

انجمن جوشکاری ایران

خبرنامه

فروردین ماه 1402 ، شماره 26

همکار این شماره : ابوالفضل صفرزاده
مهدی شفیعی آفرانی
محمود شریفی تبار

ساخت ساخت قطعات آلیاژ اینکونل 625 به روش ساخت
افزایشی قوسی با الکتروود فلزی و گاز محافظ - بخش
نخست 2



انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران

اصفهان - خیابان شمس آبادی - ساختمان شمس -

طبقه 4- واحد 413

تلفن: 03132240325

info@iwnt.com

www.iwnt.com

جوشکاری :

علم و هنر اتصال مواد

Welding: The Art and Science of Material Joining



ساخت مقاطعات آلیاژ اینکونل 625 به روش ساخت افزایشی قوسی با الکتروود فلزی و گاز محافظ (GMA-WAAM) - بخش نخست

ابوالفضل صفرزاده - مهدی شفیعی آفرانی - محمود شریفی تبار

دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده شهید نیکبخت، گروه مهندسی مواد و متالورژی

چکیده

ساخت افزایشی به عنوان روشی برای تولید مقاطعات به صورت لایه به لایه از روی مدل سه بعدی تعریف می شود. این روش تولید در مقابل روش های کاهشی همچون ماشین کاری مطرح می شود. یکی از مکانیزم های نوین ساخت در زیرشاخه ساخت افزایشی قوس و فلز، فرایند ساخت افزایشی با الکتروود فلزی و گاز محافظ (GMA-WAAM) است. در مکانیزم WAAM چون لایه های سازنده مقاطعات به وسیله جوشکاری روی هم و یا کنار هم قرار می گیرند، لذا جوش پذیری، امکان تولید و پارامترهای بهینه فرایند برای آلیاژهای مختلف متفاوت است. در این پژوهش ابتدا امکان استفاده از آلیاژ اینکونل 625 برای روش GMA-WAAM و در ادامه خواص مکانیکی و ریزساختار مقاطعات تولیدی بررسی شد. جهت به دست آوردن پارامترهای بهینه، تعداد 18 پارامتر با متغیرهای مختلف (شدت جریان، سرعت جوشکاری و سرعت تغذیه سیم) استفاده شد؛ که پس از بازرسی چشمی جوش ها، یک جوش به عنوان پارامتر بهینه انتخاب شد. در مرحله بعد دیواره های مستطیل شکل با پارامتر انتخابی تولید و نمونه های آزمون متالوگرافی، سختی و کشش از آن ها استخراج شد. نتایج نشان داد که ساختار دیواره اینکونل 625 تولید شده، دارای دندریت های پایه نیکل همراه رسوبات بین دندریتی است. خواص کششی این آلیاژ نیز نزدیک به آلیاژ مشابه ریخته گری شده بود و سطح شکست آن نیز از نوع شکست نرم بود. میزان سختی نیز در دو راستای جوشکاری (محور X) و راستای تولید (محور Z) نزدیک به هم و مشابه اعداد سختی به دست آمده برای مقاطعات تولیدی آلیاژ اینکونل 625 با دیگر روش ها بود.

کلمات کلیدی: ساخت افزایشی، اینکونل 625، WAAM، ریزساختار، خواص مکانیکی، DED.

مقدمه

امروزه ساخت افزایشی فلزی به عنوان یک روش ساخت دلچسب و منحصر بفرد برای تولید مقاطعات و نمونه های اولیه معرفی شده است. در این فرایند، منابع انرژی قوی مختلفی همچون لیزر، پرتو الکترونی و قوس الکتریکی برای رسوبدهی فلز مذاب به صورت لایه به لایه جهت تولید مقاطعات مورد نظر به کار می رود. در روش ساخت افزایشی قوس و سیم (WAAM)، قوس الکتریکی و سیم به ترتیب به عنوان منبع حرارت و مواد مصرفی مورد استفاده قرار می گیرند. جوشکاری قوسی گاز- فلز (GMAW)، جوشکاری قوسی پلاسما (PAW) و جوشکاری قوسی تنگستن- گاز (GTAW)، روش های عمده ای هستند که در این فرایند استفاده می شوند. مزایای اصلی فرایند جوشکاری برای MAM نرخ رسوب بالا، توانایی تولید مقاطعات بزرگ و میزان سرمایه اولیه پایین است. اگرچه نمونه های تولیدی دارای سطح ناصاف و دقت ابعادی پایین است، ولی حرارت ورودی بالای این فرایند می تواند رشد دانه ها و همچنین

رشد دانه‌ها و همچنین تشکیل فازهای مضر که خواص مکانیکی را تهدید می‌کند را کنترل کند. بنابراین لازم است که یک ارتباط بین پارامترهای فرایند MAM و ریزساختار و خواص قطعات پیدا کنیم. در این خصوص محققین زیادی سعی داشته‌اند که ارتباطی منطقی بین پارامترهای مختلف روش MAM و ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای مختلف مهندسی همچون Ti-6Al-4V، فولاد زنگ‌نزن، آلیاژهای پایه نیکل، آلیاژهای آلومینیوم و غیره پیدا کنند. در بین این فلزات، آلیاژ اینکونل 625 در MAM توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این فلز یک آلیاژ استحکام یافته محلول جامد دما بالا است که کاربردهای خاصی در هوافضا و صنایع دریایی دارد. قبلاً مطرح شد که خواص اینکونل 625 شدیداً به نوع فرایند MAM وابسته است. خواص کششی آلیاژ اینکونل 625 ساخته شده به روش همجوشی بستر پودر با لیزر (LPBF) بین 900-1040 MPa است، درحالی که استحکام کششی قطعات تولید شده اینکونل 625 با فرایندهای جوشکاری همچون GTAW و PAW کمتر بوده و به مقدار 800 MPa است.

فرایند GMAW یک کاندید مناسب برای MAM است، زیرا نرخ رسوب بسیار بالا و قابلیت اتوماتیک کردن دارد و همچنین محافظت خوبی از فلز جوشکاری توسط گاز محافظ صورت می‌گیرد. کنون مطالعات زیادی با تمرکز بر بررسی خواص آلیاژهای تولید شده به روش ساخت افزایشی با GMAW صورت گرفته است. هرچند کمبود اطلاعات در مورد خواص اینکونل 625 تولید شده با این روش وجود دارد. اخیراً، یانگ و همکارانش تاثیر سرعت حرکت تورچ بر ریزساختار و خواص مکانیکی اینکونل 625 تولید شده به روش ساخت افزایشی قوسی سیم- انتقال فلز سرد (CMT-WAAM) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که به جز استحکام کششی نهایی، باقی خواص مکانیکی نسبت به آلیاژ تولیدی با روش ریختگی، تقویت شده است. با اینکه تفاوت ناچیزی بین دو روش CMT-WAAM و GMAW وجود دارد؛ در روش CMT-WAAM تمام حرارت تولید شده به صورت تغذیه پالسی در حوضچه جوش کنترل شده است، این اتفاق باعث می‌شود که حرارت ورودی که می‌تواند روی خواص نهایی روی قطعه تولید شده تاثیر داشته باشد را، کاهش دهد. بنابراین خواص قطعه آلیاژ اینکونل 625 تولید شده با روش ساخت افزایشی با الکتروود فلزی و گاز محافظ GMA-WAAM با قطعات تولیدی این آلیاژ به روش CMT-WAAM متفاوت است. در این تحقیق هدف ساخت قطعاتی از جنس آلیاژ اینکونل 625 به روش GMA-WAAM و بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار آن است.

به منظور ساخت دیواره‌های اینکونل 625 به روش WAAM سیم جوش Ni-Cr-Mo3 با قطر 0/8 میلی‌متر از شرکت ESAB خریداری شد. زیرلایه مورد استفاده قطعه‌ای از فولاد زنگ نزن 304L سمباده خورده، در ابعاد 4'20'250 میلی‌متر بود. ترکیب شیمیایی سیم تغذیه شده (ESAB) و زیرلایه که توسط طیف‌سنج نوری (Oxford) اندازه‌گیری شده بود به همراه ترکیب شیمیایی اینکونل 625 طبق استاندارد ASTM B443 به دست آمده بود، در جدول (1) ارائه شده است. بعلاوه از گاز آرگون با خلوص % 99/99 جهت محافظت فلز جوش از کسیدن شدن حین جوشکاری استفاده شد.

جدول 1- ترکیب شیمیایی سیم جوش و زیرلایه

| | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | Cu | Al | Ti | Fe | V | S | P | Ref |
|-------------------|------|------|------|-----------|------|----------|-----|-----|-----|------|-----|------|------|-----------|
| Inconel 625 wire | <0.1 | <0.5 | <0.5 | 21.5 | Bal. | <0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.2 | --- | --- | --- | ESAB |
| 304L SS substrate | 0.02 | 0.3 | 1.5 | 18.4 | 8.2 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | --- | Bal. | 0.1 | 0.01 | 0.03 | --- |
| Inconel 625 | <0.1 | <0.5 | <0.5 | 20.0-23.0 | >58 | 8.0-10.0 | --- | --- | --- | <5.0 | --- | --- | --- | ASTM B443 |

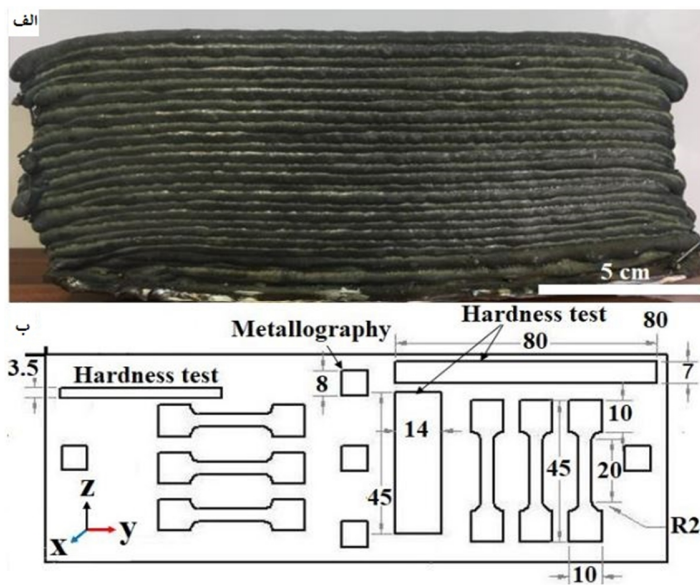
- شرایط تولید

جهت جوشکاری لایه به لایه فلز جوشکاری با قطبیت جریان مستقیم الکترو مثبت (DCEP) از دستگاه GMAW (Jousha S-MIG-303C) استفاده شد. در ابتدا تک پاس‌هایی با پارامترهای مختلف جوشکاری شامل جریان جوشکاری 70-110 A، سرعت جوشکاری 4/6-3/3 میلی‌متر بر ثانیه و نرخ تغذیه سیم 11/5-9/5 متر بر ثانیه جوشکاری شد. شرایط جوشکاری مناسب توسط بازرسی چشمی جوش‌ها جهت رسیدن به یک پاس جوش یکنواخت و بدون نقص انجام شد. در ادامه دیواره‌هایی در ابعاد طولی 200 میلی‌متر و ارتفاع 70 میلی‌متر با 27 پاس رفت و برگشتی جوش، تولید شد؛ که پارامترهای جوشکاری آن در جدول 2 ارائه شده است. جریان گاز آرگون نیز 15 لیتر بر دقیقه تنظیم شده بود. پاس جوشکاری در خلاف جهت پاس قبلی خود انجام شد و بین هر پاس زمان 3 دقیقه فاصله زمانی در نظر گرفته شد تا حداکثر دمای بین پاسی به 150 درجه سانتی‌گراد برسد. تصویر دیواره در شکل 1 الف نمایش داده شده است. بعلاوه یک دیواره با 6 پاس رفت و برگشتی جهت بررسی ریزساختار آلیاژ اینکونل 625 تولید شده، ساخته شد.

- خواص

ساختار دیواره‌ها توسط پراش اشعه ایکس (Bruker advance D8) با لامپ Cuka مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار دیواره‌ها در نقاط مختلف با میکروسکوپ نوری (Olympus) و میکروسکوپ الکترونی (FESEM MIRA3TESCAN) مجهز به آنالیز انرژی طیف برگشتی (EDS SAMX) مشاهده و بررسی شد. نمونه‌های متالوگرافی با درجه الماس 1 میکرومتر پولیش شدند. برای آشکار شدن ریزساختار نمونه‌های استخراج شده

از دیواره در محلول تیروکسید کروم (90 ml H₂O, 10 gr CrO₃) به مدت 20 ثانیه الکترواچ شدند. خواص مکانیکی توسط استحکام کششی دمای اتاق، در دو جهت جوشکاری (محور X) و راستای تولید (محور Z) بررسی شد. مکان و ابعاد نمونه‌های کشش در نمای شماتیک ارائه شده در شکل 1، نشان داده شده است.



شکل 1-الف) تصویر یکی از دیواره‌های ساخته شده به روش GMA-WAAM
 ب) شماتیک نمونه‌های استخراج شده از دیواره جهت انجام آزمون‌های متالوگرافی، کشش و سختی

به دلیل سایز کوچک دیواره‌ها، 6 نمونه تست کشش کوچک از هر دیواره استخراج شد، که سه‌تای آن‌ها در جهت جوشکاری و سه‌تای دیگر در جهت تولید بودند. سپس میانگین مقدار سه نمونه در هر جهت گزارش شدند. اندازه نمونه‌های استخراج شده مشابه مقاله وانگ و همکارانش است. این آزمون توسط دستگاه تست کشش (GOTECH, Taiwan) با سرعت حرکت پیشانی 5 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. از طرفی تست سختی سنجی ویکرز (INNOVA TEST) نیز با بار 500 گرم برای 10 ثانیه صورت گرفت تا تغییرات سختی در راستای محور X و Z مورد بررسی قرار گیرند. برای هر جهت تعداد 20 نقطه سختی گرفته شد و میانگین آن‌ها برای هر جهت گزارش شد.

جدول 2- پارامترهای فرایند GMA-WAAM

| Welding parameter | value |
|-----------------------------|-------|
| Welding current (A) | 100 |
| Welding voltage (V) | 18 |
| Welding speed (mm/s) | 4.6 |
| Argon gas flow rate (l/min) | 15 |
| Wire feed rate (m/s) | 158 |
| Welding heat input (J/mm) | 386 |