

بررسی ابعادی، خواص مکانیکی و ریزساختار دیواره تولید شده از جنس فولاد ساده کربنی به روش جوشکاری میگ/مگ به عنوان فرآیند ساخت افزایشی مبتنی بر قوس و سیم

سید محمدعلی طباطبایی مجد، جواد راستی* و حمیدرضا قزوین لو

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۸)

<https://doi.org/10.47176/jame.43.4.1070>

چکیده: هدف این مقاله، ساخت یک دیواره فولادی به کمک روش جوشکاری قوس و سیم مصرفی و بررسی ابعادی، خواص مکانیکی و ریزساختاری آن است. متغیرهای انتخابی در این تحقیق، زمان توقف بین پاسی، سرعت جوشکاری و سرعت تغذیه سیم جوش می‌باشند. طبق نتایج حاصل، ارتفاع و ضخامت میانگین دیواره با افزایش سرعت جوشکاری، به دلیل رسوب کمتر جوش در لایه، کاهش می‌یابند و در ادامه، یک رابطه میان ضخامت و ارتفاع دیواره بر حسب سرعت جوشکاری و نرخ تغذیه سیم جوش ارائه گردید. زمان توقف بین پاسی بالاتر منجر به افزایش ارتفاع دیواره گردید و درصد مساحت مؤثر نیز با افزایش سرعت جوشکاری، افزایش یافت. همچنین، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول بر حسب وجود (یا عدم وجود) حفره و نوع ریزساختار بررسی شدند. در سرعت جوشکاری بالا و زمان توقف بین پاسی زیاد، ساختار از نوع دانه‌های ستونی به همراه فریت ویدمنشتاتن ریز و پرلیت بین دانه‌ای بود. در حالی که، در سرعت جوشکاری پایین و زمان توقف بین پاسی کم، ساختار بیشتر از فریت بلوکی و پرلیت درشت تشکیل شد که هر دو نوع ساختار، منجر به استحکام و ازدیاد طول مناسب شدند و خواص مکانیکی نمونه‌ها بهبود یافت. اما در شرایط دیگر، که احتمال وجود فازهای ترد در منطقه متأثر از حرارت زیادتر بود، استحکام و درصد ازدیاد طول کاهش یافتند.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری قوس و سیم مصرفی، ساخت افزایشی، دیواره فولادی، خصوصیات ابعادی، خواص مکانیکی، ریزساختار.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: rasti@qut.ac.ir

An investigation on Dimensions, Mechanical Properties, and Microstructure of the Carbon Steel Wall using MIG/MAG Welding as a WAAM Process

S.M.A. Tabatabaei Majd, J. Rasti* and H.R. Ghazvinloo

Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

ABSTRACT

The purpose of this paper is to investigate the manufacturing of a steel wall using gas metal arc welding (GMAW) process and to study its dimensional features, mechanical properties, and the microstructure. The selected parameters were the interpass dwell time, the welding speed, and the wire feeding speed. Based on the results, the average wall height and thickness decreases with increasing welding speed due to less weld deposition in the layer. A relationship between the wall thickness and height in terms of the welding speed and wire feeding speed was proposed. A longer interpass dwell time increased the wall height. The effective area percentage also increased with increasing welding speed. Tensile strength and elongation (%) were investigated based on the presence or absence of voids and microstructure. In high welding speed and long interpass dwell time, the microstructure included columnar grains with fine widmanstätten ferrite and intergranular pearlite. At low welding speed and short interpass dwell time, the microstructure consisted mostly of blocky ferrite and coarse pearlite. Both of these structures showed satisfactory strength and elongation. But in the other conditions, where the possibility of brittle phases in the heat-affected zone was higher, the strength and elongation decreased.

Keywords: Gas metal arc welding, Additive Manufacturing, Steel wall, Dimension features, Mechanical properties, Microstructure.

۱- مقدمه

فناوری ساخت افزایشی^۱، به‌عنوان یک روش نوین در ساخت نمونه‌های پیچیده و سفارشی با هزینه کمتر و قابلیت تولید بالاتر، می‌تواند نقطه عطفی در بسیاری از صنایع باشد. در میان روش‌های گوناگون در حوزه فناوری‌های AM، روش ساخت افزایشی قوس سیمی^۲ به‌عنوان یک فرآیند ارزان با نرخ رسوب بالا مطرح است که می‌تواند در تولید قطعات بزرگ به‌کار رود (۱ و ۲). اجزائی با جرم بیش از ۱۰ kg از جنس فولاد، آلومینیوم، تیتانیوم و سایر فلزات و آلیاژها با این روش ساخته شده‌اند (۳). مارتینا و همکاران (۴)، ضمن مقایسه مزایای روش WAAM نسبت به روش پودری ذوب لیزری انتخابی^۳، مزایای آن را، مانند سرعت تولید بالاتر در کنار اقتصادی بودن روش، خاطر نشان ساخته‌اند. استفاده از فرآیند انتقال فلز سرد^۴ در روش WAAM، موجب کنترل دقیق نرخ رسوب فلز جوش با حرارت ورودی کم، کاهش تنش‌های پسماند و وسعت کمتر منطقه متأثر از حرارت^۵ شده است (۵). مهم‌ترین چالش در روش WAAM، پیوستگی ساختار حاصل (از حیث مکانیکی و

متالورژیکی) و مقایسه خواص مکانیکی حاصل از فرآیند ساخت افزایشی در مقایسه با خواص فلز کارشده با ترکیب شیمیایی یکسان است (۶). سیمهباتلا و همکاران (۷)، نشان دادند که هر چه لایه‌ها، سیکل حرارتی بیش‌تری را تجربه کنند، سختی آن‌ها کاهش می‌یابد. لذا، لایه‌های زیرین سختی کمتری دارند. هادن و همکاران (۸)، خواص مکانیکی دیواره حاصل از روش WAAM از جنس فولاد کم کربن با استفاده از سیم پرکننده ER70S-6 را بررسی نمودند. فلز پایه در روش ایشان، ورق A36 بود که ترکیب شیمیایی نزدیک به ترکیب سیم پرکننده داشت. همچنین در پژوهش آن‌ها، سرعت تغذیه سیم جوش برابر با ۵/۰۸ m/min، قطر سیم جوش برابر با mm ۰/۸۸۹، سرعت حرکت تورچ برابر با ۱۵۲ mm/min، ولتاژ قوس برابر ۱۹ ولت و ترکیب گاز محافظ ۷۵٪ آرگون و ۲۵٪ دی‌اکسید کربن بود. استحکام تسلیم فلز چاپ شده مشابه با استحکام فولاد A36 به‌دست آمد که در جهت افقی و عمودی تفاوتی نکرده بود. استحکام کششی فلز چاپ شده نیز مشابه A36 بود اما کمی در دو راستا متفاوت بود. ریزساختار حاصل

است. مرور بر منابع پیشین نشان می‌دهد که موضوع بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی در دیواره‌های حاصل از فرآیند WAAM در مقایسه با فلز کار شده مشابه، یک چالش تحقیقاتی و تولیدی به‌شمار می‌رود. اگرچه مقالاتی در زمینه مقایسه خواص مکانیکی دیواره با فلز کار شده، منتشر شده است اما در زمینه تأثیر پارامترهای ساخت بر ابعاد دیواره ایجاد شده، تأثیر زمان بین پاسی و بررسی ریزساختاری، تحقیقات کمی وجود دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر استفاده از گاز دی‌اکسید کربن (گازی با هزینه بسیار کمتر نسبت به گاز محافظ آرگون) و نیز تأثیر پارامتر زمان بین پاسی جهت ساخت دیواره فولادی تا کنون مطالعه نشده است. همچنین، بررسی تأثیر پارامترها بر خواص ظاهری، مکانیکی و ریزساختاری دیواره‌ها به‌صورت مبسوط (که شامل شرایط نامطلوب نیز گردد)، کمتر صورت گرفته است. لذا هدف این مقاله، مطالعه دیواره ایجاد شده توسط روش WAAM در صفحه فولادی St37 (به‌عنوان زیر لایه) با به‌کارگیری روش جوشکاری میگ/مگ و بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند (نرخ تغذیه سیم جوش، سرعت حرکت تورچ و زمان بین پاسی) بر ابعاد دیواره ایجاد شده، استحکام و ریزساختار آن می‌باشد.

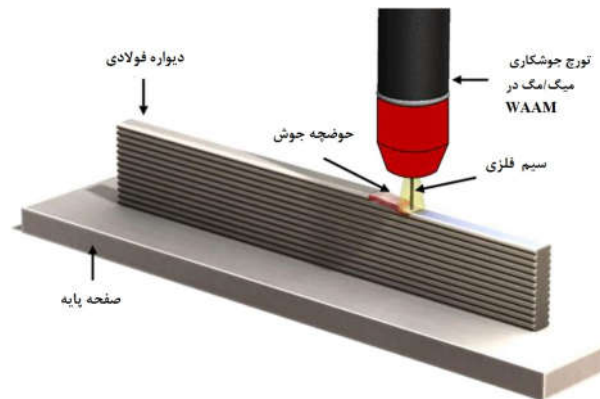
۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، از روش جوشکاری قوسی با سیم مصرفی استفاده شد. سیم پرکننده از نوع ER70S-6 به قطر ۰/۸ میلی‌متر و گاز محافظ به‌کار رفته، ۱۰۰٪ دی‌اکسید کربن بود. به‌منظور جابجایی تورچ جهت رسوب جوش و ایجاد لایه، از یک دستگاه تراش دستی استفاده شد. گیره‌ای به کمک یک نگهدارنده بر روی ساپورت عرضی نصب و تورچ در زاویه مناسب به گیره متصل شد. جهت ایجاد لایه، از جابجایی خودکار دستگاه با سرعت‌های مختلف استفاده گردید. لایه‌ای به طول حدود ۱۰ سانتی‌متر رسوب داده شد و سپس، جوش متوقف و با چرخش اهرم گیره، تورچ به اندازه ۵ میلی‌متر در راستای عمودی بالا برده شد. در ادامه، پس از گذشت زمان (به

نیز عمدتاً فریتی با کمی پرلیت میان دانه‌ای همراه با رشد دانه در بعضی مکان‌ها مشاهده شد. لو و همکاران (۹)، یک سیستم متن باز برای WAAM به‌کار بردند و علاوه بر کنترل دقیق آمپر و ولتاژ و کاربرد یک سیستم با چند درجه آزادی برای عمود نگه داشتن تورچ، لایه‌ها را پس از نشانیدن سریع سرد کردند. آن‌ها در پژوهش خود، از سیم پرکننده نوع ER70S-6 (به قطر ۰/۸ mm) برای زیرلایه از جنس AISI 1045 استفاده کردند. ایشان، برای یافتن پارامترهای مناسب جوش، ابتدا شرایط مختلف (شامل ولتاژ قوس، سرعت حرکت و سرعت تغذیه سیم) را بررسی نمودند و در این شرایط، ارتفاع و عرض جوش را اندازه گرفتند. بررسی‌های مربوط به ولتاژ قوس در محدوده ۲۴-۱۴ ولت، سرعت حرکت در محدوده ۸۰۰-۲۰۰ mm/min و سرعت تغذیه سیم در محدوده ۸-۱۴ m/min انجام گرفت که در نهایت، ولتاژ قوس برابر با ۲۰ ولت، سرعت حرکت برابر با ۶۰۰ mm/min و نرخ تغذیه سیم جوش برابر با ۷/۳ m/min و ترکیب گاز محافظ شامل ۹۵٪ آرگون و ۵٪ دی‌اکسید کربن (با دبی ۱۰ L/min) انتخاب گردید. استحکام به‌دست آمده در راستای عمود بر لایه‌ها بیشتر از استحکام در راستای لایه‌ها بود. همچنین، بررسی ریزساختاری در دو بخش درونی لایه و قسمت همپوشانی دو لایه انجام گرفت. سوریاکومار و همکاران (۱۰)، نشان دادند که خواص کششی در دو جهت رسوب نشانی (افقی) و جهت ساخت (عمودی) می‌تواند تا ۱۰٪ متفاوت باشد. همچنین، آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش شدت جریان قوس منجر به بهبود استحکام کششی می‌شود. ارماکوا و همکاران (۱۱)، دیواره‌هایی از طریق WAAM با استفاده از دو نوع سیم پرکننده ER70S-6 و ER100S-1 ایجاد کردند و آن‌ها را از حیث خواص کششی، مقدار سختی و چقرمگی شکست با هم مقایسه کردند که در همه حالات، سیم پرکننده نوع ER100S-1 برتری داشت. همچنین، ایشان نتیجه گرفتند که استحکام تسلیم و استحکام کششی دیواره حاصل از سیم پرکننده نوع ER70S-6 با مقادیر متناظر در فولاد سازه‌ای S355 قابل مقایسه است هرچند که چقرمگی شکست ۵۰٪ کمتر

جدول ۱- حالت‌های گوناگون آزمایش در این تحقیق (۱۸ حالت)

شماره	کد	زمان بین پاسی	سرعت تغذیه سیم	سرعت جوشکاری
آزمایش	آزمایش	پاسی (s)	(m/min)	(mm/min)
۱	۳۰۶۵	۳۰	۶	۵۰۰
۲	۳۰۶۷	۳۰	۶	۷۰۰
۳	۳۰۶۱۰	۳۰	۶	۱۰۰۰
۴	۳۰۷۵	۳۰	۷	۵۰۰
۵	۳۰۷۷	۳۰	۷	۷۰۰
۶	۳۰۷۱۰	۳۰	۷	۱۰۰۰
۷	۴۰۶۵	۴۰	۶	۵۰۰
۸	۴۰۶۷	۴۰	۶	۷۰۰
۹	۴۰۶۱۰	۴۰	۶	۱۰۰۰
۱۰	۴۰۷۵	۴۰	۷	۵۰۰
۱۱	۴۰۷۷	۴۰	۷	۷۰۰
۱۲	۴۰۷۱۰	۴۰	۷	۱۰۰۰
۱۳	۵۰۶۵	۵۰	۶	۵۰۰
۱۴	۵۰۶۷	۵۰	۶	۷۰۰
۱۵	۵۰۶۱۰	۵۰	۶	۱۰۰۰
۱۶	۵۰۷۵	۵۰	۷	۵۰۰
۱۷	۵۰۷۷	۵۰	۷	۷۰۰
۱۸	۵۰۷۱۰	۵۰	۷	۱۰۰۰



شکل ۱- شمای سیستم جوشکاری قوسی با سیم روی میز دستگاه تراش دستی.

اندازه زمان بین پاسی)، لایه بعدی در جهت معکوس، جوشکاری گردید و در مجموع، ۱۰ لایه به این صورت ایجاد شد. در این تحقیق، از صفحه فولادی St37 با ضخامت ۸ میلی متر به عنوان زیر لایه استفاده گردید. شکل (۱) نحوه انجام جوشکاری و ایجاد دیواره را نشان می دهد.

متغیرهای این پژوهش، سرعت تغذیه سیم جوش، زمان بین پاسی و سرعت جوشکاری بودند که در ۱۸ حالت مختلف طبق جدول (۱) ترکیب شدند. زمان‌های بین پاسی برابر با ۳۰، ۴۰ و ۵۰ ثانیه، سرعت‌های تغذیه سیم برابر با ۶ و ۷ متر بر دقیقه و سرعت‌های جوشکاری برابر با ۵۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میلی متر بر دقیقه انتخاب شدند. این متغیرها با سعی و خطا در محدوده‌ای که دیواره ایجاد می شود، به دست آمدند. سرعت‌های جوشکاری کمتر، منجر به پاشش و شره زیاد گشت. در این تحقیق، تغییرات ولتاژ قوس در محدوده ۱۹ تا ۲۱ ولت و تغییرات شدت جریان در محدوده ۹۰-۱۴۰ آمپر بود و شدت جریان جوشکاری به صورت خودکار توسط سرعت تغذیه سیم تغییر نمود. رابطه میان نرخ رسوب (تابع سرعت تغذیه سیم) و شدت جریان جوشکاری، طبق رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$DR = \alpha I + \beta I_A I^2 \quad (1)$$

که در آن، I شدت جریان بر حسب آمپر، I_A طول قوس بر حسب میلی متر، α ضریب ثابت (وابسته به جنس سیم مصرفی، قطبیت جریان و نوع گاز محافظ) و ثابت β تابع افت ولتاژ سیم

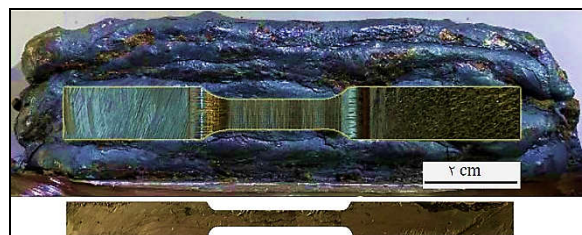
(وابسته به قطر، طول و جنس سیم) می باشد (۱۲ و ۱۳). با افزایش سرعت تغذیه سیم و کاهش سرعت جوشکاری، نرخ رسوب افزایش می یابد و به تبع آن، شدت جریان نیز بالا می رود.

طبق جدول (۱)، برای هر یک از شرایط جوشکاری، یک کد اختصاری به صورت XYZY تعریف شد که در آن، XX معرف زمان بین پاسی (بر حسب ثانیه)، Y معرف سرعت تغذیه سیم جوش (بر حسب متر بر دقیقه) و ZZ×100 معرف سرعت جوشکاری (بر حسب میلی متر بر دقیقه) بود.

بعد از عملیات جوشکاری و ایجاد دیواره، نمونه استاندارد کشش طبق استاندارد ASTM A370-13 به طول سنجه

جدول ۲- ارتفاع و ضخامت میانگین و درصد سطح مؤثر در شرایط مختلف آزمون

کد آزمایش	ارتفاع میانگین (cm)	ضخامت میانگین (cm)	درصد سطح مؤثر (%)
۳۰۶۵	۳/۶	۱/۳۲	۵۹
۳۰۶۷	۲/۸	۱/۰۴	۴۹
۳۰۶۱۰	۲/۵	۰/۷۸	۶۲
۳۰۷۵	۳/۸	۱/۰۲	۶۴
۳۰۷۷	۳/۶	۱/۱۷	۵۸
۳۰۷۱۰	۳/۱	۱/۰۱	۵۷
۴۰۶۵	۴/۳	۱/۱۲	۳۵
۴۰۶۷	۳/۴	۱/۰۶	۵۱
۴۰۶۱۰	۲/۶	۰/۸۱	۵۸
۴۰۷۵	۳/۶	۱/۲۳	۴۵
۴۰۷۷	۳/۲	۱/۰۵	۴۸
۴۰۷۱۰	۲/۸	۰/۹	۶۱
۵۰۶۵	۳/۷	۱	۵۶
۵۰۶۷	۳/۱	۰/۸۲	۶۷
۵۰۶۱۰	۳/۱	۰/۷۷	۵۹
۵۰۷۵	۳/۷	۱/۱۵	۴۱
۵۰۷۷	۳/۱	۰/۹۹	۴۴
۵۰۷۱۰	۲/۵	۰/۷۹	۴۹



شکل ۲- تهیه نمونه استاندارد کشش توسط فرز CNC از قسمت برش خورده دیواره.

۲۵/۴ cm، عرض ۶/۱ mm و ضخامت ۲/۵۴ mm از میانه دیواره به دست آمد (شکل ۲). آزمون کشش با سرعت ۸ میلی متر بر دقیقه انجام گرفت. همچنین، از میانه دیواره جهت سختی سنجی و متالوگرافی، نمونه برداری شد. جهت مطالعات ریزساختاری، نمونه ها پس از عملیات سمباده کاری، پولیش کاری و حکاکی با اسید نیتریک ۲ درصد، جهت تصویربرداری در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر آماده سازی شدند.

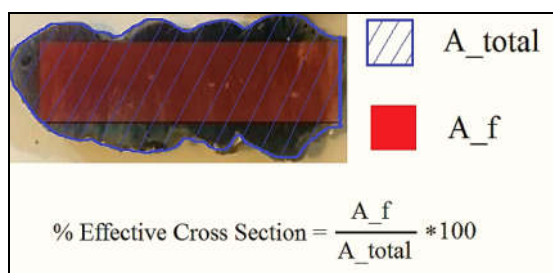
۳- نتایج و بحث

بعد از ایجاد دیواره های جوش در شرایط مختلف، بررسی های ابعادی، آزمون استحکام و بررسی های ریزساختاری انجام شد. نتایج این آزمون ها به شرح زیر می باشد:

۳-۱- بررسی ابعادی دیواره ها

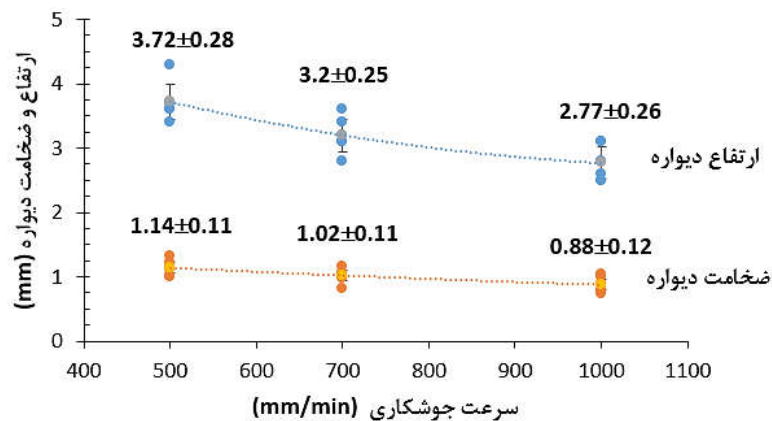
جدول (۲)، ارتفاع میانگین، ضخامت میانگین و مساحت مؤثر دیواره را در شرایط مختلف نشان می دهد. مساحت مؤثر دیواره، کسری از سطح مقطع دیواره است که پس از لایه برداری از دیواره از دو طرف تا رسیدن به یک دیواره صاف بدون وجود اثرات همپوشانی لایه های متناوب جوش، باقی می ماند و به صورت شکل (۳) به دست می آید. این عامل، مشخص کننده کیفیت لایه چینی و صافی دیواره می باشد.

شکل (۴) ارتفاع و ضخامت میانگین دیواره ها را بر حسب سرعت جوشکاری نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش سرعت جوشکاری هم ارتفاع و هم ضخامت کاهش می یابند که این، به دلیل کاهش رسوب روی دیواره است. زیرا

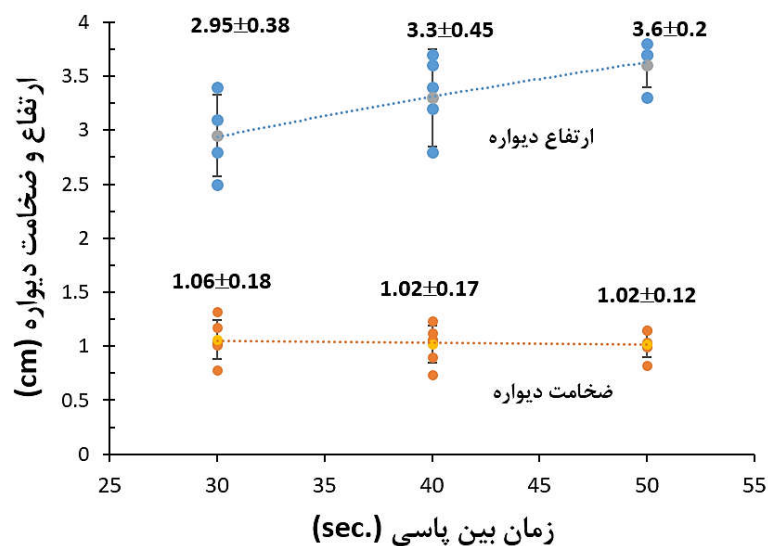


شکل ۳- نحوه محاسبه سطح مقطع مؤثر دیواره.

لایه به طول ۱۰ cm در زمان کمتری، پیموده شده و فلز رسوب کرده، کمتر خواهد بود. نتیجه مشابهی توسط لو و همکاران (۹) و کامیاب و همکاران (۱۲) گزارش شده است. شکل (۵) ارتفاع و ضخامت میانگین دیواره ها بر حسب



شکل ۴- ارتباط میان ارتفاع و ضخامت میانگین دیواره‌های جوش و سرعت جوشکاری (۱۰ لایه).



شکل ۵- ارتباط میان ارتفاع و ضخامت میانگین دیواره‌های جوش و زمان توقف بین پاسی (۱۰ لایه).

جوشکاری کمتر و زمان توقف بین پاسی بیشتر باشد، ارتفاع میانگین دیواره بیشتر خواهد شد. نرخ رسوب می‌تواند از رابطه (۲) زیر به دست آید.

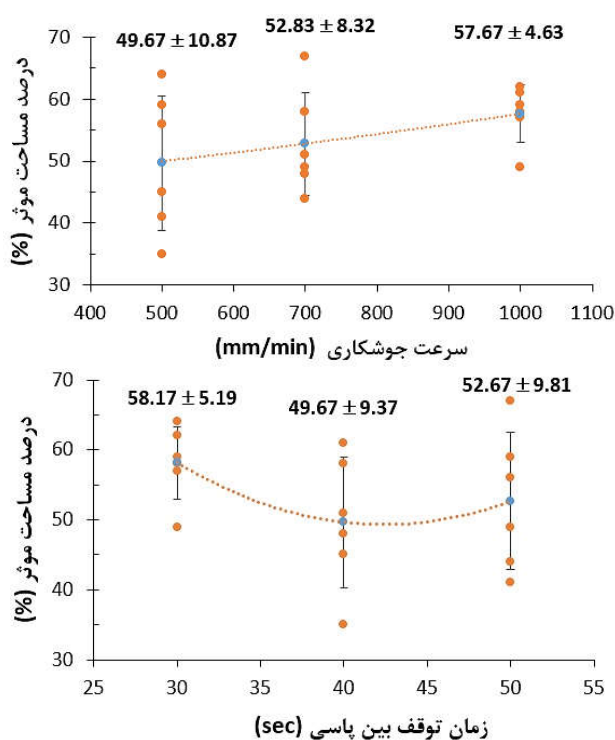
$$DR = \frac{(Fr \times \frac{\pi}{4} d^2)}{Wv} \quad (2)$$

که در آن، DR، نرخ رسوب (mm^3/mm) به مفهوم حجم رسوب کرده از سیم جوش در واحد طول جوش، Fr، نرخ تغذیه سیم جوش (mm/min)، d، قطر سیم جوش (mm) و Wv ، سرعت جوشکاری (mm/min) است. DR، نمایانگر سطح مقطع میانگین لایه است و با فرض یک مقطع مستطیلی یا بیضی

زمان توقف بین پاسی را نشان می‌دهد. زمان توقف بین پاسی بیشتر، منجر به سرد شدن لایه رسوب کرده می‌شود. لذا، با افزایش آن، ارتفاع دیواره افزایش می‌یابد.

ضخامت دیواره با شیب کمی نسبت به زمان توقف بین پاسی تغییر می‌کند اما شیب آن نزولی است که نشان می‌دهد ریزش مواد کمتر می‌شود. کامیاب و همکاران (۱۳)، روندی مشابه را با شیب تغییرات بیشتر در لایه نشانی با روش جوشکاری قوس و سیم مصرفی با الکتروود آما 40-18 AMA به دست آوردند.

شکل‌های (۴) و (۵)، بیانگر آن هستند که هر چه سرعت

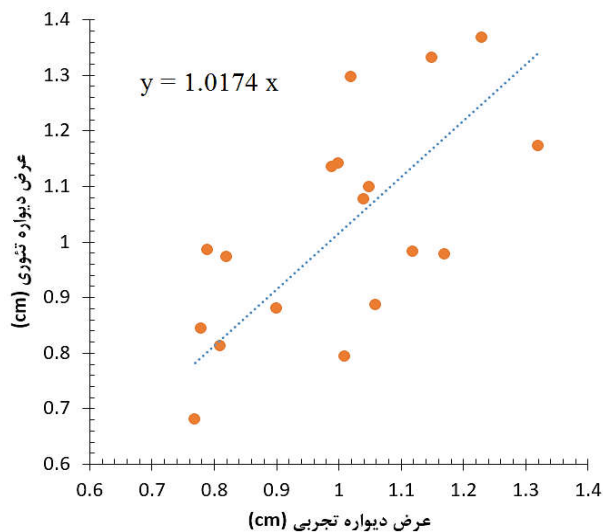


شکل ۷- ارتباط میان درصد سطح مؤثر با سرعت جوشکاری و زمان توقف بین پاسی.

سرعت جوشکاری افزایش می‌یابد که بیانگر چینش منظم‌تر لایه‌ها بر روی همدیگر و کاهش ریزش جوش است. داده‌های درصد مساحت مؤثر در سرعت جوشکاری بالا، پراکندگی کمتری نیز دارند. در خصوص تأثیر زمان توقف بین پاسی، یک تأثیر دوگانه مشاهده شد. در زمان توقف ۳۰ ثانیه، به دلیل داغ بودن زیاد لایه قبلی، مقدار ریزش یا شره جوش بالا است. در این حالت، ضخامت لایه‌ها افزایش می‌یابد و هر چند، سطح منظمی ندارند اما ریزش، منجر به پر شدن فرورفتگی‌های لایه‌های قبلی شده و نهایتاً درصد مساحت مؤثر را افزایش می‌دهد. در زمان توقف بین پاسی بالا (۵۰ ثانیه)، لایه‌ها کمی سردتر شده و مواد جوش، ریزش کمتر، سطح منظم‌تر و درصد مساحت مؤثر بیشتری دارند.

۳-۲- بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی دیواره

شکل (۸)، منحنی‌های تنش بر حسب درصد ازدیاد طول



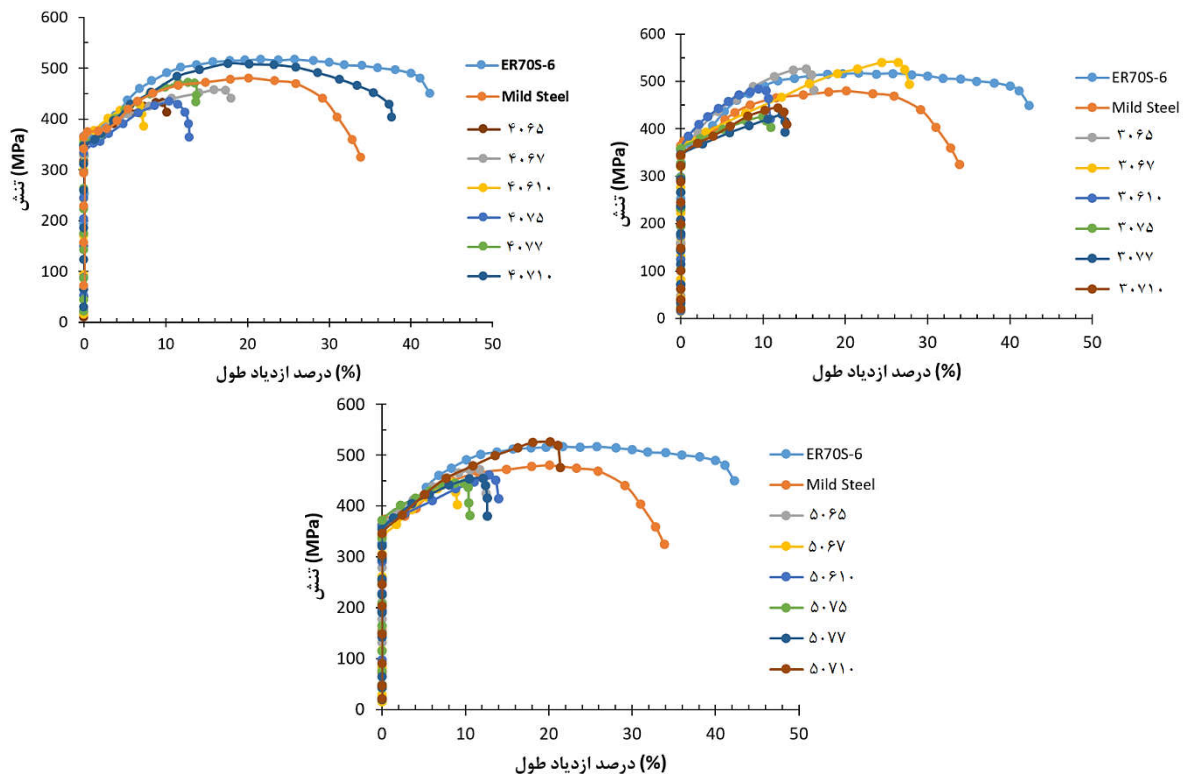
شکل ۶- ارتباط میان عرض دیواره تئوری و عرض دیواره تجربی.

برای مقطع رسوب کرده، می‌توان ارتباطی بین نرخ تغذیه و سرعت جوشکاری با ارتفاع و ضخامت دیواره برقرار کرد. با فرض یک مقطع مستطیل به ارتفاع h و عرض W ، می‌توان رابطه (۳) را در نظر گرفت.

$$W = k \cdot DR / h \quad (3)$$

که در آن، k یک ضریب وابسته به هندسه مقطع و میزان همپوشانی لایه‌ها است. شکل (۶) ارتباط میان عرض دیواره از رابطه (۳) با فرض $k=1.4$ و عرض دیواره تجربی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، کمترین ضخامت دیواره در شرایط کد ۵۰۶۱۰ حاصل شده است.

شکل (۷)، درصد مساحت مؤثر دیواره بر حسب سرعت جوشکاری و زمان بین پاسی را نشان می‌دهد. این داده‌ها بین ۳۵ تا ۶۷ درصد می‌باشند که در صورت استفاده از گاز آرگون به‌عنوان گاز محافظ (به‌ویژه با شدت جریان کمتر که منجر به انتقال اتصال کوتاه می‌شود)، می‌تواند منجر به نتایج بهتری گردد (۱۳). مشروط بر اینکه چسبیدن سیم مصرفی به حوضچه رخ ندهد که در این صورت باید از روش انتقال فلز سرد (CMT) استفاده کرد (۵ و ۱۳). استفاده از گاز محافظ دی‌اکسید کربن با روش انتقال قطره‌ای همراه است که پاشش بالایی دارد و کیفیت سطحی را کاهش می‌دهد. درصد مساحت مؤثر با افزایش



شکل ۸- منحنی‌های تنش بر حسب درصد ازدیاد طول نمونه‌های کششی دیواره‌ها در شرایط مختلف آزمون.

دیواره‌ها را در شرایط مختلف آزمون کشش نشان می‌دهد. جدول (۳) نیز مقادیر استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و وجود حفره در ساختار نمونه‌ها را نشان می‌دهد. جهت مقایسه، خواص سیم پرکننده نوع ER70S-6 و فولاد نرم نیز در جدول مذکور آورده شده است. حفراتی در ساختار دیواره‌ها به علت کمبود گاز محافظ، بالابودن فاصله نازل تا حوضچه جوش و یا واکنش گاز محافظ دی‌اکسید کربن با کربن حوضچه و تولید منوکسید کربن ایجاد شده است که منجر به کاهش استحکام و درصد ازدیاد طول نمونه‌های کششی شده است. شکل (۹)، توزیع حفرات در ریزساختار را در شرایط گوناگون تولید دیواره نشان می‌دهد.

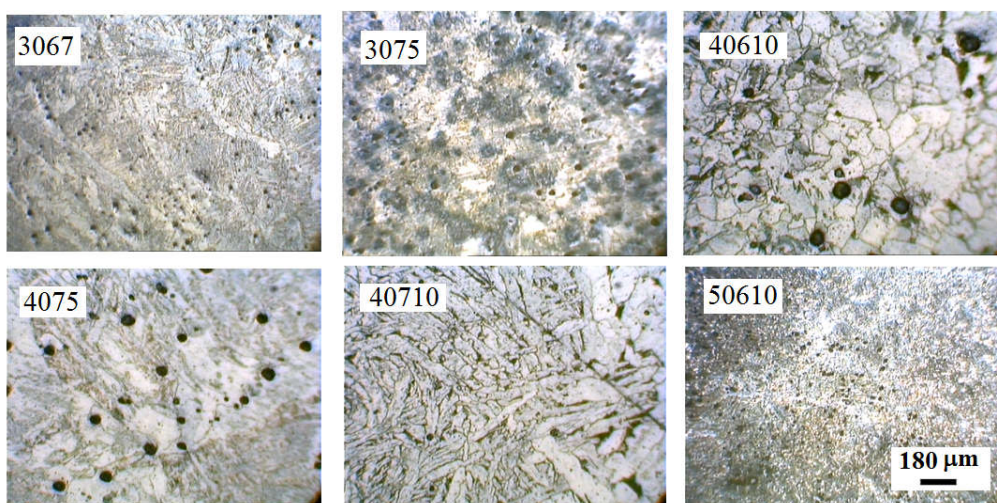
شکل (۱۰) مقادیر استحکام کششی بر حسب سرعت جوشکاری و زمان توقف بین پاسی را نشان می‌دهد. استحکام کششی با افزایش سرعت جوشکاری افزایش می‌یابد. استحکام در زمان‌های توقف بین پاسی کم (۳۰ ثانیه) و زیاد (۵۰ ثانیه) نسبت به زمان توقف بین پاسی میانی (۴۰ ثانیه)، بالاتر است. شکل (۱۱) نشان داده شده است (۱۴). ریزساختار، شامل دانه‌های ستونی و منطقه متأثر از حرارت می‌باشد. منطقه متأثر از حرارت نیز به نوبه خود شامل منطقه دانه درشت، منطقه دانه ریز و منطقه بین بحرانی است. در سرعت جوشکاری بالاتر (۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) و زمان توقف بین پاسی زیاد (۵۰ ثانیه)، همپوشانی لایه‌ها کاهش یافت و بیشتر ساختار از نوع دانه‌های ستونی گردید. ساختار در این حالت بیشتر از نوع فریت ویدمنشتاتن ریز و پرلیت میانی بود. مشابه این ساختار در نمونه ۵۰۷۱۰ در شکل (۱۲) دیده می‌شود. درحالی‌که در سرعت جوشکاری پایین و همچنین زمان توقف بین پاسی کم، همپوشانی لایه‌ها بیشتر شد و وسعت منطقه متأثر از حرارت گسترش یافت. قسمت دانه درشت ریزساختار ناشی از سرعت سرد شدن پایین بود و متشکل از فریت بلوکی و پرلیت درشت می‌باشد. این ساختار در

شکل (۱۰) مقادیر استحکام کششی بر حسب سرعت جوشکاری و زمان توقف بین پاسی را نشان می‌دهد. استحکام کششی با افزایش سرعت جوشکاری افزایش می‌یابد. استحکام در زمان‌های توقف بین پاسی کم (۳۰ ثانیه) و زیاد (۵۰ ثانیه) نسبت به زمان توقف بین پاسی میانی (۴۰ ثانیه)، بالاتر است.

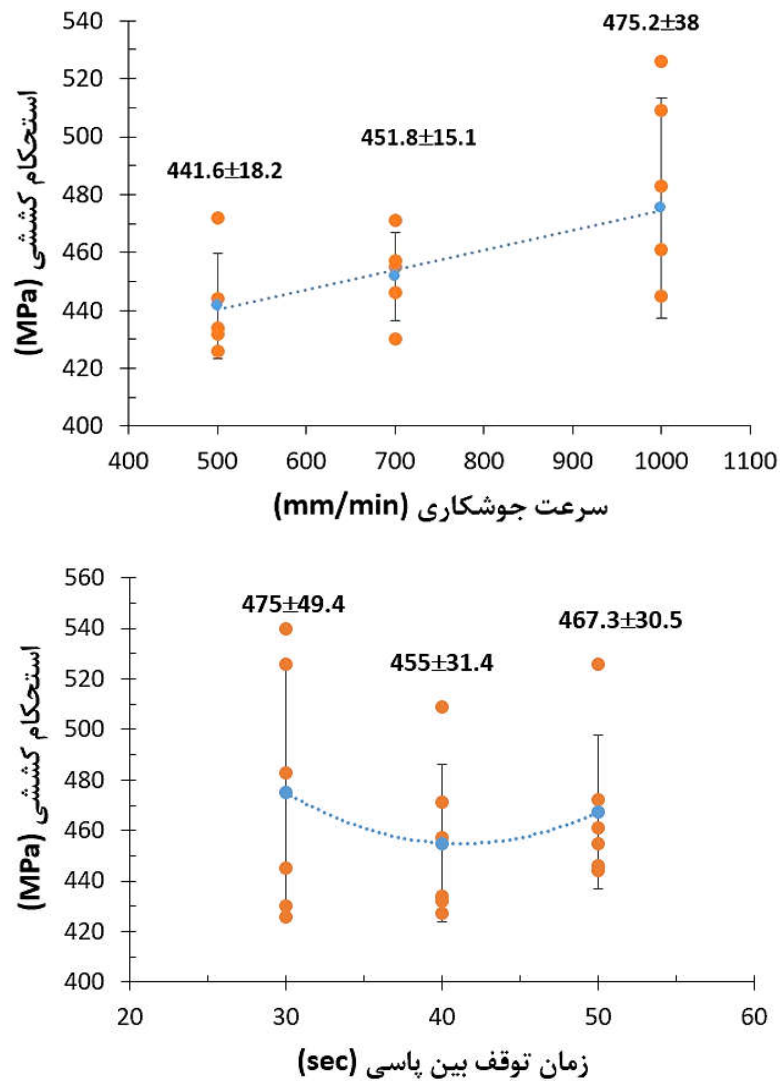
شکل (۱۰) مقادیر استحکام کششی بر حسب سرعت جوشکاری و زمان توقف بین پاسی را نشان می‌دهد. استحکام کششی با افزایش سرعت جوشکاری افزایش می‌یابد. استحکام در زمان‌های توقف بین پاسی کم (۳۰ ثانیه) و زیاد (۵۰ ثانیه) نسبت به زمان توقف بین پاسی میانی (۴۰ ثانیه)، بالاتر است.

جدول ۳- استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و نوع حفره در شرایط مختلف آزمون

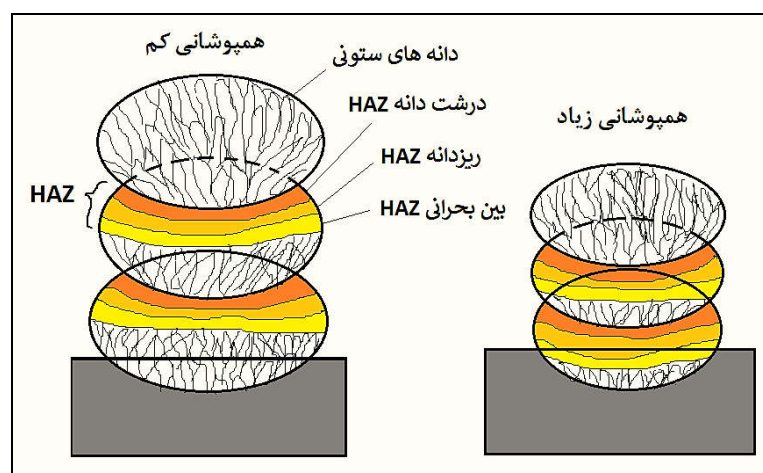
نوع حفره	درصد ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (MPa)	کد آزمایش
ریز و پراکنده	۱۶/۲	۵۲۶	۳۰۶۵
ریز و پراکنده	۲۷/۸	۵۴۰	۳۰۶۷
ریز و پراکنده	۱۰/۹	۴۸۳	۳۰۶۱۰
غیر ریز	۱۱	۴۲۶	۳۰۷۵
غیر ریز	۱۲/۷	۴۳۰	۳۰۷۷
غیر ریز	۱۲/۹	۴۴۵	۳۰۷۱۰
غیر ریز	۱۰/۱	۴۳۲	۴۰۶۵
ریز و پراکنده	۱۸	۴۵۷	۴۰۶۷
درشت	۷/۳	۴۲۷	۴۰۶۱۰
غیر ریز	۱۲/۹	۴۳۴	۴۰۷۵
ریز و پراکنده	۱۳/۷	۴۷۱	۴۰۷۷
ریز و پراکنده	۳۷/۷	۵۰۹	۴۰۷۱۰
ریز و پراکنده	۱۲/۵	۴۷۲	۵۰۶۵
غیر ریز	۹	۴۴۶	۵۰۶۷
ریز و پراکنده	۱۴	۴۶۱	۵۰۶۱۰
غیر ریز	۱۰/۵	۴۴۴	۵۰۷۵
غیر ریز	۱۲/۶	۴۵۵	۵۰۷۷
ریز و پراکنده	۲۱/۴	۵۲۶	۵۰۷۱۰
-	۴۲/۳	۵۱۷	ER70S-6
-	۳۳/۸	۴۸۰	فولاد نرم



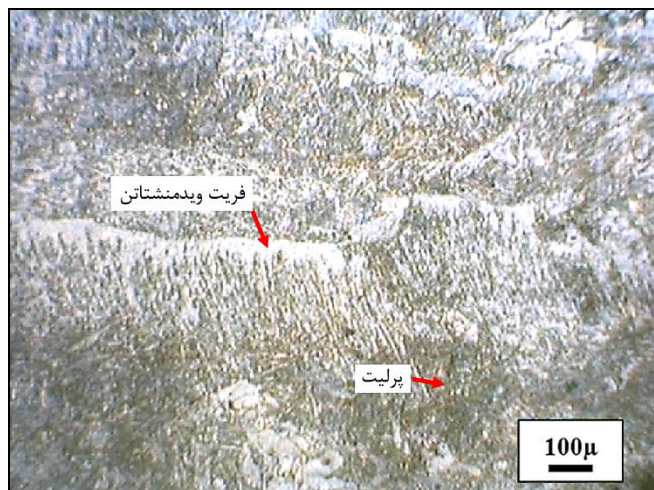
شکل ۹- توزیع حفرات در ریزساختار در شرایط گوناگون تولید دیواره (مطابق جدول ۳).



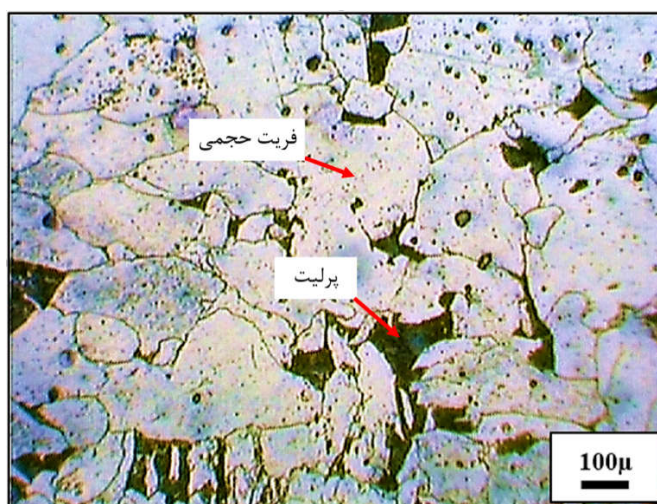
شکل ۱۰- ارتباط میان استحکام کششی با سرعت جوشکاری و زمان توقف بین پاسی.



شکل ۱۱- شماتیک ریزساختار دیواره در راستای عمودی در حالت همپوشانی کم و زیاد.



شکل ۱۲- ریزساختار نمونه ۵۰۷۱۰ شامل فريت ويدمنشتاتن ريز و پرليت مياني.



شکل ۱۳- ریزساختار نمونه ۳۰۶۵ شامل فريت بلوکی و پرليت.

با توجه به میزان کربن معادل سیم جوش مصرفی و سرعت سرد شدن بالاتر منطقه متأثر از حرارت ریزدانه و بین بحرانی (نسبت به منطقه درشت دانه) و همچنین، وجود آستنیت غنی شده از کربن در این مناطق، احتمال ایجاد جزایر پراکنده از فازهای ترد مانند مارتنزیت و بینیت وجود خواهد داشت. کو (۱۴)، نیز احتمال ایجاد این فازهای ترد حاصل از جوشکاری را محتمل شمرده است. وجود این فازها، درصد ازدیاد طول جوش را تا حد زیادی کاهش می‌دهند. این عامل به همراه وجود حفره‌ها می‌تواند دلیل کاهش درصد ازدیاد طول و نیز استحکام پایین‌تر در بعضی از شرایط ایجاد دیواره باشد.

نمونه ۳۰۶۵ در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود. هر دو نوع ساختار، استحکام و درصد ازدیاد طول مناسبی دارند. لو و همکاران (۹) نیز همپوشانی لایه‌ها را بررسی کرده‌اند و میزان همپوشانی را بر توسعه ساختارها مؤثر دانسته‌اند.

ترکیب شیمیایی سیم پرکننده نوع ER70S-6 حاوی ۰/۰۹ درصد کربن، ۱/۶ درصد منگنز، ۰/۰۵ درصد کروم، ۰/۰۹ درصد سیلسیم، ۰/۰۵ درصد نیکل، ۰/۰۵ درصد مولیبدن، ۰/۲ درصد مس، ۰/۰۵ درصد وانادیم، ۰/۰۰۷ درصد فسفر و ۰/۰۰۷ درصد گوگرد می‌باشد. بر این اساس، میزان کربن معادل سیم جوش نوع ER70S-6 حدود ۰/۴ خواهد بود.

خواص مکانیکی در دیواره‌ها بررسی و نتایج زیر حاصل شد. افزایش سرعت جوشکاری، ارتفاع و ضخامت دیواره را (به سبب کاهش رسوب روی دیواره) کاهش داد. در این تحقیق، یک رابطه میان ضخامت و ارتفاع دیواره بر حسب سرعت جوشکاری و نرخ تغذیه سیم ارائه شد. زمان توقف بین پاسی طولانی‌تر منجر به سرد شدن لایه رسوب کرده شد و با افزایش آن، ارتفاع دیواره نیز افزایش یافت. ضخامت دیواره با شیب کمی نسبت به زمان توقف بین پاسی، تغییر کرد اما شیب آن نزولی بود. با افزایش سرعت جوشکاری، درصد مساحت مؤثر افزایش یافت که بیانگر چینش منظم‌تر لایه‌ها بر روی هم و کاهش ریزش جوش بود. با افزایش سرعت جوشکاری، استحکام کششی افزایش یافت. در زمان توقف بین پاسی کوتاه و طولانی نسبت به زمان‌های میانی، استحکام بالاتری به دست آمد. در سرعت جوشکاری بالا و زمان توقف بین پاسی طولانی، بیشتر ساختار از نوع دانه‌های ستونی به همراه فریت ویدمنشتاتن ریز و پرلیت میانی بود. در سرعت جوشکاری کم و همچنین زمان توقف بین پاسی کوتاه، قسمت دانه درشت منطقه تحت تأثیر حرارت (که ناشی از سرعت سرد شدن پایین است)، گسترش یافت و متشکل از فریت بلوکی و پرلیت درشت بود. هر دو نوع ساختار، استحکام و درصد ازدیاد طول مناسبی از خود نشان دادند. اما در شرایط دیگر که احتمال وجود فازهای ترد در منطقه تحت تأثیر حرارت زیادتر بود، استحکام و درصد ازدیاد طول کاهش یافت.

تشکر و سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مادی و معنوی معاونت آموزشی و پژوهشی دانشگاه صنعتی قم صورت گرفته است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

ایجاد حفره‌ها در شرایط سرعت سرد شدن کمتر یعنی با افزایش نرخ تغذیه سیم، کاهش سرعت جوشکاری و زمان بین پاسی کمتر تشدید شده و ابعاد حفره‌ها زیاد می‌شود. لذا، تأثیر آن بر افت خواص مکانیکی بیشتر می‌گردد. استثناء این قضیه زمانی است که سرعت سرد شدن بسیار کم شود. در این شرایط ممکن است رقت زیاد گردد و ذوب مجدد در دیواره‌های زیرین رخ دهد و حفره‌های قبلی حذف شوند. این حالت‌ها در شرایط ۳۰۶۵، ۳۰۶۷ و ۳۰۶۱۰ منجر به حذف حفره‌های بزرگ شده و استحکام مناسبی به دست آمده است. اما اگر سرعت تغذیه به‌حدی زیاد شود که شره کردن جوش روی دیواره‌های زیرین رخ دهد، این اثر مطلوب از دست می‌رود و حفره‌های دیواره‌های زیرین کاهش نمی‌یابد. به‌عنوان مثال، می‌توان به شرایط ۳۰۷۵، ۳۰۷۷، ۳۰۷۱۰ و ۴۰۶۵ اشاره نمود که حفره‌های درشت مؤثری در ساختار ایجاد شده است. در شرایط سرعت سرد شدن زیاد، کاهش حفره و ایجاد ساختارهایی نظیر فریت ویدمنشتاتن و پرلیت ریز، استحکام را افزایش داده است (مانند شرایط ۵۰۷۱). ارتباط بین استحکام و حفره‌ها نشان می‌دهد که در استحکام زیر ۴۳۰ MPa، حفره‌های درشتی در ساختار وجود داشته و تأثیر منفی گذاشته‌اند. در استحکام بالاتر از ۴۳۰ MPa، حفره‌ها ابعاد ریزی داشته‌اند و تأثیر آن‌ها کمتر بوده است. در محدوده استحکام بین ۴۳۰ تا ۴۸۰ MPa تأثیر حفره‌ها متوسط است.

۴- نتیجه‌گیری

در منابع گذشته (۱۷-۱۵) دیواره ایجاد شده توسط روش WAAM با به‌کارگیری روش جوشکاری میگ/مگ بررسی شده است. در این مقاله، از طریق اتصال تورچ جوشکاری روش قوس و سیم مصرفی بر روی یک دستگاه تراش دستی، دیواره‌هایی به کمک فرآیند ساخت افزایشی مبتنی بر سیم و قوس ایجاد گردید. از طریق تغییر در سرعت جوشکاری، نرخ تغذیه سیم جوش و زمان توقف بین پاسی، دیواره‌هایی در ۱۸ حالت گوناگون تولید شدند. تغییرات ابعادی، ریزساختاری و

واژه‌نامه

1. additive manufacturing (AM)
2. wire arc additive manufacturing (WAAM)
3. selective laser melting (SLM)
4. cold metal transfer (CMT)
5. heat affected zone (HAZ)

مراجع

1. Frazier WE. Metal additive manufacturing: A review. *J Mater Eng Perform.* 2014; 23(6): 1917–28. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
2. Gordon JV, Haden CV, Nied HF, Vinci RP, Harlow DG. Fatigue crack growth anisotropy, texture and residual stress in austenitic steel made by wire and arc, additive manufacturing. *Mater Sci Eng A.* 2018; 724: 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.075>
3. Williams SW, Martina F, Addison AC, Ding J, Pardal G, Colegrove P. Wire + arc additive manufacturing. *Mater Sci Technol.* 2016; 32: 641–647. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
4. Martina F, Mehnen J, Williams S, Colegrove P, Wang F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *J Mater Process Technol.* 2012; 212: 1377–1386. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>
5. Selvi S, Vishvakshnan A, Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology-An overview. *Def Technol.* 2017; 14(1): 28-44. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>
6. Zhang M, Sun CN, Zhang X, Goh PC, Wei J, Hardacre D, Li H. Fatigue and fracture behaviour of laser powder bed fusion stainless steel 316L: influence of processing parameters. *Mater Sci Eng A.* 2017; 703: 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.071>
7. Simhambhatla S, Karunakaran K, Chandrasekhar U, Somashekara M. A study of the mechanical properties of objects built through weld-deposition, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. *Proc Inst Mech Eng, Part B.* 2013; 227(8): 1138-1147. <https://doi.org/10.1177/0954405413482122>
8. Haden CV, Zeng GS, Carter FM, Ruhl C, Krick BA, Harlow DG. Wire and arc additive manufactured steel: tensile and wear properties. *Addit Manuf.* 2010; 16: 115-123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.010>
9. Lu X, Zhou YF, Xing XL, Shao LY, Yang QX, Gao SY. Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017; 93: 2145–2154. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0636-z>
10. Suryakumar S, Karunakaran KP, Chandrasekhar U, Somashekara MA. A study of the mechanical properties of objects built through weld-deposition. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf.* 2013; 227: 1138–1147. <https://doi.org/10.1177/0954405413482122>
11. Ermakova A, Mehmanparast A, Ganguly S, Razavi J, Berto F. Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components. *Theory and Appl Fract Mech.* 2020; 109: 102685. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102685>
12. Kamyab MT, Ghodrati H, Nasiri MH, Abdollahi A, Mohbi MS. Effect of wire and arc additive manufacturing process parameters on layer geometry. First National Conference on Computational and Experimental Mechanics; 2019 Mar 1; Tehran, Iran: Shahid Rajaei Teacher Training University.
13. Kamyab M, Mohbi MS, Hajjalimohammadi A, Asadi Taheri M, Mafi A. Mechanical properties of additively manufactured 4043 alloy samples for external features of cylinder heads. Proceedings of the 11th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil; 2020 Feb 18-20; Tehran, Iran: Research Institute of Petroleum Industry.
14. Kou S. *Welding metallurgy.* 2nd ed. Hoboken (NJ): Wiley-Interscience; 2002. p. 397. ISBN: 0-471-43491-4.
15. Sasikumar C, Oyyaravelu R. Mechanical properties and microstructure of SS 316 L created by WAAM based on GMAW. *Mater Today Communic.* 2024; 38: 107807. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107807>
16. Sanjaya J, Ismail AI. Microstructure and mechanical properties of 308L steel wall fabricated using high-current manual GMAW-based additive manufacturing. *Mater Lett.* 2024; 370: 136814. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136814>
17. Zhao W, Tashiro S, Murphy AB, Tanaka M, Liu X, Wei Y. Deepening the understanding of arc characteristics and metal properties in GMAW-based WAAM with wire retraction via a multi-physics model. *J Manuf Proc.* 2023; 97: 260-274. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.008>