده است و همین ناحیه محل شکست نمونه‌ها بوده است. همچنین با افزایش سرعت خطی استحکام اتصال افزایش یافته است. در افست صفر با افزایش سرعت خطی به دلیل اینکه ناحیه جوش از آلیاژ آلومینیوم پرنشده است، استحکام کاهش یافته است. در شکل ۷ نتایج حاصل از آزمایش کشش در سرعت‌های خطی و شکل پین‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت خطی مقدار استحکام افزایش یافته است. بالاترین استحکام با ابزار مخروطی و پایین‌ترین استحکام با ابزار شش ضلعی به دست آمده است. در ابزار شش ضلعی همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده شده است، در کنار ذرات فولاد حفره‌هایی ایجاد شده است که باعث کاهش استحکام جوش شده است.



شکل (۶): تأثیر افست و سرعت خطی ابزار بر مقدار استحکام نهایی جوش.

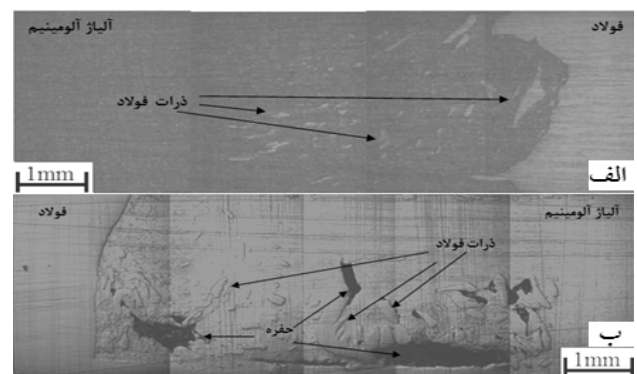


شکل (۷): تأثیر شکل پین و سرعت خطی ابزار بر مقدار استحکام نهایی.

در جدول ۷ نتایج حاصل از آزمایش کشش در سرعت‌های خطی مختلف با استفاده از ابزار مخروطی، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بالاترین استحکام کششی معادل 175 MPa در سرعت خطی 80 mm/min گزارش شده است.

بزرگ بوده و این ذرات جدا شده در ناحیه اغتشاش قرار گیرند. به دلیل بزرگ بودن این ذرات، عیوبی در ناحیه اغتشاش به وجود می‌آید. در افست $1/5 \text{ mm}$ ، قسمت بیشتر ابزار مخروطی در ناحیه آلیاژ آلومینیوم قرار می‌گیرد. حرکت دورانی ابزار باعث ایجاد سایش لبه فولاد شده و این پدیده علت جدا شدن ذرات کوچک فولاد از لبه فولاد می‌باشد. این ذرات جدا شده به صورت یکنواخت در ناحیه اغتشاش پراکنده شده است. به دلیل کوچک بودن این ذرات، عیوب کمتری نسبت به سایر افست‌ها، در ناحیه اتصال مشاهده می‌شود.

تصویر مقطع اتصال در افست $1/5 \text{ mm}$ ، با ابزارهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابزار شش ضلعی به دلیل لبه‌های تیز ابزار ذرات جدا شده از لایه فولادی بزرگ‌تر بوده که باعث ایجاد حفره‌هایی در ناحیه اغتشاش می‌گردد. نتیجه این پدیده کاهش استحکام جوش خواهد بود. بر خلاف اتصال فلزات همجنس که ایجاد لبه تیز در پین که باعث سیلان بیشتر مواد شده که این امر خود موجب ریزدانه شدن و افزایش خواص مکانیکی می‌شود. در ابزارهای استوانه‌ای و مخروطی حرکت سایشی ابزار بر لبه فولادی باعث جدا شدن ذرات ریز فولادی می‌شود که این اثر خود باعث یکنواخت پراکنده شدن این ذرات می‌شود که بهبود کیفیت اتصال را به دنبال خواهد داشت.



شکل (۵): تصویر میکروسکوپ نوری مقطع اتصال با سرعت دورانی و خطی ابزار به ترتیب 710 و 28 و ابزارهای مختلف، (الف) مخروطی و (ب) شش ضلعی.

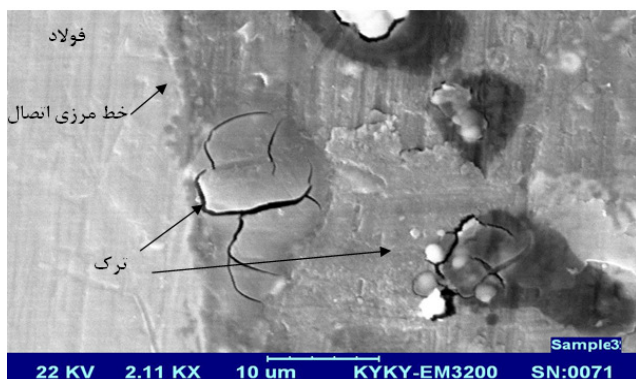
۳-۳- استحکام کششی

در شکل ۶ نتایج حاصل از آزمایش کشش در افست‌ها و سرعت‌های خطی مختلف نشان داده شده است. مقدار استحکام کششی در

آلیاژ آلومینیوم، مقدار آن کاهش می‌یابد. افزایش سختی در این ناحیه به دلیل تغییر شکل شدید مواد و ریزدانه شدن در این ناحیه می‌باشد. همچنین در این ناحیه به دلیل وجود ذرات فولاد، برخی نوسانات در اندازه سختی دیده می‌شود. مقدار سختی در فولاد افزایش یافته که با حرکت به سمت فلز پایه کاهش یافته است. افزایش سختی در این ناحیه به دلیل کارسختی ایجاد شده به وسیله ابزار در حین انجام فرآیند، می‌باشد.

۳-۵- میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM)

همان گونه که قبلاً اشاره شد، در نمونه با سرعت دورانی ۷۱۰ rpm و سرعت خطی ۲۸ mm/min گرمای تولید شده زیاد بوده و باعث ذوب شدگی آلیاژ آلومینیوم شده است. این افزایش حرارت باعث به وجود آمدن ترک‌هایی در ناحیه اغتشاش شده که کاهش استحکام جوش را به دنبال دارد. در شکل ۹ این پدیده نشان داده شده است.



شکل (۹): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ترک‌های

ایجاد شده در مقطع جوش به دلیل سرعت دورانی بالا.

برای حل این مشکل گرمای تولید شده باید کاهش یابد. در نمونه با سرعت دورانی ۵۰۰ rpm و سرعت خطی ۸۰ mm/min، هیچ عیبی همچون ترک دیده نشد که باعث کاهش استحکام شود. در حالت استفاده از سرعت دورانی ۵۰۰ rpm دمای اندازه‌گیری شده در فاصله ۲۰ mm از خط جوش در آلیاژ آلومینیوم به 240°C کاهش یافته است. در ناحیه مرزی اتصال دو فلز، ترکیبات بین فلزی تشکیل شده است. ضخامت این لایه کمتر از $2\mu\text{m}$ می‌باشد. به دلیل انتخاب مناسب پارامترهای جوشکاری، در لایه مرزی و ترکیبات فلزی ایجاد شده هیچ نوع ترک خوردگی دیده نشد. نتایج تحلیل XRD در ناحیه اتصال نشان داد که

جدول (۷): تأثیر سرعت خطی ابزار بر مقدار استحکام نهایی.

سرعت دورانی (rpm)	افست ابزار (mm)	سرعت خطی (mm/min)	استحکام نهایی (MPa)
۵۰۰	۱/۵	۴۰	۱۶۷
۵۰۰	۱/۵	۵۶	۱۷۰
۵۰۰	۱/۵	۸۰	۱۷۵

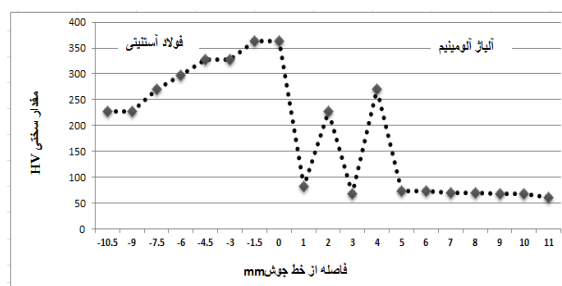
برای بررسی دقیق‌تر افست ابزار با شرایط درج شده در جدول ۸ آزمایش کشش روی نمونه‌های اتصال به عمل آمد. همان‌طور که در این جدول درج شده است با افست ۱/۸ mm و به وسیله ابزار مخروطی، بالاترین استحکام کششی (به مقدار ۲۰۳/۹۴MPa) به دست آمده است.

جدول (۸): تأثیر افست ابزار بر مقدار استحکام نهایی.

سرعت دورانی (rpm)	سرعت خطی (mm/min)	افست ابزار (mm)	استحکام نهایی (MPa)
۵۰۰	۸۰	۱/۵	۱۷۵
۵۰۰	۸۰	۱/۸	۲۰۳/۹۴
۵۰۰	۸۰	۲	۱۸۰

۳-۴- سختی

در شکل ۸ تغییرات سختی مقطع جوش نمونه با شرایط سرعت دورانی ۵۰۰ rpm، سرعت خطی ۸۰ mm/min و افست ۱/۸ mm نشان داده شده است.



شکل (۸): تغییرات سختی در نواحی مختلف اتصال با ابزار مخروطی.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار سختی در ناحیه اغتشاش افزایش یافته است و با حرکت به سمت فلز پایه

3. Dalle, D.C. and Raimbeaux, G. "Residual Stress Effects on Fatigue Crack Propagation in Friction Stir Welds", in: Int. Conf. on Fracture ICF 10, pp3-7, Hawaii, USA, Elsevier, NL, Cd-Rom. December 2001.
4. Timorian, J. "The Effect of Welding Parameters on Friction Stir Butt Welds of Copper Plates", Aerospace Mechanics Journal, Vol.8, No. 4, pp.66-74, 2013. (in Persian)
5. Zhou, C., Yang, X., and Luan, G. "Effect of Root Flaws on the Fatigue Property of Friction Stir Welds In 2024-T3 Aluminum Alloys", Mater Sci. Eng. A; Vol. 418, No. 1, pp.55-60, 2006.
6. Uzun, H., Claudio, D., Alberto, A., Tommaso G., and Gambaro, C. "Friction Stir Welding of Dissimilar Al 6013-T4 to X5crni18-10 Stainless Steel", Materials and Design, Vol. 26, No. 7, pp. 41-46, 2005.
7. Dong, H., Hu, W., Duan, Y., Wang, X., and Dong C. "Dissimilar Metal Joining of Aluminum Alloy to Galvanized Steel with Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu and Zn-Al Filler Wires", J. Materials Proc. Tech. PROTEC-, Vol.13, No.2, pp. 55-62, 2011. sive Analysis of Joint Strength for Dissimilar Friction Stir Welds of Mild Steel to Aluminum Alloys", Scriptamaterialia, Vol.61, No. 1, pp. 756-759, 2009.
9. Watanabe, T., Takawama, H., Kimapong, K., and Hotta, N. "Joining of Steel to Aluminum Alloy by Interface-Activated Adhesion Welding", Materials Sci. Forum, Vol.42, No. 4, pp. 4129-4134, 2003.
10. Chen, C.M. and Kovacevic, R. "Joining of al 6061 Alloy to AISI 1018 Steel by Combined Effects of Fusion and Solid State Welding", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, No.11, pp. 1205-1214, 2004.
11. Bang, H., Bang, H., Jeon, G., Oh, I., and Ro, C.S. "Gas Tungsten Arc Welding Assisted Hybrid Friction Stir Welding of Dissimilar Materials Al6061-T6 Aluminum Alloy and STS304 Stainless Steel", Materials and Design, Vol.37, No.2, pp. 48-55, 2012.
12. Habibnia, M., Shakeri, M., Nourouzi, S., and Karimi, N. "Effect of Tool Rotation Speed and Feed Rate on Friction Stir Welding of 1100 Aluminum Alloy to Carbon Steel", Advanced Materials Research Vol. 445, No.1, pp.741-746, 2012.
13. Karimi, N., Nourouzi, S., Shakeri, M., Habibnia, M., and Dehghani, A. "Effect of Tool Material and Offset on Friction Stir Welding of Al Alloy to Carbon Steel", Advanced Materials Research, Vol. 445, No.1 pp.747-752, 2012.
14. Karimi, N., Shakeri, M., Habibnia, M., and Nourouzi, S. "Joining of 1100 Al Alloy to AISI 1045 Carbon Steel by Friction Stir Welding", Applied Mechanics and Materials, Vol. 152-154, No.1, pp. 418-423, 2012.

فازهای بین‌فلزی بوجود آمده در حین فرآیند شامل Al_3Fe_4 و Al_3Fe_2 بوده و ترکیب بین‌فلزی دیگری مانند Mg_2Al_3 و کاربیدکرم تشکیل نشده است که باعث کاهش مقاومت خوردگی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اتصال دو فلز غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ به‌وسیله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد مطالعه قرار گرفت. اتصال فلزات غیرهمجنس به‌ویژه آلیاژ آلومینیوم به فولاد بسیار مشکل می‌باشد که در این تحقیق اتصال قابل قبول حاصل شده است. همچنین تأثیر برخی پارامترهای این روش جوشکاری در اتصال فلزات غیرهمجنس نیز بررسی شده و نتایج حاصل به شرح زیر است.

۱- شکل پین نقش تعیین کننده‌ای در به‌دست آوردن اتصال قابل قبول دارد. ابزار شش‌ضلعی باعث ایجاد عیوبی در ناحیه اغتشاش شده که باعث کاهش استحکام شده است. ابزار مخروطی، ابزار مناسبی برای دستیابی به اتصال قابل قبول است.

۲- مقدار سختی در ناحیه اغتشاش افزایش یافته که با حرکت به سمت فلز پایه آلومینیوم اندازه آن کاهش یافته است. وجود ذرات فولادی باعث نوسان در مقدار سختی در ناحیه اغتشاش شده است.

۳- با انتخاب مناسب پارامترهای فرآیندی ضخامت لایه بین فلزی به کمتر از $2\mu m$ رسیده است. همچنین در این شرایط ترکیبات بین فلزی که باعث خواص نامطلوب در جوش می‌شود تشکیل نشده است.

۴- در سرعت دورانی 500rpm ، سرعت خطی 80mm/min و ابزار مخروطی با افست $1/8\text{mm}$ استحکام $203/94\text{MPa}$ حاصل شده است که برابر با ۹۷٪ استحکام فلز پایه آلیاژ آلومینیوم می‌باشد که نتیجه بسیار مطلوب در اتصال فلزات غیرهمجنس می‌باشد.

۵- مراجع

1. Taban, E., Gould, J.E., and Lippold, J.C. "Dissimilar Friction Welding of 6061-T6 Aluminum and AISI 1018 Steel: Properties and Microstructural Characterization", Materials and Design, Vol. 3, No.5 pp. 2305-2311, 2010.
2. Murr, L., Li, Y., Flores, R.D., Trillo, EA., and McClure, J.C. "Intercalation Vortices and Related Microstructural Features in the Friction Stir Welding of Dissimilar Metals", Mat Res Innovat Vol. 33, No.5, pp. 50-63, 1998.