



## Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Friction Welded Martensitic Stainless Steel 410 to Austenitic Stainless Steel 304

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Vaezi A.A.<sup>1</sup> MSc,  
Jafari H.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Vaezi A.A, Jafari H. Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Friction Welded Martensitic Stainless Steel 410 to Austenitic Stainless Steel 304. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(2):439-445.

<sup>1</sup>Materials Engineering-Industrial Metallurgy Department, Materials Engineering & New Technologies Faculty, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Materials Engineering & New Technologies Faculty, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran  
Phone: +98 (21) 22970022  
Fax: +98 (21) 22970022  
hjafari@sru.ac.ir

#### Article History

Received: September 02, 2018  
Accepted: October 23, 2018  
ePublished: February 01, 2019

### ABSTRACT

With regard to the industry demand for welding dissimilar metals, which are not possible to be welded by conventional welding, friction welding process can be a proper approach. In this study, friction welding of two stainless steels, martensitic 410 to austenitic 304, with variable parameters of friction time (40, 50, and 40 s), friction force (90, 100, and 120 kN), and forging force (130, 150, and 180 kN), under the constant rotating speed (850 RPM) and forge time (60 s) was investigated. Microscopic characterization using optical and scanning electron microscopes, and elemental analysis using energy dispersive X-ray spectroscopy were carried out on the welds. Soundness of the weld joints was evaluated, using tensile and microhardness tests. Fracture surfaces of the tensile specimens were examined as well. The structure of the welded samples composed of acicular and rough martensite and elongated grains adjacent to 410 and 304 stainless steels, respectively. Tempering heat treatment locally caused converting rough martensite to lath martensite. The results showed that the tensile strength of the samples was in the range of 400-520 MPa, and the fractography revealed the occurrence of a brittle fracture. Microhardness measurement revealed that the highest hardness value was obtained in 410 stainless steel, at the heat-affected zone close to the interface. An appropriate friction weld joint with a tensile strength of 751 MPa was obtained after heat treatment of the weld location, and with the aid of selecting optimal parameters of 50 s friction time, 120 kN friction force, and 180 kN forging force.

**Keywords** Friction Welding; Dissimilar Joint; Stainless Steel; Microstructure; Tensile strength

### CITATION LINKS

[1] Corrosion behaviors of friction welded dissimilar aluminum alloys [2] A computationally efficient thermal modelling approach of the linear friction welding process [3] Linear friction welding process simulation of Ti-6Al-4V alloy: A heat transfer analysis of the conditioning phase [4] Evaluation of parametric significance in friction welding process of AA1100 and Zr705 alloy using finite element analysis [5] A comparison between friction stir welding, linear friction welding and rotary friction welding [6] Evaluation of mechanical and metallurgical properties of dissimilar materials by friction welding [7] Optimization of friction welding process parameters for joining carbon steel and stainless steel [8] Effect of current on characteristic for 316 stainless steel welded joint including microstructure and mechanical properties [9] Friction stir welding of austenitic stainless steel by PCBN tool and its joint analyses [10] Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels [11] Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding [12] Joining of titanium to 304L stainless steel by friction welding [13] Experimental investigation of Ti-6Al-4V titanium alloy and 304L stainless steel friction welded with copper interlayer [14] Investigation of cross sectional geometry on temperature and properties of welded area in the rotational friction welding process for Al-7075-T6 [15] Microstructural characterisation of rotary friction welded AA6082 and Ti-6Al-4V dissimilar joints [16] Effect of friction welding condition on joining phenomena and mechanical properties of friction welded joint between 6063 aluminium alloy and AISI 304 stainless steel [17] Inhomogeneous interface structure and mechanical properties of rotary friction welded TC4 titanium alloy/316L stainless steel joints [18] Microstructural characterization and mechanical properties of friction-welded IN718 and SS410 dissimilar joint [19] Effect of quenching and tempering on microstructure and mechanical properties of 410 and 410 Ni martensitic stainless steels [20] Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel [21] An investigation into joining of austenitic-stainless steels (AISI 304) with friction welding

## بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش اصطکاکی غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۳۰۴ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴

علی اکبر واعظی MSc

گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی مواد و فناوری‌های نوین، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

حسن جعفری PhD

گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی مواد و فناوری‌های نوین، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

### چکیده

با توجه به نیاز صنعت برای اتصال فلزات غیرهمجنس و عدم جوش‌پذیری آنها به هم در روش‌های معمول، فرآیند جوشکاری اصطکاکی می‌تواند کاربرد مناسبی داشته باشد. در این تحقیق جوشکاری اصطکاکی غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ به فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۳۰۴ با پارامترهای ثابت سرعت دوران (۸۵۰ دور بر دقیقه) و زمان فورج (۶۰ ثانیه) و پارامترهای متغیر زمان اصطکاک (۴۰، ۵۰ و ۶۰ ثانیه) و نیروی اصطکاک (۹۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلو نیوتن) و نیروی فورج (۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ کیلو نیوتن) بررسی شده است. مطالعات میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی و همچنین آنالیز عنصری روی جوش‌ها انجام شد. سلامتی و بی‌عیب بودن جوش‌ها توسط آزمایش کشش و میکروسختی بررسی شده و سطوح شکست هم مورد بررسی قرار گرفتند. ساختار نمونه‌ها شامل مارتنزیت‌های سوزنی و خشن در فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ و دانه‌های کشیده در فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در فصل مشترک اتصال بودند که با طراحی یک عملیات حرارتی تمپر به‌صورت موضعی، مارتنزیت‌های خشن به مارتنزیت‌های لایه‌ای تغییر پیدا کردند. نتایج نشان داد که استحکام کششی نمونه‌ها در محدوده ۵۲۰ - ۷۰۰ مگاپاسکال بود و شکست ترد مشاهده شد. نتایج سختی‌سنجی نشان داد که بالاترین سختی در فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ در منطقه متأثر از حرارت و نزدیک به فصل مشترک ایجاد می‌شود. استحکام کششی مطلوب ۷۵۱ مگاپاسکال با انتخاب پارامترهای بهینه زمان اصطکاک ۵۰ ثانیه، نیروی اصطکاک ۱۲۰ کیلو نیوتن و نیروی فورج ۱۸۰ کیلو نیوتن و انجام عملیات حرارتی تمپر در موضع جوش پس از جوشکاری به دست آمد.

**کلیدواژه‌ها:** جوشکاری اصطکاکی، اتصال غیرهمجنس، فولاد زنگ‌نزن، ریزساختار، استحکام کششی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۱

\* نویسنده مسئول: hjafari@sru.ac.ir

### ۱- مقدمه

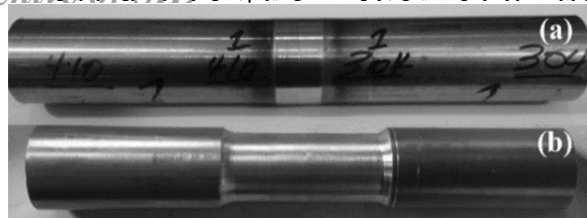
جوشکاری اصطکاکی یک روش حالت جامد بوده که براساس گرمای اصطکاک تولیدشده از حرکت بین دو مولفه تحت فشار است که در آن گرمای اصطکاک تولیدی باعث نرم شدن فصل مشترک اجزای سازنده و سرانجام یک اتصال سالم می‌شود<sup>[1]</sup>. همچنین در اثر تغییر شکل پلاستیک ایجادشده معمولاً اتصال، حاصل از یک ریزساختار ریز برخوردار است که می‌تواند خواص جوش را نسبت به ماده اصلی بهبود بخشد<sup>[2]</sup>. این روش عمدتاً برای ساخت و تعمیر اجزای پیچیده مانند دیسک‌های یکپارچه پره‌های توربین یا موتورهای هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرد. حمل‌ونقل و انرژی از جمله صنایعی هستند که علاقه روزافزونی به توسعه این فناوری به‌دلیل سرعت و صرفه اقتصادی بالا وجود دارد<sup>[3]</sup>. امروزه استفاده از مواد غیرهمجنس جوشکاری‌شده به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای صنایع مختلف اهمیت خاصی را به خود اختصاص داده و براساس گزارشات موجود، جوش اصطکاکی نقش خود را به‌عنوان یک فناوری مناسب در جوشکاری فلزات متفاوت ثابت کرده است<sup>[4]</sup>. این ادعا را می‌توان به‌دلیل عدم تشکیل حوضچه مذاب و در نتیجه

عدم شکل‌گرفتن عیوبی نظیر ایجاد ترک، تخلخل و زگرگاسیون حین انجماد نسبت داد<sup>[5]</sup>. اتصال فلزات غیرهمجنس برای ترکیب خواص مختلف است که به‌منظور کاهش هزینه‌های مواد و افزایش کارایی تجهیزات و ماشین‌آلات مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه روش‌های مختلفی برای اتصال فلزات غیرهمجنس به کار برده می‌شود که شامل جوشکاری‌های ذوبی، انفجاری، فشاری، اصطکاکی و نفوذی و همچنین لحیم‌کاری نرم و سخت است<sup>[6]</sup>.

فولادهای زنگ‌نزن، گروه وسیع و گسترده‌ای از آلیاژهای ویژه هستند که بیشتر برای مقاومت در برابر خوردگی توسعه یافته‌اند. از جمله دیگر ویژگی‌های این فولادها می‌توان به شکل‌پذیری عالی، چقرمگی زیاد در دماهای اتاق و پایین و مقاومت خوب در برابر پوسته شدن، اکسایش و خزش در دمای بالا اشاره کرد<sup>[7]</sup>. معمولاً جوشکاری ذوبی این فولادها به‌دلیل ایجاد فازهای بین‌فلزی ترد و افت خواص مکانیکی و متالورژیک امکان‌پذیر نیست<sup>[8]</sup>، ولی جوشکاری اصطکاکی، این تغییرات متالورژیک منفی را به‌همراه ندارد، چون دارای دمای پایین، زمان انجام عملیات کوتاه و سرعت سرد شدن سریع است.

تحقیقات متعددی به‌منظور توسعه اتصال فلزات همجنس و غیرهمجنس به روش جوشکاری اصطکاکی انجام شده است. تلاش *ساتیانارایانا* و همکاران<sup>[10]</sup>، بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی، ارتباط بین ریزساختار و خواص مکانیکی و رفتار شکست اتصال جوش بین دو فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فریتی بود. *ساحین*<sup>[11]</sup> ویژگی‌های ریزساختار و استحکام جوش اتصالات قطعات همجنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ حاصل از جوش اصطکاکی را مورد بررسی قرار داد. *دی* و همکاران<sup>[12]</sup> اتصال تیتانیوم به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴L را مورد تحقیق قرار دادند. *پاونتان* و همکاران<sup>[7]</sup> برخی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی نظیر فشار اصطکاک، فشار فورج، زمان اصطکاک و زمان فورج را برای اتصال فولاد کربنی به فولاد زنگ‌نزن بررسی کردند که تاثیر زیادی در استحکام جوش دارند. *کومار* و *بالاسوبرامانیان*<sup>[13]</sup> در مورد اتصال تیتانیوم به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴L با لایه میانی مس به تحقیق و بررسی پرداختند. *ظهور* و *سیدامیرخانی*<sup>[14]</sup> تاثیر هندسه سطح مقطع را بر خواص جوش اصطکاکی قطعات آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ مورد تحلیل قرار دادند. *میسنار* و همکاران<sup>[15]</sup>، فصل مشترک و ریزساختار جوش غیرهمجنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به آلیاژ آلومینیم ۶۰۸۲ را به‌منظور کاربردهای فضایی مورد مطالعه قرار دادند. *کیمورا* و همکاران<sup>[16]</sup>، تاثیر شرایط جوش اصطکاکی را بر نحوه اتصال، استحکام کششی و انعطاف‌پذیری خمشی جوش آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ بررسی کردند. *لی* و همکاران<sup>[17]</sup>، ساختار ناهمگون و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ تیتانیوم TC4 به فولاد زنگ‌نزن 316L را قبل و بعد از عملیات حرارتی تمپر مورد بررسی قرار دادند. *آنیتا* و همکاران<sup>[18]</sup> تاثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی را بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال جوش بین آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ مورد بررسی قرار دادند.

با مروری بر تحقیقات گذشته می‌توان دریافت که اتصالات غیرهمجنس متفاوتی مورد مطالعه قرار گرفته، ولی هیچ‌گونه گزارشی در خصوص اتصال فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی به روش جوشکاری اصطکاکی گزارش نشده است. اهمیت این پژوهش، استفاده از این قطعه در صنایع هوایی و مشخصاً در قطعات قسمت کنترل سوخت هواپیما بوده که خواص دو فلز در کنار هم مورد نیاز است. در این مقاله، با توجه به



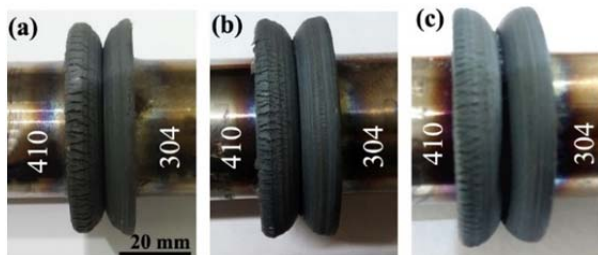
شکل ۲) نمونه جوشکاری شده بعد از پلیسه‌گیری و نمونه آزمایش کشش

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ظاهر جوش

شکل ۳، ظاهر جوش‌های ایجاد شده به همراه یک زایده در فصل مشترک هر یک را که از ویژگی‌های روش جوشکاری اصطکاکی است، برای سه نمونه ۱، ۳ و ۵ با نیروهای فورج به ترتیب ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ کیلو نیوتن با زمان اصطکاک ثابت نشان می‌دهد. این زایده‌ها ناشی از تغییر شکل پلاستیک و سیلان دو فلز در اثر تولید حرارت کافی در محل اتصال است. بررسی چشمی نمونه‌ها نشان می‌دهد که تقریباً در تمامی نمونه‌ها جوش‌ها دارای ظاهر یکنواختی هستند، با این تفاوت که با نیروی فورج بیشتر، میزان فلش ایجاد شده نیز بیشتر است. همچنین میزان فلش در فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به دلیل استحکام کششی کمتر (۷۴۳ مگاپاسکال) نسبت به فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ (۸۲۵ مگاپاسکال) بیشتر است.

هدف از اعمال نیروی فورج، فراهم‌سازی اصطکاک به منظور تولید حرارت کافی برای نفوذ دو ماده در هم است. برای حصول پیوند کامل فصل مشترک اتصال جوش، نیاز به نیروی اصطکاک مناسب است تا به دمای مطلوب و تغییر شکل پلاستیک شدید رسید که برای انتقال مواد به محدوده جوش ضروری است. افزایش نیروی فورج که منجر به افزایش نیروی اصطکاک می‌شود، موجب افزایش تولید گرمای ورودی به جوش و تغییر شکل پلاستیک بیشتر در فصل مشترک می‌شود.



شکل ۳) نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن پس از انجام جوشکاری؛ (a) نمونه ۱، (b) نمونه ۳، (c) نمونه ۵

#### ۳-۲- مشاهدات ریزساختار

تصاویر میکروسکوپ نوری در شکل ۴، ریزساختار فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴ و ۴۱۰ مورد استفاده در تحقیق حاضر را به نمایش گذاشته‌اند. شکل ۴- a نشان می‌دهد که ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ شامل دانه‌های چندضلعی آستنیت با دوقلوهای آنیل در داخل بعضی از دانه‌ها است که از مشخصه این نوع فولاد است. شکل ۴- b نیز ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ را نمایش می‌دهد که متشکل از تیغه‌های مارتنزیت است.

شکل ۵ به عنوان نمونه، تصاویر فصل مشترک اتصال فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴ و ۴۱۰ ایجاد شده را در نمونه ۳ نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود هیچ عیب قابل مشاهده‌ای در فصل مشترک وجود ندارد. دانه‌های آستنیت، در اثر فشار ایجاد شده بین دو فلز حین

نیاز صنعت و بدیع بودن پژوهش، به بررسی و امکان‌پذیری اتصال فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۱۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ و اثر پارامترهای مختلف جوشکاری اصطکاکی و تاثیر عملیات حرارتی تمپر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۱۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ پرداخته شده است.

### ۲- روش انجام آزمایش

مواد مورد استفاده برای انجام آزمایش، میله‌هایی به قطر ۳۵ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر از جنس فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۱۰ و آستنیتی ۳۰۴ بود که ترکیب شیمیایی آنها در جدول ۱ آورده شده است. ابتدا سطح نمونه‌ها به روش ماشین‌کاری صاف شدند و عملیات اتصال با استفاده از یک دستگاه جوشکاری اصطکاکی پیوسته با پارامترهای جوشکاری مندرج در جدول ۲ انجام شد. سپس نمونه‌های جوشکاری شده تحت عملیات حرارتی تمپر به روش القایی با توان ۱۰ کیلووات در دمای حدود ۴۰۰°C و برای مدت ۱۰۰ ثانیه قرار گرفتند. برای مطالعه ویژگی‌های ریزساختاری اتصالات انجام شده، سطح مقطع آنها عمود بر جوش، برش داده و سطوح مشخص شده با کاغذ سمباده و پولیش کردن به روش متالوگرافی استاندارد، آماده و سپس با محلول HNO<sub>3</sub> ۱۰CC + HCl + ۳۰CC H<sub>2</sub>O اچ شد و در نهایت با میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی و همچنین طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس به منظور تعیین توزیع خطی عناصر در طول جوش حاصل مورد ارزیابی قرار گرفتند.

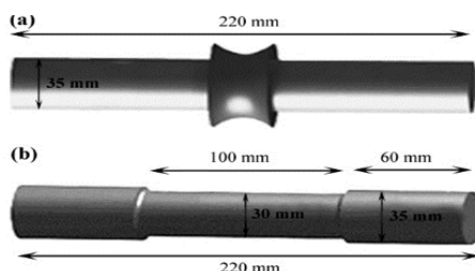
برای بررسی خواص مکانیکی اتصالات، آزمایش کشش روی نمونه‌های کشش تهیه شده از اتصالات ایجاد شده، مطابق با شکل‌های ۱ و ۲ و همچنین آزمایش سختی‌سنجی میکروسکوپی ویکرز با بار ۰/۵ کیلوگرم انجام شد. به منظور گزارش نتایج قابل اطمینان، آزمایش کشش برای سه بار و اندازه‌گیری سختی برای حداقل پنج بار انجام و متوسط اعداد حاصل ارایه شده است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴ و ۴۱۰

عنصر	فولاد زنگ‌نزن				
	کربن	نیکل	کروم	مولیبدن	منگنز
۳۰۴	۰/۰۷	۸/۶۹	۱۸/۵۷	۰/۲۶	۱/۶۲
۴۱۰	۰/۱۴	۰/۷۵	۱۲/۸	-	۰/۵۱

جدول ۲) پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در انجام تحقیق حاضر

شماره نمونه	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	اصطکاک			نیروی (کیلو نیوتن)
		زمان (ثانیه)	نیروی (کیلو نیوتن)	زمان (ثانیه)	
۱	۸۵۰	۶۰	۹۰	۶۰	۱۳۰
۲	۸۵۰	۴۰	۹۰	۶۰	۱۳۰
۳	۸۵۰	۶۰	۱۰۰	۶۰	۱۵۰
۴	۸۵۰	۴۰	۱۰۰	۶۰	۱۵۰
۵	۸۵۰	۶۰	۱۲۰	۶۰	۱۸۰
۶	۸۵۰	۴۰	۱۲۰	۶۰	۱۸۰



شکل ۴) شماتیک نمونه جوشکاری شده و نمونه آزمایش کشش

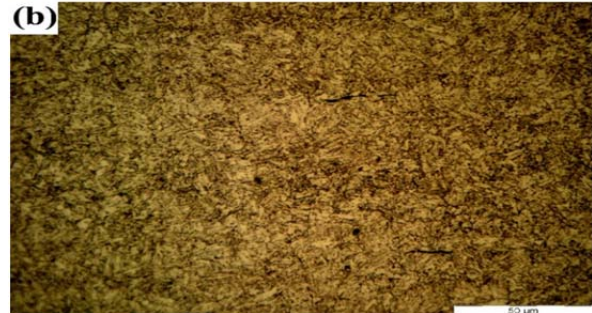
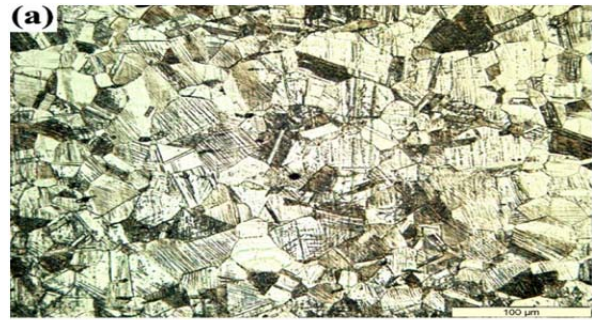
نیروی اصطکاک کافی، گرمای تولیدی در فصل مشترک افزایش می‌یابد و باعث قفل مناسب سطوح اتصال می‌شود، جایی که تغییر شکل پلاستیک زیاد رخ می‌دهد. همچنین مشاهده شده که در زمان نیروی اصطکاک کم، لایه بدون پیوند به وجود می‌آید، اما افزایش نیروی اصطکاک باعث افزایش شدت حرارت در فصل مشترک و حذف لایه غیرپیوندی می‌شود و ساختار ایده‌آلی از اتصال دوفلزی را ایجاد می‌کند [21]. همچنین گزارش شده است که با افزایش زمان نیروی اعمال فورج، دمای فصل مشترک اتصال جوش افزایش می‌یابد، در حالی که زمان کمتر اعمال نیروی فورج موجب گرمایش نامنظم در نتیجه تولید جوش ناقص می‌شود [18].

بعد از عملیات حرارتی، مارتنزیت‌های سوزنی خشن به صورت مارتنزیت‌های تمپر شده لایه‌ای تبدیل شده که در شکل ۵- b مشخص است. در مقایسه، ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به دلیل پایداری بیشتر، دچار دگرگونی فازی قابل توجهی نشده است. با این حال، به دلیل قابلیت انعطاف‌پذیری بالا، ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در اثر میزان تغییر شکل پلاستیک متفاوت در فاصله از فصل مشترک جوش، سه ناحیه مختلف مشاهده شد. ناحیه مجاور جوش یعنی جایی که شدت اصطکاک بیشترین مقدار را دارد، میزان تغییر شکل پلاستیک زیادی رخ می‌دهد و به دلیل تبلور مجدد دینامیک از دانه‌های بسیار ریز تشکیل می‌شود. در ناحیه ۲ که مجاور ناحیه ۱ است، دانه‌های ریز به‌طور جزئی و به موازات خط جوش به شکل نوارهای تغییر شکل‌یافته کشیده می‌شوند. ناحیه ۳ که مجاور کشیده شده و درشت‌تر از دانه‌های نواحی ۱ و ۲ و به موازات جهت اعمال نیرو تشکیل می‌شود.

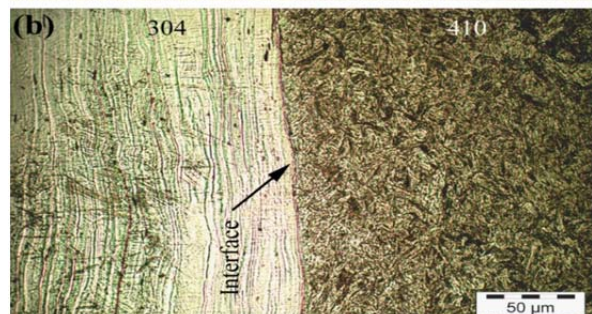
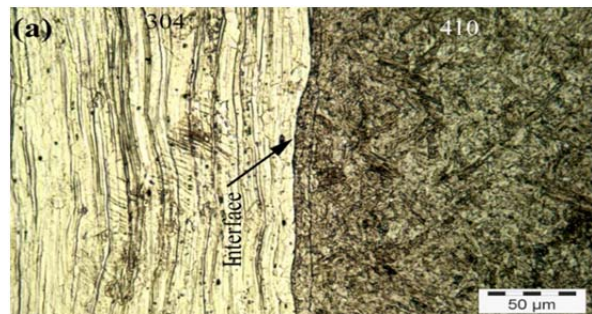
شکل ۶- a، تصویر SEM از ریزساختار جوش نمونه ۳ را قبل از عملیات حرارتی تمپر نشان می‌دهد. حضور مارتنزیت‌های خشن (در فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰) به همراه دانه‌های کشیده شده آستنیتی (در فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴) که در نزدیکی فصل مشترک اتصال بوده، به خوبی قابل مشاهده است. پس از انجام عملیات حرارتی تمپر، مارتنزیت‌های سوزنی به مارتنزیت‌های لایه‌ای تبدیل شده‌اند که در شکل ۶- b مشخص است. همچنین براساس تصاویر شکل ۶، هیچ نوع فاز بین فلزی یا کاربیدی مشاهده نمی‌شود. عدم وجود فازهای بین فلزی به دلیل دمای خیلی پایین جوشکاری اصطکاک نسبت به جوش‌های ذوبی و همچنین ماهیت و ترکیب شیمیایی دو فولاد مورد آزمایش است. ذکر مجدد این موضوع مفید به نظر می‌رسد که هیچ عیبی در فصل مشترک دیده نمی‌شود.

شکل‌های ۷ و ۸ تغییر غلظت عناصر مختلف عمود بر فصل مشترک را به ترتیب قبل و بعد از عملیات حرارتی تمپر برای نمونه ذکر شده در شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند. همان طور که در شکل ۷ مشخص است، هیچگونه کاربید و فاز بین فلزی در منطقه مشخص شده وجود ندارد و تنها به میزان کم، غلظت عناصر در قبل و بعد از فصل مشترک تغییر کرده است. غلظت نیکل در فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ به‌طور قابل توجهی زیاد شده است که این امر باعث افزایش سختی‌پذیری در فولاد می‌شود. غلظت آهن از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به سمت فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ کاهش یافته و میزان کروم در سمت فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ افزایش داشته است. تغییرات غلظت کربن نیز تقریباً یکنواخت بوده و به سمت فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ کمتر شده است که می‌تواند به دلیل نفوذ کربن در محلول جامد نیکل باشد. به نظر می‌رسد مجموعه این عوامل باعث افزایش سختی‌پذیری در منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ بوده است. بعد از عملیات حرارتی تمپر (شکل ۸)، تغییر شدید غلظت

جوشکاری به صورت ستونی و کشیده شده تبدیل شده است و اتصال را کنار مارتنزیت‌های سوزنی و خشن (سمت راست) برقرار کرده‌اند.

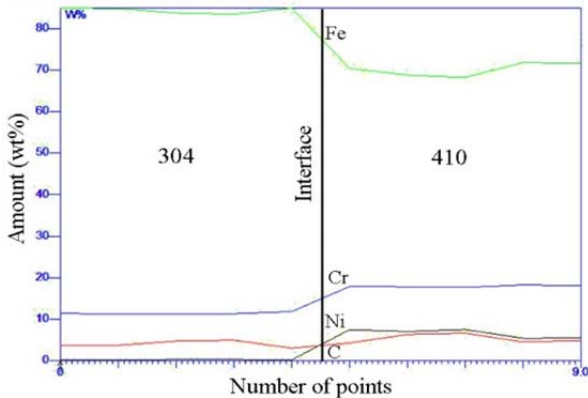
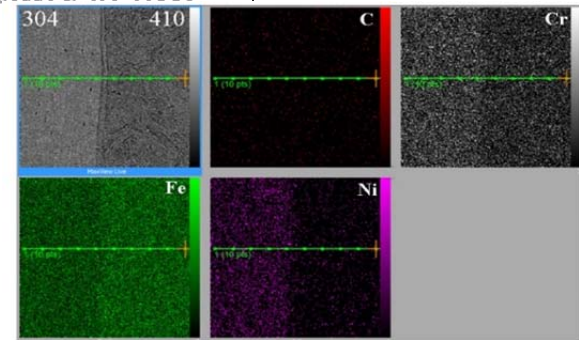


شکل ۴) تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فولادهای زنگ‌نزن اولیه ۳۰۴ و ۴۱۰ (a: ۳۰۴، b: ۴۱۰)



شکل ۵) تصاویر میکروسکوپی نوری از فصل مشترک اتصال قبل و بعد از عملیات حرارتی تمپر؛ (a) قبل از عملیات حرارتی تمپر، (b) بعد از عملیات حرارتی تمپر

قابل ذکر است با توجه به ریزساختار می‌توان دریافت که در طول فرآیند جوشکاری اصطکاک، دمای قطعه کار به بالاتر از دمای  $A_3$  که حدود  $900^{\circ}\text{C}$  بوده [19] رسیده است و بنابراین ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ به آستنیت تبدیل و متعاقب آن حین سرد شدن، ساختار حاصل به دلیل نفوذ کربن به مرز دانه‌ها و نرخ بالای سرد شدن، مجدداً به مارتنزیت تغییر شکل می‌دهد (شکل ۵- a) [20]. لازم به ذکر است با نیروی فورج بیشتر یا به عبارت دیگر

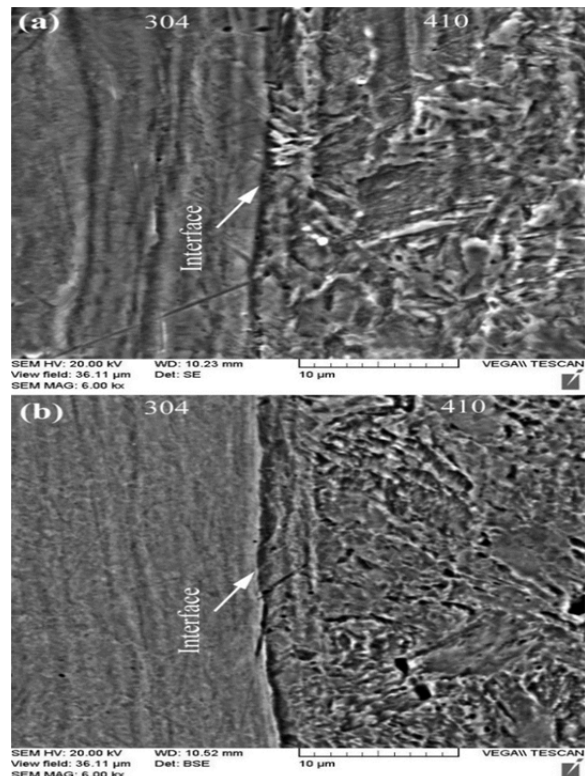


شکل ۸ توزیع درصد وزنی عناصر مختلف عمود بر فصل مشترک جوش بعد از انجام عملیات حرارتی تمپیر

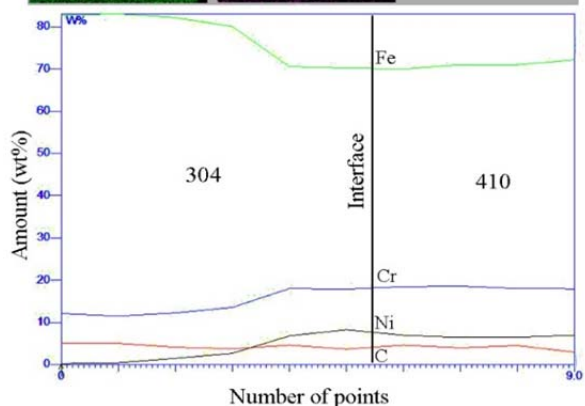
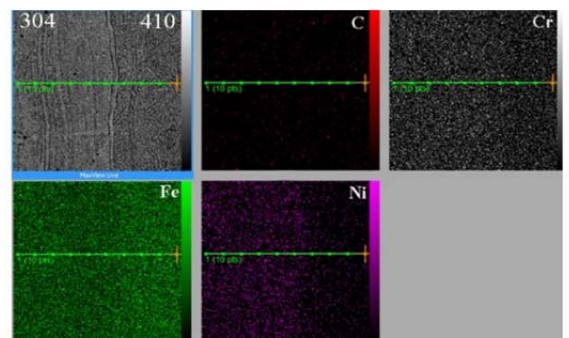
### ۳-۴- تغییرات سختی در قطعات جوشکاری شده

نمودار ۱، نتایج اندازه‌گیری ریزسختی اتصال جوش حاصل برای نمونه ۳ را قبل و بعد از عملیات حرارتی تمپیر نشان می‌دهد. خط میانی عمودی در وسط گراف‌های حاصل، مربوط به محل اتصال جوش و سمت راست و چپ این خط، مربوط به فلزهای پایه فولادهای زنگ‌نزن بوده که در نمودار نمایش داده شده است. همان طور که از گراف مربوط به ریزسختی قبل از عملیات حرارتی تمپیر مشخص است، در ناحیه نزدیک به فصل مشترک اتصال در فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰، سختی به شدت بالا رفته که این امر به دلیل نرخ زیاد سرعت سرد شدن فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰، بعد از جوشکاری و قبل از عملیات حرارتی است. همچنین دیده می‌شود که روند کاهش سختی در فاصله از خط جوش، به دلیل عدم کافی بودن سرعت سرد شدن اتفاق افتاده و به مقدار ثابتی می‌رسد که همان سختی خود فلز پایه اصلی است. به علاوه، این گراف نشان می‌دهد که در منطقه ۳۰۴ نیز رفتار مشابهی وجود دارد و سختی در مجاورت جوش به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید، نسبتاً افزایش یافته و با دور شدن از فصل مشترک، سختی به تدریج کاهش یافته و به سختی اصلی فولاد ۳۰۴، یعنی حدود ۲۴۰ ویکرز رسیده و تقریباً ثابت مانده است. این رفتار توسط /وزدمیر و همکاران نیز گزارش شده است [20]. در مقایسه، گراف مربوط به ریزسختی بعد از عملیات حرارتی تمپیر نشان می‌دهد که سختی در ناحیه نزدیک به فصل مشترک اتصال در فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ بعد از عملیات حرارتی تمپیر کاهش یافته است که قاعدتاً می‌توان به تغییر شکل ساختار مارتنزیتی سوزنی و خشن به مارتنزیت لایه‌ای نسبت داد و در نواحی دورتر میزان سختی تقریباً به معادل سختی فلز پایه رسیده است. ذکر این نکته ضروری بوده که عدم تغییر قابل توجه در سختی منطقه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، به عدم تغییر قابل ذکر در ساختار آستنیت در اثر حرارت دادن تمپیر کردن است.

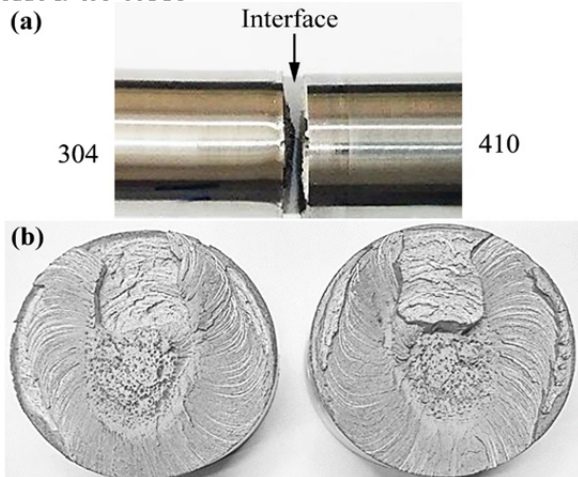
عناصر نزدیک فصل مشترک اتصال نسبت به قبل از عملیات حرارتی تمپیر رخ نداده و نفوذ قابل توجهی به دلیل دما و زمان کم عملیات حرارتی تمپیر، انجام نشده و تنها شکل و نوع مارتنزیت‌ها تغییر یافته است.



شکل ۶ تصویر SEM از فصل مشترک اتصال قبل و بعد از عملیات حرارتی تمپیر؛ (a) قبل از عملیات حرارتی تمپیر، (b) بعد از عملیات حرارتی تمپیر



شکل ۷ توزیع درصد وزنی عناصر مختلف عمود بر فصل مشترک جوش قبل از انجام عملیات حرارتی تمپیر



شکل ۹) شکست نمونه از منطقه متاثر از حرارت در فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ بعد از عملیات حرارتی تمپر و سطوح مقطع شکست؛ (a) شکست نمونه از منطقه متاثر از حرارت در فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ بعد از عملیات حرارتی تمپر، (b) سطوح مقطع شکست

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اتصال فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۱۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ و اثر پارامترهای مختلف جوشکاری اصطکاکی و تاثیر عملیات حرارتی تمپر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۱۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ مورد بررسی قرار گرفت و نکات زیر را می‌توان نتیجه‌گیری کرد: (۱) جوش اصطکاکی مطلوب فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰، با استفاده از پارامترهای سرعت دورانی ۸۵۰ دور بر دقیقه، زمان اصطکاک ۵۲/۸ ثانیه، زمان فورج ۵۴ ثانیه، نیروی اصطکاک ۱۲۰/۶ کیلو نیوتن و نیروی فورج ۱۸۱ کیلو نیوتن حاصل می‌شود که با انجام عملیات حرارتی تمپر می‌توان به اتصال جوش با استحکام بالاتر از ۵۰۰ مگاپاسکال و بالاتر از استحکام فلز پایه ضعیف‌تر دست پیدا کرد.

(۲) با توجه به ایجاد ریزساختار مارتنزیتی ظریف در منطقه متاثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ در خلال جوشکاری و پس از سرعت سرد شدن زیاد، انجام عملیات حرارتی تمپر بعد از جوشکاری اصطکاکی امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. (۳) بالاترین سختی در منطقه نزدیک به فصل مشترک اتصال در فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ به دلیل مارتنزیت‌های ظریف اتفاق می‌افتد که شکست هم از آنجا رخ می‌دهد.

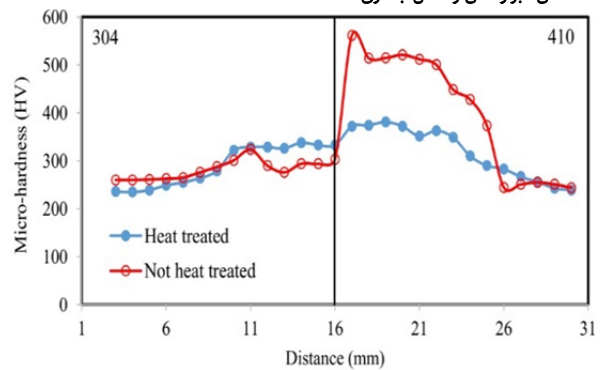
**تشکر و قدردانی:** مولفان از دانشگاه شهیدرجایی به دلیل حمایت‌های معنوی قدردانی می‌کنند.

**تاییدیه اخلاقی:** هیچ بخشی از مقاله حاضر در هیچ نشریه دیگری به چاپ نرسیده و برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. همچنین نویسندگان این مقاله، تمامی محتویات علمی مقاله را حاصل پژوهش خود می‌دانند و اعتبار نتایج گزارش شده را بر عهده می‌گیرند.

**تعارض منافع:** این مقاله، به هیچ وجه، تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

**سهم نویسندگان:** علی اکبر واعظی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (۳۰٪)؛ حسن جعفری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۷۰٪)

**منابع مالی:** در این پژوهش فقط از منابع مالی نویسندگان استفاده

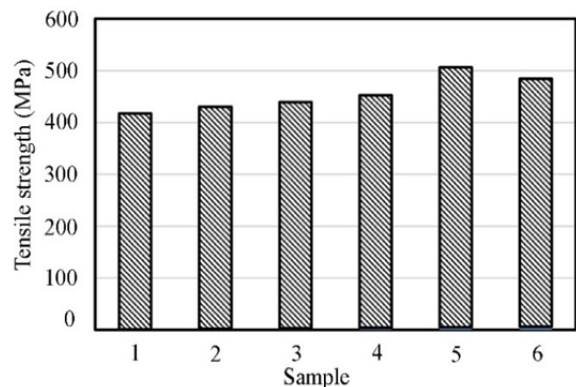


نمودار ۱) نتایج اندازه‌گیری ریزسختی قبل و بعد از عملیات حرارتی تمپر

#### ۳-۵- آزمایش کشش

بعد از نمونه‌سازی و انجام آزمایش کشش مشخص شد که نمونه‌ها تقریباً در یک محدوده از استحکام قرار دارند. شکست در تمام نمونه‌ها از قسمت منطقه متاثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ رخ داد. با توجه به نمودار ۲، همان گونه که مشخص است نمونه جوشکاری شده براساس شرایط درج شده در جدول ۲ برای نمونه شماره ۵، دارای بالاترین استحکام نهایی بوده و به همین دلیل نسبت به سایر پارامترها دارای حالت مطلوب‌تری است. برای بررسی این نمونه، مجدداً این شرایط جوشکاری برای نمونه‌ای دیگر تکرار شد و پس از انجام فرآیند جوشکاری، عملیات حرارتی تمپر روی آن نمونه صورت گرفت و آن نمونه هم مورد آزمایشات مکانیکی قرار گرفت. طبق یافته‌ها شکست از فلز پایه فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ رخ می‌دهد و نمونه از محل جوش سالم و بی‌عیب باقی می‌ماند. این موضوع را می‌توان به کاهش استحکام کششی فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ بعد از عملیات تمپر به کمتر از استحکام کششی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ نسبت داد. همچنین استحکام نهایی این نمونه به بالاتر از ۵۰۰ مگاپاسکال رسید. بعد از نمونه‌سازی و انجام آزمون کشش از نمونه‌ها مشخص شد که تقریباً نمونه‌ها در یک محدوده از استحکام قرار دارند.

لازم به ذکر است که افزایش نیروی فورج به دلیل تولید گرما و تغییر شکل پلاستیک بیشتر، استحکام بالاتر ناحیه جوش را به همراه دارد. همچنین همان گونه که نمونه ۶ در نمودار ۲ نشان می‌دهد، کاهش زمان اصطکاک به دلیل کاهش دمای فصل مشترک جوش و حرارت تولیدی کمتر موجب کاهش استحکام کششی جوش شده است [21]. شکل ۹ به طور نمونه، تصویر سطوح شکست و شکست رخ داده یکی از نمونه‌های مورد آزمایش را بعد از انجام آزمایش کشش نشان می‌دهد.



نمودار ۲) استحکام نهایی جوش در شرایط مختلف جوشکاری

welding. *Materials & Design*. 2007;28(7):2244-2250.

12- Dey HC, Ashfaq M, Bhaduri AK, Prasad Rao K. Joining of titanium to 304L stainless steel by friction welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(18-19):5862-5870.

13- Kumar R, Balasubramanian M. Experimental investigation of Ti-6Al-4V titanium alloy and 304L stainless steel friction welded with copper interlayer. *Defence Technology*. 2015;11(1):65-75.

14- Zohoor M, Seyed Amirkhani SM. Investigation of cross sectional geometry on temperature and properties of welded area in the rotational friction welding process for Al-7075-T6. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(8):13-20. [Persian]

15- Meisnar M, Baker S, Bennett JM, Bernad A, Mostafa A, Resch S, et al. Microstructural characterisation of rotary friction welded AA6082 and Ti-6Al-4V dissimilar joints. *Materials & Design*. 2017;132:188-197.

16- Kimura M, Suzuki K, Kusaka M, Kaizu K. Effect of friction welding condition on joining phenomena and mechanical properties of friction welded joint between 6063 aluminium alloy and AISI 304 stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;26:178-187.

17- Li P, Dong H, Xia Y, Hao X, Wang S, Pan L, et al. Inhomogeneous interface structure and mechanical properties of rotary friction welded TC4 titanium alloy/316L stainless steel joints. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;33:54-63.

18- Anitha P, Majumder MC, Saravanan V, Rajakumar S. Microstructural characterization and mechanical properties of friction-welded IN718 and SS410 dissimilar joint. *Metallography Microstructure and Analysis*. 2018;7(3):277-287.

19- Mirzaee M, Momeni A, Aieni N, Keshmiri H. Effect of quenching and tempering on microstructure and mechanical properties of 410 and 410 Ni martensitic stainless steels. *Journal of Materials Research*. 2017;32(3):687-696.

20- Özdemir N, Sarsılmaz F, Hasçalık A. Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel. *Materials & Design*. 2007;28(1):301-307.

21- Sahin M. An investigation into joining of austenitic-stainless steels (AISI 304) with friction welding. *Assembly Automation*. 2005;25(2):140-145.

## منابع

- 1- Won S, Seo B, Park JM, Kim HK, Song KH, Min SH, et al. Corrosion behaviors of friction welded dissimilar aluminum alloys. *Materials Characterization*. 2018;144:652-660.
- 2- Bühr C, Colegrove PA, Mc Andrew AR. A computationally efficient thermal modelling approach of the linear friction welding process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;252:849-858.
- 3- Bertrand S, Shahriari D, Jahazi M, Champlaud H. Linear friction welding process simulation of Ti-6Al-4V alloy: A heat transfer analysis of the conditioning phase. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:1382-1390.
- 4- Chennakesava Reddy A. Evaluation of parametric significance in friction welding process of AA1100 and Zr705 alloy using finite element analysis. *Materials Today Proceedings*. 2017;4(2 Pt A):2624-2631.
- 5- Vairis A, Papazafeiropoulos G, Tsainis AM. A comparison between friction stir welding, linear friction welding and rotary friction welding. *Advances in Manufacturing*. 2016;4(4):296-304.
- 6- Shanjeevi C, Satish Kumar S, Sathiy P. Evaluation of mechanical and metallurgical properties of dissimilar materials by friction welding. *Procedia Engineering*. 2013;64:1514-1523.
- 7- Pavethan R, Lakshminarayanan PR, Balasubramanian V. Optimization of friction welding process parameters for joining carbon steel and stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012;19(1):66-71.
- 8- Moslemi N, Redzuan N, Ahmad N, Hor TN. Effect of current on characteristic for 316 stainless steel welded joint including microstructure and mechanical properties. *Procedia CIRP*. 2015;26:560-564.
- 9- Meshram MP, Kodli BK, Dey SR. Friction stir welding of austenitic stainless steel by PCBN tool and its joint analyses. *Procedia Materials Science*. 2014;6:135-139.
- 10- Satyanarayana VV, Madhusudhan Reddy G, Mohandas T. Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;160(2):128-137.
- 11- Sahin M. Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction