نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره2، پاییز و زمستان1398، صفحه 50-39

مطالعه ریزساختار و ریزسختی جوش فولاد زنگ نزن AISI 316 L جوشکاری شده به روش FB-TIG , A-TIG ,TIG

نگار رحیمی، توحید سعید *

دانشکده مهندسی مواد- دانشگاه صنعتی سهند

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۳۱ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۷)

چکیده

در این تحقیق تغییرات عمق نفوذ و ریزساختار و ریزسختی جوش فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶ L در سه حالت TIG، A-TIG و FB-TIG مطالعه و با یکدیگر مقایسه شد. پس از انتخاب فلاکس بهینه تأثیر آن بر عمق نفوذ، ریزساختار و میکروسختی جوش فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶ L جوشکاری شده به روش‌های A-TIG و FB-TIG بررسی و با نمونه TIG مقایسه شد. مشاهده شد عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض در روش FB-TIG نسبت به دو روش دیگر اندکی بیشتر است. همچنین در روش A-TIG در خط مرکزی جوش وسعت دندریت‌های هم محور مرکزی نسبت به روشFB-TIG کاهش یافته است. بررسی میکروسختی این سه نمونه نشان داد که سختی خط مرکزی جوش در A-TIG و FB-TIG بیشتر ازTIG است.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶L ، A-TIG، FB-TIG، عمق نفوذ، ریزساختار، میکروسختی.

Study of microstracture and microhardness of welded AISI 316L austenic stainless steel by TIG, A-TIG and FB-TIG methods

N. Rahimi, T. Saeid*

Faculty of Materials Engineering Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

(Received 21 June 2018 ; Accepted 18 November 2018)

Abstract

In this study the effect of activating fluxes on the penetration depth, microstructure and mechanical properties of AISI316L austenitic stainless steel were evaluated by three TIG process variations (TIG, A-TIG and FB-TIG) and the results were compared together.. After selecting the optimal flux in the second stage, the effect of that on the penetration depth, microstructure and weld microhardness of welded 316L austenitic stainless steel by A–TIG and FB-TIG methods, were evaluated and the results were compared by the sample which was welded by TIG process. At this stage, it was found that the depth and width to depth ratio in FB-TIG method is slightly greater than the other two methods. Also in FB-TIG method, eqiaxed dendritic zone in the center line of weld is slightly greater than in A-TIG method. Study of microhardness of weld in three methods shows that in A-TIG and FB-TIG methods hardness of center line is more than TIG method.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: saeid@sut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

Keywords: AISI 316L austenitic stainless steel, A-TIG, FB-TIG, Penetration depth, Microstructure, Microhardness.

1- مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن گروه وسیع و گستردهای از آلیاژهای ویژه‌اند که برای مقاومت در برابر خوردگی توسعه یافته اند. از ویژگی‌های دیگر موردنظر برای این آلیاژها شکل پذیری عالی، چقرمگی زیاد در دمای اتاق و دمای پایین و مقاومت خوب در برابر پوسته شدن، اکسایش و خزش در دماهای بالاست [۱]. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، معرف بزرگترین گروه فولادهای زنگ‌نزن هستند و در حجم بالاتری نسبت به سایر گروه‌ها تولید می‌شوند. این فولادها دارای مقاومت به خوردگی خوبی در بیشتر محیط‌ها هستند. در این گروه فاز متالورژیکی غالب آستنیت است. بنابراین نه تنها باید در دمای بالا آستنیتی باشد بلکه آستنیت به وجود آمده باید در دمای محیط و حتی دماهای پایین تر نیز پایدار باشد [۲]. اتصال این فولادها عمدتاً توسط فرآیندهای جوشکاری قوسی با الکترود روکش دار(SMAW)، جوشکاری قوسی با الکترود فلزی تحت حفاظت گاز خنثی (MIG) و جوشکاری با الکترود تنگستنی تحت حفاظت گاز خنثی (TIG) انجام می‌شود. در این میان جوشکاری با الکترود تنگستنی تحت حفاظت گاز خنثی (TIG) به علت حرارت ورودی پایین‌تر، کیفیت بالاتر جوش ایجاد شده از لحاظ متالورژیکی و ظاهری و همچنین خواص مکانیکی مطلوب‌تر ترجیح داده می‌شود. اما عمق نفوذ کم باعث می‌شود که استفاده از آن برای مقاطع ضخیم تر از توجیه اقتصادی محدودی برخوردار باشد. زیرا عمق نفوذ کم باعث نیاز به آماده سازی لبه و فلز پرکننده، انجام جوشکاری چند پاسه و در نتیجه کاهش سرعت تولید برای مقاطع ضخیم میشود. بنابراین حجم وسیعی از تحقیقات، بر روی روش های افزایش عمق نفوذ GTAW متمرکز شده است [۳و۴].

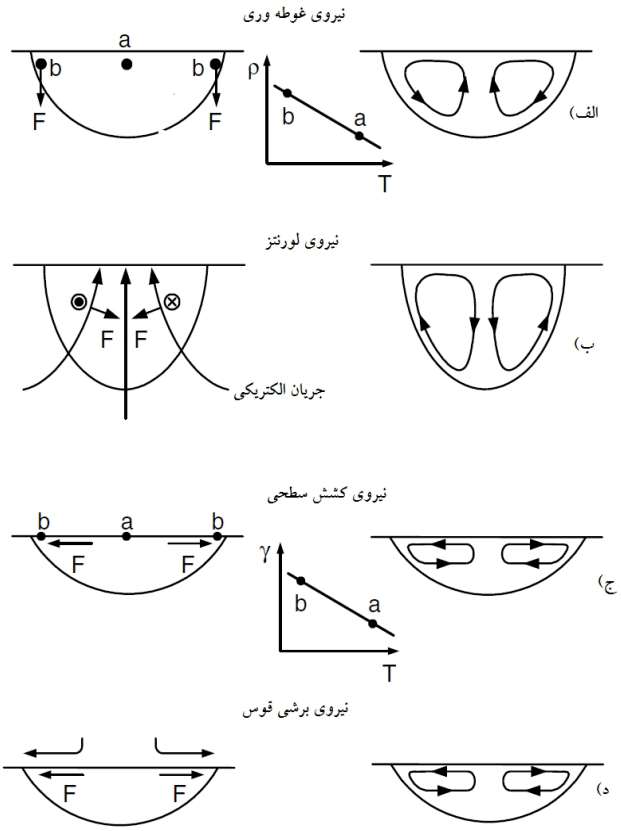
در اوایل دهه ۱۹۶۰ انستیتو جوشکاری پاتون اکراین در راستای تحقیقات انجام شده برای افزایش عمق نفوذ جوش TIG فرآیند جوشکاری (A-TIG) را معرفی کرد. در این روش با استفاده از یک سری مواد افزودنی تحت عنوان فلاکس فعال‌کننده سطحی که قبل از انجام جوشکاری به صورت یک لایه نازک بر سطح کار اعمال می شوند، شرایطی در ستون قوس و حوضچه مذاب ایجاد می شود که منجر به افزایش ۳-۴ برابری در عمق نفوذ جوش TIG معمول می شود. پس از معرفی این روش تحقیقات فراوانی جهت شناسایی مکانیزم های افزایش عمق نفوذ و توسعه بیشتر آن صورت گرفت و نظریاتی در راستای توجیه آن‌ها بیان شد، اما تاکنون محققین به اتفاق نظر کلی در این زمینه نرسیده اند [۵]. یک روش اعمال فلاکس در این فرآیند، به این صورت است که سوسپانسیون تهیه شده از فلاکس فعال به صورت دو باند موازی در دو طرف محل جوشکاری اعمال می‌شود که به جوشکاری تیگ محدوده شده با فلاکس (FB-TIG) معروف شده است، که برای نخستین بار در سال ۲۰۰۲ توسط سیره و ماریا معرفی شد. این روش میتواند دارای مزایایی چون پایداری بیشتر قوس، کاهش حساسیت عمق نفوذ به تغییرات ضخامت فلاکس، کاهش سرباره تشکیل شده بر روی گرده جوش و در نتیجه ظاهر سطحی و کیفیت متالورژیکی مناسبتر باشد. . اعتقاد براین است که در این روش به دلیل ایجاد یون های منفی در قوس و مقاومت الکتریکی دو باند فلاکس، جریان الکترون های قوس به سمت ناحیه بدون فلاکس میانی هدایت می‌شود. هدایت الکترون ها به سمت ناحیه بدون فلاکس میانی منجر به افزایش چگالی توان در قوس و در نتیجه افزایش عمق نفوذ جوش میشود. همچنین انقباض قوس اجباری ایجاد شده هنگام استفاده از فلاکس های با مقاومت الکتریکی و نقطه ذوب بالا می تواند منجر به کاهش پهنای جوش شود [۶و۷].

بنابه تعریف صورت گرفته توسط بسیاری از مولفین و محققین، حرکت سیال (فلز مذاب حوضچه جوش) توسط جابجایی به طور عمده بر اثر نیروهای خارجی است. این نیروها هم می‌توانند از داخل و هم از خارج حوضچه جوش وارد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

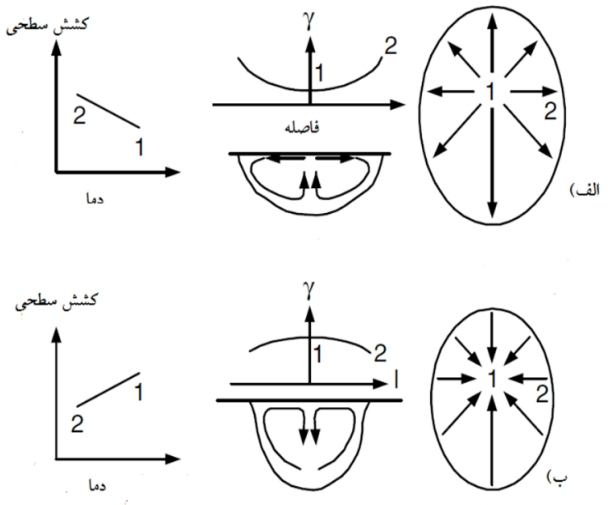
شوند. نیروهای موثر بر جریان سیال در حوضچه جوش را که تاثیر بسزایی در نحوه حرکت جریان دارند، مطابق شکل(۱) می‌توان به صورت ذیل تقسیم نمود [۸و۹].

- نیروی غوطه وری
- نیروی لورنتز یا الکترومغناطیس
- نیروی تنش برشی سطح حوضچه ناشی از گرادیان کشش سطحی (نیروی مارانگونی)
- نیروی تنش برشی سطح حوضچه ناشی از قوس



شکل ۱- نیروهای موثر بر جریان سیال حوضچه جوش: الف) نیروی غوطه وری، ب) نیروی لورنتز، ج) تنش برشی ناشی از گرادیان کشش سطحی و د) تنش برشی ناشی از پلاسمای قوس [۹].

تمامی این نیروها به غیر از نیروی مارانگونی یا کشش سطحی جزء نیروهای خارجی محسوب می‌شوند. در غیاب عناصر فعال سطحی، ضریب درجه حرارت کشش سطحی برای اکثر مواد کمتر از صفر است. به عبارت دیگر، هرچه درجه حرارت بالاتر باشد، کشش سطحی کمتر است. از این‌رو در سطح فوقانی جوش، فلز مذاب اصولا به خارج جریان می‌یابد، زیرا فلز گرم‌تر و کشش سطحی کم‌تر نزدیک به مرکز حوضچه بوسیله فلز مذاب خنک تر و کشش سطحی بالاتر در لبه حوضچه به خارج کشیده می‌شود. همانگونه که در شکل (۱-ج) نشان داده شده است فلز مذاب از مرکز سطح حوضچه به لبه جریان می‌یابد و به سمت پایین حوضچه در مرز جامد - مایع حرکت می‌نماید [۱۰]. شکل(۲) تفاوت جریان جابجایی به علت ضریب دمایی کشش سطحی بدون عوامل فعال کننده و در اثر افزودن فعال کننده را نشان می دهد.



شکل۲- الگوهای متفاوت جریان جابجایی به علت ضریب دمایی کشش سطحی گوناگون: الف) بدون عوامل فعال کننده و ب) الگوی ایجاد شده بر اثر افزودن عوامل فعال کننده سطحی [۹].

بنابراین مکانیزم های عملکرد مواد افزودنی در جوشکاری A-TIG باید در راستای تقویت نیروهایی باشند که باعث ایجاد جریان مذاب به سمت مرکز و عمق حوضچه می‌شوند. تحقیقات انجام شده در مراکز پژوهشی اکثر نقاط جهان، تا به امروز منجر به معرفی دو مکانیزم در مورد توجیه افزایش عمق نفوذ جوش با استفاده از فلاکسهای فعال‌کننده سطحی شده است که یکی تأثیر بر فیزیک قوس شامل انقباض قوس، کاهش اندازه نقطه آندی، افزایش چگالی انرژی، دما و ولتاژ قوس و دیگری تأثیر بر شیمی سطح مذاب که باعث تغییر در مقدار و جهت نیروی کشش سطحی به سمت مذاب می‌شود. انقباض قوس و کاهش اندازه نقطه آندی می‌تواند باعث تقویت نیروی لورنتز و فشار قوس شود. تغییرات کشش سطحی نیز

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

می‌تواند به صورت کاهش کشش سطحی ظاهر شود که باعث افزایش اثر فشار قوس می‌شود و یا این که می‌تواند به صورت تغییر در جهت نیروی کشش سطحی به سمت مرکز و ایجاد جریان مارانگونی معکوس باشد [۱۱و۱۲].

بطور کلی مجموعه مطالعاتی که توسط ونگ شیو، سنگ، چرن در زمینه اثر انواع فلاکس‌های فعال کننده سطحی از جمله SiO_2و TiO_2 بر روی عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض جوش فولادهای زنگنزن آستنیتی صورت گرفته است، مشاهده می‌شود که همه آن‌ها در مورد تمرکز قوس و کاهش اندازه نقطه آندی به عنوان مکانیزم غالب افزایش عمق نفوذ در هنگام استفاده از فلاکس SiO_2 و ایجاد جریان مارانگونی معکوس به عنوان مکانیزم غالب افزایش عمق نفوذ در استفاده از فلاکس TiO_2 اتفاق نظر جمعی دارند.

همچنین در مطالعه مینگ بیان شده است که میانگین ولتاژ قوس در استفاده از فلاکس SiO_2 بطور چشمگیری افزایش می‌یابد در حالیکه در فلاکس TiO_2 میانگین ولتاژ قوس حتی کمتر از حالت بدون فلاکس می‌باشد. دلیل این پدیده مقاومت الکتریکی بالای SiO_2 بیان شده است. در تحقیق انجام شده توسط شیو و سنگ که هر دو آنها به بررسی اثر انواع فلاکس‌های اکسیدی بر روی جوش فولاد زنگنزن آستنیتی پرداخته‌اند، به این نتیجه رسیده اند که فلاکسAl_2O_3 باعث بدتر شدن عمق نفوذ شده است که علت عملکرد ضعیف آن پایداری بالای آن بیان شده است. که به این دلیل قادر به تمرکز قوس و کاهش اندازه نقطه آندی نیست [۱۳-۱۶].

تحقیق سیره و همکارانش در سال ۲۰۰۲ پیرامون معرفی فرآیند FB-TIG و بررسی شرایط فیزیکی اتفاق افتاده در فرآیند بود. این گروه تحقیقاتی، بیشتر تمرکز خود را بر روی ساز و کارهای فرآیند قرار دادند و تحقیق خود را تنها با یک فلاکس (SiO_2) و در سه فاصله شکاف ۳، ۴ و ۹ میلیمتر انجام دادند.

این گروه سازوکارهایی برای افزایش عمق نفوذ جوش در فرآیند پیش‌بینی کردند که در نهایت آن‌ها به این نتیجه رسیدند که انقباض و محدود شدن قوس و افزایش ولتاژ که به صورت تجربی در این تحقیق مشاهده شد، توصیف خوبی برای توضیح افزایش نفوذ جوش در فرآیند FB-TIG می باشد[۷].

با توجه به کاربردهای فراوان فولاد L ۳۱۶ در صنایع مختلف و حجم بسیار زیاد جوشکاری این فولادها و با توجه به مجموعه تحقیقات مطرح شده دربخشهای پیشین مشخص است که روشهای جوشکاری A-TIG و FB-TIG به دلیل بهبود در عمق نفوذ و پهنای جوش دارای پتانسیل بالایی برای جایگزینی با روش TIG معمول می باشند. بیشتر تحقیقات پیشین به بررسی خواص ظاهری جوش مثل عمق نفوذ جوش و یا عمق به عرض جوش پرداخته اند. در این تحقیق هدف بررسی بیشتر خواص ریزساختاری و مکانیکی در فرآیندهایTIG ، A-TIG و FB-TIG و مقایسه آنها با یکدیگر می‌باشد.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش به مقایسه ریزساختار و ریزسختی جوش فولاد زنگ نزن L ۳۱۶ جوشکاری شده به روش هایA-TIG، FB-TIG و TIG پرداخته شده است. در مرحله اول اثر دو نوع فلاکس SiO_2 و TiO_2 بر عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض جوش فولاد زنگنزن ۳۱۶L در روشهای A-TIG و FB-TIG بررسی شد. سپس با توجه به نتایج سنجش نسبت عمق به عرض جوشهای مرحله اول، فلاکس بهینه انتخاب گردید. پس از انتخاب فلاکس SiO_2 بعنوان فلاکس بهینه، در مرحله دوم فلاکس با چگالی بهینه و مشخص بر روی دو نمونه از ورق‌های فولادی اعمال شد و سپس این دو نمونه با دو روش A-TIG و FB-TIG جوشکاری شدند. در نهایت نیز نمونه ای با روش TIG با پارامترهای ثابت جوشکاری شد. سپس ریزساختار و خواص مکانیکی جوش سه نمونه جوشکاری شده در مرحله دوم مورد بررسی قرار گرفت. لازم بذکر است در هردو مرحله ولتاژ قوس توسط دستگاه ولت متر اندازه گیری شد. همچنین پارامترهای جوشکاری از جمله شدت جریان، طول قوس، سرعت جوشکاری و دبی گاز محافظ در تمام مراحل ثابت بود.

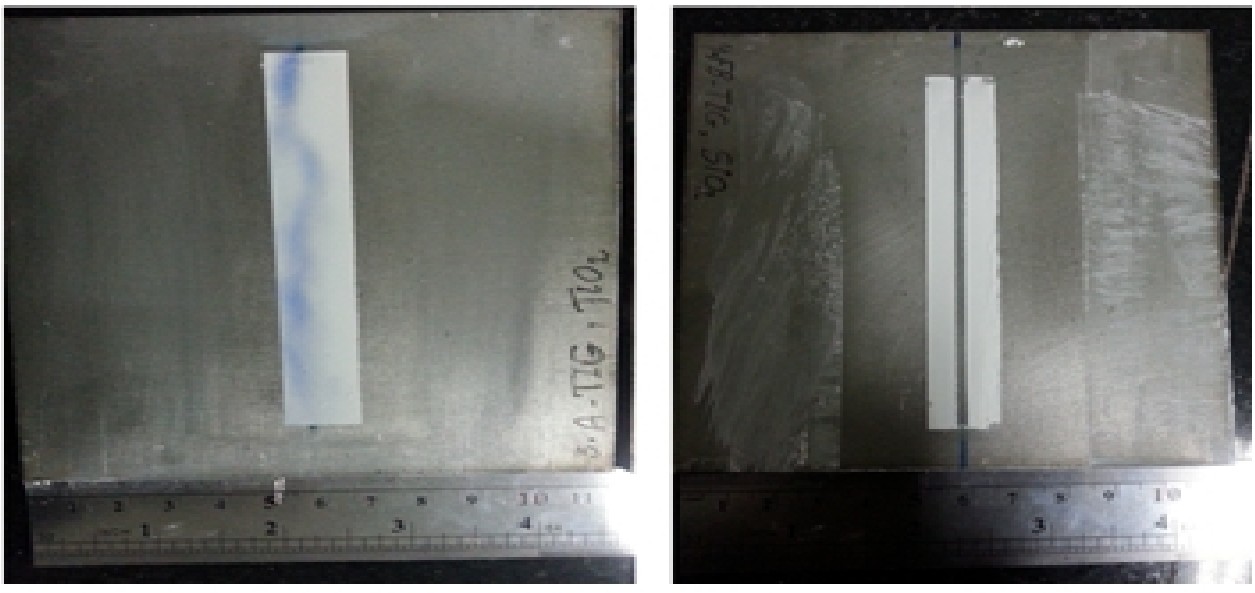
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

از ورق‌های فولاد زنگنزن L ۳۱۶ به ابعاد mm ۶×۱۰۰×۱۰۰ استفاده شد.. از پودرهای اکسیدی شامل اکسید سیلسیم (SiO_2) و اکسید تیتانیم (TiO_2) به عنوان فلاکس تک جزیی استفاده شد. برای تهیه سوسپانسیون فلاکس فعال از الکل صنعتی با خلوص ۹۷٪ به عنوان فاز مایع استفاده شد. سوسپانسیون حاصل با قلم مو بر سطح قطعه کار اعمال گردید. شکل(۳) نمایی از فلاکس اعمالی را نشان میدهد. گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ ٪ نیز به عنوان گاز محافظ در حین جوشکاری به کار گرفته شد. از فرآیند جوشکاری قوسی با الکترود تنگستن تحت حفاظت گاز خنثی (GTAW) استفاده شد. اجرای جوش‌ها به طور اتوماتیک و به صورت بدون درز روی یک میز متحرک با قابلیت تنظیم سرعت حرکت صورت گرفت. دستگاه جوشکاری مورد استفاده مدل PSQ 250 AC/DC ساخت شرکت گام الکتریک بود.

جهت اندازه گیری عمق نفوذ (D) و پهنای جوش ها (W) و بررسی ریزساختار جوش پس از اجرای هر مرحله از روش‌های متالوگرافی استفاده شد. به این صورت که از نمونه های جوش داده شده توسط کاتر مقاطع عرضی تهیه شد و پس از سنباده زنی تا مش ۸۰۰، توسط اچ ماربل با ترکیب (10g $CuSO_4$+50 mL H_2O + 50mL HCl) ۵۰ میلی لیتر اسید کلریدریک، ۵۰ میلی لیتر آب مقطر و ۱۰ گرم سولفات مس به مدت ۳۰–۲۰ ثانیه حکاکی (ماکرو اچ) شدند. ابتدا مقطع ماکرواچ شده جهت اندازه گیری عمق و عرض جوش مورد مطالعه قرار گرفت. سپس برای بررسی های ریزساختاری سطح نمونه ها ابتدا تا سنباده ۲۵۰۰ هموار و با پودر آلومینا ۰/۳ میکرون و آب و صابون پولیش شد. سپس توسط محلول اچ با ترکیب ۵۰ درصد آب و ۵۰ درصد اسید نیتریک (HNO_3 50% + H_2O 50%) به مدت ۱۰–۸ ثانیه با اعمال جریان ۰/۵–۰/۴ آمپر الکترواچ شدند و با میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مقایسه سختی نواحی مختلف جوش‌های مرحله سوم و ترسیم پروفیل سختی هریک از نمونه‌ها جهت مقایسه تغییرات سختی در هریک از نمونه‌ها از آزمون میکروسختی استفاده شد. سختی نمونه‌ها با اعمال ۲۰۰gr.f بار و به مدت ۱۵ ثانیه توسط دستگاه سختی سنجی M-400-G1 ساخت شرکت لکو صورت گرفت .

3- نتایج و بحث

ابتدا نتایج حاصل از بررسی عمق نفوذ و پهنای جوش‌های اجرا



الف ب

شکل۳- نمایی از فلاکس اعمال شده، الف) FB-TIG، ب) A-TIG

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

شده طی مرحله اول آورده شده و مورد بحث قرار گرفته است. سپس نتایج حاصل از تاثیر چگالی سطحی فلاکس بر ریزساختار، عمق نفوذ و پهنای جوش های اجرا شده در مرحله دوم ارائه شده است. در نهایت به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوشهای مرحله سوم پرداخته شده است .

3-1- نتایج مرحله اول

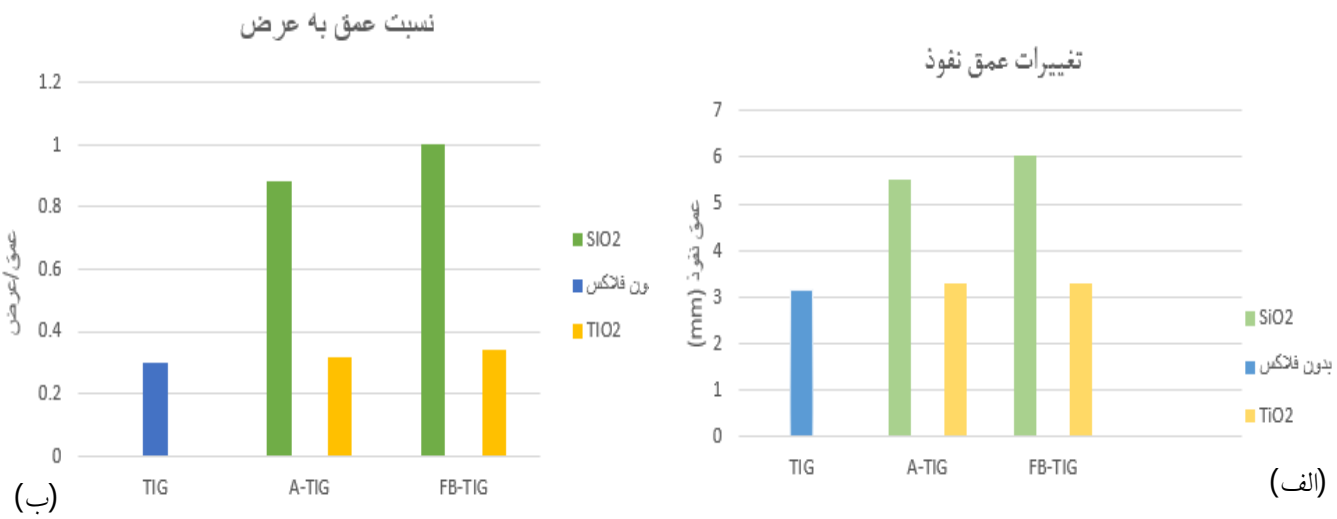
همانطور که در بخش قبل اشاره شد در مرحله نخست از انجام آزمایش‌ها اثر دو نوع فلاکس SiO_2 و TiO_2 در دو روش A-TIG و FB-TIG بررسی شد. به طوری‌که پس از انتخاب چگالی سطحی ۶-۵ mg/cm^2 با توجه به منابع و مطالعات پیشین هر یک از فلاکس‌ها مطابق روش مذکور در بخش پیشین بر روی قطعات اعمال شد و سپس جوشکاری بر روی این قطعات اجرا گردید.

3-2-تأثیر فلاکس‌ها بر عمق نفوذ

نتایج حاصل از مقایسه عمق نفوذ و پهنای جوشهای ایجاد شده به روش های TIG ، A-TIGو FB-TIG با استفاده از دو نوع فلاکس مذکور در قالب نمودارهای ستونی در شکل(۴) نشان داده شده است .

همانطور که در شکل(۴) مشاهده می‌شود هر دو فلاکس اثر متفاوتی بر عمق نفوذ و پهنای جوش‌ها می‌گذارند. بیشترین اثر مربوط به فلاکس SiO_2 است که باعث افزایش ۱/۷ برابری در عمق نفوذ شده است. در حالیکه فلاکس TiO_2 تاثیر چندانی بر عمق نفوذ نداشته است. همچنین بیشترین نسبت عمق به عرض (D/W) نیز توسط فلاکس SiO_2 ایجاد شده که نسبت به حالت بدون فلاکس ۲/۹ برابر شده است .

در روش FB-TIG نیز اثرهای متفاوتی هنگام استفاده از دو فلاکس مشاهده شده است. بیشترین عمق نفوذ و بیشترین نسبت عمق به عرض جوش مربوط به فلاکس SiO_2 است که نسبت به حالت بدون فلاکس به ترتیب ۱/۹ و ۳/۳ برابر شده است. مجدداً فلاکس TiO_2 تاثیر چندانی بر عمق نفوذ نداشته است و مقدار نسبت عمق به عرض ۱/۱ برابر شده است. موضوع دیگری که باید به آن توجه شود این است که هنگام استفاده از فلاکس SiO_2 چه در حالت A-TIG و چه در حالت FB-TIG جوش‌هایی با پهنای کمتری نسبت به فلاکس TiO_2 ایجاد شده است که در حالت FB-TIG این پهنای کم مشهودتر است. این امر باعث شده است که برای فلاکس SiO_2 نسبت عمق به عرض بیشتری در روش FB-TIG حاصل شود. این تغییرات در هندسه جوش‌ها ناشی از انجام یک سری ساز و کارها در قوس و حوضچه جوش است. حال با این دیدگاه که در روش‌های A-TIG و FB-TIG معکوس شدن جهت جابجایی مارانگونی و کاهش اندازه نقطه آندی که منجر به افزایش چگالی انرژی، دما و ولتاژ می‌شود، دو مکانیزم توجیه‌کننده



شکل۴- نمودارهای مقایسه الف) عمق نفوذ و ب) نسبت عمق به عرض نمونه های مرحله اول

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

مکانیزم توجیه کننده افزایش نسبت عمق به عرض جوش می‌باشد. به تحلیل نتایج حاصل می‌پردازیم [۱۷].

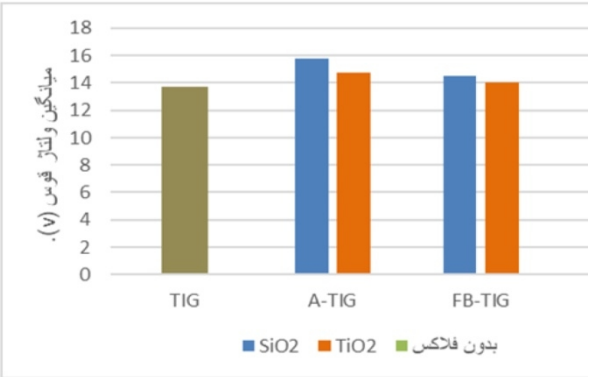
پهنای کمتر جوش‌های ایجاد شده با فلاکس SiO_2 را میتوان به انقباض ریشه قوس که ناشی از مقاومت الکتریکی بالاتر این فلاکس است نسبت داد. همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد به نظر می‌رسد که پهنای جوش علاوه بر جابجایی مارانگونی در کنترل میزان محدود شدن یا انقباض قوس نیز باشد فلاکس‌های با مقاومت الکتریکی بالا در سطح قطعه مانند یک عایق الکتریکی عمل می‌کنند. بعد از برقراری قوس الکتریکی، قسمتی از فلاکس که در زیر قوس قرار دارد ذوب و یا تبخیر می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که ناحیه زیر قوس، هدایت الکتریکی بیشتری نسبت به نواحی مجاور که در آنها فلاکس ذوب یا تبخیر نشده، داشته باشد. در چنین شرایطی جریان الکتریکی یا شارش الکترونها به ناچار در ناحیه در مساحت کمتری از سطح قطعه عبور می‌کند که می‌تواند باعث انقباض ریشه قوس شود. انقباض ریشه قوس یا همان نفطه آندی باعث انقباض ستون قوس و کاهش پهنای جوش می‌شود [۱۸].

میزان افزایش ولتاژ قوس در حضور فلاکس‌های مختلف، می‌تواند به عنوان معیاری از میزان مقاومت الکتریکی آنها در نظر گرفته شود. افزایش ولتاژ، به معنی قرار گرفتن یک مقاومت الکتریکی در مسیر عبور جریان است که ناشی از حضور لایه فلاکس است به این ترتیب، اگر فلاکس مورد استفاده به مقدار نسبتا زیادی باعث افزایش ولتاژ قوس شود مفهوم آن این است که مقاومت الکتریکی آن بالاست و می‌تواند طبق مکانیزم بیان شده باعث انقباض ریشه قوس و در نتیجه کاهش پهنای جوش بشود.

در شکل(۵) میانگین ولتاژ قوس برای روش‌های A-TIG و FB-TIGدر حضور دو فلاکس SiO_2 و TiO_2 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میانگین ولتاژ قوس در روش A-TIG و FB-TIG برای فلاکس SiO_2 افزایش یافته است. این در حالیست که برای فلاکس TiO_2 میانگین ولتاژ قوس نسبت به SiO_2 کاهش یافته است. این موضوع نشان دهنده مقاومت الکتریکی بالاتر فلاکس SiO_2 و در نتیجه توانایی بیشتر آن برای انقباض ریشه قوس است. بنابراین دلیل پهنای کمتر جوش در حضور این فلاکس مقاومت الکتریکی بالاتر آن است. این مسئله باعث شده است که حتی در روش FB-TIGبا فلاکس SiO_2 پهنای جوش نسبت به روش A-TIG کمتر شود که دلیل آن هدایت بیشتر جریان الکتریکی به سمت ناحیه بدون فلاکس است.

3-3- نتایج مرحله دوم

پس از بررسی نتایج به دست آمده در مرحله پیشین پارامترهای مناسب برای اجرای جوشهای نهایی و بررسی خواص انتخاب شدند. در واقع معیار انتخاب، جوشی است که ضمن داشتن عمق نفوذ بالا دارای کیفیت سطحی و متالورژیکی مناسب نیز باشد. پس از انتخاب پارامترهای مناسب با توجه به هدف این پژوهش سه نمونه به روش‌های TIG، A-TIG و FB-TIG با این پارامترهای بهینه جوشکاری شده و ریزساختار و ریزسختی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول(۱) پارامترهای بهینه انتخاب شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵- میانگین ولتاژ قوس برای روش‌های A-TIG و FB-TIG در حضور دو فلاکس SiO_2 و TiO_2

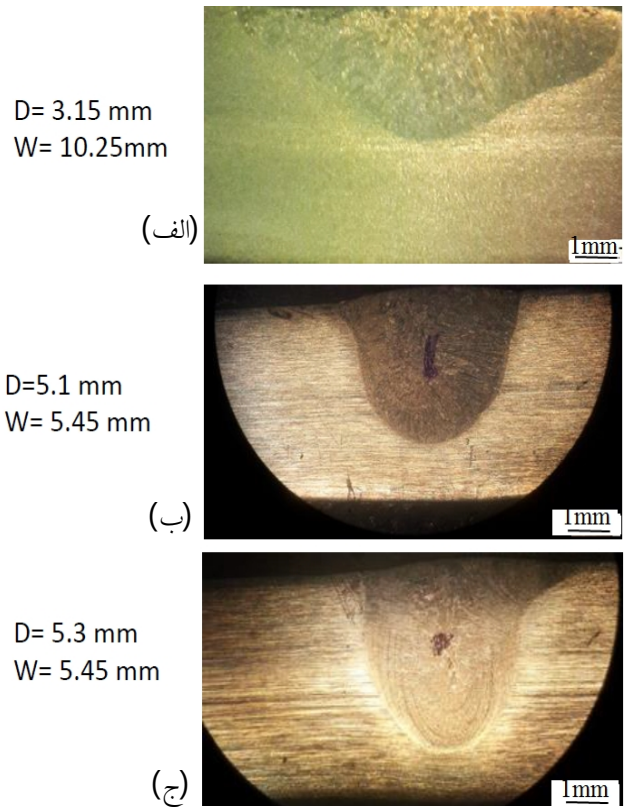
3-4- مطالعه عمق نفوذ

با توجه به شکل(۶) که از سطح مقطع سه نمونه جوشکاری شده به روش‌هایTIG، A-TIG و FB-TIG تهیه شده است مشاهده می‌شود که در نمونه جوشکاری شده به روش FB-TIG عمق نفوذ نسبت به نمونه جوشکاری شده به روش A-TIG اندکی بیشتر می‌باشد. همچنین عمق‌نفوذ جوش در دو

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول۱- پارامترهای بهینه انتخاب شده در مرحله دوم

شدت جریان	چگالی سطحی فلاکس	سرعت جوشکاری	نوع الکترود	زاویه نوک الکترود	قطر الکترود	طول قوس	گاز محافظ	دبی گاز
۱۵۰A	۷-۸mg/cm^2	۲ mm/s	تنگستن + ۲٪ توریا	۶۰ درجه	۳/۲ mm	۳ mm	آرگون	۱۰-۱۲ Lit/min



شکل۶- سطح مقطع سه نمونه جوشکاری شده به روش‌های الف) TIG، ب) A-TIG و ج) FB-TIG

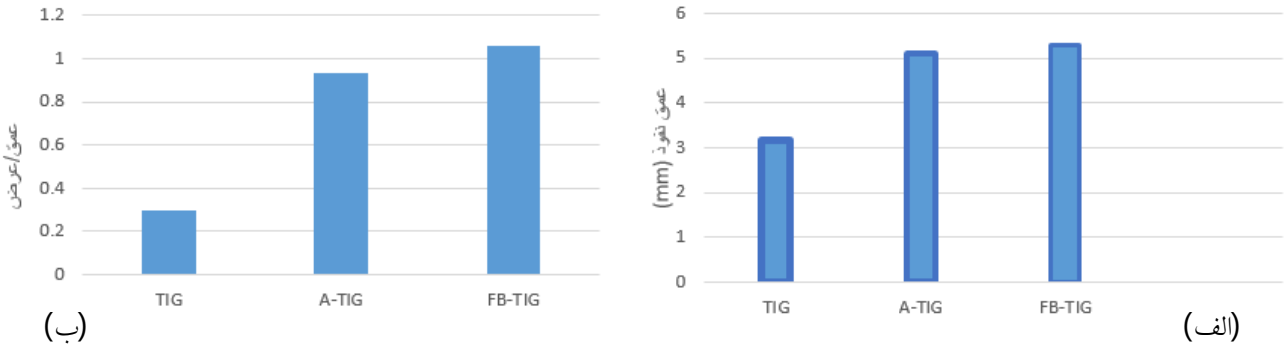
حالت جوشکاری شده با فلاکس نسبت به حالت بدون فلاکس یعنی روش TIG افزایش چشمگیری داشته است. در فرآیند FB-TIGمقاومت الکتریکی فلاکس SiO_2 سبب می‌شود قوس در ناحیه باریک بدون فلاکس محدود و منقبض شود. انقباض قوس باعث کاهش لکه آندی شده و افزایش چگالی جریان (چگالی توان) را به همراه دارد. با این مکانیزم توانایی فشار قوس افزایش می‌یابد و در نهایت قوس ایجاد شده نیروی بیشتری را بر حوضچه جوش وارد می‌کند. در نتیجه این عمل سیال تغییر جهت می‌دهد و عمق نفوذ افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دلیل دستیابی به بیشترین عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض در روشFB-TIG با استـــفاده از فلاکس فلاکس SiO_2 غالب شدن مکانیزم تمرکز قوس و انقباض ریشه جوش می‌باشد.

3-5- مطالعه ریزساختار جوش

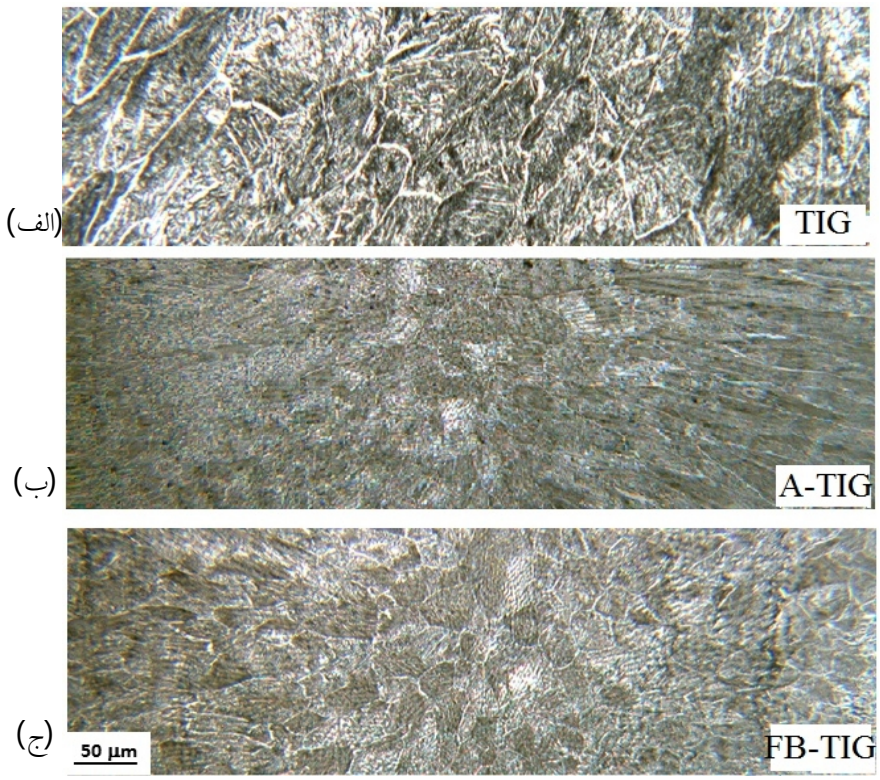
تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از ریزساختار جوش نمونه‌های جوشکاری شده به سه روشTIG ، A-TIGو FB-TIG مطابق شکل(۸) می باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در نمونه جوشکاری شده به روش A-TIG ریزساختار خط مرکزی جوش دندریتهای هم محور مرکزی می‌باشد. همچنین در نمونه جوشکاری شده به روش FB-TIG مورفولوژی ریزساختار خط مرکزی جوش هم محور مرکزی می‌باشد، با این تفاوت که وسعت ناحیه هم‌محور مرکزی در روش A-TIG کاهش یافته است. این در حالی‌است که در نمونه جوشکاری شده به روش TIGفریت‌های دلتا بدون هیچ گونه مورفولوژی خاصی در ناحیه جوش مشاهده می‌شوند.

به منظور تشریح علت تشکیل دندریت‌های هم‌محور در خط مرکزی جوش دو دلیل را می‌توان در نظر گرفت. دلیل نخست، پدیده تحت تبرید ترکیبی و دلیل دوم جوانه‌زنی ناهمگن بر روی مکان‌های مرجح جوانه‌زنی می‌باشد. پدیده تحت تبرید ترکیبی زمانی رخ می‌دهد که نسبت گرادیان دمایی (G) به سرعت انجماد (R) به حد کافی کاهش یابد، تا فصل مشترک از دندریتی به هم‌محور تبدیل شود. بنابراین با افزایش میزان حرارت ورودی گرادیان دمایی (G) کاهش یافته و با افزایش سرعت جوشکاری، نرخ انجماد جوش (R) نیز افزایش میابد بنابراین G/R کاهش می‌یابد که میتواند منطقه‌ای از دانه‌های هم محور را در امتداد خط مرکزی جوش تشکیل داده و رشد دانه‌های ستونی را در این منطقه متوقف کند.شکل(۹) نحوه تغییرات ریزساختار انجمادی با گرادیان دمایی و سرعت انجماد را نشـان می‌دهد. این تبـدیل سـاختـار انجمادی فقط به واسطه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل۷- مقایسه الف) عمق نفوذ و ب) نسبت عمق به عرض جوش در روش‌های TIG، A-TIG و FB-TIG



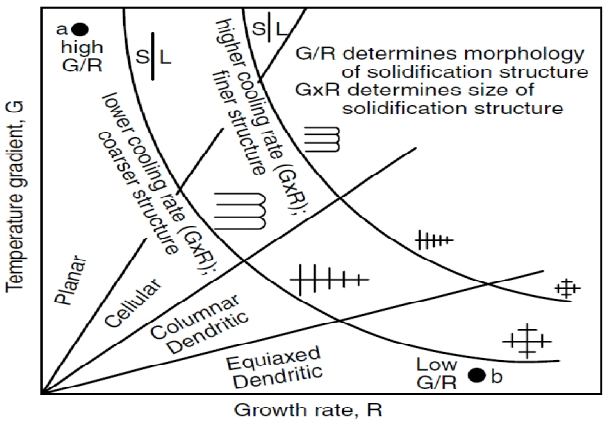
شکل۸- تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از ریزساختار جوش نمونه های جوشکاری شده به سه روش الف) TIG ب)A-TIG و ج) FB-TIG

تحت تبرید ترکیبی نیست. حضور ذرات خارجی در حوضچه جوش که اتم‌های فلز مذاب می‌توانند بر روی آن‌ها به صورت بلوری قرار گیرند، نقش جوانه‌های ناهمگن در مذاب را دارند که منجر به تشکیل دانه‌های هم‌محور در خط مرکزی حوضچه جوش می‌شود. شکل(۱۰) جوانه‌زنی ناهمگن فلز جوش از ذرات خارجی را نشان می‌دهد.

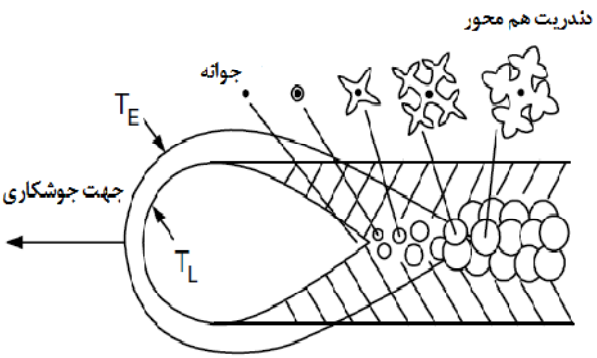
با توجه به نمودار تغییرات میانگین ولتاژ در شکل(۱۱) مشاهده می‌شود که ولتاژ قوس در روش A-TIG بیشتر از FB-TIG می‌باشد، بنابراین از لحاظ حرارت ورودی حالت جوشکاری A-TIG با بیشترین مقدار حرارت ورودی در رتبه نخست و سپس FB-TIG قرار دارد. با توجه به افزایش حرارت ورودی گرادیان دمایی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر سرعت جوشکاری در همه حالات جوشکاری ثابت بود که منجر به ثابت بودن سرعت انجماد (R) می‌شود. پس با افزایش حرارت ورودی در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت ثابت، نسبت G/Rکاهش می‌یابد و به سمت تحت تبرید ترکیبی حرکت می‌کند. بنابراین باید با افزایش حرارت ورودی در نمونه‌ها وسعت ناحیه هم‌محور مرکزی بیشتر می‌شود که تصویر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

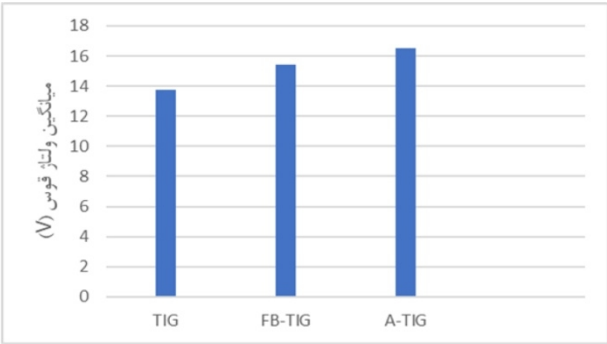
ریزساختار جوش نمونه‌ها خلاف این را نشان می‌دهند. با توجه به تصاویر میکروسکوپی مشاهده می‌شود که وسعت ناحیه هم‌محور مرکزی با افزایش حرارت ورودی کمتر شده است. همانطور که قبلا نیز اشاره شد علاوه بر تحت تبرید ترکیبی، جوانه‌زنی ناهمگن در اثر حضور عوامل جوانه‌زا خارجی می‌تواند سبب تشکیل دندریت‌های هم‌محور در خط مرکزی جوش گردد. در نمونه جوشکاری شده به روش A-TIG به دلیل بالا بودن حرارت ورودی نسبت به نمونه FB-TIG عوامل جوانه‌زا خارجی که شامل ترکیبات Si می باشد، به میزان بیشتری تجزیه شده که از مقدار جوانه‌زنی ناهمگن کاسته شده و در نتیجه وسعت ناحیه هم محور مرکزی کاهش می‌یابد. در نمونه جوشکاری شده به روش TIG به دلیل عدم استفاده از فلاکسهای فعال کننده سطحی عوامل جوانه زا خارجی همانند دو حالت فوق وجود نداشته در نتیجه هیچگونه مورفولوژی خاصی در منطقه ذوبی مشاهده نشد.



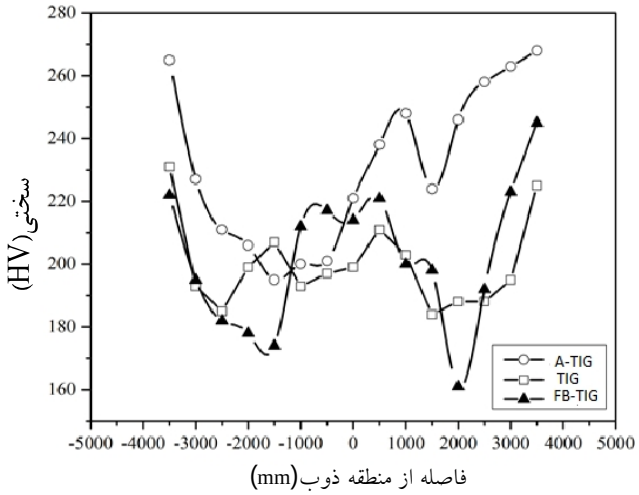
شکل۹- نحوه تغییرات ریزساختار انجمادی با گرادیان دمایی و سرعت انجماد [۹].



شکل۱۰- جوانه زنی ناهمگن فلز جوش از ذرات خارجی [۹].



شکل۱۱- نمودار تغییرات میانگین ولتاژ در روش‌های A-TIG،TIG و FB-TIG



شکل۱۲- پروفیل سختی در روش‌های روش‌های A-TIG،TIG و FB-TIG

3-6- بررسی نتایج ریزسختی سنجی

نتایج حاصل از اندازه گیری ریز سختی فلز پایه و فلز جوش در نمونه های جوشکاری شده به روش هایTIG ، A-TIGو FB-TIGمنجر به تهیه پروفیل سختی از جوش و نواحی اطراف آن شد. شکل(۱۲) این پروفیل ها را نشان می‌دهد. در مقایسه نتایج سختی در جوش های ایجاد شده بدون و با استفاده از فلاکس های فعال کننده سطحی، نمایان است که خط مرکزی جوش های A-TIG و FB-TIG سختی بالاتری را نسبت به جوش TIG ارائه می‌دهند. سنگ و همکاران دلیل افزایش سختی در جوش های A-TIG و FB-TIG را افزایش فاز فریت دلتا در فلز جوش بیان نمودند. به این ترتیب که فریت دلتا دارای ساختار کریستالی bcc بوده و خواص مکانیکی بالاتری نسبت به آستنیت با ساختار کریستالی fcc

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

دارد. بنابراین با افزایش میزان فاز فریت δ (دلتا) فلز جوش، سختی نیز افزایش می‌یابد [۱۴].

پیک کاهش سختی مشاهده شده در هر سه نمونه مربوط به ناحیه درشت دانه HAZ می‌باشد، که با نزدیک شدن به فلز پایه و ریزتر شدن دانه‌ها سختی افزایش می‌یابد. پیکهای افزایش سختی مربوط به ناحیه مرز ذوب می‌باشد. دلیل بالاتر بودن سختی در این ناحیه مربوط به دانه‌های ذوب جزئی شده است که به عنوان مکان‌های جوانه‌زا برای فازهای رسوبی حین انجماد فلز جوش عمل می‌کنند.

4- نتیجه گیری

-با استفاده از فلاکس‌های اکسیدی در روش جوشکاری TIG عمق نفوذ جوش نسبت به حالت بدون فلاکس این روش افزایش می‌یابد.

-نسبت عمق به پهنای جوش (D/W)در درجه اول در کنترل جابجایی مارانگونی در حوضچه جوش است. و پدیده انقباض ریشه قوس فقط می‌تواند با کاهش پهنا جوش سهمی در افزایش این نسبت داشته باشد

-در حضور ترکیبات با مقاومت الکتریکی بالا و پایداری شیمیایی پایین، مانند SiO_2 به دلیل انقباض ریشه قوس، پهنای جوش کمتر می‌شود. این کاهش پهنا در روش FB-TIG محسوس‌تر است.

-در نمونه جوشکاری شده به روش A-TIG به دلیل بالا بودن حرارت ورودی نسبت به نمونه FB-TIG عوامل جوانه‌زا خارجی که شامل ترکیبات Si می‌باشد، به میزان بیشتری تجزیه شد که از مقدار جوانه‌زنی ناهمگن کاسته شده و در نتیجه وسعت ناحیه هم‌محور مرکزی کاهش می‌یابد.

-در نمونه جوشکاری شده به روش TIG به دلیل عدم استفاده از فلاکس‌های فعال کننده سطحی عوامل جوانه‌زا خارجی همانند دو روش A-TIG و FB-TIG وجود ندارد، در نتیجه هیچگونه مورفولوژی خاصی در منطقه ذوبی مشاهده نشد.

- رشد دانه در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) در حضور فلاکس های فعال سطحی نسبت به روش TIG کمتر می باشد.

- روش A-TIG و FB-TIG منجر به افزایش سختی جوش نسبت به روش TIG می شود.

منابع

[1] D. J. Renzo, Corrosion Resistant Materials Handbook, 4th edition, United States of America Noyes Data Corporation, 1985.

[2] ج. لیپولد، م. کوتکی، متالورژی جوشکاری و جوش‌پذیری فولادهای زنگ نزن، ترجمه مرتضی شمعانیان، محمد رحمتی، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان، بهار ۸۷.

[3] N. Moslemi, N. Redzuan, N. Ahmad, T. N. Hor, Effect of Current on Characteristic for 316 Stainless Steel Welded Joint Including Microstructure and Mechanical Properties, 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing, 2015.

[4] N. B. Ramlee, Effect of PH, Temperature and Chloride Concentrations on the Corrosion Behavior of Welded 316L Stainless Steel, M.S.C Thesis, faculty of mechanical engineering university technology malaysia, 2008.

[5] K. H. Tseng, Development and Application of Oxide-Based Flux Powder for Tungsten Inert gas Welding of Austenitic Stainless Steel, Institute of Materials Engineering, National Pingtung University of Science and Technology, Powder Technology, Vol. 233, 2013.

[6] Y. Huang, D. Fan, and Q. Fan, Study of Mechanism of Activating Flux Increasing Weld Penetration of AC A-TIG Welding for Aluminum Alloy, Frontiers of Mechanical Engineering in China, vol. 2, 2007.

[7] S. Sire and S. Marya, On the Development of a New Flux Bounded TIG Process (FB-TIG) to Enhance Weld Penetrations in Aluminium 5086, International Journal of forming process, vol. 5, 2002.

[8] R. W. Messler, Principles of Welding, Materials Science and Engineering Department Rensselear Polytechnic Institute:, Wiley-Interscience Publication, 1999.

[9] S. Kou, Welding Metallurgy, Department of Materials Science and Engineering University of Wisconsin, Wiley, 2003.

[10]ع. فرزادی، شبیه سازی انتقال حرارت، سیلان سیال و ریزساختار انجمادی حوضچه جوش در جوشکاری تیگ، پایان‌نامه دکتری دانشگاه صنعتی شریف، گرایش جوشکاری،۱۳۸۷.

[11] P. Paillard, A. Berthier, M. Carin, S. Pellerin, and F. Valensi, Physical and chemical mechanisms occurring during A-TIG Welding: Comparison between experimental investigation and simulation, Materials Science Forum, 2010.

[12] L. Liu, Z. Zhange, G. Song, and Y. Shen, Effect of Cadmium Chloride Flux in Active Flux TIG Welding of Magnesium Alloys, Materials Transactions, Vol. 47, 2006.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[13] Q. M. Li, X. h. Wang, Z. D. Zou, and J. Wu, Effect of Activating Flux on Arc Shape and Arc Voltage in Tungsten Inert Gas Welding," Transaction of Nonferrous Metals Society of chaina, vol. 17, 2007.
[14] S. Shyu, H. Huang, K. Tseng, and C. Chou, Study of the Performance of Stainless steel A-TIG Welds, journal of Materials Engineerring of Performance, vol. 17, 2008.
[15]. K. H. Tseng and C.Y . Hsu, Performance of Activated TIG Process in Austetenitic Stainless steel welds, Journal of Materials Processing Technology, vol. 211, 2011.
[16]T. S. Chern, K. H. Tseng and H. L. Tsai, Study of the Characteristics of Duplex Stainless steel Activated Tungsten Inert Gas Welds, Material & Design, vol. 211, 2011.
[17] H. Y. F. Sandor, Dobranszky, and G. Kaptay, An Improved Theoretical Model for A-TIG Welding Based on Surface Phase Transition and Reversed Marangoni Flow, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, vol. 44, 2013.
[18] J. Lowke, M. Tanaka and M. Ushio, Mechanisms Giving Increased Weld Depth due to a Flux, Journal of Physics, D: Applied Physics, vol. 38, 2005.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]