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

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

رضا کریم‌پور، 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)

چکیده

در تحقیق حاضر اثر سه متغیر جریان، سرعت جوشکاری و دمای پیش‌گرم 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 پیش‌بینی‌ها، با افزایش جریان و میزان پیش‌گرم و کاهش سرعت جوشکاری، عمق نفوذ افزایش یافت. بیشترین مقدار عمق نفوذ 8/02 mm بود که در جریان 220 A، سرعت 120 mm/min و دمای پیش‌گرم 100 درجه سانتی‌گراد به دست آمد. تحلیل تاگوچی اثر بیشتر جریان و دمای پیش‌گرم نسبت به سرعت جوشکاری را نشان داد. تحلیل میکروسکوپی نشان دهنده ریزدانه شدن فلز جوش و درشت شدن دانه‌های HAZ در تمامی نمونه‌ها بود. حفرات بسیاری نیز در نمونه‌های 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 ازدیاد طول را داشت که 69 درصد فلز پایه بود. همچنین با آزمون ریزسختی‌سنجی دریافت شد که سختی این نمونه در HAZ افت شدیدی دارد و از 70 به 58 ویکرز رسید.

کلمات کلیدی: جوشکاری، آلیاژ آلومینیم 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

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: farzadi@aut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

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.

1- مقدمه

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 می‌دهد [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 راکِرت و همکارانش [7] تجمع و محدود شدن قوس و نیز بر اساس مشاهدات هِیپِل و روپِر [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 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].

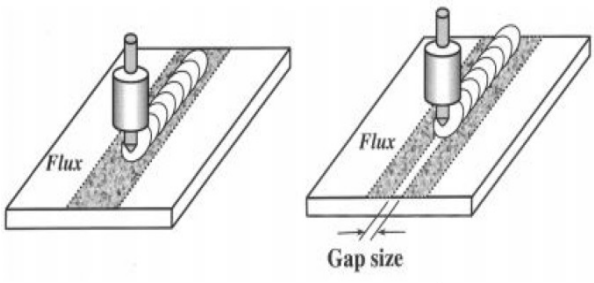
از میان A-TIG و FB-TIG سیره و ماریا فرایند FB-TIG را برای آلیاژهای آلومینیم مناسب‌تر ارزیابی کردند [11]. زیرا وجود این نوار خالی از فلاکس باعث باقی ماندن قوس در آن محل و پایداری قوس می‌شود و در عین افزایش عمق نفوذ، ظاهر خوب جوش را نیز در پی دارد [14،13]. سانتانا بابو و همکارانش [15] در سال 2014 به مقایسه کیفیت جوش ایجاد شده در آلیاژ آلومینیم 2219 به روش A-TIG و FB-TIG پرداختند و مشاهده نمودند که پراکنده شدن قوس و تمایل به ترک ذوبی جزیی در اتصال صورت گرفته به روش A-TIG اتفاق می‌افتد.

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

فلاکس‌ها SiO_2 با اندازه شیار 4 میلی‌متر بیش‌ترین 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 0/59 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 میلی‌متر حاصل شد که در مقایسه با 2/5 میلی‌متر عمق نفوذ در حالت TIG معمولی نشان از افزایش بیش از 2 برابری آن در فرایند جدید داشت.



شکل1- شماتیکی از فرایندهای A-TIG (سمت چپ) و FB-TIG (سمت راست) [12]

جوشکاری FB-TIG به تازگی توسعه یافته و اخیراً کارهای بیشتری روی این روش جوشکاری انجام می‌دهند و هنوز هم نقاط قابل پیشرفتی برای افزایش عمق نفوذ در آن یافت می‌شود. 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 نمی‌دهد. همچنین موضوع پیش‌گرم کردن نمونه قبل از جوشکاری تا به حال در هیچ مقاله‌ای به کار گرفته نشده است. در حالی که افزایش عمق نفوذ با افزایش پیش‌گرم نمونه قابل پیش‌بینی است. بنابراین در این تحقیق سعی می‌شود که اثر پیش‌گرم بر این فرایند و اثر همزمان آن با افزایش جریان جوشکاری و کاهش سرعت جوشکاری بررسی شود.

۲- مواد و روش‌ها

2-1- تعیین پارامترهای ثابت و متغیر

برای تعیین پارامترهای ثابت و متغیر از مقالات و پژوهش‌های انجام گرفته بر این موضوع استفاده شد [6،7،11،12،14،16،17]. بر این اساس جریان، سرعت جوشکاری و دمای پیش‌گرم 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

پارامترهای ثابت	توضیحات
ترکیب شیمیایی فلاکس	SiO_2
شیار بین فلاکسی	۴ میلی‌متر
چگالی سطحی فلاکس	۱۵ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع
طول قوس	۲ میلی‌متر
نوع و میزان گاز محافظ	آرگون، ۱۸ لیتر بر دقیقه
جنس و زاویه‌ی نوک الکترود	تنگستن خالص، گرد
قطر الکترود تنگستنی	۳/۲ میلی‌متر

جدول2- پارامترهای جوشکاری

پارامترهای متغیر	واحد اندازه‌گیری	سطوح مورد آزمایش
جریان جوشکاری	آمپر	۱۷۰، ۱۹۵، ۲۲۰
سرعت جوشکاری	میلیمتر بر دقیقه	۱۲۰، ۱۴۵، ۱۷۰
دمای پیش‌گرم	درجه سانتی‌گراد	بدون پیش‌گرم، ۶۲/۵، ۱۰۰

2-2- طراحی آزمایش

برای طراحی آزمایش از روش تاگوچی استفاده شد و با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب (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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

10 میلی‌متر تهیه شده و نمونه‌ها در ابعاد 200×100 میلی‌متر برشکاری و آماده شده‌اند. فلاکس فعال کننده سطح که در این آزمون SiO_2 در نظر گرفته شده است نیز به صورت پودری و با دانه‌بندی 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 سانتی‌متر 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 مساحت دقیق نمونه‌های شاهد در جدول (5) آورده شده است.

جدول3- شرایط جوشکاری نمونه‌های مختلف طراحی شده توسط روش تاگوچی

شماره نمونه	جریان(آمپر)	سرعت جوش‌کاری (میلی‌متر بر دقیقه)	دمای پیشگرم (درجه سانتی‌گراد)
S1	۱۷۰	۱۲۰	بدون پیش‌گرم
S2	۱۷۰	۱۴۵	۶۲/۵
S3	۱۷۰	۱۷۰	۱۰۰
S4	۱۹۵	۱۲۰	۶۲/۵
S5	۱۹۵	۱۴۵	۱۰۰
S6	۱۹۵	۱۷۰	بدون پیش‌گرم
S7	۲۲۰	۱۲۰	۱۰۰
S8	۲۲۰	۱۴۵	بدون پیش‌گرم
S9	۲۲۰	۱۷۰	۶۲/۵

2-4- اعمال جوش به روش FB-TIG

در ابتدای امر بعد از برشکاری نمونه‌های آزمایش و شاهد و پاک کردن سطح آن‌ها توسط استون، نمونه روی محل جوشکاری جانمایی شد. طول قوس به اندازه 2 میلی‌متر تنظیم شد و محل عبور الکترود در ابتدا و انتهای نمونه علامت زده شد. سپس چسب نواری از قبل آماده شده به عرض 4 میلی‌متر برای ایجاد شیار بین فلاکسی روی محل عبور الکترود به نمونه چسبانده شد. به دلیل سمی بودن SiO_2، نمونه به محل مخصوص برای پاشش پودر و در زیر هود منتقل شد. سپس نمونه به صورت عمودی به صورتی‌که ضلع بزرگ‌تر آن در پایین قرار بگیرد و نمونه‌های 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 SiO_2 درون 300 میلی‌لیتر 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 می‌شد میزان پودر روی نمونه به چگالی سطحی مورد نظر یعنی 15 میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع نزدیک شده است، دورترین نمونه شاهد برداشته و جرم آن ثبت می‌شد و با توجه به مشخصات نمونه شاهد در جدول 5 (جرم اولیه نمونه شاهد و مساحت آن) چگالی سطحی اعمال شده، محاسبه و مشخص می‌شد که پاشش باید ادامه داشته باشد یا این که میزان چگالی مورد نظر به‌دست آمده است و پاشش باید متوقف شود.



شکل2- آماده سازی و برش‌کاری نمونه‌های شاهد

پس از رسیدن به چگالی 15 میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع، نمونه‌ها با توجه به شرایط مورد نظر مهیای فرایند جوشکاری شدند. در نمونه‌هایی که در دمای محیط باید جوشکاری می‌شدند، پس از اعمال فلاکس چسب به آرامی از روی سطح کنده شد تا یک شیار 4 میلی‌متری در میان نمونه باقی بماند. طول قوس نیز که به میزان 2 میلی‌متر 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

جدول4- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم 5083

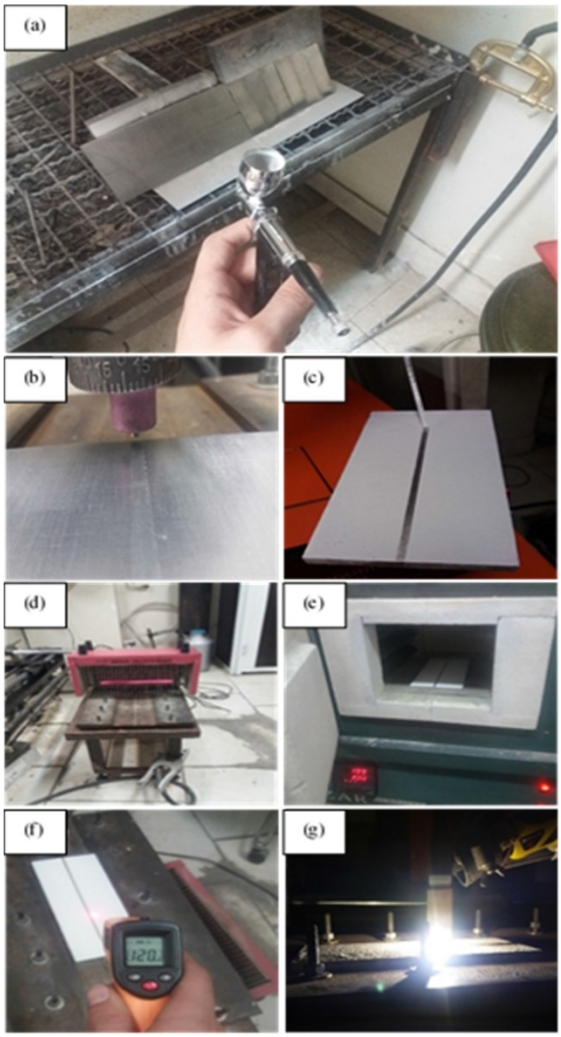
عناصر	Zn	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Al
درصد وزنی	۰/۰۷	۰/۳۱	۴/۰۸	۰/۴۵	۰/۰۶	۰/۳۱	۰/۴۲	پایه

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

شماره نمونه شاهد	مساحت (سانتی‌متر مربع)	جرم (گرم)
۱	۳۱/۶۲	۶/۱۶
۲	۳۰/۶۰	۵/۸۱
۳	۳۱/۶۲	۶/۱۰
۴	۳۰/۶۰	۵/۹۹
۵	۳۰/۳۰	۵/۷۸
۶	۳۰/۳۰	۵/۸۵

در نمونه‌هایی که شامل پیش‌گرم می‌شدند (نمونه‌های 4 تا 9) نمونه‌ها بعد از اعمال فلاکس و برداشتن چسب 4 میلی‌متری برای ایجاد شیار بین فلاکسی، داخل کوره با دمای 200 درجه قرار داده می‌شدند. دمای پیش‌گرمِ بیشتر برای جبران اتلاف دمایی میان مسیر و حین فراهم کردن مقدمات جوشکاری در نظر گرفته شد. میز جوشکاری 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. دمای نمونه در داخل کوره که توسط یک دماسنج لیزری کنترل می‌شد، به حدود 150 درجه که می‌رسید نمونه با انبر به محل جوشکاری منتقل شده و منبع حرارتی المنتی از روی میز به زیر میز منتقل می‌شد تا میز با سرعت آهسته تری دمای خود را از دست بدهد. بعد از جانمایی نمونه در محل جوشکاری و تنظیم شرایط با کنترل دما توسط دماسنج به محض رسیدن به دمای پیش‌گرم مورد نظر (62/5 °C) برای نمونه‌های 4 تا 6 و 100 °C برای نمونه‌های 7 تا 9) فرایند جوشکاری انجام شد. مراحل ذکر شده در تصاویر شکل(3) آورده شده است.



شکل3- 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) پیش‌گرمایش نمونه‌های S4 تا S9 در کوره، f) کنترل دما توسط دماسنج لیزری برای تعیین زمان شروع جوشکاری، g) نمایی از جوشکاری نمونه‌ها

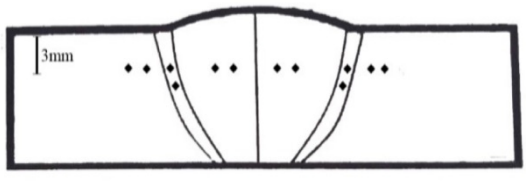
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

2-5- آزمون‌های انجام شده

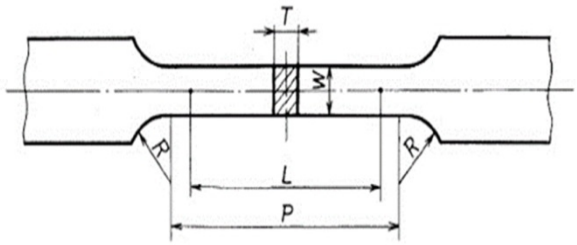
نمونه‌ها پس از انجام جوشکاری برای آنالیز خط جوش و بررسی کیفیت جوش ایجاد شده برای هر آزمونی مطابق استاندارد مربوطه آماده سازی شدند.

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 نمونه‌برداری صورت گرفت پس از جدا کردن سطح مقطع با استفاده از روش متالوگرافی و طبق استاندارد ASTM E3-11 [18] تا سنباده شماره 3000 سنباده‌زنی و توسط پارچه نمدی و خمیر الماسه پولیش شد تا سطح نمونه‌ها کاملا صاف و صیقلی شود.

برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها از محلول بارکر حاوی 2/5 درصد حجمی تترافلوئوروبوریک اسید در محلول آبی [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 نمونه‌ها بودند. جهت بررسی درشت‌ساختار نمونه‌ها از محلول کِلِر شامل 1 میلی‌لیتر هیدروفلوئوریک اسید، 1/5 میلی‌لیتر کلریک اسید، 2/5 میلی‌لیتر نیتریک اسید و 95 میلی‌لیتر 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. نمونه‌های جوشکاری شده به منظور بررسی نحوه توزیع ذرات عناصر در مقطع جوش مورد مطالعه میکروسکوپی و آنالیز عنصری قرار گرفت. برای مشاهده بهتر یک لایه طلا روی سطح مقطع جوش پوشش داده شد. هم‌چنین حکاکی توسط محلول بارکر برای مشاهده زیر میکروسکوپ 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 قرار گرفت.

2-5-3- بررسی خواص مکانیکی

پس از انجام مطالعات ریزساختاری، ریزسختی سنجی مطابق با استاندارد ASTM E384-17 [21] بر نمونه‌ها 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) طرحواره‌ای از نحوه آزمون سختی‌سنجی را نشان می‌دهد. 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 طول‌سنجه داخل منطقه جوش قرار گیرد. برای مقایسه، دو نمونه هم از فلز پایه و در همان راستای دیگر نمونه‌ها آماده شد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

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	P	R	T	A
۳	۱۲	۱۴/۴	۱۵	۳	۳

جدول7- شرایط جوشکاری نمونه‌های مختلف طراحی شده توسط روش تاگوچی

شماره نمونه	D(میلی‌متر)	W(میلی‌متر)	DWR
S1	۱/۹۲	۵/۰۱	۰/۳۸
S2	۱/۹۴	۴/۷۱	۰/۴۱
S3	۴/۷۲	۷/۶۲	۰/۶۲
S4	۴/۰۲	۷/۴۰	۰/۵۴
S5	۴/۸۳	۷/۶۹	۰/۶۳
S6	۲/۰۹	۵/۰۷	۰/۴۱
S7	۸/۰۲	۱۰/۲۰	۰/۷۹
S8	۴/۵۳	۷/۶۷	۰/۵۹
S9	۳/۹۵	۶/۸۷	۰/۵۷

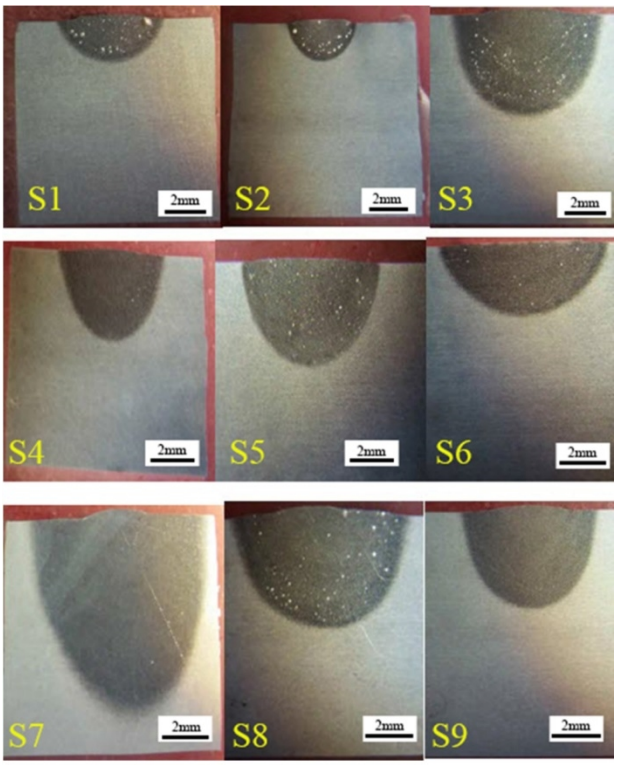
3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ماکروسکوپی

نسبت عمق نفوذ به پهنای جوش یک پارامتر مناسب و مهم برای سنجش سطح کیفی جوش‌ها است. لذا این مقادیر اندازه‌گیری شد. تصاویر ماکروگرافی در شکل (6) آمده است. همان طور که از تصاویر مشخص است نمونه S7 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 نمونه‌های مختلف نیز در جدول (7) آمده است.

3-1-1- مکانیزم افزایش عمق نفوذ

با مشاهده شکل(6) مشخص می‌شود که اضافه کردن فلاکس‌های فعال کننده سطحی تغییرات قابل توجهی را بر مقادیر عمق نفوذ جوش و نسبت DWR می‌گذارند. در حالی که طبق کارهای قبلی انجام شده بر آلیاژ آلومینیم سری 5xxx به روش‌های TIG و FB-TIG [23,16,11] عمق نفوذ جوش حداکثر در جریان‌های بالا حدود 3 میلی‌متر و نسبت DWR نیز حداکثر به میزان 0/25 گزارش شده است. در این تحقیق عمق نفوذی برابر 8/02 میلی‌متر نیز مشاهده شد و مقدار DWR به مقدار قابل ملاحظه 0/79 رسید که افزایش بیش از 3 برابری را نشان می‌دهد.



شکل6- تصاویر ماکروگرافی نمونه‌های جوش‌کاری شده

افزایش عمق نفوذ در جوشکاری FB-TIG از چندین مکانیزم مختلف ناشی می‌شود. طبق نظریه سیره و همکاران [11] مقاومت الکتریکی بالا و نقطه ذوب و جوش بالای فلاکس باعث انقباض قوس و افزایش توان ستون قوس می‌شود. 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 SiO_2 و بالاتر بودن نقاط ذوب و جوش آن نسبت به آلیاژ آلومینیم است. در نتیجه مقاومت کانال هدایت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

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].

حین جوشکاری، حرارت بسیار بالای منطقه جوش می‌تواند باعث تجزیه حرارتی مولکول‌های سیلیس شود. فلاکس تبخیر شده با استفاده از جذب الکترون بیشتر می‌تواند قوس را محدود کند. انرژی گرمایی ایجاد شده حین فرایند جوشکاری، حرارت لازم را برای تجزیه فلاکس به بخار فراهم می‌کند.

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 می‌شود 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 نمی‌تواند در مرکز قوس رخ دهد. با این حال، در مناطق بیرونی، که نسبتاً سردتر هستند و میدان‌های الکتریکی ضعیف‌تری را دارند، الکترون‌ها تمایل به ملحق شدن به توده بخار فلاکس را از خود نشان می‌دهند.

این موضوع سبب می‌گردد که جریان به بخش مرکزی قوس منحصر شود، که باعث افزایش چگالی جریان و در نتیجه کاهش قطر قوس می‌شود. با افزایش چگالی جریان، شدت انرژی قوس بالا می‌رود و یک نقطه آندی کوچک تشکیل می‌شود و در نتیجه نفوذ جوش عمیق‌تر و عرض حوضچه جوش کمتر می‌شود [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 پایین‌تر (مرکز حوضچه مذاب) به منطقه با کشش سطحی بالاتر (حاشیه حوضچه مذاب) جریان می‌یابد [30].

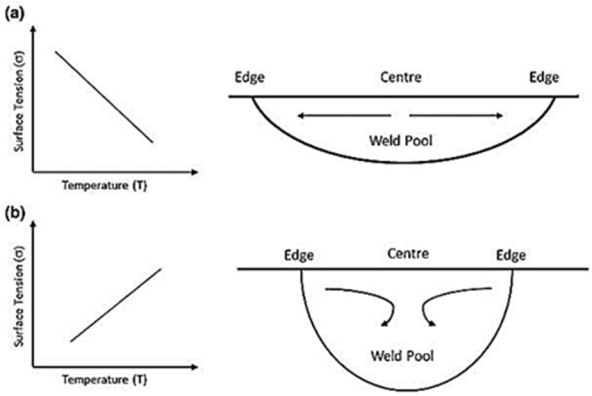
با کاهش اندازه شیار فلاکس به تدریج غلظت عنصر فعال در سطح (اکسیژن) درون حوضچه جوش مذاب به واسطه ذرات سیلیس مجاور حوضچه افزایش می یابد و گرمای شدیدی حین جوش ایجاد می شود. با افزایش غلظت اکسیژن در حوضچه جوش، ضریب دمای مؤثر باعث می‌شود کشش سطحی منفی به مثبت تغییر کند. این باعث می شود که نیروهای کشش سطحی 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 می‌شود. این باعث نفوذ بیشتر جوش همراه با کاهش در عرض گرده جوش می‌گردد [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. زمانی‌که عناصر فعال (در این مورد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

اکسیژن) بـه غلظـت خاصـی در حوضـچه جـوش (300-100 پی‌پی‌ام) برسد این اتفاق می‌افتد. غلظت اکسـیژن در حوضـچه جوش با توجه به تجزیه حرارتی مولکول‌های سـیلیس افـزایش می‌یابد. بنابراین، این مکانیسم تنها زمانی فعال می‌شود که شـیار فلاکس آن‌قدر کوچک باشد که اجـازه دهـد تـا ذرات سـیلیس ذوب شوند و به صورت حرارتی تجزیه گردند [34].



شکل7- همرفت مارانگونی در حوضچه مذاب a) در حالت عدم حضور عناصر فعال، $\partial\sigma/\partial T > 0$ و b) در حضور عناصر فعال، $\partial\sigma/\partial T < 0$ [29]

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

3-1-2- تحلیل تاگوچی از مقادیر عمق نفوذ

با وارد کردن مقادیر عمق نفـوذ و نسـبت عمـق بـه عـرض بـه نرم افـزار مینـی‌تـب تحلیـل تـاگوچی بـرای شـرایط مختلـف آزمون‌های انجام شده صورت گرفت. شکل(8) نمودار مربـوط به مقدار آماری نسبت سیگنال به برای عمق نفـوذ اسـت. عمـق نفوذ بالاتر بهتر در نظر گرفته شده است.

بـا توجـه بـه اینکـه مقیـاس محورهـای افقـی و عمـودی در نمودارهای نـرم‌افـزار مینـی‌تـب بـرای سـطوح مـورد آزمـایش مختلف، برابر است پس می‌توان نمودارها را با هم مقایسه کرد. طبـق نمودارهـا مشـاهده مـی‌شـود کـه بـا افـزایش جریـان و درجه حرارت و با کاهش سرعت، عمق نفوذ در وضعیت بهتری قرار می‌گیرد. تغییر در سطوح مختلف جریان و دمای پیش‌گـرم تغییرات قابل توجهی را بر مقدار عمق نفوذ خواهد گذاشت.

اما این تغییر در مورد سرعت جوشـکاری بـه نسـبت جریـان و دمـای پـیش‌گـرم کـم‌تـر اسـت و بـا تغییـر سـطح سـرعت از 170 میلی‌متر بر دقیقه به 145 میلی‌متـر بـر دقیقـه و سـپس بـه 120 میلی‌متر بر دقیقه، SNR فقط حدود 1/5 واحد تغییر می‌کند و از 12 به 10/5 می‌رسد. اما با افزایش جریان از 170 آمپـر بـه 195 آمپر و بعد به 220 آمپـر، مقـدار SNR حـدود 6/5 واحـد تغییر می‌کند و از 8/5 به 15 می‌رسد. نکته قابل توجه در مـورد جریان، شیب تقریبا خطی نمودار جریان در مقابل SNR اسـت. یعنی هرچه جریان افزایش پیدا کند به همان نسبت عمـق نفـوذ نیز افزایش می‌یابد و احتمال آن می‌رود که در جریان‌های بالاتر نیز عمق نفوذ بیشتری مشاهده شود.

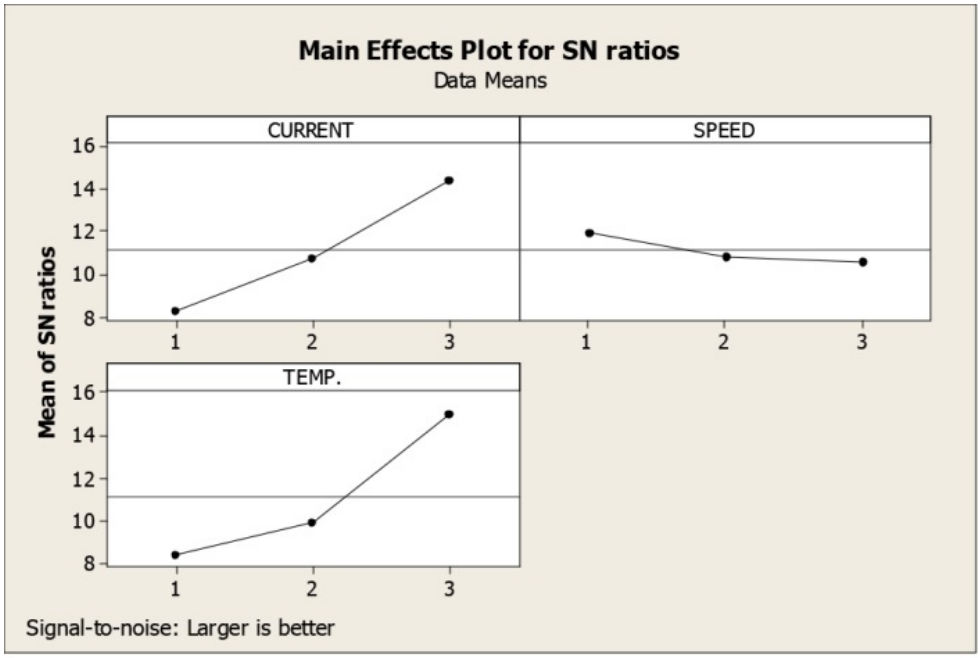
با اعمال پیش‌گرم و رساندن آن بـه 62/5 درجـه سـانتی‌گـراد و سپس به 100 درجه سانتی‌گراد مقدار SNR نیز همچون جریـان 6/5 واحد تغییر می‌کند و از 8/5 به 15 می‌رسد.

البته تفاوت اثر پیش‌گرم بـا جریـان از روی نمـودار مشـخص است و این‌گونه تفسیر می‌شود کـه در مـورد دمـای پـیش‌گـرم هرچه این مقدار بیشتر افزایش یابد اثرگذاری آن بیشـتر نمایـان می‌شود. می‌توان گفت که بـر خـلاف جریـان ایـن افـزایش در مقدار عمق نفـوذ دیگـر خطـی نیسـت و تـاثیر افـزایش دمـای پیش‌گرم به یک میزان ثابت بـر عمـق نفـوذ در دماهـای بـالاتر بیشتر است. چرا که شـیب نمـودار در دماهـای بـالاتر افـزایش می‌یابد.

اما نکته دیگر این است که اثـر بهینـه دمـای پـیش‌گـرم بیشـینه بر عمق نفوذ و اثر بهینه جریان جوشـکاری بـر عمـق نفـوذ در سطوح مورد استفاده در این آزمایش طـوری بودنـد کـه بیشـینه جریان و بیشینه دمای پیش‌گرم تقریبـا بـه یـک میـزان موجـب افزایش عمق نفوذ می‌شوند. اما با توجه به خطی بـودن نمـودار SNR جریان و همچنین صعودی بودن شیب نمودار SNR دمای پیش‌گرم، پیش‌بینی می‌شـود کـه در دماهـای پـیش‌گـرم بـالاتر اثرگذاری مطلوب بـر عمـق نفـوذ بـیش از اثرگـذاری مطلـوب جریان‌های بالاتر جوشکاری باشد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]



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

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 پیش‌گرم در این تحقیقات بر افزایش عمق نفوذ نادیده گرفته شده، نقش تعیین کنندگی و مکمل بودن دمای پیش‌گرم 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 پیش‌گرم که مقدار SNR بالاتری را نسبت به سرعت جوشکاری دارد، نقش مهمی را در افزایش عمق نفوذ دارد.

3-2- بررسی میکروسکوپی

پس از بررسی ماکروگرافی و مشاهده عمق نفوذ و پاسخ تاگوچی، 5 عدد از نمونه‌ها که دارای بیشترین عمق نفوذ بودند 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. ریزساختار ناحیه جوش در حالت پس از جوشکاری شامل 3 منطقه فلز جوش، ناحیه متاثر از حرارت و فلز پایه بدون تاثیر است. بررسی‌های انجام شده بر فلز پایه آلیاژ آلومینیم 5083 نشان می‌دهد که زمینه این آلیاژ یک ساختار دانه ریز و کشیده شده متشکل از فاز محلول جامد آلفا (محلول جامد منیزیم در آلومینیم) بوده که ذرات ریز Mg_2Al3 و ذرات درشت شامل ترکیبات بین فلزی Al-Fe-Si-Mn در داخل آن توزیع شده‌اند [35]. ساختار منطقه جوش یک ساختار انجمادی است و دانه‌های محلول جامد آلفا به همراه توزیع ترکیبات فلزی نامحلول در زمینه قابل مشاهده است. ذرات نامحلول بین‌فلزی به احتمال زیاد طبق منابع مطالعاتی Mg_2Si است [36]. زیرا سرعت سرد شدن و انجماد آن قدر زیاد است که از تشکیل Mg_2Al3 جلوگیری می‌شود [34]. با مشاهده تصاویر متالوگرافی در نمونه‌های S3، S7، S8 و S9 مشخص می‌شود که در ساختار جوش تخلخل وجود دارد و در نمونه‌های S3، S8 و S9 مقدار این تخلخل‌ها 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 کمتر است. با توجه به پارامترهای جوشکاری در نظر گرفته شده برای هر نمونه،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

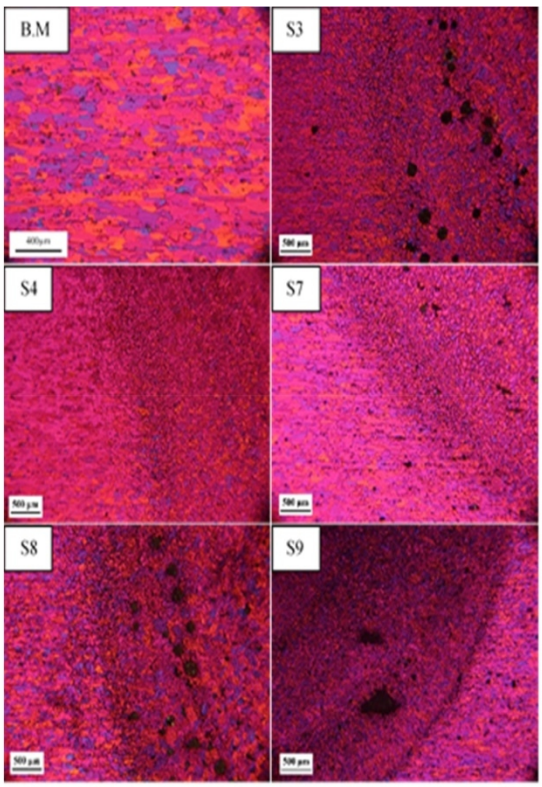
جدول 8- اندازه دانه نواحی مختلف جوش

اندازه‌ی دانه (µm)	S3	S4	S7	S8	S9
فلز جوش	۱۴۲/۲۷	۱۹۵/۳۳	۱۲۵/۹۱	۲۲۳/۰۲	۱۷۳/۲۷
منطقه متاثر از حرارت	۱۹۱/۷۸	۲۵۳/۶۹	۲۵۸/۱۳	۲۴۹/۱۳	۲۲۵/۷۹
فلز پایه	۱۴۶/۲				

جدول9- نتایج آنالیز EDX از فلز پایه و فلز جوش نمونه S7

عناصر		Mg	Mn	Fe	Si	Al
درصد وزنی	فلز پایه	۴/۲۷	۰/۵۸	۰/۳۰	۰/۳۷	۹۴/۴۷
	فلز جوش نمونه S7	۳/۷۰	۰/۲۰	۰/۰۷	۱/۷۷	۹۴/۲۶

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 پدید آمدن این تخلخل‌ها در ساختار جوش نقش دارند. شایان ذکر است سرعت جوشکاری عامل تاثیرگذارتری است. در میان سه نمونه جوشکاری شده با بالاترین جریان، با افزایش سرعت جوشکاری تخلخل‌های موجود در ساختار جوش افزایش می‌یابند. در نمونه S9 که دارای بیشترین سرعت و بیشترین جریان است، تخلخل‌ها اندازه بزرگتری دارند. نمونه S7 یعنی نمونه با عمق نفوذ بیشتر، کمترین سرعت جوشکاری را داشته و نسبت به دیگر نمونه‌های با بیشینه جریان، کمترین تخلخل را دارد. از این رو می توان نتیجه گرفت که تشکیل این تخلخل‌ها 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 نمی‌کنند و به صورت فوق اشباع باقی می‌مانند. از طرفی در سرعت‌های جوشکاری پایین و به عبارتی سرمایش آهسته، مدت زمان کافی برای رسیدن این تخلخل‌ها به سطح و خروج آن‌ها 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 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 S3، S4، S7، S8 و S9

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

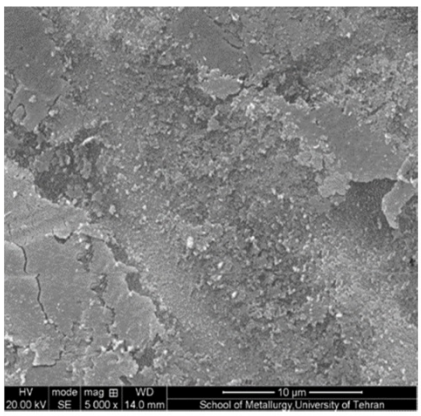
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

شد که در این آلیاژ فقط در صورت استفاده از فلاکس SiO_2، این تخلخل‌ها در ساختار جوش بوجود آمد. اما این پدیده در صورت استفاده از دیگر فلاکس‌ها رخ نداد.

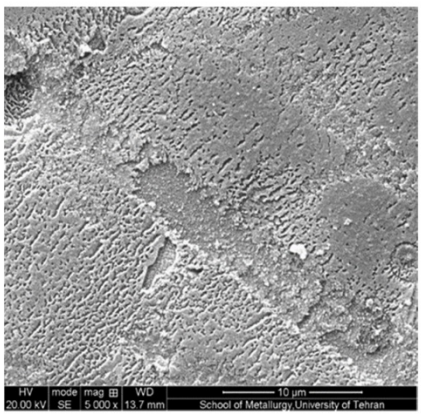
همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است و با توجه به تحقیقات صورت گرفته بر جوشکاری TIG آلومینیم سری 5xxx حضور فلاکس اکسیدی موجب افزایش حرارت ورودی در واحد طول جوش می‌گردد. در جوشکاری FB-TIG حرکت سیال حوضچه جوش به دلیل افزایش فشار ستون قوس، پرتلاطم‌تر از جوشکاری TIG است که این موضوع باعث تکه تکه شدن نوک دندریت‌ها در ناحیه خمیری می‌شود. این دندریت‌های تکه تکه شده به درون حجم حوضچه جوش وارد می‌شوند و به عنوان هسته‌های مناسب جوانه زنی ناهمگن عمل می‌کنند [23]. در ناحیه فلز جوش هر چه به مرز ذوب نزدیک‌تر می‌شویم دانه‌ها ریزتر می‌شوند. می‌توان گفت دلیل 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 ریخته‌گری‌شده 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 SiO_2 در این نواحی باعث به وجود آمدن ابری می‌گردد که الکترون‌های مناطق بیرونی‌تر 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.

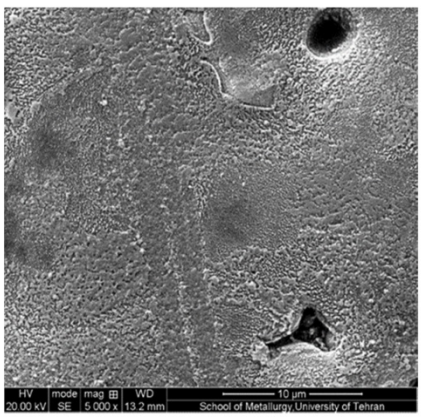
کاهش گرادیان حرارتی، ناحیه واقع در تحت تبرید جلوی جبهه اصلی انجماد را افزایش می‌دهد و به رشد هم‌محور کمک می‌کند. افزایش سرعت انجماد نیز تحت تبرید در جبهه رشد اصلی را افزایش می‌دهد. همچنین اندازه ناحیه به تحت تبرید رفته را افزایش می‌دهد و در نتیجه به رشد هم‌محور کمک می‌کند [39].



الف



ب



ج

شکل10- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه S7، الف- فلز پایه، ب- فلز جوش و ج- فلز جوش نزدیک به مرز ذوب و حفرات این منطقه.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

جدول10- خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده

نمونه	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام شکست (مگاپاسکال)	درصد ازدیاد طول
فلز پایه	۱۴۹	۳۰۶	۳۵
S3	۱۵۸	۲۷۵	۲۱
S4	۱۷۸	۲۵۲	۱۸
S7	۱۶۹	۲۷۷	۲۴
S8	۱۵۸	۲۲۵	۱۵
S9	۱۵۷	۲۶۶	۲۱

3-2-2- محاسبه اندازه دانه

اندازه دانه برای مناطق فلز جوش، منطقه متاثر از حرارت و فلز پایه برای نمونه‌های مختلف در جدول (8) آورده شده است.

منطقه متاثر از حرارت به دلیل عملیات جوشکاری تحت سیکل‌های حرارتی مختلفی قرار می‌گیرد. 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 می‌گیرد. همچنین این حرارت ورودی که در نمونه‌های متفاوت جوشکاری شده در این تحقیق نیز با یکدیگر فرق می‌کنند، باعث می‌شود که رسوبات به سمت مرزدانه‌ها حرکت کرده و یک شبکه پیوسته را تشکیل دهند [35].

همچنین مشاهده می‌گردد که نمونه S7 در منطقه متاثر از حرارت دارای بیشترین اندازه دانه در میان نمونه‌های مختلف می‌باشد. با توجه به این که S7 دارای بیشترین میزان حرارت ورودی در بین نمونه‌ها است و همچنین دمای پیش‌گرم 100 درجه سانتی‌گراد در این نمونه هر دو باعث کاهش سرعت سرد شدن و درشت‌دانه تر شدن منطقه HAZ می‌گردد. با این حال در منطقه فلز جوش نمونه S7 دارای ریزترین دانه‌بندی است. نمونه S3 نیز که دارای کم‌ترین میزان حرارت ورودی است اندازه دانه کوچک‌تری در منطقه HAZ نسبت به دیگر نمونه‌ها دارد که با توجه به عدم پیش‌گرم این نمونه و همچنین اثر حرارت ورودی قابل توجیه است.

3-2-3- بررسی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی

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 SiO_2 تحت انرژی قوس قرار گرفته و وارد حوضچه مذاب شوند. تجزیه SiO_2 به سیلیسیم و اکسیژن صورت گرفته و سیلیسیم به صورت محلول در زمینه آلومینیم می‌تواند ظاهر شود و یا با منیزیم موجود ترکیب Mg_2Si را بدهد.

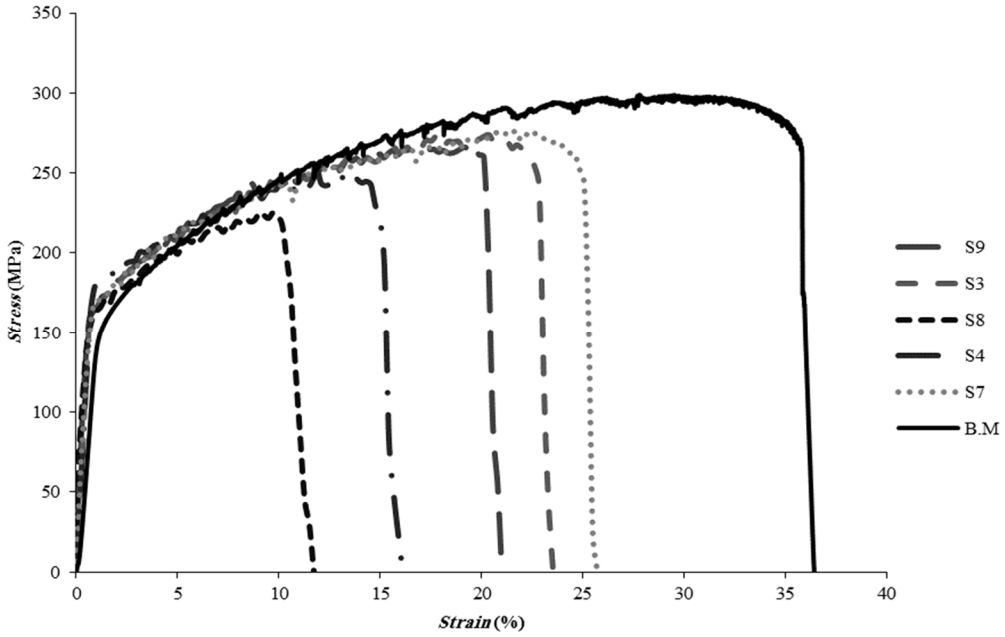
3-3- خواص مکانیکی

پس از بررسی مفصل خواص فیزیکی برای مشاهده تطابق نتایج با تحلیل‌ها آزمایش‌های خواص مکانیکی از جمله ریزسختی 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 می‌دهد. تصاویر شکست نگاری نمونه‌های 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 عمیق و هم محور هستند. این ساختار حکایت از شکست نرم دارد که این امر ناشی از چقرمگی بالا در آلیاژ آلومینیم است. گلویی در نقطه مومسان که ازدیاد استحکام به علت کرنش سختی افت پیدا می‌کند تا کاهش سطح مقطع را جبران کند، رخ می‌دهد. این شکست در بار حداکثر یا هنگامی رخ می‌دهد که کرنش حقیقی مساوی ضریب کرنش‌سختی 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]



شکل11- نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های جوشکاری شده

تشکیل می‌شود، که با ادامه کرنش رشد می‌کنند و به صورت یک ترک مرکزی به هم می‌پیوندند.

این ترک در راستای عمود بر محور نمونه بزرگ می‌شود تا به سطح نمونه نزدیک شود، سپس در امتداد صفحات برشی موضعی که 45 درجه است اشاعه پیدا می‌کند و بخش مخروطی شکست تشکیل می‌شود [40]. از تصاویر مشخص است که نمونه S7 بیشترین درصد ازدیاد طول را نیز داشت، یعنی تنش تسلیم بالا به همراه شکست در تنش‌های بالاتر در بهترین نمونه تحقیق از نظر عمق نفوذ اتفاق افتاده است. با مقایسه سطح زیر منحنی تنش کرنش و نتایج حاصل از آزمایش‌ها این نمونه بیشترین چقرمگی را نیز دارد. درصد ازدیاد طول در همه نمونه‌ها کاهش داشته که می‌تواند به دلیل تشکیل رسوبات ترد در فلز جوش همچون $MgSi_2$ و $Al_6(Fe\text{-}Mn)$ باشد [41].

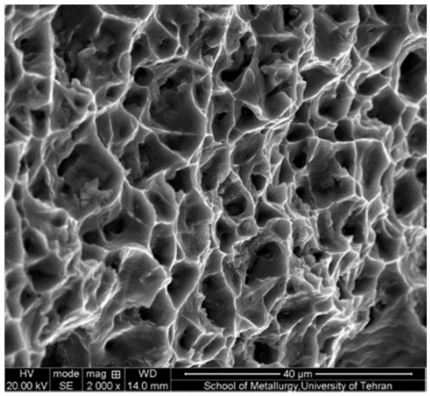
اما این کاهش نرمی برای S7 از همه کمتر بوده به طوری‌که درصد ازدیاد طول در آن 69 درصد فلز پایه است. حال آن که نمونه S8 که کمترین درصد ازدیاد طول را داشت مقدار آن برابر با 43 درصد فلز پایه است. در شکل (12-ب) که مربوط به نمونه S8 است با توجه به ساختار صاف و براق و البته در کنار حفرات نمایانگر یک شکست نیمه ترد است. این نمونه به دلیل وجود حفرات بزرگ که در تصاویر میکروسکوپ نوری هم مشخص بود و در شکل (12-ج) نیز می‌بینیم، ترک از همان مناطق آغاز شده و به سرعت اشاعه پیدا کرده و مشاهده می‌گردد که استحکام تسلیم نهایی و تنش شکست آن بسیار پایین‌تر از دیگر نمونه‌هاست. از طرفی دیگر در نمونه S7 که در شکل (12-الف) نیز تصویر SEM آن آمده است حفرات و شکست نرم کاملا قابل مشاهده است.

3-3-2- بررسی نتایج آزمون ریزسختی

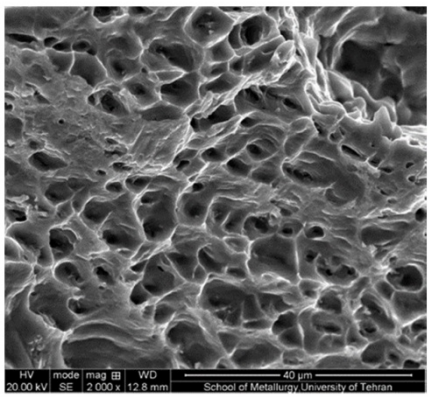
نمودار ریزسختی سنجی نمونه‌ها در شکل 13 مشاهده می‌شود. از نمودار مشخص است که سختی نمونه S3 در منطقه متاثر از حرارت از بقیه نمونه‌ها بیشتر است. کاهش استحکامی که در سختی نمونه‌ها در یک فاصله خاص از خط مرکزی جوش وجود دارد نشانگر این است که وارد منطقه HAZ شده ایم. در این نواحی که کمترین سختی یک نمونه قرار دارد، با مقایسه نمونه‌های مختلف به این نتیجه می‌رسیم که نمونه S3 سختی بیشتری در این منطقه دارد. اما نمونه S7 دارای کمترین سختی در این ناحیه است. با توجه به اینکه نمونه S7 دارای بیشترین عمق نفوذ است مهمترین نمونه در این تحقیق است که با توجه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

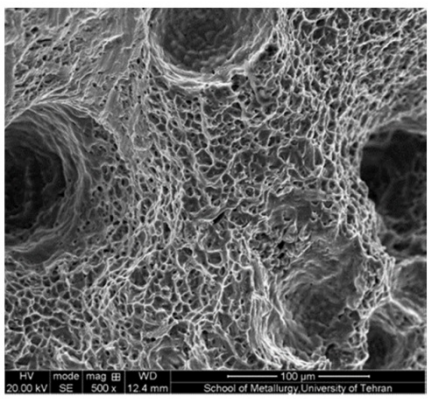
به نتایج آزمایش کشش نیز از دیگر نمونه‌ها چقرمه‌تر است.



الف



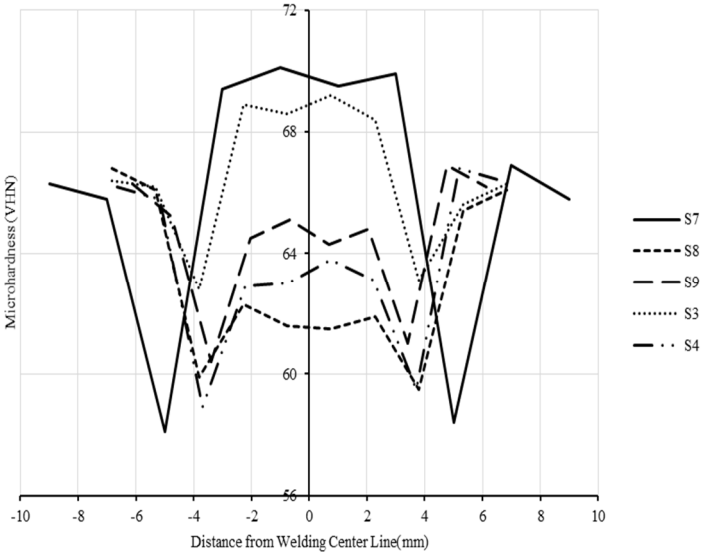
ب



ج

شکل12- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست الف) نمونه S7، ب) و ج) نمونه S8 و حفرات بزرگ در سطح مقطع شکست

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.



شکل 13- نمودار ریزسختی نمونه‌های جوشکاری شده

4- نتیجه‌گیری

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 ماکروگرافی مشخص شد که پیش‌گرم کردن نمونه می‌تواند عمق نفوذ جوش در جوشکاری FB-TIG را بسیار بهبود بخشد. همچنین جریان بالای جوشکاری و سرعت کم از دیگر مؤلفه‌های افزایش عمق نفوذ هستند.

- از تحلیل تاگوچی این نتیجه دریافت شد که سرعت جوشکاری نسبت به جریان و پیش‌گرم در افزایش عمق نفوذ تأثیر کمتری دارد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

- با مشاهده تصاویر ریزساختاری مقادیری تخلخل در نمونه‌های S3، S7، S8 و S9 دیده شد که در S7 کمتر و در S3، S8 و S9 از همه بیشتر بود. همچنین در نمونه S9 تخلخل‌های بزرگی مشاهده شد که مشخص شد جریان بالای جوشکاری و به خصوص سرعت بالا در پدید آمدن این تخلخل‌ها نقش اساسی بازی می‌کنند.

- 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. به‌طوری‌که درصد ازدیاد طول در S7 برابر با 69 درصد فلز پایه و در S8 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 S8 دارای کمترین سختی است. اما در منطقه HAZ افت استحکام شدیدی در نمونه S7 به دلیل حرارت ورودی بالاتر مشاهده شد و نرم‌ترین HAZ را در میان سایر نمونه‌ها داشت. و نیز نمونه S3 با کمترین حرارت ورودی بیشترین استحکام را در منطقه HAZ 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. l42, p. 45, 2006.

[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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]

[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 فارسی)
[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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.1.1.2]