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

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

Volume 11, Number 1, 2025

Effect of friction stir welding on microstructure, phase transformations, and mechanical properties of austenitic Fe-24Ni-4Cr steel

H.G.Tehrani-Moghadam[1],H.R. Jafarian[1], M. Aghazadeh Ghomi[2], A. Heidarzadeh[2*]

1- School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2- Department of Materials Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

Received 10 Februaryl 2025 ; Accepted 3 April 2025

Abstract

In this study, the effect of friction stir welding on the microstructure and mechanical properties of Fe-24Ni-4Cr austenitic steel was investigated. For this purpose, a sheet with a thickness of 1 mm was subjected to friction stir welding using a WC-5%Co tool at a traverse speed of 100 mm/min and a tool rotational speed of 450 rpm. Electron backscatter diffraction (EBSD) analysis revealed that this process led to grain refinement and an increase in high-angle grain boundaries in the stir zone, attributed to dynamic recrystallization during welding. Phase maps indicated an increase in the BCC phase fraction in the stir zone compared to the base metal. Given the high strain rate and the presence of stabilizing elements, this phase was primarily strain-induced martensite. Mechanical property assessments showed a significant increase in the tensile strength of the stir zone (450 MPa) compared to the base metal (350 MPa). Moreover, the yield strength of the stir zone (388 MPa) was substantially higher than that of the base metal (145 MPa), which can be attributed to grain refinement, an increase in high-angle grain boundaries, a higher dislocation density, and martensite formation. However, the ductility of the stir zone decreased due to higher stress concentration and dislocation density in this region. These findings suggest that friction stir welding can be an effective method for enhancing the strength and hardness of austenitic steels, but process conditions must be carefully controlled to prevent reductions in toughness and ductility.

Keywords:Friction stir welding, Austenitic steel, Microstructure evolution, Mechanical properties.

*Corresponding Author: A. Heidarzadeh: ac.heydarzadeh@azaruniv.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1404

تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار، تحولات فازی و خواص مکانیکی فولاد آستنیتی Fe-24Ni-4Cr

هادی غلامحسین طهرانی مقدم[1]، حمیدرضا جعفریان[1]، مصطفی آقازاده قمی[2]، اکبر حیدرزاده[2*]

1- دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

2- گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

دریافت مقاله: 1403/11/23 ؛ پذیرش مقاله: 1404/01/14

چکیده

در این پژوهش، تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد آستنیتی Fe-24Ni-4Cr مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ورق با ضخامت 1 میلی‌متر با سرعت پیشروی 100 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش ابزار 450 دور بر دقیقه با ابزاری از جنس WC-5%Co تحت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفت. تحلیل‌های پراش الکترون‌های برگشتی (EBSD) نشان داد که این فرایند موجب کاهش اندازه دانه و افزایش مرزهای بزرگ زاویه در ناحیه همزده شده است که به دلیل وقوع تبلور مجدد دینامیکی طی فرایند جوشکاری می‌باشد. نقشه‌های فازی نشان دادند که درصد فاز BCC در ناحیه همزده نسبت به فلزپایه افزایش یافته و با توجه به نرخ کرنش بالا و حضور عناصر پایدارکننده، این فاز عمدتاً مارتنزیت حاصل از استحاله تحت کرنش است. بررسی خواص مکانیکی نشان داد که استحکام کششی ناحیه همزده (450 مگاپاسکال) نسبت به فلزپایه (350 مگاپاسکال) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. همچنین، تنش تسلیم ناحیه همزده (388 مگاپاسکال) نسبت به فلزپایه (145 مگاپاسکال) بهبود چشمگیری داشته که این امر را می‌توان به کاهش اندازه دانه، افزایش مرزهای بزرگ زاویه، افزایش چگالی نابجایی و تشکیل مارتنزیت نسبت داد. با این حال، انعطاف‌پذیری ناحیه همزده کاهش یافت که ناشی از افزایش تمرکز تنش و چگالی نابجایی در این ناحیه است. این نتایج نشان می‌دهد که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند یک روش مؤثر برای بهبود استحکام و سختی فولادهای آستنیتی باشد، اما نیازمند کنترل شرایط فرایندی جهت جلوگیری از کاهش چقرمگی و انعطاف‌پذیری است.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، فولاد آستنیتی، ریزساختار، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: اکبر حیدرزاده، ac.heydarzadeh@azaruniv.ac.ir.

1- مقدمه

جوشکاری فولادهای آستنیتی با روش‌های ذوبی، به دلیل حرارت ورودی بالا و فرایندهای ذوب و انجماد باعث افت خواص مکانیکی جوش و بروز عیوبی مانند حساس شدن، ترک گرم، درشت شدن دانه‌ها و رسوب فازهای ثانویه می‌شود. در حالی‌که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که یک نوع جوش حالت جامد است نه تنها از این عیوب جلوگیری می‌شود، بلکه می‌توان به خواص برتری در ناحیه جوش نسبت به فلزپایه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]

رسید. تحقیقات وسیعی در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و خواص مکانیکی این جوش‌ها و تغییرات ریزساختاری مربوطه در فلزات و آلیاژهای مختلف منتشر شده است. به عنوان مثال می‌توان به کارهای حیدرزاده و همکاران در مورد مس و آلیاژهای پایه مس [1،2]، مک نلی و همکاران [3] و رودس و همکاران [4] در مورد آلومینیوم و آلیاژهای پایه آلومینیوم اشاره کرد. مروری بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انواع فولادها در مقاله‌های منتشر شده توسط کانان و همکاران [5]، چام و همکاران [6] و موهان و وو [7] و فوجی و همکاران [8] منتشر شده است.

فولادهای زنگ نزن آستنیتی به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی کاربردهای وسیعی در تجهیزات مورد استفاده در صنایع شیمیایی، غذایی، نفت و گاز و دریایی دارند. برای حفظ خواص برتر این فولادها بعد از جوشکاری، روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در برابر روش‌های ذوبی به مراتب بهتر هستند. در بیشتر کارهایی که در خصوص جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادهای آستنیتی منتشر شده است، از فولادهای زنگ نزن 304، 316 و به میزان کمتر از فولادهای سوپر آستنیتی استفاده شده است.

مران و جانیورت [9] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر روی فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 با کمک ابزار کاربید تنگستن-6 درصد کبالت اعمال کردند. مرور کاملی در مورد ابزار مورد استفاده برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط رائی و همکاران انجام شده است [10]. در کار مران و جانیورت [9]، اندازه متوسط دانه‌ها در ناحیه همزده 3 الی 7 میکرومتر و در ناحیه متأثر از حرارت 20 میکرومتر و در حد نصف اندازه دانه‌های فلزپایه گزارش شده است. علاوه بر ساختار ریزدانه ناحیه جوش، نوارهای تیره و باریکی در ناحیه جوش دیده شده که معتقدند لایه‌های اکسیدی Cr_2O_3 هستند. آن‌ها در بهترین حالت به استحکام کششی 430 MPa برای نمونه جوشکاری شده دست یافتند، در حالی‌که استحکام کششی فلزپایه MPa 505 بوده است. مران و همکاران [11] نیز به بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ نزن 304 پرداخته اند. در این کار ورق‌های با ضخامت 2/5 mm با چرخش یک ابزار از جنس کاربید تنگستن با سرعت چرخش 1000 rpm با موفقیت جوش داده شدند. آن‌ها توانستند دو ناحیه SZ (ناحیه همزده) و ناحیه TMAZ (ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی) را تشخیص دهند. استحکام کششی برای سرعت‌های جوشکاری 63 mm/min در حدود استحکام کششی فلزپایه بوده است. ایشیکاوا و همکاران [12] با هدف افزایش سرعت خطی جوشکاری، جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ نزن 304 را توانستند با سرعت بالای 1150 mm/min بدون عیب اجرا کنند. در این کار استحکام بیشتری برای جوش نسبت به فلزپایه مخصوصاً در سرعت‌های بالای جوشکاری به دست آمده است. آن‌ها توافقی بین افزایش استحکام کششی جوش و ریز شدن دانه‌های ناحیه همزده و تشکیل دانه‌های تبلور مجددیافته هم‌محور مشاهده نمودند. پارک و همکاران [13] بالاترین سختی را در ناحیه TMAZ جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ نزن 304 اندازه‌گیری نمودند. در این مطالعه در ناحیه همزده و در سمت پیشرونده، در طول مرز دانه‌های زمینه آستنیتی، فاز فریت دیده شده است که به استحاله آستنیت به فریت در اثر گرمای ناشی از اصطکاک و سرد شدن سریع در ادامه، نسبت داده شده است. نتایج مشابهی توسط سیدیکی و همکاران [14] گزارش شده است.

کومار و همکاران [15] خواص مکانیکی و ریز ساختار جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ نزن 316 را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از تصویربرداری EBSD و TEM متوجه شدند که مکانیسم غالب تبلور مجدد در ناحیه همزده، تبلور مجدد دینامیک ناپیوسته است و اندازه دانه‌ها در این ناحیه به شدت تحت تأثیر گرمای تولید شده و نرخ کرنش می‌باشد. همچنین بررسی‌های آن‌ها نشان داد که هیچ فاز ثانویه‌ای در جوش ایجاد نمی‌شود. ساختار نواری ایجاد شده در اثر فراوری اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ نزن 316 توسط چن و همکاران [16] به دقت مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در ساختار نواری توانستند حضور فاز سیگما را بوسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری آشکار کرده و ارتباطی مستقیم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]

بین مقدار این فاز و گرمای وارده پیدا کنند. تشکیل این فاز غنی از کروم باعث ایجاد نواحی خالی شده از کروم و در نتیجه کاهش مقاومت به خوردگی می‌شود. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادهای سوپرآستنیتی با مقاومت بسیار خوب در برابر خوردگی از نوع حفره دار شدن موضوعی است که به شدت مورد توجه هست. چرا که به دلیل مقدار بالای عناصر آلیاژی در آنها، مساله ایجاد فازهای ثانویه حائز اهمیت است. لی و همکاران [17] توانسته‌اند جوش‌های سالمی را برای فولاد سوپرآستنیتی S32654 به روش اصطکاکی اغتشاشی اجرا کنند. در ناحیه همزده، ریزساختار ریزدانه و بدون افت محتوای نیتروژن مشاهده شدند. آنها تشکیل ساختار نواری حاوی عناصر مرتبط با ابزار را نیز نشان دادند و ایجاد ساختار دانه‌ها با مکانیزم غالب CDRX را اثبات کردند. اثر همزمان ریزدانه شدن و افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها به همراه ساختار فرعی باعث افزایش سختی و استحکام شده اما ظرفیت تغییر شکل پلاستیک اتصالات را کاهش می‌دهد. تغییرات ریز ساختاری در جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی نوع دیگری از فولادهای سوپرآستنیتی به نام S31254 توسط میونوف و همکاران [18] مورد توجه قرار گرفته است. فولادهای سوپر آستنیتی به عنوان یک آلیاژ با انرژی نقص در چیده شدن پایین شناخته می‌شوند. آنها با روش EBSD بافت ایجاد شده در ناحیه جوش را به دقت مورد بررسی قرار داده اند.

نویسندگان مقاله حاضر، در کار اخیر خود [19]، ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های اصطکاکی اغتشاشی فولاد Fe-24Ni-0.3Cr را که یک نوع فولاد TRIP می‌باشد، مورد بررسی قرار داده‌اند. در این کار نشان داده شده است که در فلزپایه تا ناحیه همزده، ریزساختار فقط حاوی فاز آستنیت می‌باشد و مارتنزیت ناشی از تغییر شکل پلاستیک، بوجود نمی‌آید. با افزایش سرعت پیشروی جوشکاری، کسر مرزهای کم زاویه زیاد شده و ریزدانه شدن با شدت بیشتری ایجاد می‌شود. اثر TRIP هنگام تغییر شکل آزمایش کشش، در ناحیه همزده، نسبت به فلزپایه کاهش می‌یابد که به ریزدانه شدن نسبت داده می‌شود.

در کار حاضر، فولاد آستنیتی جدیدی با مقدار نیکل مشابه کار قبلی [19]، اما با حضور 0/3 درصد وزنی کربن و 4 درصد وزنی کروم مورد مطالعه قرار گرفته است.چنین فولادی برای اولین بار پیشنهاد شده و با توجه به اینکه تاکنون مطالعات محدودی بر روی تأثیر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر فولادهای آستنیتی حاوی نیکل و کروم انجام شده است، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به توسعه بیشتر فناوری جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در این دسته از آلیاژها کمک نماید. در این تحقیق تغییرات ریزساختاری ناشی از فراوری اصطکاکی اغتشاشی با روش EBSD به دقت مورد بررسی قرار گرفته و خواص مکانیکی نواحی مختلف، با آزمایش‌های کشش و سختی سنجی مورد بررسی قرار گرفته است.

2- روش پژوهش

در این پژوهش، فولاد آستنیتی Fe-24Ni-4Cr مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌هایی به صورت ورق با ضخامت 1 میلی‌متر تهیه شده و تحت فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفتند. پارامترهای فرایند شامل سرعت پیشروی 100 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش ابزار 450 دور بر دقیقه بود. به‌منظور اجرای فرایند، از ابزاری ساخته‌شده از WC-5%Co استفاده شد که دارای قطر شانه 16 میلی‌متر و پین استوانه‌ای بدون رزوه با قطر 3 میلی‌متر و ارتفاع 0/7 میلی‌متر بود. همچنین، ابزار با زاویه تمایل 3 درجه نسبت به خط نرمال سطح ورق تنظیم شد. برای بررسی ریزساختار، نمونه‌هایی از مقطع عرضی جوش تهیه شده و با استفاده از میکروسکوپ نوری (Olympus BX51) و پراش الکترون‌های برگشتی (EBSD) مورد مطالعه قرار گرفتند. برای این منظور از آشکارساز مدل Oxford Instruments Nordlys که بر میکروسکوپ الکترونی روبشی (JEOL JSM-7800F SEM) نصب شده بود، بهره گرفته شد. آماده‌سازی نمونه‌های EBSD از طریق پولیش مکانیکی و سپس پولیش الکترولیتی در محلول 900 ml CH_3COOH+100 ml $HCLO_4$ در دمای 284 کلوین و با اعمال اختلاف پتانسیل 20 ولت انجام شد.

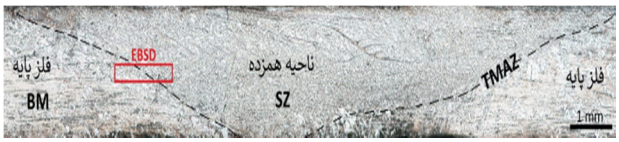
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]

پردازش داده‌های EBSD با استفاده از نرم‌افزار TSL-OIM صورت گرفت. خواص مکانیکی جوش از طریق آزمایش میکروسختی‌سنجی ویکرز (مدل MHV-1000) و آزمایش کشش (مدل SANTAM STM-20) ارزیابی شد. برای بررسی سختی، از آزمایش میکروسختی ویکرز با بار 500 گرم-نیرو و زمان اعمال بار 15 ثانیه استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در نقاط مختلف مقطع عرضی جوش انجام گرفت. نمونه‌های کشش از مقطع عرضی جوش تهیه شده بودند. نمونه‌های کشش با طول کلی 50 میلی‌متر، عرض گیج 2 میلی‌متر و طول گیج 2 میلی‌متر با روش وایرکات برش داده شدند. آزمایش کشش با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال و با نرخ اعمال کرنش 1 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.

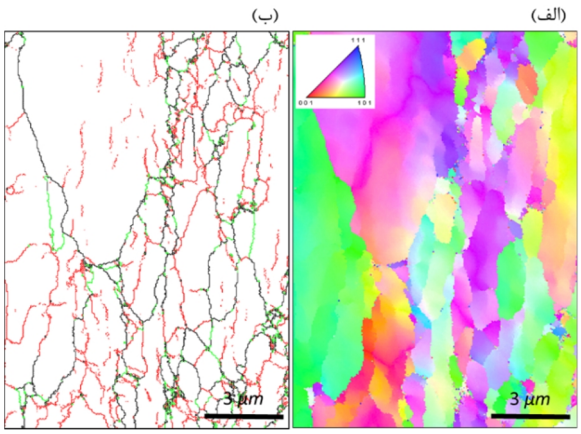
3- نتایج و بحث

شکل(1) نمایی از ماکروساختار نمونه جوشکاری‌شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جوش شامل سه ناحیه اصلی فلزپایه (BM)، ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) و ناحیه همزده (SZ) است. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ابزار چرخان موجب تولید حرارت و اعمال تغییرشکل پلاستیک شدید در ناحیه همزده می‌شود که منجر به تغییرات اساسی در ریزساختار می‌گردد. علاوه بر این، ناحیه تحت تأثیر ترمومکانیکی (TMAZ) نیز دچار تغییر شکل می‌شود، اما میزان این تغییر شکل کمتر از ناحیه همزده بوده و اثری از تبلور مجدد در آن مشاهده نمی‌شود.



شکل1- ماکروساختار نمونه جوشکاری شده. ناحیه مورد بررسی توسط آنالیز EBSD به وسیله مستطیل قرمز مشخص شده است.

ریزساختار فلزپایه براساس نتایج EBSD در شکل(2) نمایش داده شده است. مطابق با نقشه‌های جهت‌گیری بلوری (IPF) و مرزدانه‌ای، فلزپایه دارای توزیع مرزدانه‌ای متعادلی است که شامل 52 درصد مرزهای بزرگ‌زاویه و 48 درصد مرزهای کوچک‌زاویه می‌باشد. حضور نسبت قابل‌توجهی از مرزهای کوچک‌زاویه در فلزپایه نشان‌دهنده عدم وقوع تبلور مجدد گسترده و ساختاری با تغییرشکل سرد جزئی است. با این حال، همان‌طور که در شکل(3) مشاهده می‌شود، ناحیه همزده دچار تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در توزیع مرزدانه‌ها شده است. در این ناحیه، میزان مرزهای بزرگ‌زاویه به 79 درصد افزایش یافته و مقدار مرزهای کوچک‌زاویه به 21 درصد کاهش پیدا کرده است. این تغییر نشان‌دهنده وقوع تبلور مجدد دینامیکی (DRX) در حین جوشکاری است. در طی این فرایند، تغییرشکل پلاستیک شدید به همراه گرمای ناشی از اصطکاک، منجر به فعال‌سازی مکانیزم‌های بازیابی نابجایی‌ها و در نهایت تشکیل دانه‌های جدید با مرزهای بزرگ‌زاویه می‌شود [1]. افزایش مرزهای بزرگ‌زاویه در ناحیه همزده نقش مهمی در بهبود برخی از خواص مکانیکی مانند چقرمگی و شکل‌پذیری ایفا می‌کند.

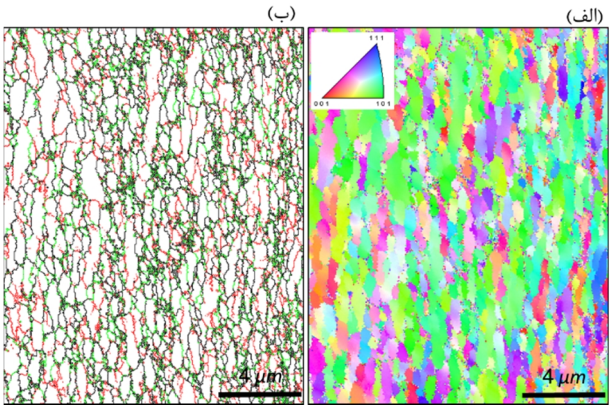


شکل2-الف- نقشه IPF و ب- نقشه مرزدانه‌ای فلزپایه (BM). مرزهای بزرگ‌زاویه، کوچک‌زاویه و CSL به ترتیب با رنگ‌های مشکی، قرمز و سبز نمایش داده شده‌اند.

شکل(4) توزیع اندازه دانه را در فلزپایه و ناحیه همزده نشان می‌دهد. در فلزپایه، اندازه متوسط دانه‌ها برابر با 4/7 میکرومتر است، در حالی‌که در ناحیه همزده، اندازه متوسط دانه‌ها به 1/1 میکرومتر کاهش یافته است. این کاهش چشمگیر در اندازه دانه، نتیجه مستقیم فرایند تبلور مجدد دینامیکی در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. کاهش اندازه دانه در ناحیه همزده را می‌توان به نرخ بالای جوانه‌زنی دانه‌های جدید نسبت داد که در

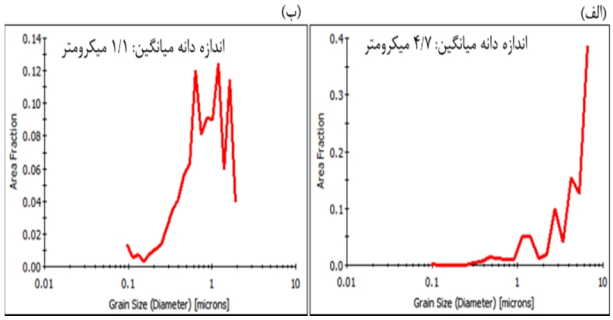
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]

حضور انرژی حرارتی و تغییرشکل شدید اتفاق می‌افتد. همچنین، در این فرایند، زمان کافی برای رشد دانه‌ها وجود ندارد، که این امر باعث حفظ ساختار دانه‌ای ریز در ناحیه همزده می‌شود. ریزشدن دانه‌ها در ناحیه همزده، تأثیر مهمی بر خواص مکانیکی جوش دارد. براساس قانون هال-پچ، کاهش اندازه دانه منجر به افزایش استحکام و سختی می‌شود [20]، که در بخش‌های بعدی به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت. در نتیجه، فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نه‌تنها باعث همگن‌سازی ریزساختار در ناحیه جوش می‌شود، بلکه به بهبود خواص مکانیکی نیز کمک شایانی می‌کند. بنابراین، براساس نتایج تحلیل‌های EBSD و بررسی‌های ماکروساختاری می‌توان گفت که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باعث افزایش مرزهای بزرگ‌زاویه (از 52 درصد به 79 درصد) و کاهش اندازه دانه (از 4/7 میکرومتر به 1/1 میکرومتر) می‌شود. این تغییرات ساختاری را می‌توان به وقوع تبلور مجدد دینامیکی در حین فرایند جوشکاری نسبت داد که تأثیر مستقیمی بر سختی و استحکام جوش دارد.



شکل3-الف- نقشه IPF و ب- نقشه مرزدانه‌ای ناحیه همزده. مرزهای بزرگ زاویه، کوچک زاویه و CSL به ترتیب با رنگ‌های مشکی، قرمز و سبز نمایش داده شده‌اند.

تصاویر فازی ارائه‌شده در شکل(5) نشان می‌دهند که پس از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مقدار فاز با ساختارکریستالی BCC در ناحیه همزده نسبت به فلزپایه افزایش یافته است. در فلزپایه، میزان فاز BCC تنها 0/7 درصد است، در حالی‌که در ناحیه همزده این مقدار به 6/7 درصد افزایش می‌یابد. این افزایش بیانگر وقوع یک استحاله فازی در طی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که منجر به تشکیل فاز جدیدی با ساختار BCC شده است.



شکل4- توزیع اندازه دانه در: الف- فلزپایه (BM) و ب- ناحیه همزده (SZ).

در سیستم‌های آلیاژی آهن-نیکل-کروم، فاز BCC می‌تواند به دو شکل اصلی، یعنی فریت δ و مارتنزیت، ظاهر شود. با این حال، دلایل متعددی نشان می‌دهند که فاز تشکیل‌شده در اینجا، مارتنزیت است. نخست، فریت δ به‌طور معمول در دماهای بالا تشکیل شده و در اثر سرمایش، پایدار باقی می‌ماند. ازآنجا که فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند در دمای نسبتاً پایین‌تر نسبت به جوشکاری‌های ذوبی است، احتمال تشکیل و پایداری فریت δ در این شرایط بسیار کم است. در مقابل، استحاله مارتنزیتی ناشی از کرنش، یکی از مکانیزم‌های شناخته‌شده برای تغییر فاز در فولادهای آستنیتی است که در شرایط اعمال کرنش شدید و دمای پایین اتفاق می‌افتد. در این پژوهش، چندین عامل کلیدی سبب تسهیل این استحاله و تشکیل مارتنزیت شده‌اند:

-جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به دلیل ماهیت ترمومکانیکی خود، منجر به اعمال نرخ کرنش‌های بالا در ناحیه همزده می‌شود. مشخص شده است که نرخ کرنش بالا می‌تواند موجب تسریع استحاله مارتنزیتی در فولادهای آستنیتی گردد، به‌ویژه زمانی‌که ترکیب شیمیایی فولاد به‌گونه‌ای باشد که پایداری آستنیت را کاهش دهد [21].

-برخلاف فرایندهای شکل‌دهی گرم که در آن‌ها دماهای بالاتری اعمال می‌شود و معمولاً استحاله مارتنزیتی اتفاق نمی‌افتد، در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دماهای ایجادشده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]

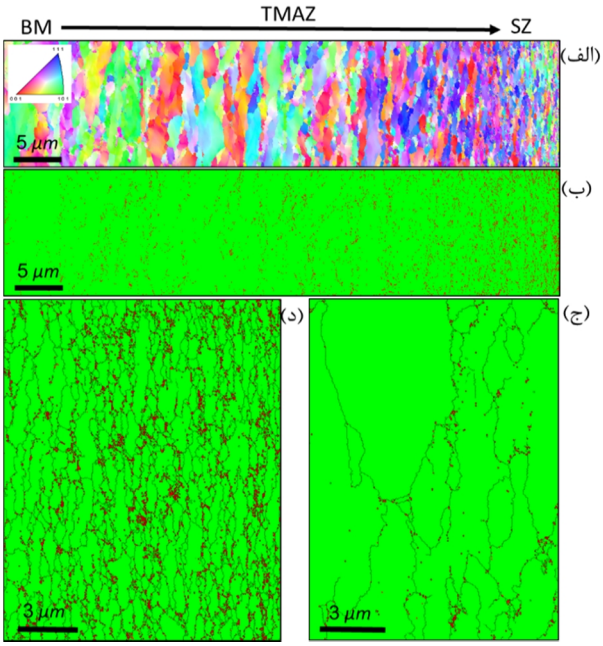
پایین‌تر هستند. این کاهش دما می‌تواند احتمال تشکیل مارتنزیت را افزایش دهد، زیرا استحاله مارتنزیتی در فولادهای آستنیتی معمولاً در دماهای پایین‌تر از یک حد بحرانی رخ می‌دهد [22].

-کروم یکی از عناصر پایدارکننده فاز BCC است که می‌تواند شرایط را برای تشکیل مارتنزیت در این فولاد فراهم کند. اگرچه نیکل به‌عنوان پایدارکننده آستنیت عمل می‌کند، اما اثر آن در حضور کرنش‌های بالا و دماهای پایین کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی، کروم می‌تواند با کاهش پایداری فاز FCC، احتمال استحاله مارتنزیتی را افزایش دهد [23].

-مطالعات پیشین بر روی فولادهای آستنیتی نشان داده‌اند که درر صورت اعمال کرنش بالا و دماهای نسبتاً پایین، استحاله مارتنزیتی تحت کرنش اتفاق می‌افتد. این امر به‌ویژه در سیستم‌هایی که دارای کروم هستند، تسهیل می‌شود، زیرا کروم تمایل به تشکیل فازهای BCC دارد [24و 25].

با توجه به این موارد، افزایش مقدار فاز BCC در ناحیه همزده را می‌توان به تشکیل مارتنزیت ناشی از کرنش نسبت داد. این استحاله فازی تأثیر مهمی بر خواص مکانیکی جوش دارد، که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت.

شکل(6) نمایش قطبی صفحات کریستالوگرافی (001)، (011) و (111) را در ناحیه همزده نشان می‌دهد. این داده‌ها بیانگر توزیع بافت کریستالوگرافی در این ناحیه بوده و اطلاعات مهمی درباره مکانیزم تغییر شکل حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه می‌دهند. در فرایندهای تغییر شکل شدید مانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، بافت کریستالوگرافی می‌تواند تحت تأثیر مکانیزم‌های تغییر شکل پلاستیک، تبلور مجدد دینامیکی و جهت‌گیری دانه‌ها پس از تغییر شکل قرار گیرد. در اینجا مشاهده می‌شود که شدت بافت برشی کم است، که نشان‌دهنده وقوع فرایند تبلور مجدد دینامیکی است. تبلور مجدد دینامیکی موجب شکل‌گیری دانه‌های ریز و با جهت‌گیری تصادفی‌تر نسبت به هم می‌شود و از ایجاد بافت قوی جلوگیری می‌کند. این ویژگی معمولاً در شرایطی که فرایند تبلور مجدد دینامیکی کامل‌تر باشد، مشاهده می‌شود. در نتیجه، شکل(6) نشان می‌دهد که تغییر شکل برشی و تبلور مجدد منجر به جهت‌گیری تصادفی‌تر دانه‌ها در ناحیه همزده شده است، که این امر می‌تواند بر خواص مکانیکی مانند استحکام، چقرمگی و داکتیلیتی تأثیر بگذارد [21].

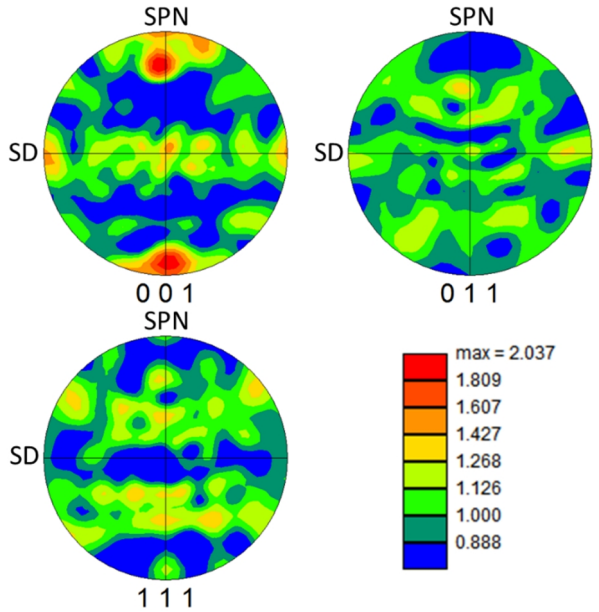


شکل5-الف- نقشه IPF و ب- نقشه فازی ناحیه مشخص شده به وسیله مستطیل قرمز رنگ در شکل1 که حاوی نواحی مختلف ریزساختاری می‌باشد. در نقشه‌های فازی، فازهای FCC و BCC به ترتیب با رنگ‌های سبز و قرمز نمایش داده شده‌اند. ج- نقشه فازی فلزپایه در بزرگنمایی بالاتر. د- نقشه فازی ناحیه همزده در بزرگنمایی بالاتر نشان دهنده مقدار فاز BCC.

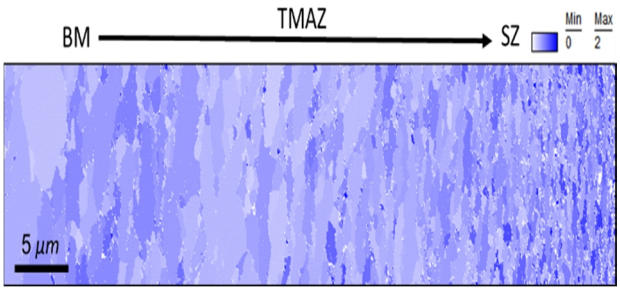
شکل(7) نقشه زاویه ناهمسوئی متوسط دانه‌ای (GAM) را برای ناحیه مشخص‌شده در شکل(1) نشان می‌دهد. پارامتر GAM میزان تغییر زاویه کریستالوگرافی بین نقاط مجاور را نشان می‌دهد و به‌عنوان یک شاخص غیرمستقیم برای چگالی نابجایی‌ها در ریزساختار مورد استفاده قرار می‌گیرد [21و 26]. در این تصویر، مشاهده می‌شود که چگالی نابجایی‌ها در ناحیه همزده نسبت به فلزپایه افزایش یافته است. ناحیه همزده تحت تأثیر کرنش‌های شدید ناشی از دوران ابزار جوشکاری قرار گرفته که باعث افزایش چگالی نابجایی در این ناحیه شده است. همچنین، در برخی نواحی ممکن است تبلور مجدد به‌طور کامل رخ نداده باشد، در نتیجه برخی نابجایی‌ها در دانه‌های جدید باقی‌مانده‌اند. در مجموع، داده‌های شکل(7) نشان می‌دهند که

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نه‌تنها باعث اصلاح بافت کریستالوگرافی و تبلور مجدد شده، بلکه منجر به افزایش چگالی نابجایی در ناحیه همزده نیز شده است، که می‌تواند بر خواص مکانیکی از جمله سختی و استحکام تأثیرگذار باشد [27].

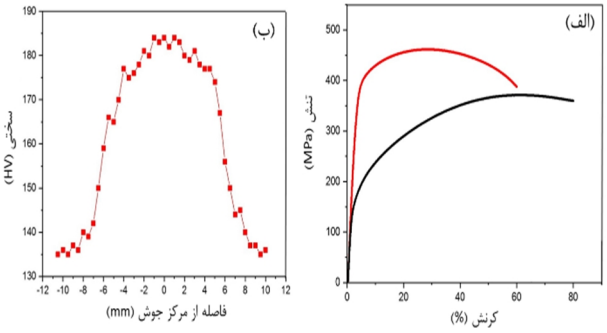


شکل6-. شکل قطبی صفحات (001)، (011) و (111) در ناحیه همزده جوش.



شکل7- نقشه GAM ناحیه مشخص شده به وسیله مستطیل قرمز رنگ در شکل1.

شکل(8) تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی را نشان می‌دهد. در شکل(8-الف)، منحنی‌های تنش-کرنش فلزپایه و ناحیه همزده مقایسه شده‌اند که نشان می‌دهد ناحیه همزده دارای استحکام کششی و تنش تسلیم بالاتری نسبت به فلزپایه است. در شکل(8-ب)، پروفیل سختی جوش ارائه شده که نشان می‌دهد سختی در ناحیه جوشکاری‌شده نسبت به فلزپایه افزایش یافته است.



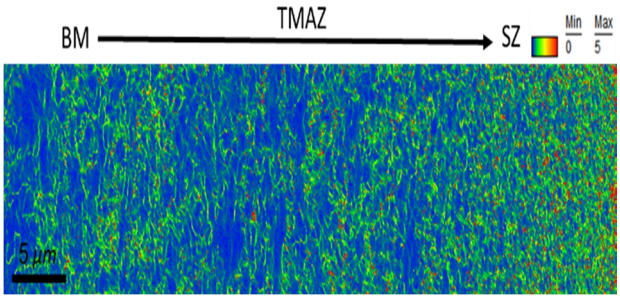
شکل8- الف-منحنی تنش-کرنش مهندسی فلزپایه و جوش.
ب- پروفیل سختی جوش

در ناحیه همزده، افزایش استحکام و سختی نسبت به فلزپایه را می‌توان به چندین مکانیزم ریزساختاری مرتبط دانست. نخست، کاهش اندازه دانه از 4/7 میکرومتر در فلزپایه به 1/1 میکرومتر در ناحیه همزده براساس مکانیزم هال-پچ منجر به افزایش تنش تسلیم و استحکام کششی شده است، چراکه مرزهای دانه ریزتر به‌عنوان مانعی مؤثر در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل کرده و باعث افزایش مقاومت به تغییر شکل پلاستیک می‌شوند. علاوه بر این، افزایش نسبت مرزهای بزرگ زاویه از 52 درصد در فلزپایه به 79 درصد در ناحیه همزده، منجر به ایجاد مرزهای پرانرژی‌تری شده که از رشد دانه‌ها جلوگیری کرده و به دلیل افزایش سدکنندگی در برابر حرکت نابجایی‌ها، موجب افزایش استحکام و سختی شده است. هم‌زمان، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با اعمال کرنش بالا و ایجاد تغییر شکل شدید، چگالی نابجایی را در ناحیه همزده افزایش داده که این پدیده باعث کارسختی موضعی و افزایش تنش تسلیم شده است. از سوی دیگر، بررسی نقشه‌های فازی نشان می‌دهد که مقدار فاز BCC که در اینجا به احتمال زیاد مارتنزیت ناشی از کرنش است، از 0/7 درصد در فلزپایه به 6/7 درصد در ناحیه همزده افزایش یافته است. شکل‌گیری مارتنزیت به دلیل ترکیب اثرات کرنش بالا، دمای پایین‌تر فرایند نسبت به شکل‌دهی داغ و حضور عناصر پایدارکننده فاز BCC مانند کروم رخ داده است که باعث افزایش استحکام و سختی جوش می‌شود. این تغییرات

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]

ریزساختاری، که شامل دانه‌بندی ریزتر، افزایش مرزهای بزرگ زاویه، چگالی بالاتر نابجایی و حضور فاز مارتنزیت است [28]، در مجموع باعث افزایش استحکام کششی ناحیه همزده به 450 مگاپاسکال در مقایسه با 350 مگاپاسکال در فلزپایه و افزایش تنش تسلیم به 388 مگاپاسکال در مقایسه با 145 مگاپاسکال شده‌اند.

به موازات این افزایش استحکام، پروفیل سختی جوش نیز نشان می‌دهد که سختی در ناحیه جوشکاری‌شده نسبت به فلزپایه افزایش یافته است که این افزایش را نیز می‌توان به همین مکانیزم‌های استحکام‌بخشی نسبت داد. در نتیجه، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به دلیل اعمال دمای پایین‌تر و نرخ کرنش بالاتر، ریزساختاری بهینه‌تر نسبت به روش‌های دیگر ایجاد کرده و در نهایت منجر به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی جوش شده است.



شکل 9- نقشه KAM ناحیه مشخص شده به وسیله مستطیل قرمز رنگ در شکل1 .

در شکل (8)، کاهش کرنش شکست در ناحیه همزده پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند به چندین عامل ریزساختاری مرتبط باشد. همان‌طور که در شکل(9) مشاهده می‌شود، نقشه زاویه ناهمسوئی متوسط کرنل (KAM) نشان‌دهنده تمرکز تنش بالاتر در ناحیه همزده در مقایسه با فلزپایه است. این افزایش تنش داخلی می‌تواند ناشی از چگالی نابجایی بیشتر، ریزدانه شدن شدید و افزایش درصد فاز مارتنزیت باشد. از آنجا که فاز مارتنزیت سخت و شکننده است، افزایش مقدار آن می‌تواند منجر به کاهش انعطاف‌پذیری شود [29]. علاوه بر این، افزایش نسبت مرزهای بزرگ زاویه باعث محدود شدن حرکت نابجایی‌ها شده و تغییرشکل پلاستیک را دشوارتر می‌کند. بنابراین، اگرچه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی موجب افزایش استحکام و سختی می‌شود، اما هم‌زمان منجر به کاهش انعطاف‌پذیری به دلیل تغییرات ریزساختاری ذکر شده نیز خواهد شد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی یک فولاد آستنیتی Fe-24Ni-4Cr مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

-جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به تغییرات قابل‌توجهی در ساختار دانه، توزیع فازها و خواص مکانیکی جوش شده است. تحلیل‌های EBSD نشان داد که درصد مرزهای بزرگ زاویه در ناحیه همزده نسبت به فلزپایه افزایش یافته است که این امر به دلیل وقوع تبلور مجدد دینامیکی طی فرایند جوشکاری می‌باشد. همچنین، کاهش چشمگیر اندازه دانه از 4/7 میکرومتر در فلزپایه به 1/1 میکرومتر در ناحیه همزده، تأثیر مستقیم این فرایند بر ریزدانه شدن را تأیید کرد.

-نتایج نقشه‌های فازی نشان داد که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به افزایش مقدار فاز BCC در ناحیه همزده شده است. با توجه به شرایط دمایی و نرخ کرنش بالای این فرایند، و همچنین حضور کروم به عنوان پایدارکننده فاز BCC، مشخص شد که این فاز تشکیل‌شده عمدتاً مارتنزیت حاصل از استحاله تحت کرنش است. بررسی توزیع تنش و چگالی نابجایی نیز نشان داد که این فرایند باعث ایجاد تمرکز تنش و افزایش چگالی نابجایی‌ها در ناحیه همزده شده است.

-مطالعات مکانیکی نشان داد که استحکام کششی ناحیه همزده نسبت به فلزپایه افزایش قابل‌توجهی داشته و از 350 مگاپاسکال در فلزپایه به 450 مگاپاسکال رسیده است. همچنین، سختی این ناحیه به دلیل کاهش اندازه دانه، افزایش مرزهای بزرگ زاویه، افزایش چگالی نابجایی و تشکیل فاز مارتنزیت نسبت به فلزپایه افزایش یافته است. با این حال، میزان کرنش شکست در ناحیه همزده کاهش یافته که این امر را می‌توان به افزایش تمرکز تنش، افزایش چگالی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]

نابجایی و کاهش انعطاف‌پذیری ناشی از افزایش فاز مارتنزیت نسبت داد. به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند یک روش کارآمد برای بهبود استحکام و سختی فولادهای آستنیتی باشد، اما کاهش انعطاف‌پذیری می‌تواند چالشی در کاربردهای موردنظر ایجاد کند. بنابراین، بهینه‌سازی پارامترهای فرایند و کنترل تشکیل فازهای سخت می‌تواند نقش مهمی در بهبود رفتار مکانیکی نهایی این جوش‌ها ایفا کند.

منابع

1- Heidarzadeh A, Mironov S, Kaibyshev R, et al. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. Progress in Materials Science 2021;117:100752.

2- Heidarzadeh A, Saeid T. Prediction of mechanical properties in friction stir welds of pure copper. Materials & Design (1980-2015) 2013;52:1077–1087.

3- McNelley TR, Swaminathan S, Su JQ. Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys. Scripta Materialia 2008;58:349–354.

4- Rhodes CG, Mahoney MW, Bingel WH, et al. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. Scripta Materialia 1997;36:69–75.

5- Venkatesh KM, Arivarsu M, Manikandan M, et al. Review on friction stir welding of steels. Materials Today: Proceedings 2018;5:13227–13235.

6- Çam G, İpekoğlu G, Küçükömeroğlu T, et al. Applicability of friction stir welding to steels. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2017;80:65–85.

7- Mohan DG, Wu C. A review on friction stir welding of steels. Chinese Journal of Mechanical Engineering 2021;34:137.

8- Fujii H, Cui L, Tsuji N, et al. Friction stir welding of carbon steels. Materials Science and Engineering: A 2006;429:50–57.

9- Meran C, Canyurt OE. Friction Stir Welding of austenitic stainless steels. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2010;43:432.

10-Rai R, De A, Bhadeshia H, et al. Friction stir welding tools. Science and Technology of Welding and Joining 2011;16:325–342.

11-Meran C, Kovan V, Alptekin A. Friction stir welding of AISI 304 austenitic stainless steel. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften Und Anwendungen Technischer Werkstoffe 2007;38:829–835.

12-Ishikawa T, Fujii H, Genchi K, et al. High speed–high quality friction stir welding of austenitic stainless steel. ISIJ International 2009;49:897–901.

13-Park SHC, Sato YS, Kokawa H, et al. Microstructural characterisation of stir zone containing residual ferrite in friction stir welded 304 austenitic stainless steel. Science and Technology of Welding and Joining 2005;10:550–556.

14-Siddiquee AN, pandey S, Khan NZ. Friction Stir Welding of Austenitic Stainless Steel: A Study on Microstructure and Effect of Parameters on Tensile Strength. Materials Today: Proceedings 2015;2:1388–1397.

15-Kumar SS, Murugan N, Ramachandran KK. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AISI 316L austenitic stainless steel joints. Journal of Materials Processing Technology 2018;254:79–90.

16-Chen YC, Fujii H, Tsumura T, et al. Banded structure and its distribution in friction stir processing of 316L austenitic stainless steel. Journal of Nuclear Materials 2012;420:497–500.

17-Li H, Yang S, Zhang S, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of friction stir welding super-austenitic stainless steel S32654. Materials & Design 2017;118:207–217.

18-Mironov S, Sato YS, Kokawa H, et al. Structural response of superaustenitic stainless steel to friction stir welding. Acta Materialia 2011;59:5472–5481.

19-Tehrani-Moghadam HG, Jafarian HR, Salehi MT, et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of Fe-24Ni-0.3 C TRIP steel during friction stir processing. Materials Science and Engineering: A 2018;718:335–344.

20-Hansen N. Hall–Petch relation and boundary strengthening. Scripta Materialia 2004;51:801–806.

21-Mishra RS, Ma ZY. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering: R: Reports 2005;50:1–78.

22-Meng X, Huang Y, Cao J, et al. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding. Progress in Materials Science 2021;115:100706.

23-Oñoro J. Martensite microstructure of 9–12%Cr steels weld metals. Journal of Materials Processing Technology 2006;180:137–142.

24-Talonen J, Nenonen P, Pape G, et al. Effect of strain rate on the strain-induced γ, → α′-martensite transformation and mechanical properties of austenitic stainless steels. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science 2005;36 A:421–432.

25-Zou DQ, Li SH, He J. Temperature and strain rate dependent deformation induced martensitic transformation and flow behavior of quenching and partitioning steels. Materials Science and Engineering: A 2017;680:54–63.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]

Monel alloy. Journal of Materials Research and Technology 2023;24:5139–5146.
28-Kostryzhev AG. Strengthening Mechanisms in Metallic Materials. Metals 2021, Vol 11, Page 1134 2021;11:1134.
29-Harte A, Atkinson M, Preuss M, et al. A statistical study of the relationship between plastic strain and lattice misorientation on the surface of a deformed Ni-based superalloy. Acta Materialia 2020;195:555–570.
26-Heidarzadeh A, Khajeh R, Jafarian HR, et al. A pathway towards strengthening and ductilization of additive-manufactured AlSi10Mg through friction stir processing: Microstructural evolution and tensile behavior. Materials Science and Engineering: A 2024;906:146367.
27-Heidarzadeh A, Mohammadzadeh R, Ahmed M, et al. Correlation between local mechanical properties and corresponding microstructures in a friction stir processed

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.23]