



# جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دو فلز غیرهمجنس آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴

سلمان نوروزی<sup>۱\*</sup>، محسن شاکری<sup>۲</sup>، مصطفی حبیب‌نیا<sup>۳</sup>

۱- استادیار مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

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

\* بابل، صندوق پستی ۴۸۴، پست الکترونیکی s-nourouzi@nit.ac.ir

**چکیده-** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌های جوشکاری حالت جامد است که امروزه برای اتصال انواع مواد، به ویژه فلزات غیرهمجنس، کاربرد فراوانی یافته است. این روش نه تنها محدودیت‌های روش‌های جوشکاری ذوبی را ندارد، بلکه مزایای زیادی از جمله امکان اتصال فلزات با نقاط ذوب متفاوت را دارا می‌باشد. در این پژوهش اتصال موفقیت‌آمیز دو فلز غیرهمجنس آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ مورد مطالعه گرفت. از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال این دو فلز استفاده شد. در اتصال فلزات غیرهمجنس به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، پارامترهای زیادی همچون سرعت دورانی، سرعت خطی، افست و شکل ابزار بر خواص ریزساختاری و مکانیکی محل اتصال تاثیرگذار می‌باشد. در این تحقیق، به بررسی تاثیر سرعت دورانی، سرعت خطی و افست ابزار بر استحکام و سختی محل اتصال پرداخته شده است. همچنین، در ادامه تاثیر عملیات آنیل بر مقدار استحکام نهایی، درصد ازدیاد طول و خواص ناحیه جوش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با آنیل کردن نمونه جوشکاری‌شده، استحکام نهایی ۹ درصد و درصد ازدیاد طول به دو برابر افزایش یافته است.

**کلیدواژگان:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، فلزات غیرهمجنس، آنیل، ناحیه جوش

## Frictions stir welding of dissimilar metal Al 5050 Aluminum alloy to AISI304 stainless steel

S. Nourouzi<sup>1\*</sup>, M. Shakeri<sup>2</sup>, M. Habibnia<sup>3</sup>

1- Assis. Prof., Materials Eng., Babol Univ. of Tech., Babol, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Babol Univ. of Technology, Babol, Iran

2- MSc. Student, Mech. Eng., Babol Univ. of Tech., Babol, Iran

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

**Abstract-** Friction Stir Welding (FSW) is a solid state welding method. Now, for joining the variety of materials, especially dissimilar metals, has many applications. This method has no restrictions on the fusion welding. In addition to its many advantages, including the joining of metals with different melting points. In this paper, a successfully joint between Al5050Aluminum alloys to AISI304 stainless steel was reported. Friction Stir Welding (FSW) process was used for joining these dissimilar materials. In friction stir welding many parameters such as tool rotational speed, feedrate, offset and pin profile were effective on microstructure and mechanical properties of weld nugget by. This paper is focused on the effect of tool rotational speed, feedrate and offset on tensile strength and micro-hardness. In addition, effect of annealing operations was investigated on microstructure and mechanical properties of the weld nugget. The elongation and tensile strength of the weld nugget were increased 100 and 9 percent respectively by the annealing process.

**Keywords:** FSW, Dissimilar Metal, Annealing, Weld Nugget

## ۱- مقدمه

اتصال فلزات غیرهمجنس یک ایده جالب و موثر در صنعت می‌باشد. هدف از اتصال فلزات غیرهمجنس، ترکیب خواص دو فلز برای افزایش کارایی و بازدهی قطعات تولیدی می‌باشد. همچنین این عمل مقاومت به سایش، خوردگی و استحکام ویژه بالا از یک فلز و قابلیت هدایت حرارتی، مقاومت به خوردگی و وزن کم از فلز دیگر را به دنبال دارد [۱]. آلیاژ آلومینیم دارای وزن کم، استحکام ویژه بالا و هدایت حرارتی خوب می‌باشد [۲]. فولاد زنگ‌نزن آستنیتی دارای استحکام بالا و مقاومت به خوردگی خوب می‌باشد [۳]. اتصال این دو فلز می‌تواند کاربرد وسیعی در بسیاری از صنایع داشته باشد، زیرا باعث کاهش وزن ماشین‌آلات تولیدی می‌شود، که این امر به نوبه خود موجب افزایش بازدهی و کاهش مصرف سوخت می‌شود [۴].

اتصال این دو فلز غیرهمجنس با استفاده از روش‌های متداول ذوبی، به دلیل اختلاف زیاد در خواص حرارتی آن‌ها، دشوار می‌باشد و جوش حاصل از این روش‌ها، به دلیل ایجاد ساختارهای بین‌فلزی، دارای شکنندگی بالایی می‌باشد [۵]. فرآیندهای حالت جامد روش مناسبی برای اتصال این گونه فلزات می‌باشند. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از فرآیندهای حالت جامدی است که می‌تواند برای اتصال فلزات غیرهمجنس به‌خصوص با خواص حرارتی متفاوت به کار رود.

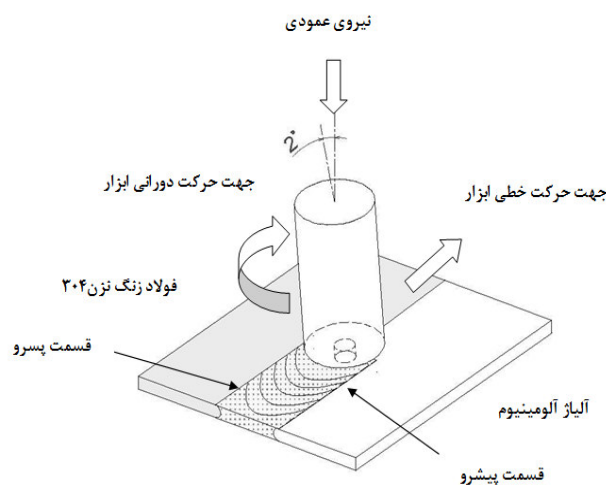
در مورد اتصال فلزات غیرهمجنس به وسیله این روش تحقیقات زیادی نظیر اتصال آلیاژ آلومینیم به مس، آلیاژهای مختلف آلومینیم مانند ۲۰۲۴ به ۶۰۱۳ را می‌توان نام برد [۶، ۷]. در مورد اتصال آلیاژ آلومینیم به فولاد نیز برای اولین بار واتاناب و همکاران در سال ۲۰۰۳ اتصال آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ را به فولاد کربنی SS400 با ضخامت ۲ میلی‌متر گزارش کردند [۸]. شننیز روی اتصال فولاد ۱۰۱۸ به آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ مطالعاتی انجام داد [۹]. تاناکا و همکاران روی خواص جوش آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ به فولاد در سال ۲۰۰۹ مطالعه انجام داده‌اند [۵]. نوروزی و همکاران در سال ۲۰۱۲ بر روی خواص اتصال آلیاژ آلومینیم ۱۱۰۰ به فولاد کربنی مطالعاتی انجام داده‌اند [۱۰-۱۲].

در این تحقیق، به بررسی امکان اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ به آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۰ پرداخته شده است. در ادامه تاثیر پارامترهای سرعت دورانی و خطی و افست ابزار مورد

بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر عملیات حرارتی آنیل بر ریزساختار و خواص مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- روش آزمایش

در این تحقیق، ورق‌هایی از دو ماده به ضخامت ۳mm استفاده شد. ورق آلومینیمی در قسمت پیشرو و ورق فولادی در قسمت پسرو قرار گرفت. تصویر شماتیک فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ تصویر شماتیک فرآیند جوشکاری مورد

در جدول ۱ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی هر کدام از ورق‌های آلیاژهای مورد استفاده، نشان داده شده است. ابزار مورد استفاده از جنس کاربید تنگستن بوده و نسبت به محور عمودی با زاویه انحراف ۲ درجه موقعیت‌دهی شد. شکل ابزار مخروطی و با قطر شولدر ۲۰ میلی‌متر و زاویه تفرع ۳ درجه انتخاب شد. در شکل ۲ مشخصات هندسی ابزار نشان داده شده است. در این تحقیق، در سرعت دورانی ۷۱۰rpm و سرعت خطی ۲۸mm/min به بررسی تاثیر افست ابزار در ۰، ۰/۸ و ۱/۵ mm پرداخته شده است. نحوه افست‌دادن به ابزار در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه افست ۱/۵ میلی‌متر نتیجه مطلوب‌تری را در آزمایش‌های اولیه دارا بوده است، در افست ۱/۵ میلی‌متر و سرعت دورانی ۵۰۰ rpm تاثیر پارامتر سرعت خطی در سرعت‌های ۴۰، ۵۶ و ۸۰mm/min مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه تاثیر عملیات حرارتی آنیل بر

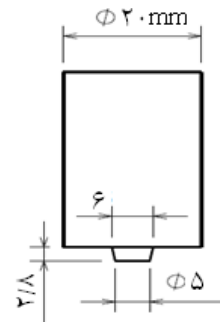
## ۳- نتایج

## ۳-۱- کیفیت ظاهری اتصال

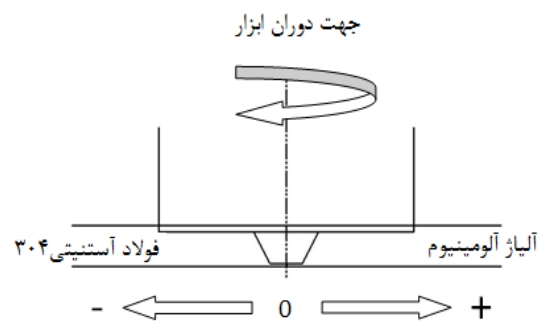
همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با کاهش مقدار افست ذرات فولاد بزرگتر و به صورت پیوسته در ناحیه اغتشاش مشاهده می‌شوند. در افست صفر یک لایه پیوسته از فولاد در ناحیه اغتشاش بوجود آمده است، در محل این لایه پیوسته، ترک‌ها نمایان می‌باشند. در افست  $0/8\text{mm}$  ذرات فولاد هنوز بزرگ و پیوسته بوده و به همین دلیل عیوبی در کنار این ذرات پیوسته بوجود آمده است. در افست  $1/5\text{mm}$  عیب ظاهری مشاهده نشده است. ولی همانطور که از این شکل مشخص می‌باشد، مقدار حرارت تولیدی در این سرعت دورانی زیاد بوده و باعث ذوب آلیاژ آلومینیم شده است.

با توجه به اینکه در آزمایش‌های قبل افست  $1/5\text{mm}$  نتیجه بهتری نسبت به سایر افست‌های اعمالی از نظر شکل ظاهری، عیب و استحکام کششی حاصل شد، از این افست برای بررسی پارامترهای دیگر جوشکاری استفاده شده است. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در افست  $1/5\text{mm}$ ، سرعت دورانی  $710\text{rpm}$  و سرعت خطی  $28\text{mm/min}$ ، مقدار حرارت تولیدشده زیاد بوده و باعث ذوب آلیاژ آلومینیم شده است. برای برطرف شدن این عیب، سرعت دورانی را کاهش داده و همچنین سرعت‌های خطی مختلف نیز بررسی شده است. به طوری که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش سرعت خطی، کیفیت ظاهری جوش بهتر شده است.

خواص ریزساختاری و مکانیکی نمونه جوشکاری شده مورد بررسی قرار گرفت. عملیات آنیل کردن نمونه‌ها در دمای  $350^\circ\text{C}$  و به مدت  $60\text{min}$  انجام شد. برای بررسی خواص مکانیکی از آزمایش‌های میکروسختی و کشش و برای مطالعه خواص ریزساختاری از میکروسکوپ نوری، الکترونی و پراش اشعه X استفاده شده است.



شکل ۲ هندسه ابزار مورد



شکل ۳ نحوه افست ابزار

جدول ۱ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ورق‌های آلیاژهای مورد استفاده

ترکیب شیمیایی (wt %)									
Ti	Mn	Si	Mg	Cu	Zn	Ni	Cr	V	Al
0/018	0/224	0/129	1/72	0/043	<0/008	<0/005	0/01	0/01	97/6
خواص مکانیکی									
تنش نهایی (MPa)			تنش تسلیم (MPa)			درصد ازدیاد طول (%)		سختی (Hv)	
210			117			25		61	
ترکیب شیمیایی (wt %)									
Cu	AL	Cr	Ni	Mn	Si	P	Fe		
0/264	0/019	19/05	11/8	1/34	0/367	0/038	70/3		
خواص مکانیکی									
تنش نهایی (MPa)			تنش تسلیم (MPa)			درصد ازدیاد طول (%)		سختی (Hv)	
628			265			55		227	

آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۰

فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

ظواهر اتصال	افست ابزار (mm)	سرعت دورانی ابزار (rpm)	سرعت خطی (mm/min)
۴-الف	۱/۵	۷۱۰	۲۸
۴-ب	۰/۸		
۴-ج	۰		

شکل ۴ تاثیر افست ابزار بر کیفیت ظاهری جوش

ظواهر اتصال	سرعت خطی (mm/min)	سرعت دورانی ابزار (rpm)	افست ابزار (mm)
۵-الف	۴۰	۵۰۰	۱/۵
۵-ب	۵۶		
۵-ج	۸۰		

شکل ۵ تاثیر سرعت خطی ابزار بر کیفیت ظاهری جوش

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 بزرگ بوده و این ذرات جدا شده در ناحیه اغتشاش قرار می‌گیرند. به دلیل بزرگ بودن این ذرات، عیوبی در ناحیه اغتشاش به وجود می‌آید. همان‌طور که در شکل ۶-ب نشان داده شده است، در کنار این ذرات حفره‌هایی دیده می‌شود. در افست  $1.5\text{ mm}$ ، قسمت بیشتر ابزار مخروطی در ناحیه آلیاژ آلومینیم قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۶-ج مشاهده می‌شود، 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.

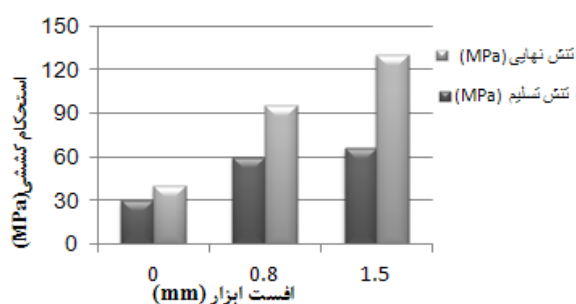
در سرعت خطی  $40\text{ mm/min}$  در ناحیه آلیاژ آلومینیم ذوب شدگی این فلز مشاهده می‌شود، ولی با افزایش سرعت خطی سطح جوش دارای کیفیت بهتری شده است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش حرارت ورودی در واحد طول مربوط دانست.

### ۳-۲- ریزساختار ناحیه جوش

شکل ۶ تصاویر مقاطع برش‌خورده ناحیه اتصال تهیه شده به وسیله میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶-الف نشان داده شده است، 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

مقطع برش خورده اتصال	افست ابزار (mm)	سرعت دورانی ابزار (rpm)	سرعت خطی (mm/min)
الف-۶	۰	۷۱۰	۲۸
ب-۶	۰/۸	۷۱۰	۲۸
ج-۶	۱/۵	۷۱۰	۲۸

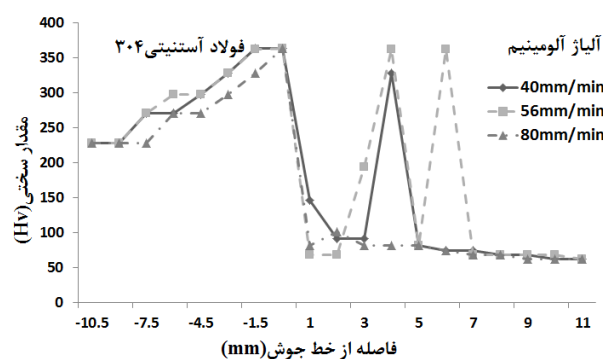
شکل ۶ نمای برش خورده مقطع اتصال در افست‌های مختلف



شکل ۸ تاثیر افست ابزار بر مقدار استحکام کششی

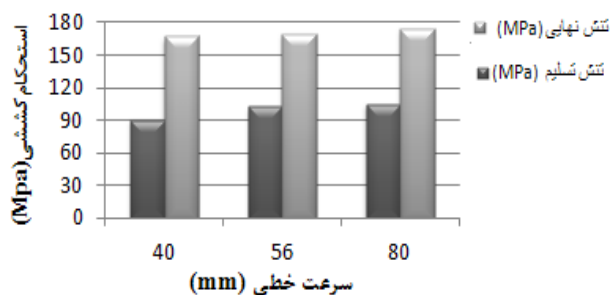
### ۳-۳- سختی

تغییرات مقدار سختی با سرعت‌های خطی مختلف ابزار با فاصله از مرکز جوش در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت خطی، مقدار سختی در ناحیه فولاد کاهش یافته است. در ناحیه آلیاژ آلومینیم، با کاهش سرعت خطی، مقدار سختی افزایش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به ریزدانه شدن بیشتر آلیاژ آلومینیم نسبت داد. همچنین، مقدار سختی در ناحیه اغتشاش، به دلیل وجود ذرات فولاد، دارای نوسان می‌باشد.



شکل ۷ تاثیر سرعت‌های خطی مختلف در مقدار سختی

در شکل ۹ نتایج آزمون کشش در سرعت‌های خطی مختلف در افست ۱/۵ mm نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت خطی مقدار استحکام کششی افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش سرعت خطی از ۴۰ mm/min به ۸۰ mm/min مقدار استحکام از ۱۶۷ به ۱۷۵ MPa تغییر کرده است.



شکل ۹ تاثیر سرعت خطی ابزار بر مقدار استحکام

### ۴-۳- استحکام کششی

در شکل ۸، نتایج حاصل از آزمون کشش در افست‌های مختلف نشان داده شده است. مقدار استحکام کششی در افست صفر و ۰/۸ میلی‌متر، به دلیل وجود عیوبی همچون ترک و حفره در ناحیه اغتشاش، افت کرده است و همین ناحیه، محل شکست نمونه‌ها بوده است.

عملیات حرارتی	شکل نمونه تست	نوع شکست
آنیل شده		نرم
بدون عملیات حرارتی		ترد

شکل ۱۱ تاثیر عملیات حرارتی بر ناحیه وقوع شکست

بنابراین، تاثیر توام انتخاب پارامترهای مطلوب در جوشکاری و عملیات حرارتی این ناحیه عیوب زیادی نداشته و استحکام این ناحیه برابر با  $198\text{MPa}$  می‌باشد که معادل با ۹۴ درصد استحکام فلز پایه است.

### ۳-۵- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

از سطح مقطع شکست نمونه آنیل شده و بدون عملیات حرارتی در بزرگ‌نمایی‌های مختلف تصویر SEM تهیه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، در مرکز مقطع شکست نمونه بدون عملیات آنیل حفره‌های زیادی دیده می‌شود که این نشان از وقوع شکست نرم در آن می‌باشد. در قسمت انتهایی جوش، با توجه به شکل، صفحات صاف دیده می‌شود که حاکی از شکست ترد است. بنابراین در نمونه بدون عملیات حرارتی شکست نرم و ترد تواما اتفاق می‌افتد، در حالی که در نمونه آنیل شده (شکل ۱۳) در تمام مقطع شکست حفره مشاهده می‌شود که نشان از شکست نرم می‌باشد. کوچک و ریزبودن این حفره‌ها و مقدار بالای آن‌ها حاکی از یکنواختی ریزساختاری بوده که دلیلی برای افزایش درصد ازدیاد طول نیز می‌باشد.

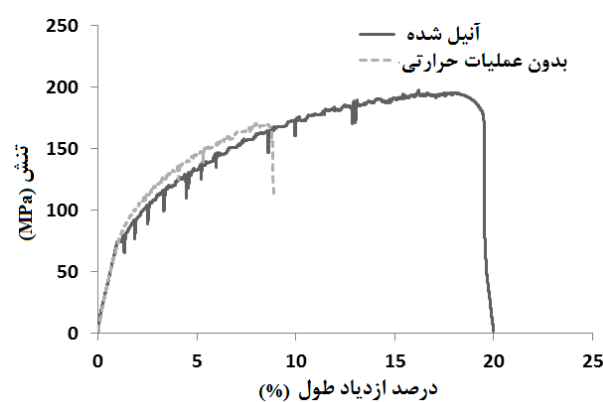
### ۳-۶- طیف‌سنج پراش اشعه ایکس XRD

در شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع جوش نشان داده شده است. همان‌طور که شکل دیده می‌شود، در ناحیه مرزی اتصال دو فلز، ترکیبات بین فلزی نازکی 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 ترک‌خوردگی در شکل دیده نمی‌شود.

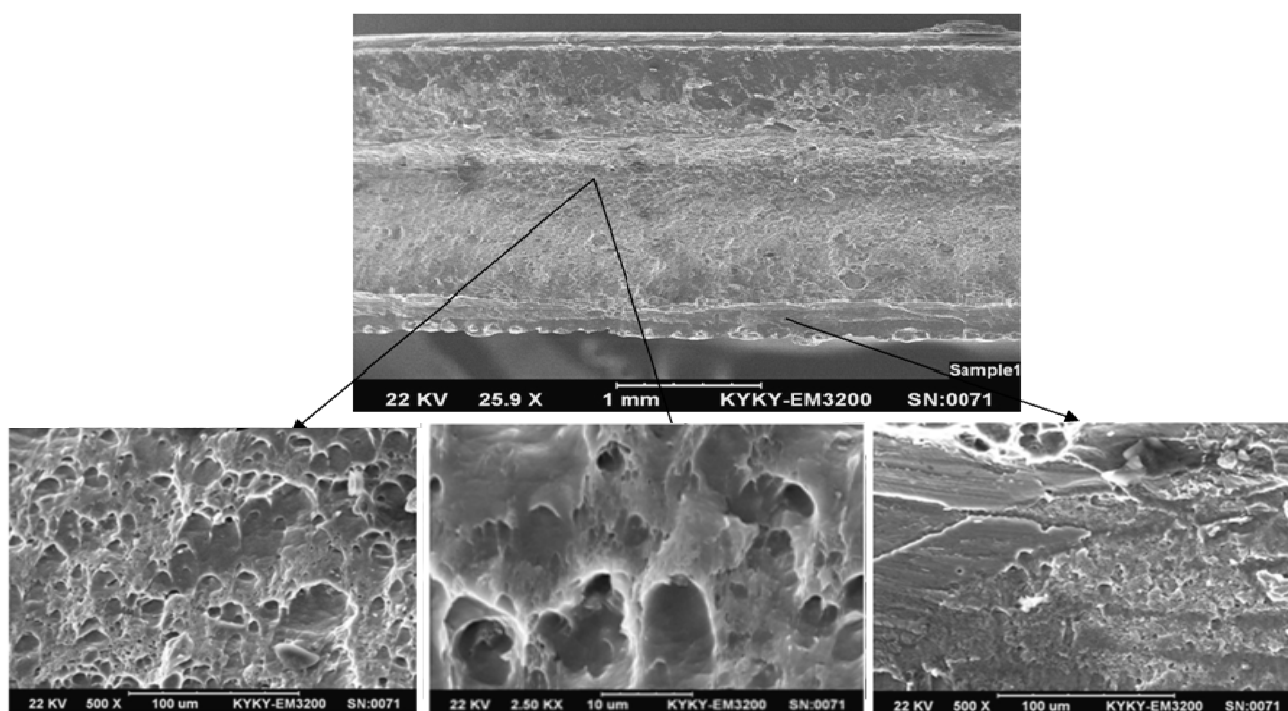
بیشترین استحکام کششی در افست  $1/5\text{mm}$  و سرعت دورانی  $500\text{ rpm}$  و سرعت خطی  $80\text{mm/min}$  در این آزمایش‌ها به دست آمده که برابر با  $175\text{ MPa}$  است.

آلیاژهای گروه ۵۰۰۰، به دلیل ترکیب شیمیایی‌شان، قابلیت عملیات حرارتی سخت‌شدن رسوبی را ندارند؛ لذا افزایش استحکام این گروه تنها به وسیله کارسختی ممکن می‌باشد. تنها عملیات حرارتی که می‌توان روی این گروه انجام داد آنیل کردن می‌باشد. برای این نمونه تاثیر عملیات آنیل بر استحکام آن بررسی شده است. در نمودار تنش-درصد ازدیاد طول دو نمونه با آنیل و بدون عملیات حرارتی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

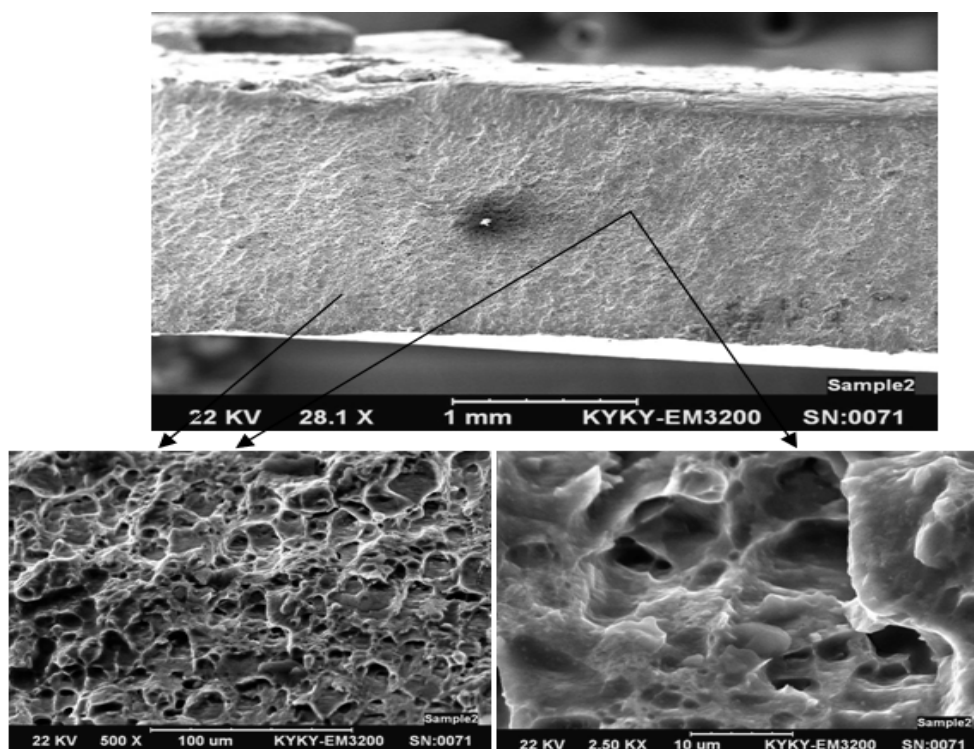
در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به دلیل جابه‌جایی مواد به وسیله ابزار جوشکاری، به هم ریختن ساختاری و مرز دانه‌ها در ناحیه اغتشاش حادث می‌شود. همچنین، به دلیل اینکه نمونه جوش در تماس با هوا بوده و به سرعت سرد می‌شود، فرصت کافی برای برطرف کردن این عیوب وجود ندارد. این عامل دلیل اصلی کاهش استحکام در ناحیه اغتشاش بوده و به دنبال آن شکست نمونه‌ها در این ناحیه وقوع می‌پیوندد. با آنیل نمونه جوش، زمان لازم برای نفوذ و جابه‌جایی اتم‌ها فراهم می‌شود. لذا ضمن اینکه عیوب موجود در دانه‌بندی ناحیه اغتشاش برطرف می‌شود، تنش‌های باقی‌مانده نیز حذف می‌شود و این امر باعث می‌شود که مقدار ازدیاد طول نمونه اتصال افزایش یابد. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، شکست کمی به ناحیه ضعیف مجاور اتصال یعنی ناحیه HAZ انتقال یافت.



شکل ۱۰ تاثیر عملیات حرارتی اتصال بر مقدار استحکام کششی و درصد ازدیاد طول



شکل ۱۲ سطح مقطع شکست نمونه بدون عملیات آنیل در بزرگ‌نمایی‌های مختلف با شرایط جوشکاری: سرعت دورانی ۵۰۰ rpm و سرعت خطی ۸۰mm/min



شکل ۱۳ سطح مقطع شکست نمونه آنیل شده در بزرگ‌نمایی‌های مختلف با شرایط جوشکاری: دمای ۳۵۰°C و زمان ۶۰ min

## ۴- نتایج

در این تحقیق، اتصال دو فلز غیرهمجنس آلیاژ آلومینیم ۵۰۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ به وسیله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد مطالعه قرار گرفته است. تاثیر برخی پارامترهای این تکنیک جوشکاری در اتصال فلزات غیرهمجنس نیز بررسی شده و نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

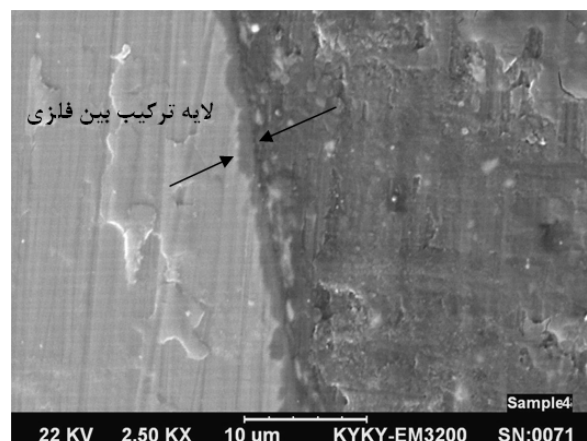
۱- افست ابزار نقش تعیین‌کننده‌ای در خواص مکانیکی ناحیه اتصال دارد. به طوری که با افزایش افست ابزار تا ۱/۵mm استحکام جوش از ۴۰ به ۱۳۰MPa افزایش یافته است.

۲- سرعت خطی تاثیر قوی روی استحکام کششی اتصال نداشت، به طوری که با افزایش مقدار آن از ۴۰ به ۸۰mm/min استحکام کششی از ۱۶۰ به ۱۷۵MPa افزایش یافت.

۳- با انتخاب سرعت دورانی ۵۰۰rpm، افست ۱/۵mm، سرعت خطی ۸۰mm/min و شرایط مطلوب حاصل شده است.

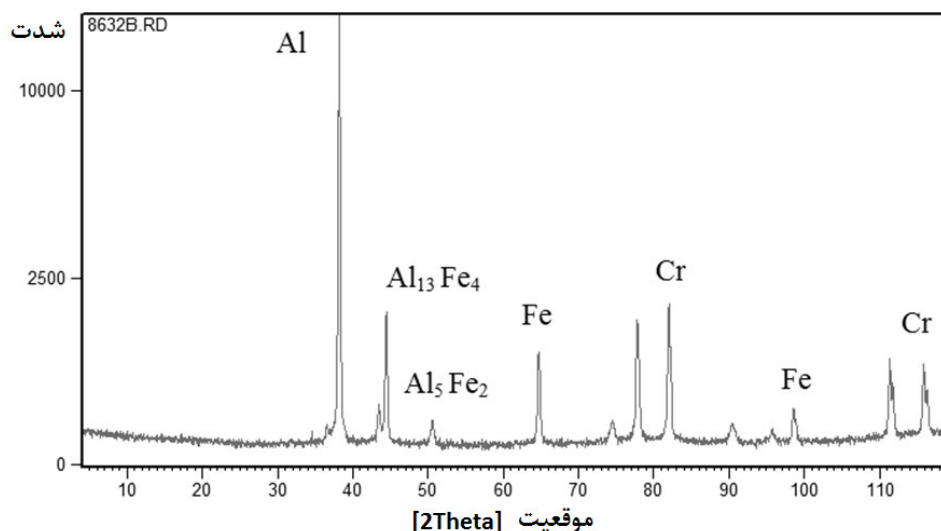
۴- مقدار سختی، با افزایش سرعت خطی، کاهش یافته است.

۵- با عملیات آنیل روی نمونه جوشکاری‌شده، مقدار استحکام به میزان ۹ درصد و ازدیاد طول به دو برابر افزایش یافته است.



شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع جوش

برای بررسی فازهای موجود در ناحیه اتصال، از آنالیز XRD استفاده شده است. زاویه پراش اشعه X از صفر تا ۱۲۰ درجه می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، فازهای بین‌فلزی به‌وجود آمده در حین فرآیند شامل  $Al_{13}Fe_4$  و  $Al_5Fe_2$  می‌باشد و ترکیب بین‌فلزی دیگری مشاهده نشده است.



شکل ۱۵ فازهای تشکیل شده در ناحیه اتصال حاصل از آنالیز XRD

Characterization”, *Materials and Design*, Vol. 31, 2010, pp. 2305-2311.

- [2] Zhou C., Yang X., 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, 2006, pp.155-160.

## ۵- مراجع

- [1] Taban E., Gould J. E., Lippold J. C., “Dissimilar Friction Welding of 6061-T6 Aluminum and AISI 1018 Steel: Properties and Microstructural



- [8] Watanabe T., Takawama H., Kimapong K., Hotta N., "Joining of Steel to Aluminum Alloy by Interface-Activated Adhesion Welding", *Materials Science Forum*, Vols. 426-432, 2003, pp. 4129-4134.
- [9] Chen C. M., Kovacevic R., Joining of Al 6061 Alloy to AISI 1018 Steel by Combined Effects of Fusion and Solid State Welding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, 2004, pp. 1205-1214.
- [10] Habibnia M., Shakeri M., Nourouzi S., 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, 2012, pp. 741-746.
- [11] Karimi N., Nourouzi S., Shakeri M., Habibnia M., Dehghani A. "Effect of Tool Material and Offset on Friction Stir Welding of Al Alloy to Carbon Steel", *Advanced Materials Research*, Vol. 445, 2012, pp. 747-752.
- [12] Karimi N., Shakeri M., Habibnia M., Nourouzi S., "Joining of 1100 Al Alloy to AISI 1045 Carbon Steel by Friction Stir Welding", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 152-154, 2012, pp. 418-423.
- [3] Ue H., Dalle D. C., Argagnotto A., Ghidini T., Gambaro C., "Friction Stir Welding of Dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 Stainless Steel", *Materials and Design*, Vol. 26, 2005, pp. 41-46.
- [4] Dong H., Hu W., Duan Y., Wang X., Dong C., "Dissimilar Metal Joining of Aluminum Alloy to Galvanized Steel with Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu and Zn-Al Filler Wires", *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, PROTEC-13255.
- [5] Tanaka T., Morishige T., Hirata T., "Comprehensive Analysis of Joint Strength for Dissimilar Friction Stir Welds of Mild Steel to Aluminum Alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 61, 2009, pp. 756-759.
- [6] Murr L. E., Li Y., Flores R. D., Trillo E. A., McClure J. C., "Intercalation Vortices and Related Microstructural Features in the Friction Stir Welding of Dissimilar Metals", *Mat Res Innovat*, Vol. 2, 1998, pp. 150-163.
- [7] Dalle Donne C., Raimbeaux G. "Residual Stress Effects on Fatigue Crack Propagation in Friction Stir Welds", *International Conference on Fracture ICF 10*, Hawaii, USA, Elsevier, NL, Cd-rom, December 2001.