

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره1، بهار و تابستان 1400، صفحه 17-1

اثر جریان، سرعت جوشکاری و پیش گرم بر عمق نفوذ جوشکاری FB-TIG آلیاژ آلومینیم 5083

رضا کریم پور، علی فرزادی ^{*}، علیرضا ابراهیمی دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران. (دریافت مقاله: 1399/11/28؛ پذیرش مقاله: 1400/03/31)

چکیدہ

در تحقیق حاضر اثر سه متغیر جریان، سرعت جوشکاری و دمای پیش گرم در سه سطح مختلف حین جوشکاری FB-TIG آلیاژ آلومینیم 5083 مطالعه شد. با استفاده از روش تاگوچی، 9 آزمون برای بررسی اثر متغیرها بر عمق نفوذ طراحی شد. مطابق با پیش بینی ها، با افزایش جریان و میزان پیش گرم و کاهش سرعت جوشکاری، عمق نفوذ افزایش یافت. بیشترین مقدار عمق نفوذ طراحی شد. مطابق با پیش بینی ها، با افزایش جریان و میزان پیش گرم و کاهش سرعت جوشکاری، عمق نفوذ افزایش یافت. بیشترین مقدار عمق نفوذ طراحی شد. مطابق با پیش بینی ها، با افزایش جریان و مراان پیش گرم و کاهش سرعت جوشکاری، عمق نفوذ افزایش یافت. بیشترین مقدار عمق نفوذ سام 200 سرعت 120 mm/min جوشکاری را نشان داد. تحلیل میکروسکوپی نشان دهنده ریزدانه شدن فلز جوش و درشت شدن دانه های HAZ در تمامی نمونه ها بود. حفرات بسیاری نیز در نمونه های با سرعت و جریان بالا در منطقه ذوب رویت شد. نمونه جوشکاری شده با بیشترین میزان حرارت ورودی دارای بیشترین عمق نفوذ بود. این نمونه بیشترین درصد از دیاد طول را داشت که 69 درصد فلز پایه بود. همچنین با آزمون ریز سختی سنجی دریافت شد که سختی این نمونه در HAZ افت شدیدی دارد و از 70 به 58 ویکرز رسید.

كلمات كليدى: جوشكارى، آلياژ ألومينيم 5083، FB-TIG، عمق نفوذ.

Effect of welding parameters on penetration depth in FB-TIG welding of 5083 aluminum alloy

R. Karimpoor, A. Farzadi^{*}, A. Ebrahimi

Department of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (Received 16 February 2021; Accepted 21 June 2021)

Abstract

In the present study, effect of current, welding speed and preheat temperature during FB-TIG welding of AA5083 aluminum alloy was studied. Using the Taguchi method, 9 different tests were designed to investigate the effect of welding parameters on the penetration depth. Consistent with predictions, increasing the current and preheat temperature, and reducing the welding speed led to an increase in penetration depth. The maximum penetration depth of

* نويسنده مسئول، پست الکترونيکي: farzadi@aut.ac.ir

8.02 mm was achieved at the current of 220 A, welding speed of 120 mm/min, and the preheat temperature of 100 °C. Taguchi analysis showed that increasing the welding current and preheat temperature had a more significant effect than the welding speed. Microstructural analysis indicated that the weld metal is fine-grained, along with coarse-grain in the HAZ of all samples. Many pores were observed in the samples with high welding speed and high welding current in the fusion zone. The sample with the highest heat input had the highest penetration depth. This sample had the highest elongation, equal to 69% of the base metal. Moreover, microhardness test demonstrated that the hardness of this sample dropped sharply from 70 Vickers to 58 Vickers in the HAZ.

Keywords: Welding, Aluminum Alloy 5083, Flux-Bonded TIG, Weld Penetration.

شد. در سال 2002 برای دستیابی به جوشی با ظاهر زیبا و عمق نفوذ بالا در آلیاژهای آلومینیم سیره و ماریا فرایند را با اعمال دو پوشش فلاکس متقارن نزدیک به محل اتصال جوش و خالی گذاشتن یک نوار باریک بین دو باند فلاکس توسعه دادند و نام آن را تیگ با فلاکس محدود نهادند [11]. شماتیک فرایندهای A-TIG و FB-TIG در شکل(1) قابل مشاهده است [12].

از میان FB-TIG و FB-TIG سیره و ماریا فرایند FB-TIG را برای آلیاژهای آلومینیم مناسبتر ارزیابی کردند [11]. زیرا وجود این نوار خالی از فلاکس باعث باقی ماندن قوس در آن محل و پایداری قوس می شود و در عین افزایش عمق نفوذ، ظاهر خوب جوش را نیز در پی دارد [14،13]. سانتانا بابو و همکارانش [15] در سال 2014 به مقایسه کیفیت جوش ایجاد fB-TIG و A-TIG به مقایسه کیفیت جوش ایجاد پرداختند و مشاهده نمودند که پراکنده شدن قوس و تمایل به ترک ذوبی جزیی در اتصال صورت گرفته به روش A-TIG اتفاق می افتد.

ژائو یانگ و همکارانش [16] طی یک تحقیق در سال 2011 به بررسی اثر نوع فلاکس فعال و اندازه شیار بر عمق نفوذ آلیاژ آلومینیم 5083 در روش FB-TIG پرداختند. در این آزمایش 5 نوع فلاکس تکجزیی اکسید سیلیسیم، اکسید تیتانیم، فلوئورید کلسیم، اکسید منیزیم و سدیم کلرید و سه اندازه شیار مختلف 4، 6 و 8 میلیمتر در نظر گرفته شد. هر 5 فلاکس در مقایسه با منطقه عاری از فلاکس توانستند تحت همان شرایط به طور قابل توجهی عمق نفوذ را افزایش دهند. در میان کلیه آلیاژهای آلومینیم به دلیل چگالی پایین، استحکام بالا و مقاومت خوب در برابر خوردگی کاربردهای بسیار گستردهای در هوافضا، کشتیرانی، تولید انرژی و دیگر صنایع دارند [1]. در میان فرایندهای جوشکاری ذوبی تجاری مختلف فرایندهای جوشکاری قوسی فلز -گاز و جوشکاری قوسی تنگستن -گاز بسیار رایج و در دسترس هستند [2].

سادگی، ظاهر خوب جوش و امکان اتصال سازههای بزرگ در جوشکاری قوسی تنگستن -گاز و با استفاده از جریان متناوب (AC-TIG) باعث شده که این فرایند به طور وسیع در فرایندهای جوشکاری سازههای اصلی هوافضا مورد استفاده قرار گیرد [3]. اگرچه در مقایسه با دیگر فرایندهای جوشکاری قوسی، این نوع فرایند معایبی همچون عمق نفوذ کم و نرخ رسوب پایینی را به همراه دارد که مشکلات جوشکاری را افزایش و بازدهی آن را کاهش می دهد [5.4].

در سال 1960 میلادی برای بهبود عمق نفوذ در آلیاژهای تیتانیوم، مؤسسه جوشکاری الکتریکی پاتون روشی جدید را در فرایند TIG به نام تیگ فعال (Active TIG) پدید آورد که در آن قبل از جوشکاری یک لایه فلاکس فعال روی سطح ماده اعمال میشود [6]. طبق گزارش راکرت و همکارانش [7] تجمع و محدود شدن قوس و نیز بر اساس مشاهدات هیپل و روپر [8] معکوس شدن انتقال گرمای مارانگونی مکانیزمهای افزایش عمق نفوذ در جوشکاری A-TIG در نظر گرفته شدند. مطالعات بعدی توسط آیدون و مارتین [9] و لو و همکارانش [10] صورت گرفت و معکوس شدن جریان مارانگونی تایید

1- مقدمه

فلاکس ها SiO₂ با اندازه شیار 4 میلی متر بیش ترین عمق نفوذ را داشت که این میزان 5/6 برابر عمق نفوذ در منطقه عاری از فلاکس بود. در این حالت نسبت عمق به عرض جوش نیز به بیشینه مقدار خود یعنی 2009 رسید. در تحقیقی که توسط سیره و ماریا [11] در سال 2002 بر ورقی از جنس آلیاژ آلومینیم 5086 انجام شد، در فرایند FB-TIG عمق نفوذ 6 میلی متر حاصل شد که در مقایسه با 2/5 میلی متر عمق نفوذ در حالت TIG معمولی نشان از افزایش بیش از 2 برابری آن در فرایند جدید داشت.



جوشکاری FB-TIG به تازگی توسعه یافته و اخیراً کارهای بیشتری روی این روش جوشکاری انجام می دهند و هنوز هم نقاط قابل پیشرفتی برای افزایش عمق نفوذ در آن یافت می شود. در مورد آلیاژ آلومینیم 5083 از این روش فقط یکبار استفاده شده است که نتایج آن اطلاعات کافی را در مورد نتایج این روش و چگونگی اثرات آن در اختیار محققین قرار نمی دهد. همچنین موضوع پیش گرم کردن نمونه قبل از جوشکاری تا به حال در هیچ مقالهای به کار گرفته نشده است. در حالی که افزایش عمق نفوذ با افزایش پیش گرم نمونه قابل پیش بینی است. بنابراین در این تحقیق سعی می شود که اثر پیش گرم بر این فرایند و اثر هم زمان آن با افزایش جریان جوشکاری و کاهش سرعت جوشکاری بررسی شود.

۲ - مواد و روش ها
2 - 1 - تعیین پارامترهای ثابت و متغیر
برای تعیین پارامترهای ثابت و متغیر از مقالات و پژوهش های
انجام گرفته بر این موضوع استفاده شد [6،7،16،14،12].

بر این اساس جریان، سرعت جوشکاری و دمای پیش گرم به عنوان پارامترهای متغیر و پارامترهای دیگری نظیر ترکیب شیمیایی فلاکس، اندازه شیار بین فلاکسی، چگالی سطحی فلاکس، طول قوس، نوع الکترود، قطر الکترود و میزان گاز محافظ ثابت در نظر گرفته شدند. پارامترهای ثابت جوشکاری در جدول (1) و پارامترهای متغیر در جدول (2) آورده شده است.

جدول1- پارامترهای ثابت جوشکاری

توضيحات	پارامترهای ثابت
SiO ₂	تركيب شيميايي فلاكس
۴ میلیمتر	شيار بين فلاكسي
۱۵ میلیگرم بر سانتیمتر مربع	چگالی سطحی فلاکس
۲ میلیمتر	طول قوس
آرگون، ۱۸ لیتر بر دقیقه	نوع و میزان گاز محافظ
تنگستن خالص، گرد	جنس و زاویهی نوک الکترود
۲/۲ میلیمتر	قطر الكترود تنگستني

جدول2- پارامترهای جوشکاری					
سطوح مورد آزمایش	واحد اندازهگیری	پارامترهای متغیر			
۱۷۰ ،۱۹۵ ،۲۲۰	آمپر	جريان جوشكاري			
11. 140 .11.	میلیمتر بر دقیقه	سرعت جوشکاري			
بدون پیش گرم، ۲/۵ء، ۱۰۰	درجه سانتی گراد	دمای پیش گرم			

2-2- **طراحی آزمایش** برای طراحی آزمایش از روش تاگوچی استفاده شد و با استفاده از نرمافزار مینی تب (Minitab)، 9 آزمون متفاوت در نظر گرفته شد که در جدول (3) آمده است.

2-3- **تهیه مواد اولیه** جهت انجام آزمون جوشکاری از ورق آلیاژ آلومینیم کار شده 5083 با ترکیب شیمیایی مطابق جدول (4) و به ضخامت

10 میلی متر تهیه شده و نمونه ها در ابعاد 200×100 میلی متر برشکاری و آماده شده اند. فلاکس فعال کننده سطح که در این آزمون 2002 در نظر گرفته شده است نیز به صورت پودری و با دانه بندی 40-20 میکرون، به همراه استون تهیه شد. برای کنترل میزان مناسب فلاکس روی نمونه، 6 عدد نمونه شاهد از جنس آلومینیم و به مساحت حدودی 30 سانتی متر مربع مطابق شکل (2) فراهم گردید. نمونه مورد آزمایش و نمونههای شاهد برشکاری شدند و روی آنها با استون پاک گردید تا لایه اکسید و آلودگی موجود روی سطوح آنها از بین برود. جرم و

جدول3- شرایط جوشکاری نمونههای مختلف طراحی شده توسط روش تاگوچی

 بر عت جوش کاري دماي پيشگرم	شماره نمونه
جريان(امپر)	J J
(میلیمتر بر دقیقه) (درجه سانتیگراد)	0.200
۱۲۰ ۱۲۰ بدون پیش گرم	S1
۶۷/۵ ۱۲۵ ۱۷۰	S2
\·· \V·	S3
۶۲/۵ ۱۲۰ ۱۹۵	S4
۱۰۰ ۱۴۵ ۱۹۵	S5
۱۷۰ بدون پیش گرم	S 6
١٠٠ ١٢٠ ٢٢٠	S7
۲۲۰ ۱۴۵ بدون پیش گرم	S 8
۶۲/۵ ۱۷۰ ۲۲۰	S9

4-2- اعمال جوش به روش FB-TIG

در ابتدای امر بعد از برشکاری نمونه های آزمایش و شاهد و پاک کردن سطح آن ها توسط استون، نمونه روی محل جوشکاری جانمایی شد. طول قوس به اندازه 2 میلی متر تنظیم شد و محل عبور الکترود در ابتدا و انتهای نمونه علامت زده شد. سپس چسب نواری از قبل آماده شده به عرض 4 میلی متر برای ایجاد شیار بین فلاکسی روی محل عبور الکترود به نمونه چسبانده شد. به دلیل سمی بودن 2io، نمونه به محل مخصوص برای پاشش پودر و در زیر هود منتقل شد. سپس نمونه به صورت عمودی به صورتی که ضلع بزرگتر آن در پایین قرار بگیرد و نمونه های شاهد نیز در کنار نمونه اصلی

در محل مورد نظر برای پاشش پودر روی میز قرار داده شد. سپس فلاکس به صورت محلول سوسپانسیون حاوی 50 گرم ذرات معلق SiO₂ درون 300 میلی لیتر استون آماده شد و به کمک پیستوله پاشش و پمپ باد روی نمونه اعمال شد. سعی شد که سرعت پاشش و یکنواختی آن روی نمونه اصلی و نمونههای شاهد حفظ شود. حضور نمونههای شاهد برای کنترل سطح چگالی فلاکس اعمالی و حفظ یکنواختی آن ضروری بود. هرجا که احساس می شد میزان پودر روی نمونه به چگالی سطحی مورد نظر یعنی 15 میلی گرم بر سانتی متر مربع نزدیک شده است، دورترین نمونه شاهد برداشته و جرم آن ثبت می شد نمونه شاهد و مساحت آن) چگالی سطحی اعمال شده، این که میزان چگالی مورد نظر به دست آمده است و پاشش باید این که میزان چگالی مورد نظر به دست آمده است و پاشش باید متوقف شود.



شکل2- آماده سازی و برشکاری نمونههای شاهد

پس از رسیدن به چگالی 15 میلی گرم بر سانتی متر مربع، نمونه ها با توجه به شرایط مورد نظر مهیای فرایند جوشکاری شدند. در نمونه هایی که در دمای محیط باید جوشکاری می شدند، پس از اعمال فلاکس چسب به آرامی از روی سطح کنده شد تا یک شیار 4 میلی متری در میان نمونه باقی بماند. طول قوس نیز که به میزان 2 میلی متر از پیش تنظیم شده و مقدار نرخ گاز محافظ نیز روی 18 لیتر بر دقیقه قرار گرفت. الکترود جوشکاری هم که از جنس تنگستن خالص و با قطر

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	عناصر
پايە	•/47	۰/۳۱	•/•9	•/40	۴/•۸	۰/۳۱	•/•V	رصد وزنى

جدول4- تركيب شيميايي ألياژ ألومينيم 5083

3/2 میلیمتر بود. بیرون زدگی الکترود نیز با توجه به قطر الکترود به اندازه 3 میلیمتر تنظیم شد. در این مرحله نمونه در محل جوشکاری قرار داده و با اعمال شرایط مربوط به هر نمونه فرایند جوشکاری انجام شد.

جدول5- مساحت و جرم نمونههای شاهد مختلف برای کنترل میزان چگالی فلاکس اعمالی

جرم (گرم)	مساحت (سانتیمتر مربع)	شماره نمونه شاهد
8/18	31/85	١
۵/۸۱	۳./۶.	۲
۶/۱۰	31/87	٣
۵/۹۹	۳./۶.	۴
Δ/VA	٣./٣.	۵
۵/۸۵	٣./٣.	6

در نمونههایی که شامل پیش گرم می شدند (نمونه های 4 تا 9) نمونه ها بعد از اعمال فلاکس و برداشتن چسب 4 میلی متری برای ایجاد شیار بین فلاکسی، داخل کوره با دمای 200 درجه قرار داده می شدند. دمای پیش گرم بیشتر برای جبران اتلاف دمایی میان مسیر و حین فراهم کردن مقدمات جو شکاری در نظر گرفته شد. میز جو شکاری نیز به وسیله یک منبع گرمایی المنتی گرم شد تا از ایجاد شوک حرارتی و پایین آوردن ناگهانی دمای نمونه و عیوب احتمالی بعدی جلوگیری شود. می شد، به حدود 150 درجه که می رسید نمونه با انبر به محل می شد، به حدود 150 درجه که می رسید نمونه با انبر به محل میز منتقل می شد تا میز با سرعت آهسته تری دمای خود را از شرایط با کنترل دما توسط دماسنج لیز دی و تنظیم میز منتقل می شد تا میز با سرعت آهسته تری دمای خود را از شرایط با کنترل دما توسط دماسنج به محض رسیدن به دمای پیش گرم مورد نظر (2° 62/5 برای نمونههای 4 تا 6 و 2° 100

برای نمونههای 7 تا 9) فرایند جوشکاری انجام شد. مراحل ذکر شده در تصاویر شکل(3) آورده شده است.



شکل 3- مراحل آمادهسازی و اعمال جوشکاری به روش FB-TIG.a) نحوه قرار دادن نمونه اصلی و نمونههای شاهد در کنار هم جهت پاشش فلاکس، b) جانمایی نمونه در محل جوش قبل از پاشش فلاکس c) جدا کردن چسب از روی نمونه بعد از پاشش فلاکس جهت ایجاد شیار بین فلاکسی، d) گرم کردن میز جوشکاری، e) پیش گرمایش نمونههای S4 تا S9 در کوره، f) کنترل دما توسط دماسنج لیزری برای تعیین زمان شروع جوشکاری، g) نمایی از جوشکاری نمونهها

2-5- آزمونهای انجام شده نمونهها پس از انجام جوشکاری برای آنالیز خط جـوش و بررسی کیفیت جـوش ایجاد شـده بـرای هـر آزمـونی مطابق استاندارد مربوطه آماده سازی شدند.

2-5-1- بازرسی چشمی جوش

نمونهها پس از جوشکاری مورد بازرسی چشمی قرار گرفتند تا کیفیت جوش اعمالی سنجیده شود و بهترین نمونهها برای انجام آزمایشهای بعدی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل4-طرحواره ای از نقاط تحت اثر در آزمون ریزسختیسنجی



شکل5- استاندارد آزمون کشش JIS Z2201 شماره 7 [22]

2-5-2 بررسی ریزساختاری

بررسی ریزساختار حاصل در منطقه جوش، ناحیه متاثر از حرارت جوش و فلز پایه در دو مقیاس میکرو و ماکرو انجام شد. جهت آمادهسازی نمونه متالوگرافی ابتدا یک برش از سطح مقطع جوش زده شد و سطح مقطع جوش مورد بررسی قرار گرفت. موقعیت نمونهها نسبت به ابتدا و انتهای جوش ثابت بود و به فاصله 3 سانتیمتر از انتهای جوش نمونه برداری صورت گرفت پس از جدا کردن سطح مقطع با استفاده از روش متالوگرافی و طبق استاندارد ASTM E3-11 تا سنباده شماره 3000 سنباده زنی و توسط پارچه نمدی و خمیر الماسه پولیش شد تا سطح نمونه ها کاملا صاف و صیقلی شود.

برای بررسی ریزساختار نمونهها از محلول بارکر حاوی 2/5 درصد حجمي تترافلوئوروبوريک اسيد در محلول آبي [19] استفاده شد و حکاکی به صورت الکترواچ انجام گرفت. ولتاژ 20 ولت به مدت 150 ثانیه، چگالی جریان 0/2 آمپر بر سانتیمتر مربع و استفاده از کاتد آلومینیمی، شرایط مورد استفاده در الکترواچ نمونـههـا بودنـد. جهـت بررسـی درشـتسـاختار نمونهها از محلول كِلِر شامل 1 ميليليتر هيدروفلوئوريك اسيد، 1/5 میلیلیتر کلریک اسید، 2/5 میلیلیتر نیتریک اسید و 95 میلی لیتر آب [19] استفاده شد. برای محاسبه اندازه دانه از نرمافزار MIP 4 Student material استفاده شد. مقدار اندازه دانه مطابق با ASTM E-112-96 [20] به روش خطوط قطع کننده محاسبه شد. نمونه های جو شکاری شده به منظور بررسی نحوه توزيع ذرات عناصر در مقطع جوش مورد مطالعه میکروسکوپی و آنالیز عنصری قرار گرفت. برای مشاهده بهتـر یک لایه طلا روی سطح مقطع جوش پوشش داده شد. همچنین حکاکی توسط محلول بارکر برای مشاهده زیـر میکروسـکوپ الکترونی روبشی و آنالیز عنصری به روش طیفسنجی تفکیک انرژی ایجاد شد. از طرفی برای مطالعه سطح و شکستنگاری پس از انجام آزمون کشش نمونه شکسته شده از سطح مقطع شکست به ارتفاع یک سانتیمتر جدا شد و مورد مطالعه قـرار گر فت.

2-5-2- بررسي خواص مكانيكي

پس از انجام مطالعات ریزساختاری، ریزسختی سنجی مطابق با استاندارد ASTM E384-17 [21] بر نمونه ها انجام گرفت و خواص مکانیکی جوش و نواحی اطراف آن نسبت به فلز پایه مورد بررسی قرار گرفت. آزمون ریزسختی سنجی توسط دستگاه شیمیدزو (Shimidzu) با نیروی 50 گرم به مدت 10 ثانیه انجام شد. شکل (4) طرحواره ای از نحوه آزمون سختی سنجی را نشان می دهد. نمونه کشش نیز مطابق شکل (5) براساس استاندارد JIS Z2201 شماره 7 [22] به صورت ریز اندازه و در راستای طولی از داخل جوش طوری تهیه شد که کل طول سنجه داخل منطقه جوش قرار گیرد. برای مقایسه، دو

که مقدار میانگین آنها برای دقت بیشتر در تحلیلها مورد استفاده قرار گرفت. برای برشکاری نمونههای کشش نیز از وایرکات استفاده شد.

جدول6- ابعاد نمونه آزمون کشش شکل 5 به میلیمتر

W	L	Р	R	Т	Α
٣	١٢	14/4	10	٣	٣

جدول7- شرایط جوشکاری نمونههای مختلف طراحی شده توسط
روش تاگوچى

DWR	W(ميلىمتر)	D(ميلىمتر)	شماره نمونه
•/٣٨	$\Delta / \cdot 1$	1/97	S 1
•/41	۴/V1	1/94	S2
•/97	٧/۶٢	4/14	S3
•/۵۴	٧/۴.	4/•7	S4
•/9٣	٧ /۶٩	۴/۸۳	S5
•/41	$\Delta / \cdot V$	۲/•٩	S 6
•/\/٩	1./7.	٨/•٢	S 7
•/۵٩	V/ S V	4/03	S 8
•/۵V	$\mathcal{P}/\Lambda V$	۳/۹۵	S9

3- نتايج و بحث

1-3- بررسي ماكروسكوپي

نسبت عمق نفوذ به پهنای جوش یک پارامتر مناسب و مهم برای سنجش سطح کیفی جوش ها است. لذا این مقادیر اندازه گیری شد. تصاویر ماکرو گرافی در شکل (6) آمده است. همان طور که از تصاویر مشخص است نمونه 57 دارای بیشترین عمق نفوذ و نمونه S1 دارای کمترین میزان عمق نفوذ است. مقادیر عمق نفوذ (D)، عرض جوش (W) و نسبت عمق به عرض (DWR) در نمونه های مختلف نیز در جدول (7) آمده است.

3-1-1- م**کانیزم افزایش عمق نفوذ** بـا مشـاهده شـکل(6) مشـخص مـیشـود کـه اضـافه کـردن فلاکسهای فعال کننده سـطحی تغییـرات قابـل تـوجهی را بـر

مقادیر عمق نفوذ جوش و نسبت DWR می گذارند. در حالی که طبق کارهای قبلی انجام شده بر آلیاژ آلومینیم سری 5xxx به روش های TIG و TIG [23,16,11] FB-TIG عمق نفوذ جوش حداکثر در جریان های بالا حدود 3 میلی متر و نسبت DWR نیز حداکثر به میزان 20/2 گزارش شده است. در این تحقیق عمق نفوذی برابر 20/8 میلی متر نیز مشاهده شد و مقدار DWR به مقدار قابل ملاحظه 0/79 رسید که افزایش بیش از 3 برابری را نشان می دهد.



شکل6- تصاویر ماکروگرافی نمونههای جوشکاری شده

افزایش عمق نفوذ در جوشکاری FB-TIG از چندین مکانیزم مختلف ناشی می شود. طبق نظریه سیره و همکاران [11] مقاومت الکتریکی بالا و نقطه ذوب و جوش بالای فلاکس باعث انقباض قوس و افزایش توان ستون قوس می شود. همان طور که هوانگ [4] پیشنهاد کرده بود، در این تحقیق نیز ریشه قوس دچار یک انقباض آشکار شد و قوس به مرکز منطقه عاری از فلاکس محدود شد. این پدیده اساساً به دلیل مقاومت بالای فلاکس پوششی SiO2 و بالاتر بودن نقاط ذوب و جوش آن نسبت به آلیاژ آلومینیم است. در نتیجه مقاومت کانال هدایت

در منطقه پوشیده شده با فلاکس از مقاومت ماده عاری از فلاکس در منطقه باریک بین دو فلاکس بالاتر است. هنگامی که قوس وارد منطقه فلاکسدار میشود، جریان همواره از قسمتهایی از کانال هدایت با کمترین مقاومت عبور میکند. بنابراین در ابتدا تشکیل کانال هدایت بین قوس و قطعه کار در منطقهی عاری از فلاکس با مقاومت کمتر صورت میپذیرد. تحت این شرایط فلاکس مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به قطعه کار در منطقه باریک پوشیده نشده بین فلاکسی داشته که باعث محدود شدن قوس به یک نوار فلزی باریک میگردد. انواع یونهای فلاکس فعال که از تبخیر حاصل شدهاند الکترونهای هادی را به دام میاندازند و تعداد الکترونها را کاهش میدهند. در نتیجه قوس منقبض شده و ضمن کوچکتر شدن منطقه رسانا، چگالی توان قوس افزایش مییابد که نیروی لورنتز را در قوس و حوضچه مذاب میافزاید [14].

ورصر را تر توس و موصوح مناب می تربیه ۲۰۱۱. حین جوشکاری، حرارت بسیار بالای منطقه جوش می تواند باعث تجزیه حرارتی مولکول های سیلیس شود. فلاکس تبخیر شده با استفاده از جذب الکترون بیشتر می تواند قوس را محدود کند. انرژی گرمایی ایجاد شده حین فرایند جوشکاری، حرارت لازم را برای تجزیه فلاکس به بخار فراهم می کند.

این بخار فلاکس که متشکل از مولکولهای تبخیرشده و اتمهای جدا شده است، اطراف قوس الکتریکی را احاطه میکند. توده بخار فلاکس الکترونها را از اطراف قوس جذب میکند و در نتیجه باعث می شود که تجمع قوس با قطر مؤثرتری رخ دهد. با توجه به حضور میدان الکتریکی قوی، درجه حرارت بالا و الکترون با انرژی بالا این پدیده نمی تواند در مرکز قوس رخ دهد. با این حال، در مناطق بیرونی، که نسبتاً سردتر هستند و میدانهای الکتریکی ضعیف تری را دارند، الکترونها تمایل به ملحق شدن به توده بخار فلاکس را از خود نشان می دهند.

این موضوع سبب می گردد که جریان به بخش مرکزی قوس منحصر شود، که باعث افزایش چگالی جریان و در نتیجه کاهش قطر قوس می شود. با افزایش چگالی جریان، شدت انرژی قوس بالا می رود و یک نقطه آندی کوچک تشکیل

می شود و در نتیجه نفوذ جـوش عمیـقتـر و عـرض حوضـچه جوش کمتر می شود [26-24]. عمق و شکل گرده جوش به شدت تحت تأثیر الگوهای جریان فلز مذاب و مد جریان سیال در منطقه جوش است. عموماً برای

آلیاژها و فلزات خالص، کشش سطحی (σ) با افزایش دما (T) کاهش مییابد [28،27] و این بدین معنی است که در مرکز حوضچه جوش که بیشینه گرما را از مشعل جوشکاری دریافت میکند، دارای کمترین کشش سطحی در مقایسه با لبههای خارجی گرده جوش است [29]. در مرکز و لبههای حوضچه جوش یک شیب کشش سطحی قابل توجهی وجود خواهد داشت. در نتیجه فلز مذاب از منطقه با کشش سطحی پایین تر (مرکز حوضچه مذاب) به منطقه با کشش سطحی بالاتر (حاشیه حوضچه مذاب) جریان مییابد [30].

با کاهش اندازه شیار فلاکس به تدریج غلظت عنصر فعال در سطح (اکسیژن) درون حوضچه جوش مذاب به واسطه ذرات سیلیس مجاور حوضچه افزایش می یابد و گرمای شدیدی حین جوش ایجاد می شود. با افزایش غلظت اکسیژن در حوضچه جوش، ضریب دمای مؤثر باعث می شود کشش سطحی منفی به مثبت تغییر کند. این باعث می شود که نیروهای کشش سطحی مثبت تغییر کند. این باعث می شود که نیروهای کشش سطحی با افزایش درجه حرارت افزایش یابد. این موضوع باعث افزایش کشش سطحی در وسط حوضچه مذاب که دارای بیشترین دما است، می شود. به این دلیل، جهت جریان فلز مذاب معکوس» خواهد شد که به طور عمومی «جریانهای مارانگونی معکوس» یا «همرفت مارانگونی معکوس» نامیده می شود. این باعث نفوذ بیشتر جوش همراه با کاهش در عرض گرده جوش می گردد [32،31،26،24]. این پدیده در شکل (7) نشان داده شده است.

بنابراین، حوضچه جوش نسبت به حالت معمول که کمعمق و پهن بود، عمیق و باریک می شود [33]. محدودیت این مکانیسم غلظت اکسیژن است. حضور اکسیژن در حوضچه جوش سبب ایجاد جریان مارانگونی معکوس می شود. جریان مارانگونی معکوس نیاز دارد که ضریب حرارت مؤثر کشش سطحی از منفی به مثبت تغییر کند. زمانی که عناصر فعال (در این مورد

اکسیژن) به غلظت خاصی در حوضچه جوش (300-100 پیپیام) برسد این اتفاق می افتد. غلظت اکسیژن در حوضچه جوش با توجه به تجزیه حرارتی مولکول های سیلیس افزایش مییابد. بنابراین، این مکانیسم تنها زمانی فعال می شود که شیار فلاکس آنقدر کوچک باشد که اجازه دهد تا ذرات سیلیس ذوب شوند و به صورت حرارتی تجزیه گردند [34].



در نتیجه مشاهده می شود که با سه تئوری عمده اثر عایق بودن فلاکس، تجمع ریشه قوس و اثر مارانگونی معکوس، عمق نفوذ و نسبت DWR افزایش و میزان HAZ کاهش می یابد. از طرفی چون بزرگترین محل عیب جوش HAZ آن است، نتیجه بسیار مطلوبی تلقی می گردد.

3-1-2- تحليل تاگوچي از مقادير عمق نفوذ

با وارد کردن مقادیر عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض به نرم افزار مینی تب تحلیل تاگوچی برای شرایط مختلف آزمونهای انجام شده صورت گرفت. شکل (8) نمودار مربوط به مقدار آماری نسبت سیگنال به برای عمق نفوذ است. عمق نفوذ بالاتر بهتر در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه مقیاس محورهای افقی و عمودی در نمودارهای نرمافزار مینی تب برای سطوح مورد آزمایش مختلف، برابر است پس می توان نمودارها را با هم مقایسه کرد. طبق نمودارها مشاهده می شود که با افزایش جریان و درجه حرارت و با کاهش سرعت، عمق نفوذ در وضعیت بهتری

قرار می گیرد. تغییر در سطوح مختلف جریان و دمای پیش گرم تغییرات قابل توجهی را بر مقدار عمق نفوذ خواهد گذاشت. اما این تغییر در مورد سرعت جوشکاری به نسبت جریان و دمای پیش گرم کمتر است و با تغییر سطح سرعت از 170 میلی متر بر دقیقه به 145 میلی متر بر دقیقه و سپس به 120 میلی متر بر دقیقه به 145 میلی متر بر دقیقه و سپس به و از 12 به 105 می رسد. اما با افزایش جریان از 170 آمپر به 195 آمپر و بعد به 220 آمپر، مقدار SNR حدود 5/6 واحد تغییر می کند و از 5/8 به 15 می رسد. نکته قابل توجه در مورد جریان، شیب تقریبا خطی نمودار جریان در مقابل SNR است. یعنی هرچه جریان افزایش پیدا کند به همان نسبت عمق نفوذ نیز افزایش می بابد و احتمال آن می رود که در جریانهای بالاتر نیز عمق نفوذ بیشتری مشاهده شود.

با اعمال پیشگرم و رساندن آن به 62/5 درجه سانتی گراد و سپس به 100 درجه سانتی گراد مقدار SNR نیز همچون جریان 6/5 واحد تغییر میکند و از 8/5 به 15 میرسد.

البته تفاوت اثر پیش گرم با جریان از روی نمودار مشخص است و این گونه تفسیر می شود که در مورد دمای پیش گرم هرچه این مقدار بیشتر افزایش یابد اثر گذاری آن بیشتر نمایان می شود. می توان گفت که بر خلاف جریان این افزایش در مقدار عمق نفوذ دیگر خطی نیست و تاثیر افزایش دمای پیش گرم به یک میزان ثابت بر عمق نفوذ در دماهای بالاتر بیشتر است. چرا که شیب نمودار در دماهای بالاتر افزایش می یابد.

اما نکته دیگر این است که اثر بهینه دمای پیش گرم بیشینه بر عمق نفوذ و اثر بهینه جریان جوشکاری بر عمق نفوذ در سطوح مورد استفاده در این آزمایش طوری بودند که بیشینه جریان و بیشینه دمای پیش گرم تقریبا به یک میزان موجب افزایش عمق نفوذ می شوند. اما با توجه به خطی بودن نمودار SNR جریان و همچنین صعودی بودن شیب نمودار SNR دمای پیش گرم، پیش بینی می شود که در دماهای پیش گرم بالاتر اثرگذاری مطلوب بر عمق نفوذ بیش از اثر گذاری مطلوب جریانهای بالاتر جوشکاری باشد.



شکل8- نمودار SNR در مقابل سطوح مختلف پارامترهای متغیر مورد آزمایش

ریزساختار ناحیه جوش در حالت یس از جوشکاری شامل 3 منطقه فلز جوش، ناحیه متاثر از حرارت و فلز پایه بدون تاثیر است. بررسی های انجام شده بر فلز پایه آلیاژ آلومینیم 5083 نشان میدهد که زمینه این آلیاژ یک ساختار دانه ریے و کشیده شده متشکل از فاز محلول جامد آلفا (محلول جامد منیزیم در آلومینیم) بوده که ذرات ریـز Mg₂Al3 و ذرات درشـت شـامل تركيبات بين فلزى Al-Fe-Si-Mn در داخل أن توزيع شدهاند [35]. ساختار منطقه جوش يک ساختار انجمادي است و دانههای محلول جامد آلفا به همراه توزیع ترکیبات فلزی نامحلول در زمینه قابل مشاهده است. ذرات نامحلول بین فلـزی به احتمال زیاد طبق منابع مطالعـاتی Mg₂Si اسـت [36]. زیـرا سرعت سرد شدن و انجماد آن قدر زیاد است که از تشکیل Mg₂Al3 جلوگیری می شود [34]. با مشاهده تصاویر متالوگرافی در نمونه های 33، 57، 88 و 59 مشخص می شود که در ساختار جوش تخلخل وجود دارد و در نمونههای S3، S3 و S9 مقدار این تخلخل ها بیشتر از دیگر نمونهها است. در نمونه S9 نیز تخلخل با اندازه بزرگتر دیده میشود. در حالی که در تصاویر متالوگرافی نمونه S4 تخلخل بسیار کمتـر اسـت. بـا توجـه بـه پارامترهای جوشکاری در نظر گرفته شده برای هر نمونه، از سوی دیگر با توجه به کارهایی که در گذشته روی FB-TIG آلیاژهای آلومینیم سری 5xxx صورت گرفته است [23،16،11]، بیشترین عمق نفوذ میزان 6 میلیمتر به دست آمده که با در نظر گرفتن این موضوع که اثر پیش گرم در این تحقیقات بر افزایش عمق نفوذ نادیده گرفته شده، نقش تعیین کنندگی و مکمل بودن دمای پیش گرم بر اثر افزایش جریان و کاهش سرعت جوشکاری قابل درک است. پس میتوان نتیجه گرفت که همافزایی اثر جریان و دیگر پارامترهای متغیر بخصوص دمای پیش گرم که مقدار SNR بالاتری را نسبت به سرعت جوشکاری دارد، نقش مهمی را در افزایش عمق نفوذ دارد.

3-2- بررسی میکروسکوپی پـس از بررسـی مـاکروگرافی و مشـاهده عمـق نفـوذ و پاسـخ تاگوچی، 5 عدد از نمونهها که دارای بیشترین عمق نفوذ بودنـد برای مطالعهی خواص فیزیکی و مکانیکی برگزیده شدند.

3-2-1- بررسی ریزساختار با میکروسکوپ نوری در شکل (9) ریز ساختار نمونههای مختلف آمده است.

S9	S 8	S7	S4	S3	اندازهی دانه (μm)
127/72	775/.7	170/91	190/00	147/71	فلز جوش
770/19	249/12	201/12	103/29	191/VA	منطقه متاثر از حرارت
		148/1			فلز پايه

جدول 8- اندازه دانه نواحي مختلف جوش

	جدول9- نتایج آنالیز EDX از فلز پایه و فلز جوش نمونه S7						
Al	Si	Fe	Mn		Mg	عناصر	
94/41	•/٣٧	۰/٣۰	•/۵A	4/71	فلز پايه	درصد	
94/79	1/VV	•/•V	•/۲۰	۳/۷۰	فلز جوش نمونه S7	وزنى	

دنبال میکند، این مورد نیز در تحقیقات پیشین بیان شده است [38،37]. حفرهها میکرونی و در اکثر موارد کاملا کروی هستند و ابعاد آن بسته به پارامترهای جوشکاری متفاوت است.



شکل9- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونههای 33 84 83 و 89

در بررسیهای یانگ و همکارانش [16] در جوشکاری FB-TIG آلیاژ آلومینیم 5083 با فلاکسهای مختلف مشخص

نمونه S3 دارای بیشترین سرعت جوشکاری و نمونههای S7، S8 و S9 دارای بیشترین جریان با سرعتهای متفاوت هستند. اما نمونه S4 دارای کمترین سرعت و جریان متوسط است. در نتیجه هر دو عامل جریان و سرعت جوشکاری در یدید آمدن این تخلخلها در ساختار جوش نقش دارند. شایان ذکر است سرعت جوشکاری عامل تاثیرگذارتری است. در میان سه نمونه جوشکاری شدہ با بالاترین جریان، با افزایش سرعت جوشکاری تخلخل های موجود در ساختار جوش افزایش مییابند. در نمونه S9 کـه دارای بیشـترین سـرعت و بیشـترین جریان است، تخلخل ها اندازه بزرگتری دارند. نمونه S7 یعنی نمونه با عمق نفوذ بیشتر، کمترین سرعت جوشکاری را داشته و نسبت به دیگر نمونه های با بیشینه جریان، کمترین تخلخل را دارد. از این رو می توان نتیجه گرفت که تشکیل این تخلخل ها در اثر افزایش جریان و سرعت چوشکاری است در سرعت جوشکاری بالا و سرمایش بسیار سریع، تخلخلها زمان کافی برای خروج از حوضچه مذاب را پیدا نمی کننـد و بـه صـورت فوق اشباع باقی میمانند. از طرفی در سرعت های جوشکاری پایین و به عبارتی سرمایش آهسته، مدت زمان کافی برای رسيدن اين تخلخلها به سطح و خروج أنها وجود خواهد داشت. بررسی مقاطع جوشها نشان داد تمامی حفرات سطحی و یا نزدیک به سطح هستند و در مرز ذوب توزیع شدهاند. چنین توزیعی ناشی از نحوه جریان همرفت مذاب از ریشه به سمت بالاست که فصل مشترک مذاب جامد را به سمت سطح

شد که در این آلیاژ فقط در صورت استفاده از فلاکس SiO₂، این تخلخلها در ساختار جوش بوجود آمد. اما این پدیده در صورت استفاده از دیگر فلاکسها رخ نداد.

همانطور که در شکلها مشخص است و با توجه به تحقیقات صورت گرفته بر جوشکاری TIG آلومینیم سری 5xxx حضور فلاکس اکسیدی موجب افزایش حرارت ورودی در واحد طول جوش می گردد. در جوشکاری FB-TIG حرکت سیال حوضچه جوش به دلیل افزایش فشار ستون قوس، پرتلاطمتر از جوشکاری TIG است که این موضوع باعث تکه تکه شدن نوک دندریتها در ناحیه خمیری می شود. این دندریتهای تکه تکه شده به درون حجم حوضچه جـوش وارد مـیشـوند و بـه عنوان هسته های مناسب جوانه زنی ناهمگن عمل میکنند [23]. در ناحیه فلز جوش هر چه به مرز ذوب نزدیکتر می شویم دانهها ريزتر مي شوند. مي توان گفت دليل آن وجود مناطق مناسب جوانهزنی ناهمگن زیاد در مرز ذوب و روی فلز پایه است. به عبارتی فلز پایه نقشی مشابه با نقش دیواره قالب در انجماد ذوب قطعه ریخته گریشده دارد. با بررسی تصاویر متالوگرافی مشاهده شد که در تمامی ساختارهای جوش دانهبندی هممحور است و انجماد ستونی در مرز ذوب ایجاد نشده است.

با توجه به مکانیزمهای افزایش عمق نفوذ در جوشکاری FB-TIG یکی از دلایل این افزایش، تجزیه فلاکس در لبههای قسمت عاری از پوشش و قرار گرفته در زیر قوس است. تجزیه فلاکس SiO₂ در این نواحی باعث به وجود آمدن ابری میگردد که الکترونهای مناطق بیرونی تر قوس با دمای کمتر را به دام میاندازند و قوس با توان بیشتری و به صورت متمرکزتر برقرار میشود. این تمرکز قوس باعث میشود که قوس در همه نقاط با دمای نزدیک به هم از میان منطقه عاری از فلاکس عبور کند و در هنگام ذوب، گرادیان حرارتی را در فواصل مختلف از خط مرکزی جوش کم کند.

کاهش گرادیان حرارتی، ناحیـه واقـع در تحـت تبریـد جلـوی جبهه اصلی انجماد را افزایش میدهد و به رشد هممحور کمک میکند. افزایش سرعت انجماد نیز تحت تبریـد در جبهـه رشـد

اصلی را افزایش میدهد. همچنین اندازه ناحیه به تحت تبریـد رفته را افزایش میدهد و در نتیجه به رشد هممحور کمک می-کند [39].







شكل10- تصوير ميكروسكوپ الكترونى روبشى نمونه 57، الف- فلز پايه، ب- فلز جوش و ج- فلز جوش نزديک به مرز ذوب و حفرات اين منطقه.

درصد ازدیاد طول	استحکام شکست (مگاپاسکال)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	نمونه
۳۵	3.8	149	فلز پايه
21	TVO	101	S3
١٨	707	114	S4
74	TVV	189	S 7
۱۵	272	101	S 8
۲۱	788	101	S 9

جدول10- خواص مکانیکی نمونه های جوشکاری شده

3-2-2- محاسبه اندازه دانه

اندازه دانه برای مناطق فلز جـوش، منطقـه متـاثر از حـرارت و فلز پایه برای نمونـههـای مختلـف در جـدول (8) آورده شـده است.

منطقه متاثر از حرارت به دلیل عملیات جوشکاری تحت سیکلهای حرارتی مختلفی قرار می گیرد. آلیاژ آلومینیم 5083 یک آلیاژ کار سرد شده است که در برابر حرارت ناشی از جوشکاری این منطقه مورد بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه قرار می گیرد. همچنین این حرارت ورودی که در نمونههای متفاوت جوشکاری شده در این تحقیق نیز با یکدیگر فرق میکنند، باعث می شود که رسوبات به سمت مرزدانهها حرکت کرده و یک شبکه پیوسته را تشکیل دهند [35].

همچنین مشاهده می گردد که نمونه S7 در منطقه متاثر از حرارت دارای بیشترین اندازه دانه در میان نمونه های مختلف می باشد. با توجه به این که S7 دارای بیشترین میزان حرارت ورودی در بین نمونه ها است و همچنین دمای پیش گرم 100 درجه سانتی گراد در این نمونه هر دو باعث کاهش سرعت سرد شدن و درشتدانه تر شدن منطقه HAZ می گردد. با این حال نمونه S3 نیز که دارای کم ترین میزان حرارت ورودی است اندازه دانه کوچک تری در منطقه HAZ نسبت به دیگر نمونه ها دارد که با توجه به عدم پیش گرم این نمونه و همچنین اثر حرارت ورودی قابل توجیه است.

3-2-3- بررســى ريزسـاختار بــا ميكروسـكوپ الكترونــى

رویشی نمونه S7 جهت بررسی دقیقتر با میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مجهز به EDX مورد مطالعه قرار گرفت. تصاویر SEM از فلز جوش نمونه S7 و فلز پایه در شکل(10) آمده است. پیشبینی میشد که با توجه به کارهای صورت گرفته در حوزه FB-TIG مقادیری از فلاکس SiO2 تحت انرژی قوس قرار گرفته و وارد حوضچه مذاب شوند. تجزیه SiO2 به سیلیسیم و اکسیژن صورت گرفته و سیلیسیم به صورت محلول در زمینه آلومینیم میتواند ظاهر شود و یا با منیزیم موجود ترکیب Mg₂Si را بدهد.

3-3- خواص مکانیکی

پس از بررسی مفصل خواص فیزیکی برای مشاهده تطابق نتایج با تحلیلها آزمایشهای خواص مکانیکی از جملـه ریزسـختی سنجی و آزمایش کشش انجام گرفت.

3-3-1- بررسی نتایج آزمون کشش شکل (11) و جدول (10) به ترتیب نمودارهای استحکام کششی و خواص مکانیکی اتصال را برای نمونههای جوش داده شده نشان می دهد. تصاویر شکست نگاری نمونه های S7 و S8 در شکل (12) آمده است. از بررسی میکروسکوپی اطلاعات مهمی درباره ماهیت شکست به دست میآید. بررسی نمونههای گسیخته شده نشان میدهد که سطح شکست نمونهها متشکل از ساختار حفرهای (Dimpled Structure) است. حفرات نسبتا عميق و هم محور هستند. اين ساختار حكايت از شكست نـرم دارد که این امر ناشی از چقرمگی بالا در آلیاژ آلـومینیم اسـت. گلویی در نقطه مومسان که ازدیاد استحکام به علت کرنش سختی افت پیدا می کند تا کاهش سطح مقطع را جبران کند، رخ میدهد. این شکست در بار حداکثر یا هنگامی رخ میدهـد کـه کرنش حقیقی مساوی ضریب کرنش سختی است. تشکیل گلویی باعث ایجاد حالت تنش سه بعدی در ناحیه میشود. مولفه هیدرواستاتیکی کشش در امتداد محور نمونه و در مرکز ناحیه گلویی عمل میکند. در این ناحیه تعداد زیادی حفره ریز



شکل11- نتایج آزمون کشش برای نمونههای جوشکاری شده

وجود حفرات بزرگ که در تصاویر میکروسکوپ نوری هم مشخص بود و در شکل (12-ج) نیز می بینیم، ترک از همان مناطق آغاز شده و به سرعت اشاعه پیدا کرده و مشاهده می گردد که استحکام تسلیم نهایی و تنش شکست آن بسیار پایین تر از دیگر نمونه هاست. از طرفی دیگر در نمونه 57 که در شکل (12-الف) نیز تصویر SEM آن آمده است حفرات و شکست نرم کاملا قابل مشاهده است.

3-3-2- بررسي نتايج آزمون ريزسختي

نمودار ریزسختی سنجی نمونه ها در شکل 13 مشاهده می شود. از نمودار مشخص است که سختی نمونه 23 در منطقه متاثر از حرارت از بقیه نمونه ها بیشتر است. کاهش استحکامی که در سختی نمونه ها در یک فاصله خاص از خط مرکزی جوش وجود دارد نشانگر این است که وارد منطقه HAZ شده ایم. در این نواحی که کمترین سختی یک نمونه قرار دارد، با مقایسه نمونه های مختلف به این نتیجه می رسیم که نمونه دی سختی بیشتری در این منطقه دارد. اما نمونه 73 دارای کمترین سختی در این ناحیه است. با توجه به اینکه نمونه 75 دارای بیشترین عمق نفوذ است مهمترین نمونه در این تحقیق است که با توجه تشکیل می شود. که با ادامه کرنش رشد میکنند و بـه صـورت یک ترک مرکزی به هم می پیوندند.

این ترک در راستای عمود بر محور نمونه بزرگ می شود تا به سطح نمونه نزدیک شود. سپس در امتداد صفحات برشی موضعی که 45 درجه است اشاعه پیدا می کند و بخش مخروطی شکست تشکیل می شود [40]. از تصاویر مشخص است که نمونه 57 بیشترین درصد ازدیاد طول را نیز داشت. یعنی تنش تسلیم بالا به همراه شکست در تنش های بالاتر در بهترین نمونه تحقیق از نظر عمق نفوذ اتفاق افتاده است. با مقایسه سطح زیر منحنی تنش کرنش و نتایج حاصل از آزمایش ها این نمونه بیشترین چقرمگی را نیز دارد. درصد ازدیاد طول در همه نمونهها کاهش داشته که می تواند به دلیل تشکیل رسوبات ترد

در فلز جوش همچون MgSi₂ و Al₆(Fe-Mn باشد [41]. اما این کاهش نرمی برای S7 از همه کمتر بوده به طوری که درصد ازدیاد طول در آن 69 درصد فلز پایه است. حال آن که نمونه S8 که کمترین درصد ازدیاد طول را داشت مقدار آن برابر با 43 درصد فلز پایه است. در شکل (12-ب) که مربوط به نمونه S8 است با توجه به ساختار صاف و براق و البته در کنار حفرات نمایانگر یک شکست نیمه ترد است. این نمونه به دلیل

به نتایج آزمایش کشش نیز از دیگر نمونهها چقرمهتر است.







شکل12- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست الف) نمونه ۶۲، ب) و ج) نمونه ۶8 و حفرات بزرگ در سطح مقطع شکست

7.

البته با توجه به در نظر گرفتن افزایش قابل توجه نسبت عمق نفوذ به عرض در این نمونه و مکانیزمهای مختلف روش FB-TIG که در بخشهای قبلی شرح داده شدهاند، عرض جوش و HAZ در این روش جوشکاری نسبت به TIG معمولی

کاهش مییابد. پس کمتر میتوان افت سختی در HAZ در این فرایند را نسبت به دیگر فرایندها برای استحکام جوش مضر قلمداد کرد. سختی در منطقه HAZ به شدت کاهش یافته که میتواند مربوط به درشت دانه بودن همه نمونهها در این منطقه باشد. از طرفی فلز جوش نمونه S7 که در تصاویر میکروسکوپی دارای ریزترین ساختار بود، سختی بیشتری نسبت به بقیه نمونهها دارد.



شكل 13- نمودار ريزسختي نمونه هاي جوشكاري شده

4- نتيجەگىرى

در این تحقیق جوشکاری B-TIG F بر روی آلیاژ 5083 و با در نظر گرفتن سه پارامتر متغیر میزان جریان، سرعت جوشکاری و مقدار پیشگرم در سه سطح مختلف و با استفاده از روش طراحی تاگوچی انجام گرفت. پس از جوشکاری و انجام آزمایشهای مختلف نتایج زیر حاصل شد:

- با نتایج به دست آمده از بررسی ماکرو گرافی مشخص شد که پیش گرم کردن نمونه می تواند عمق نفوذ جوش در جو شکاری FB-TIG را بسیار بهبود بخشد. همچنین جریان بالای جو شکاری و سرعت کم از دیگر مؤلفه های افزایش عمق نفوذ هستند.

- از تحلیل تاگوچی این نتیجه دریافت شد که سرعت جوشکاری نسبت به جریان و پیش گرم در افزایش عمق نفوذ تأثیر کمتری دارد. [5] Y. Huang, D. Fan, and F. Qinghua, Weld, J, vol. 3, p. 10, 2004.

[6] A. S. Babu, P. Giridharan, P. R. Narayanan, S. Narayana Murty, and V. Sharma, "Experimental Investigations on Tensile Strength of Flux Bounded TIG Welds of AA2219-T87 Aluminum Alloy," Journal of Advanced Manufacturing Systems, vol. 13, pp. 103-112, 2014.

[7] G. Rückert, B. Huneau, and S. Marya, "Optimizing the design of silica coating for productivity gains during the TIG welding of 304L stainless steel," Materials & design, vol. 28, pp. 2387-2393, 2007.

[8] C. R. Heiple and J. R. Roper, "Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry," Welding Journal, vol. 61, pp. 97–102, 1982.

[9] D. K. Aidun and S. A. Martin, "Effect of sulphur and oxygen on weld penetration of high-purity austenitic stainless steels," Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 6, pp. 496–502, 1997.

[10] S. Lu, H. Fujii, and K. Nogi, "Marangoni convection in weld pool in CO2-Ar-shielded gas thermal arc welding," Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 35, pp. 2861-2867, 2004.

[11] S. Sire and S. Marya, "On the development of a New Flux Bounded TIG process (FBTIG) to enhance weld penetrations in aluminium 5086," International Journal of forming processes, vol. 5, pp. 39-52, 2002.

[12] H.-L. Lin and T.-M. Wu, "Effects of activating flux on weld bead geometry of Inconel 718 alloy TIG welds," Materials and Manufacturing Processes, vol. 27, pp. 1457-1461, 2012.

[13] Y. Huang and D. Fan, The Weld. j, vol. 4, p. 9, 2003.

[14] A. Santhana Babu, P. Giridharan, P. Ramesh Narayanan, and S. Narayana Murty, "Microstructural investigations on ATIG and FBTIG welding of AA 2219 T87 Aluminum alloy," in Applied Mechanics and Materials, 2014, pp. 489-493.

[15] S. B. AV and G. PK, "Modeling and Optimization of FBTIG Process to weld AA 2219-T87 Aluminum Alloy," Second International Conference on Advanced Manufacturing and Automation, pp. 136-140, 28-30 March 2013.

[16] Y. Zhao, G. Yang, K. Yan, and W. Liu, "Effect on formation of 5083 aluminum alloy of activating flux in FBTIG welding," in Advanced Materials Research, 2011, pp. 2385-2388.

[17] S. Jayakrishnan, P. Chakravarthy, and A. M. Rijas, "Effect of Flux Gap and Particle Size on the Depth of Penetration in FBTIG Welding of Aluminium," Transactions of the Indian Institute of Metals, pp. 1-7.

[18] ASTM E3-11(2017), Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017

[19] A. Handbook, "Metallography and microstructures," Edited by GF Vander Voort, ASM Intenational, vol. 9, 2004.

[20] ASTM E112-96(2004), Standard Test Methods for

- با مشاهده تصاویر ریزساختاری مقادیری تخلخل در نمونههای 33، 57، 88 و 59 دیده شد که در 57 کمتر و در 33، 88 و 59 از همه بیشتر بود. همچنین در نمونه 59 تخلخلهای بزرگی مشاهده شد که مشخص شد جریان بالای جوشکاری و به خصوص سرعت بالا در پدید آمدن این تخلخلها نقش اساسی بازی می کنند.

- در بررسی اندازه دانه مشخص شد که نمونه S7 به دلیل حرارت ورودی بالا دارای HAZ درشت دانهتری نسبت به دیگر نمونهها بود. در حالیکه نمونه S3 با کمترین حرارت ورودی ریزدانهترین HAZ را در بین سایر نمونهها داشت.

- در بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی و بررسی EDX مشخص شد که مقدار سیلیسیم در فلز جوش به دلیل تجزیه مقادیری از آن در زیر انرژی قوس و حل شدن در فلز جوش افزایش یافته است.

- از نتایج آزمایش کشش این نتیجه حاصل شد که استحکام و درصد ازدیاد طول در همه نمونهها نسبت به فلز پایه کاهش مییابد. ولی این کاهش استحکام در نمونه S7 از همه کمتر بود. بهطوری که درصد ازدیاد طول در S7 برابر با 69 درصد فلز پایه و در 88 که بیشترین افت استحکام را به دلیل حفرات بسیار زیاد داشت، درصد ازدیاد طول برابر با 43 درصد فلز پایه بود. - آزمایش سختی نشان داد که در داخل منطقه فلز جوش S7 دارای بیشترین سختی و 88 دارای کمترین سختی است. اما در منطقه TAZ افت استحکام شدیدی در نمونه S7 به دلیل منطقه IAZ افت استحکام شدیدی در نمونه S7 به دلیل سایر نمونهها داشت. و نیز نمونه S3 با کمترین حرارت ورودی بیشترین استحکام را در منطقه S7 داشت.

منابع

[1] D. Fan, F. Shao, and HuangYong, *Weld. Tech*, vol. 36, p. 20, 2007.

[2] A. Handbook and B. Welding, Soldering, vol. 6 *ASM International, Material Park, OH*, p. 438, 2005.

[3] W. Robert and J. Messler, "Principles of welding," ed: New York: John Wiley & Sons, Inc, 1999.

[4] Y. Huang, D. Fan, and F. Qinghua, Chn J. Of Mech. Eng., vol. 142, p. 45, 2006.

Downloaded from intjournals.iut.ac.ir on 2025-04-18

[33] S. Lu, H. F. H, and K. N. K, p. 380, 2004.

[34] K. D. Sattler, Handbook of nanophysics: nanoparticles and quantum dots: CRC press, 2016.

[35] A. R. Kooshki Ardestani, M. Goodarzi, M. A. Bootorabi, The effect of adding oxygen and nitrogen to the argon shield gas in the GMAW welding process on the apparent and structural properties of the aluminum alloy 5083H321, *Proceeding of the 12th Iran Manofacturing engeneering conference*, Tehran, Iran, September 27-29, 2011. (in persian *General Conference*)

[36] R.A. Saravanan, J.M. Molina, J. Narciso, Effects of Nitrogen on the Surface Tension of Pure Aluminium at High Temperatures, Scriptamater.44 (2001)965–970.

[37] Sh. Tahmasebi, F. Malek Ghaeeni, M. J. Torkamani, Investigating the amount and distribution of gas porosity in conduction welding of aluminum alloy 5083 Using Fiber Laser, 5th International Conference on Materials Engineering and Metallurgy, Shiraz, Iran, November 8-9, 2016. (in persian فارسی)

[38] Haboudou A, Peyre P, Vannes AB, Peix G. Reduction of porosity content generated during Nd: YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys. Materials Science and Engineering: A. 2003 Dec 20;363(1-2):40-52.

[39] Davies, G. J., and J. G. Garland. "Solidification structures and properties of fusion welds." *International metallurgical reviews*20.1 (1975): 83-108.

[40] Dieter GE, Bacon DJ. Mechanical metallurgy. New York: McGraw-hill; 1986 Apr.

[41] Calcraft RC, Wahab MA, Viano DM, Schumann GO, Phillips RH, Ahmed NU. The development of the welding procedures and fatigue of butt-welded structures of aluminium-AA5383. Journal of Materials Processing Technology. 1999 Aug 30;92:60-5.

Determining Average Grain Size, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

[21] ASTM E384-17, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

[22] Japanese Standards Association. "Japanese Industrial Standard (JIS) Z2201: Test pieces for Tensile Test for Metallic Materials." (1980): 19-25.

[23] Liu Y, Wang W, Xie J, Sun S, Wang L, Qian Y, Meng Y, Wei Y. Microstructure and mechanical properties of aluminum 5083 weldments by gas tungsten arc and gas metal arc welding. Materials Science and Engineering: A. 2012 Jul 15;549:7-13.

[24] P. J. Modenesi, E. R. Apolinario, and I. M. Pereira, J. Mater. Process. Technol., p. 260, 2000.

[25] D. Fan, R. Zhang, Y. Gu, and M. Ushio, Trans JWRI, vol. 30, p. 35, 2001.

[26] H. Fujii, T. Sato, S. Lu, and K. Nogi, Mater. Sci. Eng. A., p. 495, 2008.

[27] Miller R, Liggieri L, editors. Bubble and drop interfaces. CRC Press, 2011.

[28] Sugden S, The variation of surface tension with temperature and some related functions. J Chem Soc Trans 1924; 125:32-41.

[29] Y. Zhao, G. Yang, K. Yan, and W. Liu, Adv. Mater. Res., pp. 311-313, 2011.

[30] Y. L. Xu, Z. B. Dong, Y. H. Wei, and C. L. Yang, Theor. Appl. Fract. Mech., p. 178, 2007.

[31] Tsai MC, Kou S. Marangoni convection in weld pools with a free surface. Int J Number Methods Fluids 1989;9(12):1503-16.

[32] Lu S, Fujii H, Sugiyama H, Tanaka M, Nogi K. Weld penetration and marangoni convection with oxide fluxes in GTA welding. Materi Trans 2002;43(11):2926-31.