

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

Volume 11, Number 1, 2025



6

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

## H.G.Tehrani-Moghadam<sup>1</sup>,H.R. Jafarian<sup>1</sup>, M. Aghazadeh Ghomi<sup>2</sup>, A. Heidarzadeh<sup>2\*</sup>

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.

S \*Corresponding Author: A. Heidarzadeh: <u>ac.heydarzadeh@azaruniv.ac.ir</u>





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

هادی غلامحسین طهرانی مقدم<sup>1</sup>، حمیدرضا جعفریان<sup>1</sup>، مصطفی آقازاده قمی<sup>2</sup>، اکبر حیدرزاده<sup>2\*</sup> 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.

دريافت مقاله: 1403/11/23 ؛ پذيرش مقاله: 1404/01/14

#### چکیدہ

در این پژوهش، تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد آستیتی 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 DSC 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 (250 مگاپاسکال) بهطور قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین، تنش تسلیم ناحیه همزده (450 مگاپاسکال) نسبت به فلزپایه (451 مگاپاسکال) بهبود چشمگیری داشته که این امر را می توان به کاهش اندازه دانه، افزایش مرزهای برزگ زاویه، افزایش چگالی نابجایی و تشکیل مارتنزیت نسبت داد. با این حال، انعطافپذیری ناحیه همزده کاهش یافت که ناش مرزهای برزگ زاویه افزایش نابجایی در این ناحیه است. این نتایج نشان می دهد که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می تواند یک راش مرز می برزگ زاویه افزایش و هرده کاهش یا ای بهبود چشمگیری داشته که این امر را می توان به کاهش اندازه دانه، افزایش مرزهای برزگ زاویه افزایش پایجایی در این ناحیه است. این نتایج نشان می دهد که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می تواند یک روش مؤثر برای بهبود استحکام و سختی فولادهای آستیتی باشد، اما نیازمند کنترل شرایط فرایندی جهت جلوگیری از کاهش چقرمگی و انعطافپذیری است.

كلمات كليدى: جوشكارى اصطكاكي اغتشاشي، فولاد أستنيتي، ريزساختار، خواص مكانيكي.

🖾 \* نويسنده مسئول، پست الکترونيکي: اکبر حيدرزاده، ac.heydarzadeh@azaruniv.ac.ir.

#### 1- مقدمه

گرم، درشت شدن دانهها و رسوب فازهای ثانویه می شود. در حالی که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که یک نوع جوش حالت جامد است نه تنها از این عیوب جلوگیری می شود، بلکه می توان به خواص بر تری در ناحیه جوش نسبت به فلزپایه

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

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 20<sup>-10</sup> هستند. آنها در بهترین شده دست یافتند، در حالی که استحکام کششی فلزپایه هرای شده دست یافتند، در حالی که استحکام کششی فلزپایه 205 اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ نزن 304 پرداخته اند. در این

کار ورق،های با ضخامت 2/5 mm پر خش 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 سرعت های جوشکاری 63 mm/min در حدود استحکام کششی فلزیایه بوده است. ایشیکاوا و همکاران [12] با هدف افزایش سرعت خطی جوشکاری، جوش های اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ نزن 304 را توانستند با سرعت بالای mm/min 1150 بدون عیب اجرا کنند. در این کار استحکام بیشتری برای جوش نسبت به فلزیایه مخصوصاً در سرعتهای بالای جوشکاری به دست آمده است. آنها توافقی بین افزایش استحکام کششی جـوش و ریز شدن دانههای ناحیه همزده و تشکیل دانههای تبلور مجددیافته هممحور مشاهده نمودند. پارک و همکاران [13] بالاترین سختی را در ناحیـه TMAZ جـوشهـای اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ نزن 304 اندازه گیری 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 نمی شود. 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 م فاز غنی در کار حاضر، فولاد آستنیتی جدیدی با مقدار نیکل مشابه کار در نتیجه قبلی [19]، اما با حضور 3/0 درصد وزنی کربن و 4 درصد مطکاکی وزنی کروم مورد مطالعه قرار گرفته است.چنین فولادی برای صوب در اولین بار پیشنهاد شده و با توجه به اینکه تاکنون مطالعات موب در بر فولادهای آستنیتی حاوی نیکل و کروم انجام شده است، یا مناصر بر فولادهای آستنیتی حاوی نیکل و کروم انجام شده است، یا مناصر بر فولادهای آستنیتی حاوی نیکل و کروم انجام شده است، یا میت. یا میت. یا فولاد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در این دسته از آلیاژها کمک محتوای اصطکاکی اغتشاشی در این دسته از آلیاژها کمک محتوای اصطکاکی اغتشاشی در این دسته از آلیاژها کمک محتوای محتوای اصطکاکی اغتشاشی در این دسته از آلیاژها کمک محتوای محتوای اصطکاکی اغتشاشی در این دسته از آلیاژها کمک محتوای محتوای اصطکاکی اغتشاشی با روش EBSD به دقت مورد بررسی قرار محتوای گرفته و خواص مکانیکی نواحی مختلف، با آزمایشهای کشش دانه ها 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 میلی متر تهیه شده و تحت فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفتند. پارامترهای فرایند شامل سرعت پیشروی 100 میلیمتـر بر دقیقه و سرعت چرخش ابزار 450 دور بر دقیقه بود. بهمنظور اجرای فرایند، از ابزاری ساخته شده از WC-5%Co استفاده شد که دارای قطر شانه 16 میلیمتر و پین استوانهای بـدون رزوه بـا 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 نـوری (Olympus BX51) و یراش الکترونهای برگشتی (EBSD) مورد مطالعه قرار گرفتند. برای این منظور از آشکارساز مدل Oxford Instruments JEOL JSM-) که بر میکروسکوپ الکترونی روبشی (Nordlys 7800F SEM) نصب شده بود، بهره گرفته شد. آمادهسازی نمونههای EBSD از طریق پولیش مکانیکی و سپس پولیش الكتروليتي در محلول MI CH3COOH+100 ml HCLO4 الكتروليتي در دمای 284 کلوین و با اعمال اختلاف پتانسیل 20 ولت انجام شىل.

بين مقدار اين فاز و گرماي وارده ييدا كنند. تشكيل اين فاز غني از کروم باعث ایجاد نـواحی خـالی شـده از کـروم و در نتیجـه کاهش مقاومت به خوردگی می شود. جو شکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادهای سویر آستنیتی 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. لى و همكاران [17] توانستهاند جوش هاى سالمي را براى فولاد سویرآستنیتی \$32654 به روش اصطکاکی اغتشاشی اجرا کنند. در ناحیه همزده، ریزساختار ریزدانه و بدون افت محتوای نيتروژن مشاهده شدند. آنها تشكيل ساختار نواري حاوي 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 مےدهد. تغییرات ریز ساختاری در جـوش،هـای اصطکاکی اغتشاشـی نـوع دیگـری از فولادهـای سویرآستنیتی 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 می شوند. آنها با روش EBSD بافت ایجاد شده در ناحیـه جـوش را بـه دقت مورد بررسی قرار داده اند.

نویسندگان مقاله حاضر، در کار اخیر خود [19]، ریزساختار و خواص مکانیکی جوش های 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 نمی آید. 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 می شود.

پردازش داده های EBSD با استفاده از نرم افزار TSL-OIM مورت گرفت. خواص مکانیکی جوش از طریق آزمایش میکروسختی سنجی 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. اندازه گیری ها در نقاط مختلف مقطع عرضی جوش انجام گرفت. نمونه های کشش از کلی 50 میلی متر، عرض گیچ 2 میلی متر و طول گیچ 2 میلی متر با روش وایرکات برش داده شدند. آزمایش کشش با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال و با نرخ اعمال کرنش 1 میلی متر بر دقیقه انجام شد.

3- نتايج و بحث

شکل (1) نمایی از ماکروساختار نمونه جوشکاری شده را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، 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 تغییر شکل پلاستیک شدید در ناحیه همزده می شود که منجر به تغییرات اساسی در ریز ساختار می گردد. علاوه بر این، ناحیه تحت تأثیر ترمومکانیکی (TMAZ) نیز دچار تغییر شکل می شود، اما میزان این تغییر شکل کمتر از ناحیه همزده بوده و اثری از تبلور مجدد در آن مشاهده نمی شود.



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 جهت گیری 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، همان طور که در شکل (3) مشاهده میشود، ناحیه همزده دچار تغییرات قابل ملاحظه ای در توزیع مرزدانه ها شده است. در این ناحیه، میزان مرزهای بزرگزاویه به 79 درصد افزایش یافته و مقدار مرزهای کوچکزاویه به 21 درصد کاهش پیدا مقدار مرزهای کوچکزاویه به 21 درصد کاهش پیدا دینامیکی (DRX) کوچکزاویه به ممراه گرمای ناشی از اصطکاک، تغییر شکل پلاستیک شدید به همراه گرمای ناشی از اصطکاک، منجر به فعال سازی مکانیزمهای بازیابی نابجایی ها و در نهایت تشکیل دانه های جدید با مرزهای بررگزاویه می شود [1]. افزایش مرزهای بزرگزاویه در ناحیه همزده نقش مهمی در بهبود برخی از خواص مکانیکی مانند چقرمگی و شکل پذیری ایفا می کند.



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 می دهد. در فلزپایه، اندازه متوسط دانه ها برابر با 4/7 میکرومتر است، در حالی که در ناحیه همزده، اندازه متوسط دانه ها 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 می توان به نرخ بالای جوانهزنی دانه های جدید نسبت داد که در

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 می شود. ریزشدن دانهها در ناحیه همزده، تأثیر مهمی بر خواص مکانیکی جوش دارد. براساس قانون هال-یچ، کاهش اندازه دانه منجر به افزایش استحکام و سختی می شود [20]، که در بخشهای بعدی به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت. در نتیجه، فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نه تنها باعث همگنسازی ریزساختار در ناحیه جوش می شود، بلکه به بهبود خواص مکانیکی نیز کمک شایانی میکند. بنابراین، براساس نتایج تحلیلهای EBSD و بررسیهای ماکروساختاری می توان 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) می شود. این تغییرات ساختاری را میتوان به وقوع تبلور مجدد دینامیکی در حین فرایند جوشکاری نسبت داد کـه تـأثیر مسـتقیمی بـر سـختی و استحكام جوش دارد.



زاویه، کوچک زاویه و CSL به ترتیب با رنگهای مشکی، قرمز و سبز نمایش داده شدهاند.

تصاویر فازی ارائه شده در شکل (5) نشان میدهند که پس از فرایند جو شکاری اصطکاکی اغتشا شی، مقدار فاز با ساختار کریستالی BCC در ناحیه همزده نسبت به فلزپایه افزایش یافته است. در فلزپایه، میزان فاز BCC تنها 0/7 درصد است، در حالی که 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.



در سیستمهای آلیاژی آهن -نیکل -کروم، فاز BCC می تواند به دو شکل اصلی، یعنی فریت ۵ و مارتنزیت، ظاهر شود. با این حال، دلایل متعددی نشان می دهند که فاز تشکیل شده در اینجا، مارتنزیت است. نخست، فریت ۵ به طور معمول در دماهای بالا تشکیل شده و در اثر سرمایش، پایدار باقی می ماند. از آنجا که فرایند جو شکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند در دمای نسبتا پایین تر نسبت به جو شکاری های ذوبی است، احتمال تشکیل و پایداری فریت ۵ در این شرایط بسیار کم است. در مقابل، استحاله مارتنزیتی ناشی از کرنش، یکی از مکانیزمهای شناخته شده برای تغییر فاز در فولادهای آستنیتی است که در شرایط اعمال کرنش شدید و دمای پایین اتفاق می افتد. در این پژوهش، چندین عامل کلیدی سبب تسهیل این استحاله و

-جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به دلیل ماهیت ترمومکانیکی خود، منجر به اعمال نرخ کرنش های بالا در ناحیه همزده می شود. مشخص شده است که نرخ کرنش بالا می تواند موجب تسریع استحاله مارتنزیتی در فولادهای آستنیتی گردد، به ویژه زمانی که ترکیب شیمیایی فولاد به گونه ای 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

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

-کروم یکی از عناصر پایدارکننده فاز BCC است که می تواند شرایط را برای تشکیل مارتنزیت در این فولاد فراهم کند. اگرچه نیکل به عنوان پایدارکننده آستنیت عمل می کند، اما اثر آن در حضور کرنشهای بالا و دماهای پایین کاهش می یابد. در چنین شرایطی، کروم می تواند 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 [24 و25].

با توجه به این موارد، افزایش مقدار فاز BCC در ناحیه همزده را می توان 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 کریستالو گرافی (001)، (011) و (111) را در ناحیه همزده نشان می دهد. این داده ها بیانگر توزیع بافت کریستالو گرافی در این ناحیه بوده و اطلاعات مهمی درباره مکانیزم تغییر شکل حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه می دهند. در فرایندهای تغییر شکل شدید مانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، بافت کریستالو گرافی می تواند تحت تأثیر مکانیزمهای تغییر شکل پلاستیک، تبلور مجدد دینامیکی و جهت گیری دانه ها پس از تغییر شکل قرار گیرد. در اینجا مشاهده می شود که شدت بافت برشی کم است، که نشان دهنده وقوع فرایند تبلور مجدد دینامیکی است. تبلور مجدد دینامیکی موجب شکل گیری دانههای ریز و با فرایند تبلور می کند. این ویژگی معمولاً در شرایطی که فرایند تبلور مجدد دینامیکی کامل تر باشد، مشاهده می شود. 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 مشخص شده در شکل (1) نشان می دهد. پارامتر GAM میزان تغییر زاویه کریستالو گرافی بین نقاط مجاور را نشان می دهد و به عنوان یک شاخص غیر مستقیم برای چگالی نابجایی ها در ریز ساختار مورد استفاده قرار می گیرد [21و 26]. در این تصویر، مشاهده می شود که چگالی نابجایی ها در ناحیه همزده نسبت به فلزپایه افزایش یافته است. ناحیه همزده تحت تأثیر کرنش های 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 به طور کامل رخ نداده باشد، در نتیجه برخی نابجایی ها در دانههای جدید باقی مانده اند. در مجموع، داده های شکل (7) نشان می دهند که

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].





شکل (8) تم اثیر 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 تینش تسلیم بالاتری نسبت به فلزپایه است. در شکل (8-ب)، پروفیل سختی جوش



در ناحیه همزده، افزایش استحکام و سختی نسبت به فلزپایـه را می توان به چندین مکانیزم ریز ساختاری مرتبط دانست. نخست، کاهش اندازه دانه از 4/7 میکرومتر در فلزیایه به 1/1 میکرومتـر 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 نابجایی ها عمل کرده و باعث افزایش مقاومت به تغییر شکل پلاستیک میشوند. عـلاوه بر این، افزایش نسبت مرزهای بزرگ زاویه از 52 درصد در فلزيايه به 79 درصد در ناحيه همزده، منجر به ايجاد مرزهاي یرانرژی تری شده که از رشد دانهها جلوگیری کرده و به دلیل افزایش سدکنندگی در برابر حرکت نابجایی ها، 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 كارسختى موضعي و افزايش تنش تسليم شده است. از سوى 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 فلزیایه به 6/7 درصد در ناحیه همـزده افـزایش یافته است. شکل گیری مارتنزیت به دلیل ترکیب اثرات کرنش بالا، دمای پایین تر فرایند نسبت به شکلدهمی داغ و حضور عناصر پایدارکننده فاز BCC مانند کروم رخ داده است که باعث افزایش استحکام و سختی جـوش مـیشـود. ایـن تغییـرات

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 مقایسه با افزایش تنش تسلیم به 388 مگاپاسکال در مقایسه با 145 مگاپاسکال شدهاند.

به موازات این افزایش استحکام، پروفیل سختی جوش نیز نشان می دهد که سختی در ناحیه جوشکاری شده نسبت به فلزپایه افزایش یافته است که این افزایش را نیز می توان به همین مکانیزم های استحکام بخشی نسبت داد. در نتیجه، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به دلیل اعمال دمای پایین تر و نرخ کرنش بالاتر، ریز ساختاری بهینه تر نسبت به روش های دیگر ایجاد کرده و در نهایت منجر به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی جوش شده است.



شكل ۲- نفشه KAWI ناحيه مشخص شده به وسيله مستطيل قرمز رنگ در شكل1 .

در شکل (8)، کاهش کرنش شکست در ناحیه همزده پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی میتواند به چندین عامل ریزساختاری مرتبط باشد. همان طور که در شکل (9) مشاهده میشود، نقشه زاویه ناهمسوئی متوسط کرنل (KAM) نشان دهنده 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 انعطاف پذیری شود [29]. علاوه بر این، افزایش نسبت مرزهای بزرگ زاویه باعث محدود شدن حرکت نابجایی ها شده و تغییر شکل

پلاستیک را دشوارتر میکند. بنابراین، اگرچه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی موجب افزایش استحکام و سختی میشود، اما همزمان منجر به کاهش انعطاف پذیری به دلیل تغییرات ریزساختاری ذکر شده نیز خواهد شد.

#### 4- نتيجەگىرى

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:

میا مورد بررسی عرار عرب و تعییم ریر به دست اسا. -جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به تغییرات قابل توجهی 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 می باشد. 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 تشکیل شده 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 نابجایی ها در ناحیه همزده شده است.

-مطالعات مکانیکی نشان داد که استحکام کششی ناحیه همزده نسبت به فلزپایه افزایش قابل توجهی 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 می توان به افرایش تمرکز تنش، افزایش چگالی 12-Ishikawa T, Fujii H, Genchi K, et al. High speedhigh 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  $\gamma$ ,  $\rightarrow \alpha'$ -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.

نابجایی و کاهش انعطاف پذیری 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 انعطاف پذیری میتواند چالشی در کاربردهای موردنظر ایجاد کند. بنابراین، بهینه سازی 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. 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 Nibased 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