

## مطالعه ریزساختار و ریزسختی جوش فولاد زنگ نزن AISI 316 L جوشکاری شده به روش TIG, A-TIG, FB-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 316 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 316 L جوشکاری شده به روش های 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 روش FB-TIG کاهش یافته است. بررسی میکروسختی این سه نمونه نشان داد که سختی خط مرکزی جوش در A-TIG و FB-TIG بیشتر از TIG است.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن AISI 316L، A-TIG، FB-TIG، عمق نفوذ، ریزساختار، میکروسختی.

## Study of microstructure and microhardness of welded AISI 316L austenitic 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

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

## 1- مقدمه

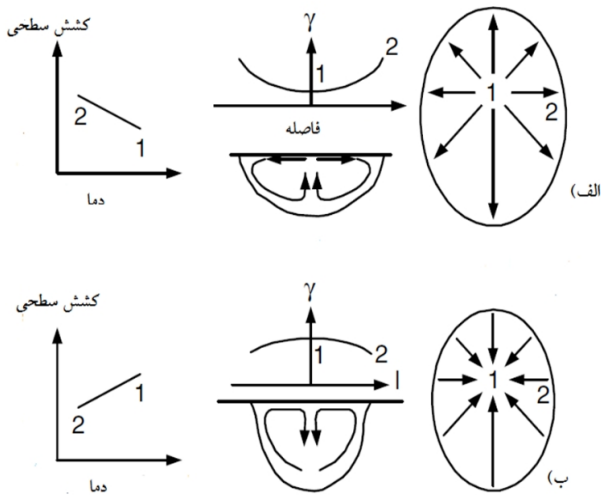
یک سری مواد افزودنی تحت عنوان فلاکس فعال‌کننده سطحی که قبل از انجام جوشکاری به صورت یک لایه نازک بر سطح کار اعمال می‌شوند، شرایطی در ستون قوس و حوضچه مذاب ایجاد می‌شود که منجر به افزایش ۳-۴ برابری در عمق نفوذ جوش TIG معمول می‌شود. پس از معرفی این روش تحقیقات فراوانی جهت شناسایی مکانیزم‌های افزایش عمق 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 نرسیده‌اند [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 محدود 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 بر این است که در این روش به دلیل ایجاد یون‌های منفی در قوس و مقاومت الکتریکی دو باند فلاکس، جریان الکترون‌های قوس به سمت ناحیه بدون فلاکس میانی هدایت می‌شود. هدایت الکترون‌ها 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 فلاکس‌های با مقاومت الکتریکی و نقطه ذوب بالا می‌تواند منجر به کاهش پهنای جوش شود [۷و۶].

بنابراین 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

فولادهای زنگ‌نزن گروه وسیع و گسترده‌ای از آلیاژهای ویژه‌اند که برای مقاومت در برابر خوردگی توسعه یافته‌اند. از ویژگی‌های دیگر موردنظر برای این آلیاژها شکل‌پذیری 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 پایین‌تر نیز پایدار باشد [۲]. اتصال این فولادها عمدتاً توسط فرآیندهای جوشکاری قوسی با الکتروود روکش دار (SMAW)، جوشکاری قوسی با الکتروود فلزی تحت حفاظت گاز خنثی (MIG) و جوشکاری با الکتروود تنگستنی تحت حفاظت گاز خنثی (TIG) انجام می‌شود. در این میان جوشکاری با الکتروود 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 ضخیم‌تر از توجیه اقتصادی محدودی برخوردار باشد. زیرا عمق نفوذ کم باعث نیاز به آماده‌سازی 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 روش‌های 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

فوقانی جوش، فلز مذاب اصولاً به خارج جریان می‌یابد، زیرا فلز گرم‌تر و کشش سطحی کم‌تر نزدیک به مرکز حوضچه بوسیله فلز مذاب خنک‌تر 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 می‌دهد.

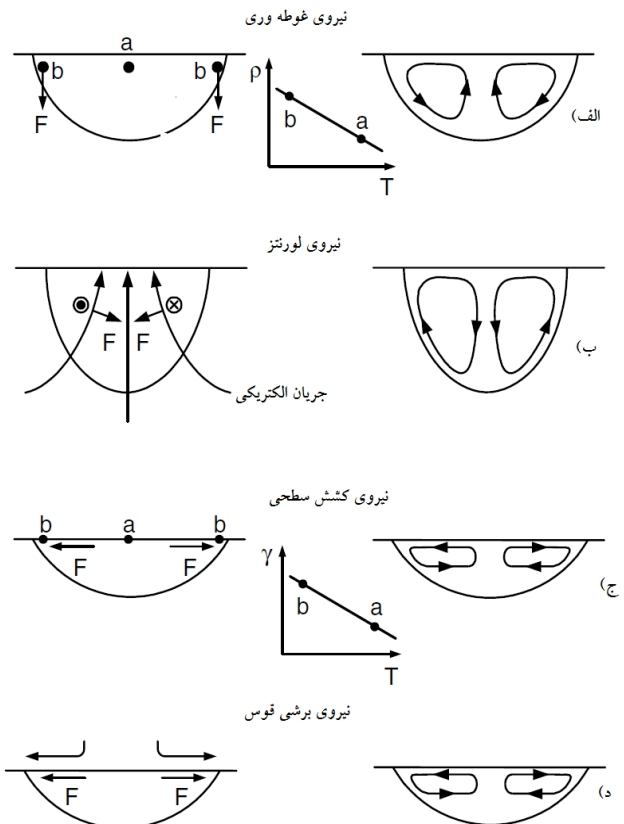


شکل ۲- الگوهای متفاوت جریان جابجایی به علت ضریب دمایی کشش سطحی گوناگون: الف) بدون عوامل فعال کننده و ب) الگوی ایجاد شده بر اثر افزودن عوامل فعال کننده سطحی [۹].

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 فعال کننده 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

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 [۹و۸].

- 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 این رو در سطح

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 در بخشهای 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 فرآیندهای TIG، A-TIG و FB-TIG و مقایسه آنها با یکدیگر می باشد.

## 2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش به مقایسه ریزساختار و ریزسختی جوش فولاد زنگ نزن L ۳۱۶ جوشکاری شده به روش های A-TIG، FB-TIG و TIG پرداخته شده است. در مرحله اول اثر دو نوع فلاکس  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  بر عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض جوش فولاد زنگ نزن L ۳۱۶ 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  $\text{SiO}_2$  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 هر دو 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.

می تواند به صورت کاهش کشش سطحی ظاهر شود که باعث افزایش اثر فشار قوس می شود و یا این که می تواند به صورت تغییر در جهت نیروی کشش سطحی به سمت مرکز و ایجاد جریان مارانگونی معکوس باشد [۱۱ و ۱۲].

بطور کلی مجموعه مطالعاتی که توسط ونگ شیو، سنگ، چرن در زمینه اثر انواع فلاکسهای فعال کننده سطحی از جمله  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  بر روی عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض جوش فولادهای زنگ نزن آستنیتی صورت گرفته است، مشاهده می شود که همه آنها در مورد تمرکز قوس و کاهش اندازه نقطه آندی به عنوان مکانیزم غالب افزایش عمق نفوذ در هنگام استفاده از فلاکس  $\text{SiO}_2$  و ایجاد جریان مارانگونی معکوس به عنوان مکانیزم غالب افزایش عمق نفوذ در استفاده از فلاکس  $\text{TiO}_2$  اتفاق نظر جمعی دارند.

همچنین در مطالعه مینگ بیان شده است که میانگین ولتاژ قوس در استفاده از فلاکس  $\text{SiO}_2$  بطور چشمگیری افزایش می یابد در حالیکه در فلاکس  $\text{TiO}_2$  میانگین ولتاژ قوس حتی کمتر از حالت بدون فلاکس می باشد. دلیل این پدیده مقاومت الکتریکی بالای  $\text{SiO}_2$  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 زنگ نزن آستنیتی پرداخته اند، به این نتیجه رسیده اند که فلاکس  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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 ( $\text{SiO}_2$ ) و در سه فاصله شکاف ۳، ۴ و ۹ میلیمتر انجام دادند.

این گروه سازوکارهایی برای افزایش عمق نفوذ جوش در فرآیند پیش بینی کردند که در نهایت آنها به این نتیجه رسیدند که انقباض و محدود شدن قوس و افزایش ولتاژ که به صورت

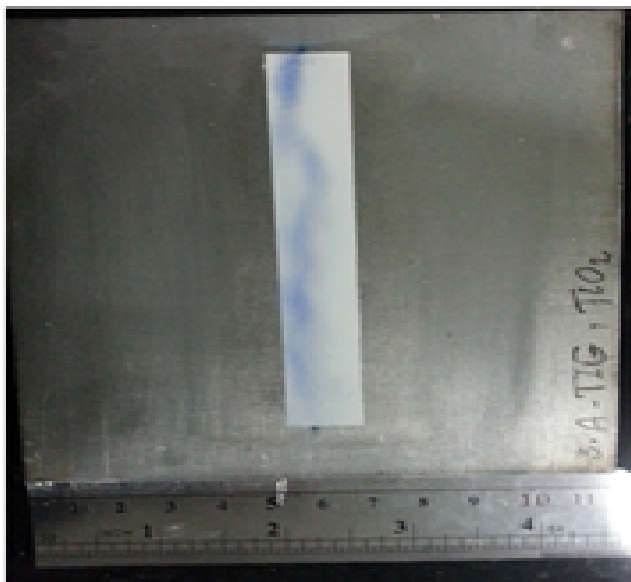
از ورق‌های فولاد زنگ‌نزن L ۳۱۶ به ابعاد  $100 \times 100 \times 6$  mm استفاده شد. از پودرهای اکسیدی شامل اکسید سیلیسیم ( $\text{SiO}_2$ ) و اکسید تیتانیم ( $\text{TiO}_2$ ) به عنوان فلاکس تک جزیی استفاده شد. برای تهیه سوسپانسیون فلاکس فعال از الکل صنعتی با خلوص ۹۷٪ به عنوان فاز مایع استفاده شد. سوسپانسیون حاصل با قلم مو بر سطح قطعه کار اعمال گردید. شکل (۳) نمایشی 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 الکتروود 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 اندازه‌گیری عمق نفوذ (D) و پهنای جوش‌ها (W) و بررسی ریزساختار جوش پس از اجرای هر مرحله از روش‌های متالوگرافی استفاده شد. به این صورت که از نمونه‌های جوش داده شده توسط کاتر مقاطع عرضی تهیه شد و پس از سنباده زنی تا مش ۸۰۰، توسط اچ ماربل با ترکیب

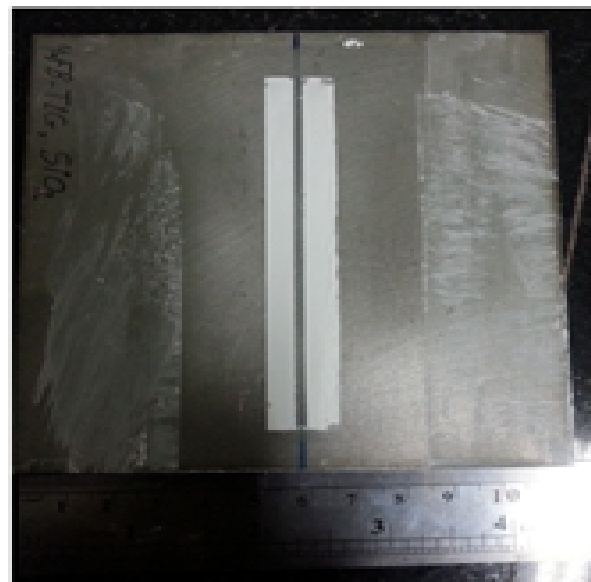
۵۰ میلی لیتر آب مقطر و ۱۰ گرم سولفات مس به مدت ۲۰-۳۰ ثانیه حکاکی (ماکرو اچ) شدند. ابتدا مقطع ماکرواچ شده جهت اندازه‌گیری عمق و عرض جوش مورد مطالعه قرار گرفت. سپس برای بررسی‌های ریزساختاری سطح نمونه‌ها ابتدا تا سنباده ۲۵۰۰ هموار و با پودر آلومینا ۰/۳ میکرون و آب و صابون پولیش شد. سپس توسط محلول اچ با ترکیب ۵۰ درصد آب و ۵۰ درصد اسید نیتریک ( $\text{HNO}_3$  50% +  $\text{H}_2\text{O}$  50%) به مدت ۱۰-۸ ثانیه با اعمال جریان ۰/۴-۰/۵ 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  $200 \text{ gr.f}$  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



ب



الف

شکل ۳- نمایشی از فلاکس اعمال شده، الف) FB-TIG، ب) A-TIG

مربوط به فلاکس  $\text{SiO}_2$  است که باعث افزایش  $1/7$  برابری در عمق نفوذ شده است. در حالیکه فلاکس  $\text{TiO}_2$  تاثیر چندانی بر عمق نفوذ نداشته است. همچنین بیشترین نسبت عمق به عرض (D/W) نیز توسط فلاکس  $\text{SiO}_2$  ایجاد شده که نسبت به حالت بدون فلاکس  $2/9$  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  $\text{SiO}_2$  است که نسبت به حالت بدون فلاکس به ترتیب  $1/9$  و  $3/3$  برابر شده است. مجدداً فلاکس  $\text{TiO}_2$  تاثیر چندانی بر عمق نفوذ نداشته است و مقدار نسبت عمق به عرض  $1/1$  برابر شده است. موضوع دیگری که باید به آن توجه شود این است که هنگام استفاده از فلاکس  $\text{SiO}_2$  چه در حالت A-TIG و چه در حالت FB-TIG جوش‌هایی با پهنای کمتری نسبت به فلاکس  $\text{TiO}_2$  ایجاد شده است که در حالت FB-TIG این پهنای کم مشهودتر است. این امر باعث شده است که برای فلاکس  $\text{SiO}_2$  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

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 جوش‌های اجرا شده در مرحله دوم ارائه شده است. در نهایت به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوشهای مرحله سوم پرداخته شده است.

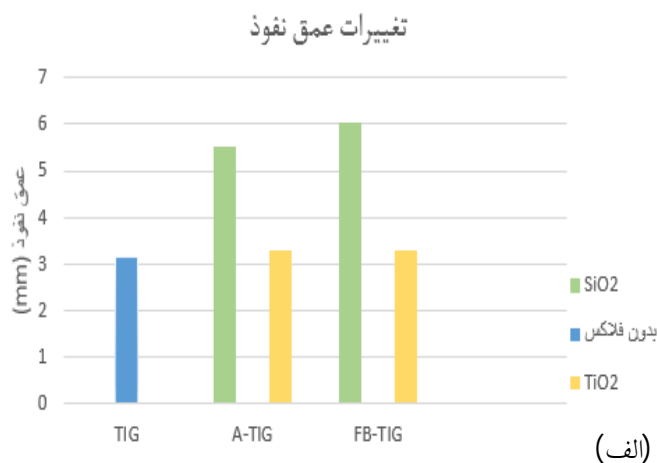
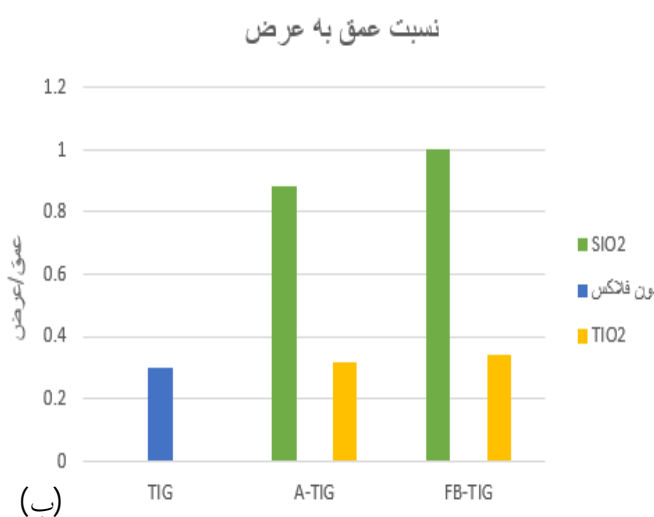
### 3-1- نتایج مرحله اول

همانطور که در بخش قبل اشاره شد در مرحله نخست از انجام آزمایش‌ها اثر دو نوع فلاکس  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  در دو روش A-TIG و FB-TIG بررسی شد. به طوری که پس از انتخاب چگالی سطحی  $5-6 \text{ mg/cm}^2$  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- تاثیر فلاکس‌ها بر عمق نفوذ

نتایج حاصل از مقایسه عمق نفوذ و پهنای جوشهای ایجاد شده به روش‌های TIG، A-TIG و FB-TIG با استفاده از دو نوع فلاکس مذکور در قالب نمودارهای ستونی در شکل (4) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (4) مشاهده می‌شود هر دو فلاکس اثر متفاوتی بر عمق نفوذ و پهنای جوش‌ها می‌گذارند. بیشترین اثر



شکل 4- نمودارهای مقایسه عمق نفوذ و (ب) نسبت عمق به عرض نمونه‌های مرحله اول

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 A-TIG با فلاکس  $\text{SiO}_2$  پهنای جوش نسبت به روش FB-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  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$

### 3-4- مطالعه عمق نفوذ

با توجه به شکل (۶) که از سطح مقطع سه نمونه جوشکاری شده به روشهای TIG، 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 عمق نفوذ جوش در دو

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

پهنای کمتر جوشهای ایجاد شده با فلاکس  $\text{SiO}_2$  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 نقطه 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 نسبتاً 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-TIG در حضور دو فلاکس  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میانگین ولتاژ قوس در روش A-TIG و FB-TIG برای فلاکس  $\text{SiO}_2$  افزایش یافته است. این در حالیست که برای فلاکس  $\text{TiO}_2$  میانگین ولتاژ قوس نسبت به  $\text{SiO}_2$  کاهش یافته است. این موضوع نشان دهنده مقاومت الکتریکی بالاتر فلاکس  $\text{SiO}_2$  و در نتیجه

جدول ۱- 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	$7-8 \text{ mg/cm}^2$	۲ mm/s	تنگستن + ۲٪ توریبا	۶۰ درجه	۳/۲ mm	۳ mm	آرگون	۱۰-۱۲ Lit/min

فلاکس  $\text{SiO}_2$  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 روش TIG، A-TIG و FB-TIG مطابق شکل (۸) می‌باشد. 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 هم محور مرکزی در روش A-TIG کاهش یافته است. این در حالی است که در نمونه جوشکاری شده به روش TIG فریت‌های دلنا بدون هیچ گونه مورفولوژی خاصی در ناحیه جوش مشاهده می‌شوند.

به منظور تشریح علت تشکیل دندریتهای هم محور در خط مرکزی جوش دو دلیل را می‌توان در نظر گرفت. دلیل نخست، پدیده تحت تبرید ترکیبی و دلیل دوم جوانه زنی ناهمگن بر روی مکان‌های مرجح جوانه زنی 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 هم محور تبدیل شود. بنابراین با افزایش میزان حرارت ورودی گرادیان دمایی (G) کاهش یافته و با افزایش سرعت جوشکاری، نرخ انجماد جوش (R) نیز افزایش می‌یابد 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 نشان می‌دهد. این تبدیل ساختار انجمادی فقط به واسطه

D= 3.15 mm  
W= 10.25mm

(الف)



D=5.1 mm  
W= 5.45 mm

(ب)



D= 5.3 mm  
W= 5.45 mm

(ج)

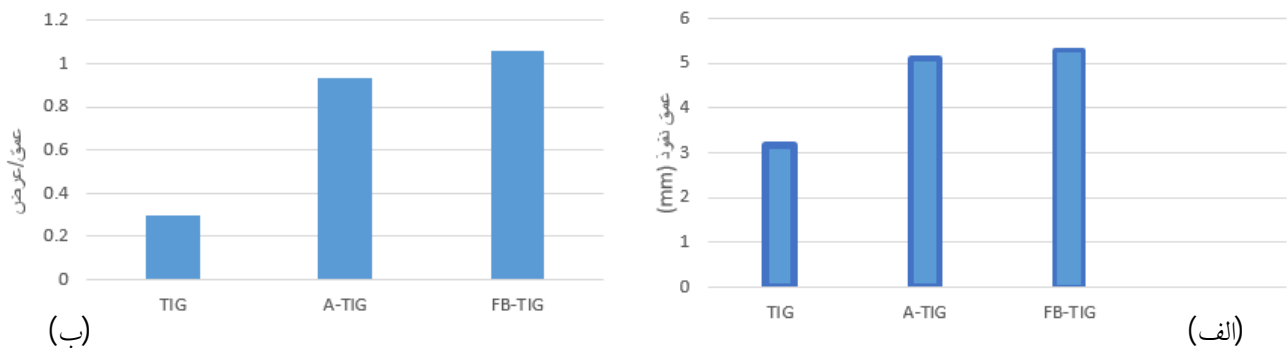


شکل ۶- سطح مقطع سه نمونه جوشکاری شده به روش‌های

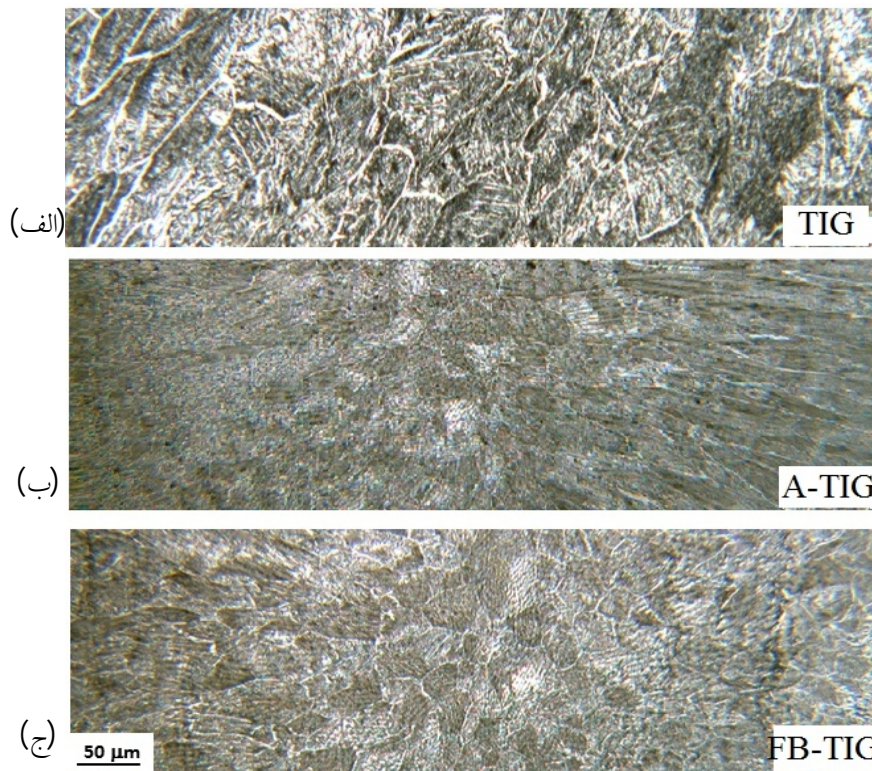
(الف) TIG، (ب) A-TIG و (ج) FB-TIG

حالت جوشکاری شده با فلاکس نسبت به حالت بدون فلاکس یعنی روش TIG افزایش چشمگیری داشته است. در فرآیند FB-TIG مقاومت الکتریکی فلاکس  $\text{SiO}_2$  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 روش FB-TIG با استفاده از فلاکس





شکل ۷- مقایسه الف) عمق نفوذ و ب) نسبت عمق به عرض جوش در روش‌های TIG، A-TIG و FB-TIG

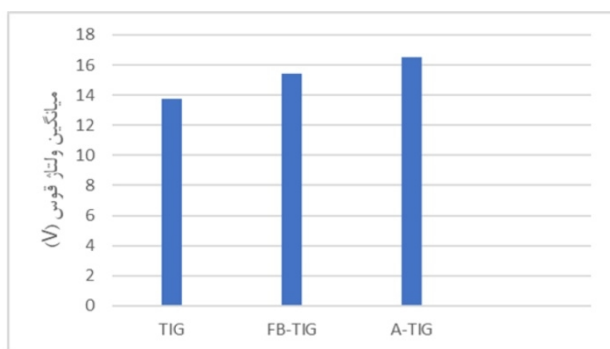


شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از ریزساختار جوش نمونه‌های جوشکاری شده به سه روش الف) TIG، ب) A-TIG و ج) FB-TIG

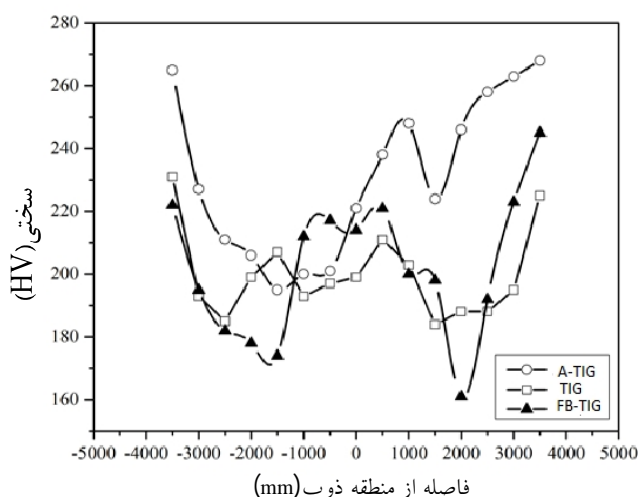
جوشکاری A-TIG با بیشترین مقدار حرارت ورودی در رتبه نخست و سپس FB-TIG قرار دارد. با توجه به افزایش حرارت ورودی گرادیان دمایی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر سرعت جوشکاری در همه حالات جوشکاری ثابت بود که منجر به ثابت بودن سرعت انجماد (R) می‌شود. پس با افزایش حرارت ورودی در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت ثابت، نسبت  $G/R$  کاهش 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

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



شکل ۱۱- نمودار تغییرات میانگین ولتاژ در روش‌های TIG, FB-TIG و A-TIG

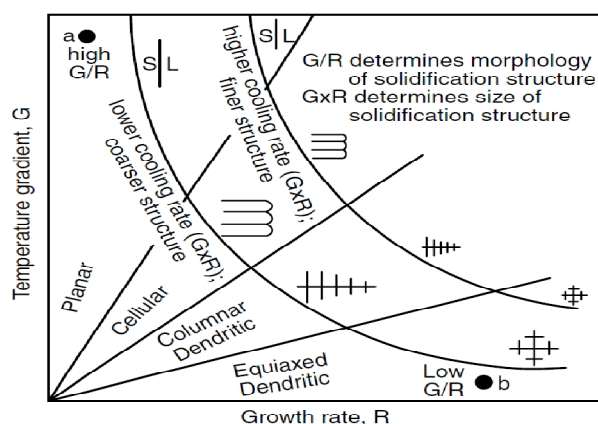


شکل ۱۲- پروفیل سختی در روش‌های TIG, FB-TIG و A-TIG

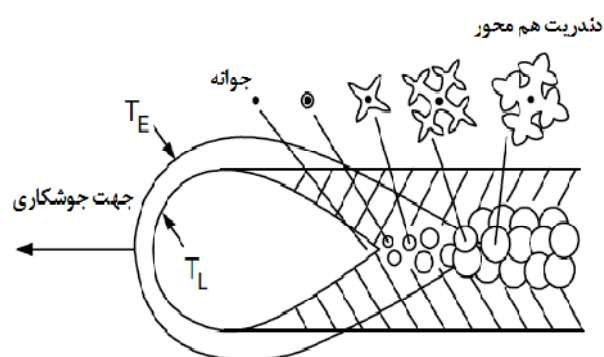
### 3-6- بررسی نتایج ریزسختی سنجی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ریزسختی فلز پایه و فلز جوش در نمونه‌های جوشکاری شده به روش‌های TIG، A-TIG و FB-TIG منجر به تهیه پروفیل سختی از جوش و نواحی اطراف آن شد. شکل (۱۲) این پروفیل‌ها را نشان می‌دهد. در مقایسه نتایج سختی در جوش‌های ایجاد شده بدون و با استفاده از فلاکس‌های فعال‌کننده سطحی، نمایان است که خط مرکزی جوش‌های A-TIG و FB-TIG سختی بالاتری را نسبت به جوش TIG ارائه می‌دهند. سنگ و همکاران دلیل افزایش سختی در جوش‌های 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

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 قبلاً 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 می‌باشد، به میزان بیشتری تجزیه شده 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 فعال‌کننده سطحی عوامل جوانه‌زا خارجی همانند دو حالت فوق وجود نداشته در نتیجه هیچگونه مورفولوژی خاصی در منطقه ذوبی مشاهده نشد.



شکل ۹- نحوه تغییرات ریزساختار انجمادی با گرادینان دمایی و سرعت انجماد [۹].



شکل ۱۰- جوانه زنی ناهمگن فلز جوش از ذرات خارجی [۹].

- 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 جوش پذیری فولادهای زنگ نزن، ترجمه مرتضی شمعیان، 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 Rensselaer 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، پایان نامه 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.

دارد. بنابراین با افزایش میزان فاز فریت  $\delta$  (دلتا) فلز جوش، سختی نیز افزایش می یابد [۱۴].

پیک کاهش سختی مشاهده شده در هر سه نمونه مربوط به ناحیه درشت دانه HAZ می باشد، که با نزدیک شدن به فلز پایه و ریزتر شدن دانه ها سختی افزایش می یابد. پیکهای افزایش سختی مربوط به ناحیه مرز ذوب می باشد. دلیل بالاتر بودن سختی در این ناحیه مربوط به دانه های ذوب جزئی شده است که به عنوان مکان های جوانه زای فازهای رسوبی حین انجماد فلز جوش عمل می کنند.

#### 4- نتیجه گیری

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

- نسبت عمق به پهنای جوش (D/W) در درجه اول در کنترل جابجایی مارانگونی در حوضچه جوش است. و پدیده انقباض ریشه قوس فقط می تواند با کاهش پهنای 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 می شود. این کاهش پهنای در روش FB-TIG محسوس تر است.

- در نمونه جوشکاری شده به روش A-TIG به دلیل بالا بودن حرارت ورودی نسبت به نمونه FB-TIG عوامل جوانه زای خارجی که شامل ترکیبات Si می باشد، به میزان بیشتری تجزیه شد که از مقدار جوانه زنی ناهمگن کاسته شده و در نتیجه وسعت ناحیه هم محور مرکزی کاهش می یابد.

- در نمونه جوشکاری شده به روش TIG به دلیل عدم استفاده از فلاکس های فعال کننده سطحی عوامل جوانه زای 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.

- [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.
- [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 china*, 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 Austenitic Stainless steel welds, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, 2011.