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

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

Volume 8, Number 1, 2022



Effect of oxide flux powders of SiO_2, MoO_3 and CuO on the diffusion depth, microstructure and microhardness of GTAWed precipitation hardening martensitic 17-4PH steel

S. Golestanehzadeh, S.H.Mousavi Anijdan*, H.R. Najafi Dezdeh Monfared
Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received 1 May 2022 ; Accepted 4 July 2022

Abstract

In this investigation the effect of oxides powders of SiO_2, MoO_3 and CuO on the depth of penetration, microstructure and hardness profile of GTAWeld precipitation hardening martensitic 17-4PH was assessed. Samples were taken from 17-4PH steel sheet with the dimensions of 150*50 mm and with the thickness of 5 mm, and were welded by oxide powder of SiO_2, MoO_3 and CuO. Results showed that using oxide powder increased the penetration depth of the welded joints by about 150 percent compared to the normal condition. Also, it was shown that although using SiO_2 powder increased the penetration depth to about 7.49 mm, it provides inferior weld bead appearance. The use of MoO_3 and CuO powder increased the penetration depth of the weld to about 5.3 mm. Although inclusions were found throughout the side of the weld bead when MoO_3 powder was employed for welding. The microstructure of the weld in different samples did not vary and included dendritic structure with delta ferrite located between the dendrites. The hardness profile of the welded joints showed the closeness of the hardness of the welded joints using different oxide powder with the base metal.

Keywords: Precipitation hardening stainless steel, TIG welding; Active flux, Microstructure of the weld.

Corresponding Author: hashemmousavi@srbiau.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.8.6]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هشتم، شماره1، بهار و تابستان 1401



بررسی اثر پودر فلاکس‌های اکسیدی SiO_2، MoO_3 و CuO بر عمق نفوذ، ریزساختار و میکروسختی جوش GTAW فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت مارتنزیتی 17-4PH

ساسان گلستانه زاده، سیدهاشم موسوی انیجدان*، حمیدرضا نجفی دژده منفرد

دانشکده مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1401/02/11 ؛ پذیرش مقاله: 1401/04/13

چکیده

هدف در این پژوهش به بررسی تاثیر پودرهای اکسیدی SiO_2، MoO_3 و CuO بر عمق نفوذ، ریزساختار و پروفیل سختی جوش GTAW فولاد زنگ نزن رسوب سخت مارتنزیتی 17-4PH پرداخته شده است. نمونه‌هایی با ابعاد 150× 50 میلی‌متر با ضخامت 5 میلی‌متر از ورقی از جنس فولاد 17-4PH توسط پودرهای اکسیدی SiO_2، MoO_3 و CuO جوشکاری گردیدند. نتایج حاکی از این بودند که استفاده از پودرهای اکسیدی سبب افزایش عمق نفوذ تا 1/5 برابر در جوش این فولاد در مقایسه با حالت معمولی شده اند. همچنین استفاده از پودر SiO_2 اگرچه باعث افزایش 7/49 میلی‌متری عمق نفوذ شد، ولی ظاهر جوش مناسبی حاصل نکرد. استفاده از پودرهای MoO_3 و CuO نیز باعث افزایش عمق نفوذ تا 5/3 میلی‌متر گردیدند. در جوش با استفاده از پودر MoO_3 آخال در سرتاسر جوش در کناره‌ها وجود داشت. ریزساختار جوش در نمونه‌های مختلف تفاوت چشمگیری نداشته و شامل ساختار دندریتی با فریت دلتا به صورت بین دندریتی بود. پروفیل سختی جوش نمونه‌ها نشان دهنده نزدیکی مقدار سختی نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از پودرهای اکسیدی با فلزپایه بود.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن پیر سخت شونده، جوشکاری تیگ، فلاکس فعال، ریز ساختار جوش.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: hashemmousavi@srbiau.ac.ir

1- مقدمه

فرایند جوشکاری قوسی گاز-تنگستن، که به اختصار با نام تیگ نیز شناخته می‌شود، با توجه به دقت بالا و ایجاد سطح جوش بسیار تمیز، با اقبال بیشتری در میان فرایندهای قوسی دیگر رو به رو بوده است. در این فرایند با استفاده از یک الکترود غیرمصرفی می‌توان قطعات را تا عمق 3 میلی‌متر در یک پاس حتی بدون استفاده از فلزپرکننده بهم متصل نمود و جوشی بی عیب و نقص بدست آورد. اما این فرایند علیرغم تمام مزایای خود یک عیب عمده دارد و آن عدم امکان گرفتن نفوذ جوش مناسب برای قطعات ضخیم در یک پاس است [1].

استفاده از فلاکس در جوشکاری تیگ اولین بار در اواسط دهه 1960 میلادی توسط مؤسسه جوشکاری پاتون الکتریک از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.8.6]

آکادمی جهانی علوم در کشور اوکراین مطرح شد [2, 3]. در این فرایند یک لایه پودر فعال بر روی سطح اعمال می‌گردد و جوشکاری بر روی این لایه انجام می‌گیرد [4].

تحقیقات زیادی بروی این فرایند، فلاکس‌ها و مکانیزم‌های اثرگذار در آن انجام گرفته است. تحقیقات صورت گرفته حاکی از این است که استفاده از تیگ فعال باعث افزایش همزمان عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض جوش می‌شود [5]. این امر ناشی از تمرکز بالای انرژی در این فرایند است. این تمرکز انرژی، به دلیل کاهش مقدار حرارت تولیدی بوده که از گرم شدن بیش از حد فلزپایه جلوگیری کرده و احتمال ایجاد تنش حرارتی و کرنش نامتعارف به علت انقباض در ضخامت را کاهش می‌دهد. همچنین مشاهدات تجربی بیانگر آن بوده است که استفاده از تیگ فعال باعث کاهش پیچیدگی زاویه ای در قطعات جوشکاری شده می‌شود [6].

اصلی‌ترین و مهمترین پارامتر این فرایند در واقع پودر فلاکس است که حضور و تأثیر آن بر حوضچه و نیروهای مؤثر بر جریان گردش مذاب، سبب نفوذ بیشتر جوش می‌شود. استفاده از فلاکس فعال در فرایند تیگ فعال نیاز به بررسی و تحقیق در رابطه با اثر فلاکس بر فلزپایه و حوضچه جوش و همچنین ساختار نهایی دارد. از آنجا که این فلاکس‌ها دارای تنوع نسبتاً زیادی هستند، بررسی اینکه کدام فلاکس بهترین نتیجه را حاصل می‌کند اهمیت به سزایی دارد.

به طور کلی فلاکس‌های مورد استفاده در این فرایند، فلاکس‌های اکسیدی و هالیدی هستند. دو اثر شناخته شده این فلاکس‌ها انقباض قوس و عکس همرفت مارانگونی است [2, 4]. این فلاکس‌ها با تجزیه به عناصر تشکیل دهنده‌شان تبخیر شده و یک پوشش از بخار (با ماهیت الکترون منفی) را در اطراف قوس تشکیل می‌دهند [5]. فلاکس‌های مختلفی در تحقیقات توسط محققان استفاده شد و نتایج حاکی از آن بود که با وجود یکسان بودن پارامترهای کلی جوش، تأثیر فلاکس‌ها با هم متفاوت بوده است[2, 4, 7, 8].

فولادهای زنگ‌نزن رسوب سخت مارتنزیتی گروهی از فولادهای زنگ‌نزن هستند که در دمای آنیل انحلالی به طور عمده ساختار آستنیتی دارند ولی حین سرد شدن تا دمای محیط، آستنیت به مارتنزیت استحاله می یابد. مارتنزیت در این فولادها برخلاف مارتنزیت پر کربن در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی معمول، نسبتاً نرم و کم کربن (کمتر از 0/05%) می باشد. کاربردهای رایج انواع فولادهای مارتنزیتی شامل شیرها، چرخ دنده‌ها، هزار خارها و محورها می‌باشند [9].

از میان فولادهای این گروه یکی از پرکاربردترین فولادهای این گروه فولاد 17-4PH است که در استاندارد ASTM با کد 630 و در استاندارد UNS با کد S17400 شناخته می‌شود و یک فولاد زنگ نزن رسوب سخت شونده مارتنزیتی کم کربن، شامل نیکل و مس می‌باشد. این فولاد با استفاده از عملیات حرارتی پیرسازی قابل سخت شدن است. همچنین حضور3 تا 5 درصد وزنی مس در این آلیاژ سبب استحکام بیشتر بواسطه رسوبات غنی از مس توزیع شده در زمینه مارتنزیتی می‌شود. فولاد 17-4PH در گروه زنگ نزن‌های رسوب سخت شونده مارتنزیتی از جوش پذیری خوبی برخوردار است. جوشکاری زنگ نزن های پیر سخت‌شونده بسیار شبیه جوشکاری مارتنزیتی و آستنیتی‌ها است و نیاز به فرایند کنترل شده برای پایین نگه داشتن حرارت ورودی، برای بدست آوردن بهترین انعطاف‌پذیری و چقرمگی را دارد [9-12]. در این پژوهش به بررسی تأثیر نوع پودر بر عمق نفوذ، پروفیل سختی و ریزساختار جوش در جوشکاری تیگ فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت مارتنزیتی 17-4PH با استفاده از پودر فلاکس‌های SiO_2، MoO_3 و CuO پرداخته شده است. برای درک بهتر عمق نفوذ، پروفیل میکروسختی و ریز ساختار، نمونه‌ها با جوشکاری به روش تیگ سنتی نیز مقایسه شده است.

2- مواد و روش آزمایش

ورقی از جنس فولاد 17-4PH که ترکیب شیمیایی آن در جدول (1) آورده شده است، انتخاب گردید. این ورق به نمونه‌هایی با ابعاد 150× 50 میلی‌متر با ضخامت 5 میلی‌متر برش خورد و سطح آن با استفاده از سنباده 80 صیقل داده و

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.8.6]

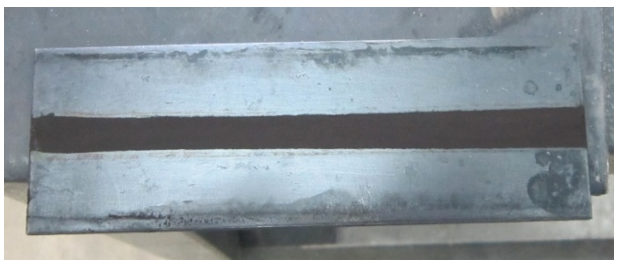
جدول1- ترکیب شیمیایی فلزپایه.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	Fe
0.058	0.0509	0.507	0.010	0.011	15.789	4.146	0.202	3.159	0.245	Rest.

جدول2- مشخصات پودرهای مورد استفاده.

نوع پودر	دانه بندی	دانسیته سطحی
SiO_2	50 µ ±5µ	0.0016 g/mm^2
MoO_3	50 µ ±5µ	0.004 g/mm^2
CuO	50 µ ±5µ	0.0036 g/mm^2

سپس با الکل 70 درصد شستشو داده شد. پودرهای اکسیدی SiO_2، MoO_3 و CuO که مشخصات آن در جدول (2) آورده شده است برای جوشکاری انتخاب گردیدند. این پودرها در بوته با آستن آزمایشگاهی ترکیب و مایع خمیری شکل حاصل در طول 150 میلی‌متر و عرض 10 میلی‌متر در مرکز نمونه‌ها پوشش داده شد. سپس برای خشک شدن پودرها 20 دقیقه زمان داده شد و بعد از آن مورد جوشکاری قرار گرفت. شکل(1) نمونه آماده سازی شده با پودر CuO را نشان می دهد. جوشکاری بوسیله فرایند تیگ و با استفاده از پارامترهایی که در جدول (3) آورده شده است، انجام گرفت. برای یکنواختی سرعت جوشکاری و ثابت بودن فاصله نوک الکترود تا سطح نمونه از یک گاری حمل تورچ استفاده گردید. همچنین جهت مقایسه یک نمونه به صورت ساده (بدون استفاده از پودر) جوشکاری گردید.



شکل1- نمونه آماده سازی با پودر CuO.

پس از جوشکاری سطح جوش مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برش‌های عرضی از مقاطع جوش زده شد و سطح جوش به صورت ماکرو و میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ استریو مدل Stereo Discovery V12 با قابلیت بزرگنمایی 1:12 ساخت شرکت ZEISS کشور آلمان و میکروسکوپ نوری مدل IX73M ساخت شرکت Olympus کشورژاپن‌بررسی گردیدند. سختی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسختی سنج (میکروویکرز) سری MMT ساخت شرکت Matsuzawa کشور ژاپن اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه گردید.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی سطحی

شکل(2) سطح نمونه‌های اولیه جوشکاری شده با پودرهای SiO_2، CuO، MoO_3 و تیگ مرسوم پس از جوشکاری و قبل از برش عرضی را نشان می‌دهند. این تصاویر بیانگر تفاوت بین ظاهر جوش‌های صورت گرفته با استفاده از پودرهای مختلف است. همانطورکه در تحقیقات گذشته نیز گزارش شده [2]، پودرهای مختلف می‌توانند تأثیر متفاوتی در فلزات مختلف داشته باشند. این تفاوت‌ها علاوه بر عمق نفوذ، بر ظاهرجوش نیز تأثیرگذار است. البته برخی از اکسیدها، مانند SiO_2، در اکثر فلزات نتایج قابل قبولی را ارائه نموده‌اند. شکل(2-د) ظاهر نمونه جوشکاری شده با استفاده از پودر SiO_2 را نشان می‌دهد. همانطور که در این تصویر مشخص است، به دلیل سیالیت بالای این اکسید، اگرچه نفوذ بالایی را به دنبال داشته، ولی ظاهرجوش مناسبی را حاصل ننموده است که عدم داشتن عرض جوش یکنواخت و وجود تقعر در بعضی از مقاطع از مهمترین آن‌ها است. شکل(2-ج) ظاهر نمونه جوشکاری شده با اکسید MoO_3 را نشان می‌دهد. در جوش با استفاده از این اکسید نیز نفوذ حداکثری حاصل گردیده است، ولی وجود آخال‌های اکسیدی در کناره‌های جوش ظاهر نا مناسبی به این جوش بخشیده است. علت این امر را می‌توان در فعال و تجزیه نشدن بخشی از پودر در حین جوشکاری جستجو کرد. اگرچه در این جوش نفوذ کامل اتفاق افتاده است اما مشخصا

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.8.6]

جدول3- پارامترهای جوشکاری مورد استفاده.

Amperage	Voltage	Polarity	Electrode TYP.	Electrode Dia.	Torch Cup	Gas TYP.	Gas Flow Rate	Welding Speed
100A	13-14V	DCEN	Red-Th 0.2	2.4	6	Ar99.999	10Lit/min	5cm/min

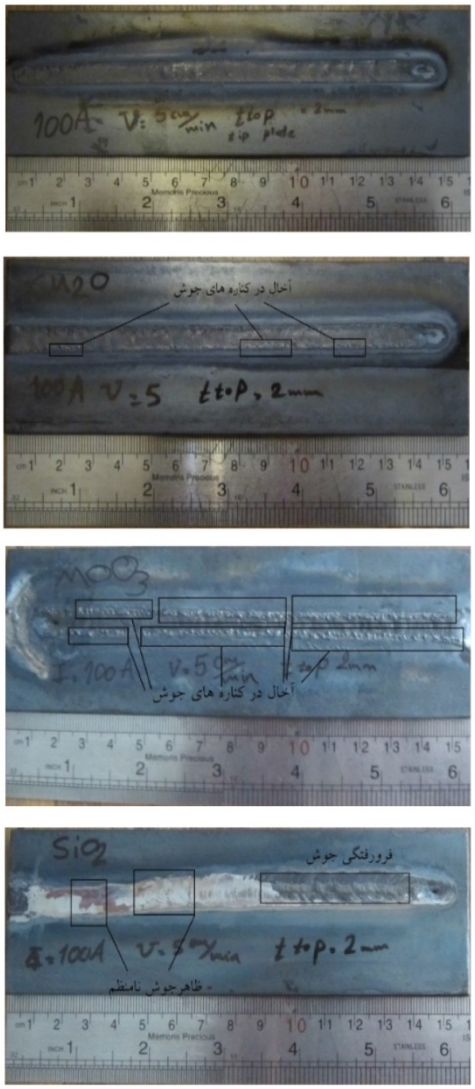
بخش زیادی از پودر تجزیه نگردیده و بصورت آخـــال در کناره های جوش رسوب نموده است. شکل (2-ب) نمونه جوشکاری شده با استفاده از اکسید CuO را نشان می دهد. ظاهر این جوش نسبت به سایر اکسید ها قابل قبول‌تر به نظر می‌رسد و عرض جوش آن کاملاً یکنواخت است. البته مقدار کم‌ی نیز آخال، همانند نمونه جوشکاری شده با MoO_3 در کناره های این جوش وجود دارد که مشخصاً شدت کمتری نسبت به نمونه MoO_3 دارد. ظاهر نمونه جوشکاری شده با روش تیگ سنتی شکل(2-الف)

نیز دارای عرض جوش یکنواخت بوده و همچنین عاری از آخال و سایر عیوب ظاهری که در نمونه‌های جوشکاری شده با پودر اکسیدی وجود داشته است. البته این موضوع در پژوهش های قبلی نیز گزارش گردیده [13] و با توجه به اینکه جوشکاری تیگ یکی از تمیزترین فرایندهای جوشکاری است، این اتفاق چندان دور از ذهن نیست. البته نفوذ در این نمونه بسیار کمتر از نمونه‌های دیگر است که در ادامه به آن می پردازیم.

3-2- بررسی عمق نفوذ

شکل(3)، تصاویر سطح مقاطع عرضی جوش‌های انجام شده را نشان می‌دهد. مقایسه مقدار نفوذ در این نمونه‌ها بیانگر نفوذ بالا و حتی بیشتر از ضخامت، معادل 49/7 میلی‌متر، در استفاده از پودر SiO_2 است. البته با توجه به اینکه در جوشکاری این نمونه‌ها از فلز پرکننده استفاده نشده است و همچنین با توجه به مسطح بودن گرده جوش در مقطع برش، این نفوذ اضافه می‌بایست از مقاطع قبلی جوش و به دلیل سیالیت بالای مذاب در استفاده از این پودر اکسیدی باشد.

با توجه به ظاهر این جوش در شکل(3-د)، این امر دور از ذهن نیست چرا که در مقاطعی از جوش این نمونه، تقعر در سطح گرده جوش مشخص است. در نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از پودرهای اکسیدی MoO_3 و CuO، نفوذ کامل اتفـاق افتاده است که کمی بیشتر از ضخامت ورق می‌باشد، ولی نسبت به SiO_2 قابل قبول تر است. در نمونه جوشکاری شده با تیگ مرسوم، شکل(3-الف)، همانطور که انتظار می‌رفت حداقل نفوذ که حدود 97/2 میلی‌متر است، اتفاق افتاده است. در شکل(4) نمودار تغییرات نفوذ در نمونه‌ها با استفاده از پودر فلاکس‌های مختلف در مقایسه با تیگ مرسوم آورده شده است.

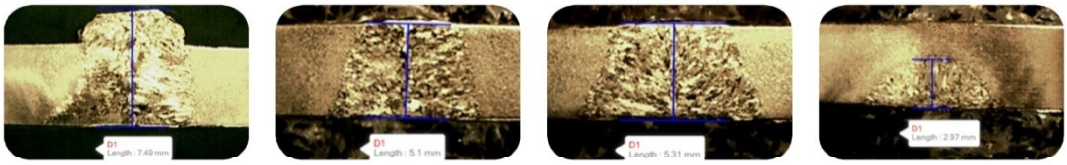


شکل2- سطح جوش نمونه‌ها الف-تیگ مرسوم ب- نمونه CuO ج-نمونه MoO_3 د-نمونه SiO_2.

لازم به ذکر است که مقدار پیچش جوش به عوامل زیادی مانند عمق نفوذ و شکل گرده جوش بستگی دارد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.8.6]

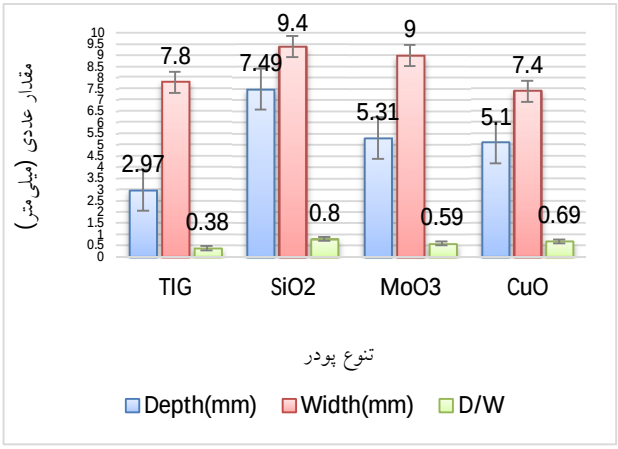


شکل3- عمق نفوذ جوش نمونه‌ها الف- تیگ مرسوم ب- نمونه MoO3 ج- نمونه CuO د- نمونه SiO2

همچنین نسبت عمق به عرض در جوش یکی از پارامترهای اثرگذار بر مقدار پیچیدگی جوش است [14]. هر چقدر این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد تنش پسماند کمتری در جوش ایجاد می‌گردد [5]. در نمودار شکل(4)، نسبت عمق به عرض در نمونه‌های مختلف جوشکاری شده، با یکدیگر مقایسه گردیده است. طبق این نمودار پودر SiO_2 با توجه به نفوذ 49/7 میلی‌متری آن و با عرض جوشی در حدود 4/9 میلی‌متر، بالاترین نسبت عمق به عرض، با مقدار 8/0 را دارا بوده است. نمونه‌های CuO و MoO_3 به ترتیب با عمق نفوذهای 1/5 و31/5 میلی‌متر و عرض جوش‌های 49/7 و 9 میلی‌متر، و با نسبت عمق به عرض 69/0 و 59/0 در رتبه‌های بعدی قرار داشتند. همانطور که انتظار می‌رفت تیگ مرسوم با نفوذ 97/2 میلی‌متری و عرض جوش 8/7 میلی‌متر و نسبت عمق به عرض 38/0 کمترین مقدار را دارا بود.

3-3- بررسی ریزساختاری

شکل(5) تصویر ریزساختار فلزپایه 17-4PH در شرایط آنیل انحلالی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد. با توجه به اینکه این فولاد از نوع زنگ نزن پیر سخت شونده مارتنزیتی است، ساختار پایه آن مارتنزیت می باشد. در بین این ساختار مارتنزیتی، رگه هایی از فریت دلتا که از مراحل اولیه انجماد باقی‌مانده است، قابل مشاهده است. انجماد در این فولاد به صورت فریت دلتا اولیه صورت می‌گیرد. در ادامه انجماد این فریت دلتا اولیه، به آستنیت تبدیل می‌گردد. در این مرحله و با توجه به نرخ سرد شدن، احتمال اینکه مقداری از فریت دلتا اولیه به آستنیت استحاله نیابد وجود دارد. در ادامه سرد شدن و با وارد شدن به محدوده M_s آستنیت به مارتنزیت استحاله یافته و مابقی فریت دلتا در ساختار باقی می‌ماند. پراکندگی این رگه‌های فریت دلتا در فلزپایه الگوی خاصی نداشته و همانطـــور که در منابع مختلف [9, 12, 15-17] آورده شـــده، می‌توان امتداد آن را در راستای نورد مشاهده کرد.



شکل4- نمودار مقایسه عمق نفوذ، عرض جوش و نسبت عمق به عرض نمونه‌ها.

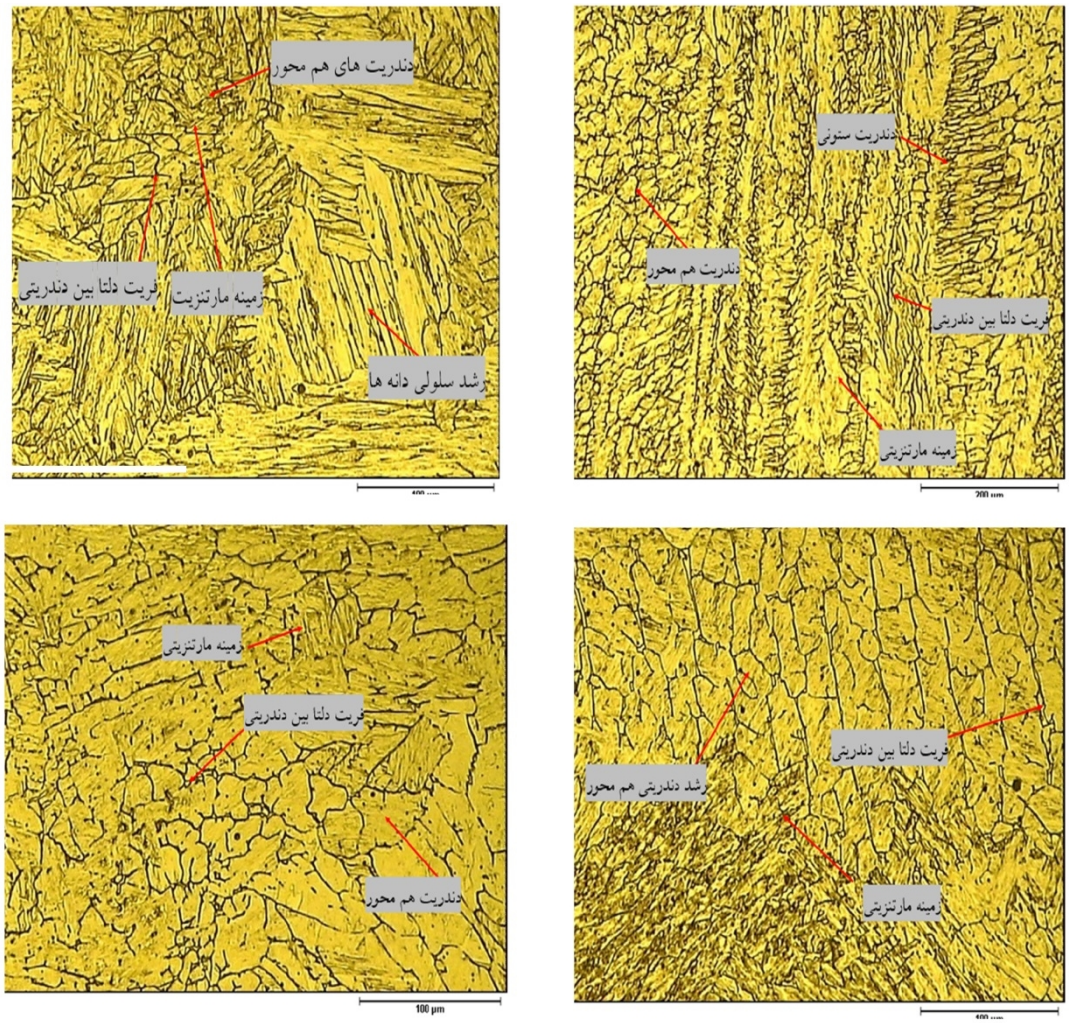


شکل5- ریزساختار فلزپایه 17-4PH.

شکل‌های(6و7) ریز ساختار فلزجوش و منطقه متأثر از حرارت در نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد. ساختار فلزجوش در نمونه‌های جوشکاری شده با پودر فلاکس مختلف، تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته و به صورت دندریتی با حضور فریت دلتا در بین دندریت‌ها به چشم می‌خورد. استفاده از فلاکس‌های اکسیـدی در جوشکاری تیگ فعال تاثیر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.8.6]

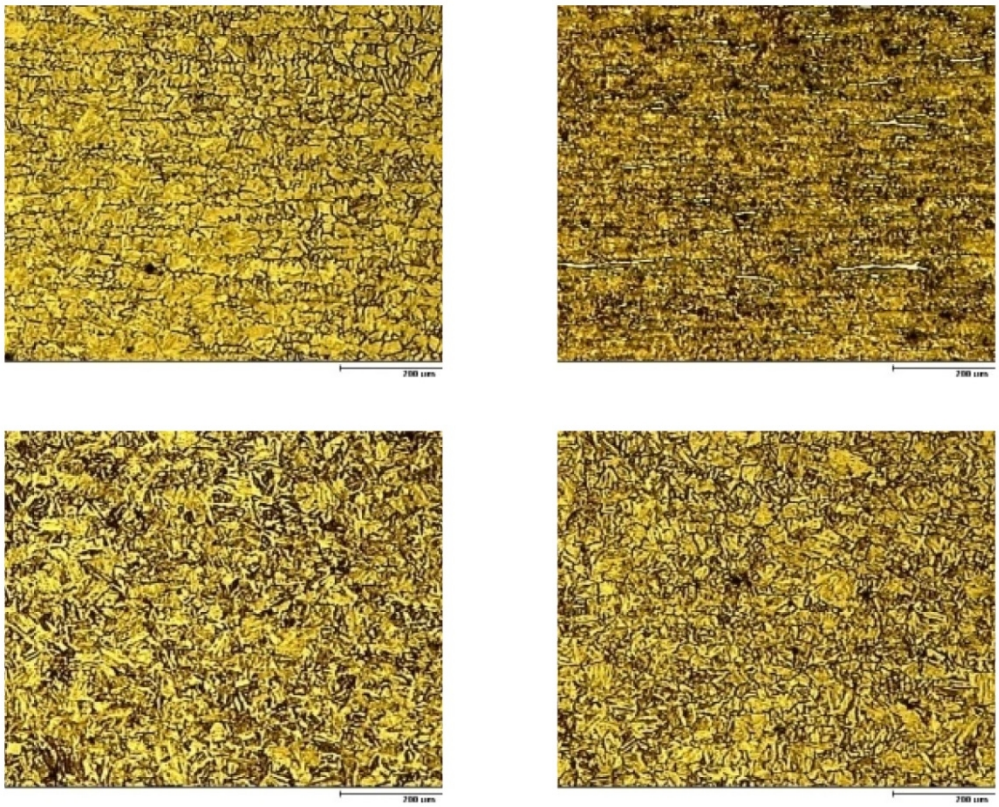


شکل6- منطقه جوش نمونه‌ها الف- تیگ مرسوم ب- پودر CuO ج- پودر MoO_3 د- پودر SiO_2.

زیادی بر ریزساختار جوش نمی گذارد و با توجه به تأثیر آن بر متمرکز کردن منبع حرارتی، بیشتر بر میزان نفوذ در جوش تأثیرگذار است که این موضوع مطابق با سایر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌باشد [7, 18]. تنها تفاوت در شکل جوش تیگ و تیگ فعال، تغییر در جهت گیری دانه ها بود، که علت آن را می توان تفاوت در جهت‌های انتقال حرارت دانست. در هر دو نوع جوش، دانه‌های کریستالی در جهت گرادیان دمایی شکل گرفته اند، اما در جوشکاری تیگ این جهت گیری در جهت گرده به ریشه است. در حالی‌که در تیگ فعال، دانه‌ها در جهت عمود بر ضخامت ورق شکل گرفته اند. دانه‌ها در جوش تیگ کوچک هستند و ساختار دندریتی دارند ولی در جوش تیگ فعال دانه‌های بزرگتر در مرکز جوش شکل گرفته اند و با دانه‌های درون کریستالی احاطه شده اند که از دانه‌های فلزپایه بزرگترند.

ساختار منطقه متأثر از حرارت در ناحیه چسبیده به جوش به صورت مارتنزیت لایه‌ای می‌باشد. با افزایش فاصله از مرز جوش این ساختار به صورت مارتنزیتی با دانه‌های درشت به چشم می‌خورد. با توجه به اینکه دما در این ناحیه به بالای 132 درجه، که دمای شروع استحاله مارتنزیت در این فولاد است و همچنین دمای 580 درجه، که دمای دوفازی آستنیت و فریت دلتا این فولاد است، رسیده [15, 16, 19]، احتمال تبدیل مقداری از فریت دلتا به آستنیت وجود داشته که در ادامه باعث کاهش کسر حجمی فریت دلتا در این ناحیه گردیده است. اگرچه با فاصله گرفتن ازحوضچه‌جوش و کاهش‌دما این استحاله

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.8.6]



شکل 7- منطقه متأثر از حرارت جوش الف- تیگ مرسوم ب- CuO ج-MoO_3 د-SiO_2.

کاهش می‌یابد. تا جایی‌که در انتهای منطقه متأثر از حرارت ساختار دانه ریزتری از مارتنزیت به چشم می‌خورد. در نواحی منطقه متأثر از حرارت مرزهایی وجود دارد که ساختار مارتنزیت در داخل آن شکل گرفته و فریت دلتا باقی‌مانده نیز در نواحی مرزی آن به چشم می‌خورد. این نواحی در واقع دانه‌های اولیه آستنیت هستند که در حین سرد شدن و به دلیل نرخ سرد شدن بالا در این ناحیه تشکیل شده اند و به مارتنزیت تبدیل شده‌اند.

3-4-میکروسختی

در شکل(8) پروفیل میکروسختی نمونه‌های جوشکاری شده با پودرهای مختلف در مقایسه با جوش تیگ مرسوم آورده شده است. سطح سختی در نمونه‌های جوشکاری شده با پودرهای اکسیدی نسبت به نمونه جوش تیگ مرسوم کمی پایین‌تر بود. در نمونه‌های جوشکاری شده با پودر اکسیدی سختی نمونه‌ها بسیار نزدیک به سختی فلزپایه بود و تغییر چندانی نداشت. این امر به دلیل تمرکز حرارتی بالا در این فرایند است که از گرم شدن بیش از حد نمونه و در نهایت سخت شدن آن در حین سرد شدن بعدی جلوگیری می‌کند. البته شایان ذکر است که این فولاد عمده سختی خود را پس از پیرسازی بدست می‌آورد و در حالت آنیل انحلالی و پس از جوشکاری تفاوت فاحشی از لحاظ سختی وجود ندارد. لذا این کمتر بودن سختی نقیصه محسوب نمی‌گردد.

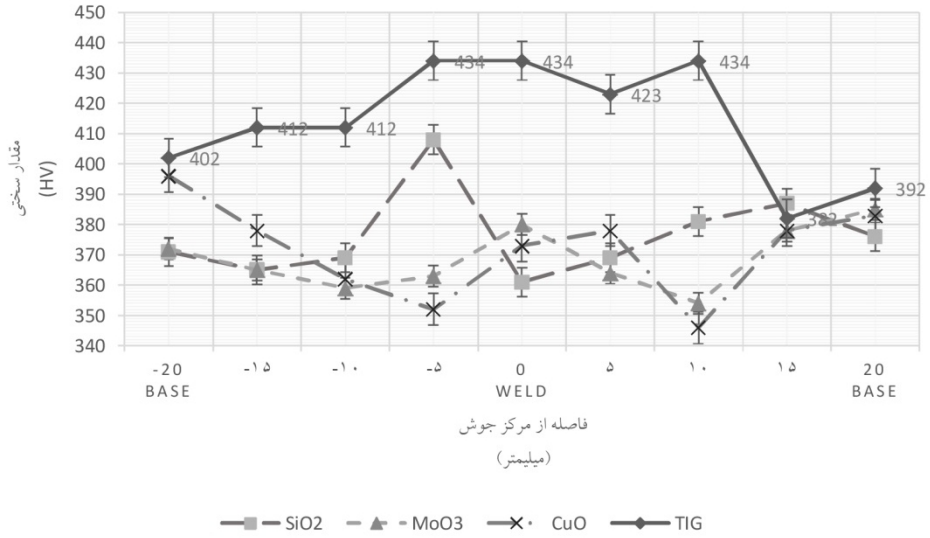
4- نتیجه گیری

در این تحقیق نمونه‌هایی از جنس فولاد 17-4PH با ضخامت 5 میلی‌متر با استفاده از پودرهای SiO_2، CuO و MoO_3 جوشکاری گردید و نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج زیر پس از مقایسه حالت‌های مختلف جوشکاری بدست آمد:

- استفاده از پودرهای اکسیدی سبب افزایش نفوذ جوش در این فولاد تا 2 برابر در مقایسه با تیگ مرسوم می‌گردد.
- استفاده از پودر فلاکس SiO_2 سبب بالا رفتن سیالیت مذاب در این فولاد شده و سطح جوش نامرغوبی را حاصل می‌کند. پودر فلاکس MoO_3 نفوذی معادل 3/5 میلی‌متر داشت اما در

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.8.6]



شکل8- پروفیل میکروسختی نمونه‌های جوشکاری شده با پودرهای مختلف در مقایسه با جوش تیگ.

کناره‌های جوش در تمام طول آن آخال‌های اکسیدی بوجود آمده بود. پودر فلاکس CuO نفوذ کامل و معادل 1/5 میلی‌متر داشته و در مقایسه با دو پودر دیگر ظاهر مناسب‌تر و کم عیب‌تری حاصل نموده است.

- ریزساختار جوش در نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از پودر فلاکس تفاوت چندانی با جوش تیگ مرسوم نداشته و تنها تفاوت آن در جهت‌گیری انجماد کریستال‌های آن‌ها بود.

- بررسی پروفیل میکروسختی نمونه‌های جوشکاری شده نشان داد که استفاده از پودر فلاکس سبب کاهش سختی فلزجوش از 434 به 361 ویکرز در مقایسه با تیگ مرسوم می‌گردد.

منابع

1-Kou, S., Welding metallurgy. New Jersey, USA, 2003. 431(446): p. 223-225.
2-Vidyarthy, R. and D. Dwivedi, Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration. Journal of Manufacturing Processes, 2016. 22: p. 211-228.
3-Gurevich ,S., V. Zamkov, and N. Kushnirenko, Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten arc process. Automat Weld, 1965. 18(9): p. 1-5.
4-Singh, S.R. and P. Khanna, A-TIG (activated flux tungsten inert gas) welding:–A review. Materials Today: Proceedings, 2021. 44: p. 808-820.
5-Tseng, K.-H. and C.-Y. Hsu, Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds. Journal of Materials Processing Technology, 2011. 211(3): p. 503-512.
6-Huang, H., et al., Evaluation of TIG flux welding on the characteristics of stainless steel. Science and Technology of Welding and Joining, 2005. 10(5): p. 566-573.
7-Modenesi, P.J., E.R. Apolinario, and I.M. Pereira, TIG welding with single-component fluxes. Journal of materials processing technology, 2000. 99(1-3): p. 260-265.
8-Chern, T.-S., K.-H. Tseng, and H.-L. Tsai, Study of the characteristics of duplex stainless steel activated tungsten inert gas welds. Materials & Design, 2011. 32(1): p. 255-263.
9-Lippold, J.C. and D.J. Kotecki, Welding metallurgy and weldability of stainless steels. 2005.
10-Das, C., et al., Weldability of 17-4PH stainless steel in overaged heat treated condition. Science and Technology of Welding and Joining, 2006. 11(5): p. 502-508.
11-Vagi ,J., R.M. Evans, and D.C. Martin, Welding of precipitation-hardening stainless steels. Vol. 5087. 1968: National Aeronautics and Space Administration.
12-Balajaddeh, M.B. and H. Naffakh-Moosavy, Pulsed Nd: YAG laser welding of 17-4 PH stainless steel: Microstructure, mechanical properties, and weldability investigation. Optics & Laser Technology, 2019. 119: p. 105651.
13-Venkatesan, G., et al., Effect of ternary fluxes on depth of penetration in A-TIG welding of AISI 409 ferritic stainless steel. Procedia Materials Science, 2014. 5: p. 2402-2410.
14-Huang, H.-Y., Research on the activating flux

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.8.6]

and shielding gas. Materials and Manufacturing Processes, 2016. 31(3): p. 335-342.
18-Ramkumar, K.D., et al., Studies on the structure–property relationships and corrosion behaviour of the activated flux TIG welding of UNS S32750. Journal of Manufacturing Processes, 2016. 23: p. 231-241.
19-Ziewiec, A., A. ZieliŃska-Lipiec, and E. Tasak, Microstructure of welded joints of X5CrNiCuNb16-4 (17-4 PH) martensitic stainlees steel after heat treatment. Archives of metallurgy and materials, 2014. 59.
gas tungsten arc welding and plasma arc welding for stainless steel. Metals and Materials International, 2010. 16(5): p. 819-825.
15-Liu, W., et al., Hybrid laser-arc welding of 17-4 PH martensitic stainless steel. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2015. 2(2): p. 74-90.
16-Ma, J., et al., Laser-based welding of 17-4 PH martensitic stainless steel in a tubular butt joint configuration with a built-in backing bar. Optics & Laser Technology, 2016. 82: p. 38-52.
17-Tathgir, S. and A. Bhattacharya, Activated-TIG welding of different steels: influence of various flux

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.8.6]