

انجمن جوشکاری ایران

## خبرنامه

خرداد ماه 1402 ، شماره 27

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...- بخش دوم 2



انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران

اصفهان- خیابان شمس آبادی- ساختمان شمس-

طبقه 4- واحد 413

تلفن: 03132240325

[info@iwnt.com](mailto:info@iwnt.com)

[www.iwnt.com](http://www.iwnt.com)

جوشکاری :

علم و هنر اتصال مواد

## Welding: The Art and Science of Material Joining



# ساخت قطعات آلیاژ اینکونل 625 به روش ساخت افزایشی قوسی با الکتروده فلزی و گاز محافظ (GMA-WAAM) - بخش دوم

ابوالفضل صفرزاده - مهدی شفیعی آفرانی - محمود شریفی تبار

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

## نتایج و بحث

### - ترکیب شیمیایی و آنالیز فازی

حرارت ورودی بالای فرایند GMAW می‌تواند برخی از عناصر آلیاژی را تبخیر کند و ترکیب شیمیایی فلز جوشکاری شده را تغییر دهد. بنابراین ترکیب شیمیایی نمونه تولید شده با طیف‌سنج نوری تعیین شد، آن دارا  $0.05\% \text{ Al}$ ,  $0.06\% \text{ Co}$ ,  $0.05\% \text{ Si}$ ,  $0.18\% \text{ Fe}$ ,  $0.17\% \text{ Ti}$ ,  $3.7\% \text{ Nb}$ ,  $9.3\% \text{ Mo}$ ,  $22.2\% \text{ Cr}$  و  $0.02\% \text{ V}$  و باقی آن نیکل بود (گزارشات بر اساس درصد وزنی است). که ترکیب به دست آمده با ترکیب اینکونل 625 ارائه شده در استاندارد ASTM B443، کاملاً مطابقت دارد؛ این داده‌ها در جدول یک ارائه شده است.

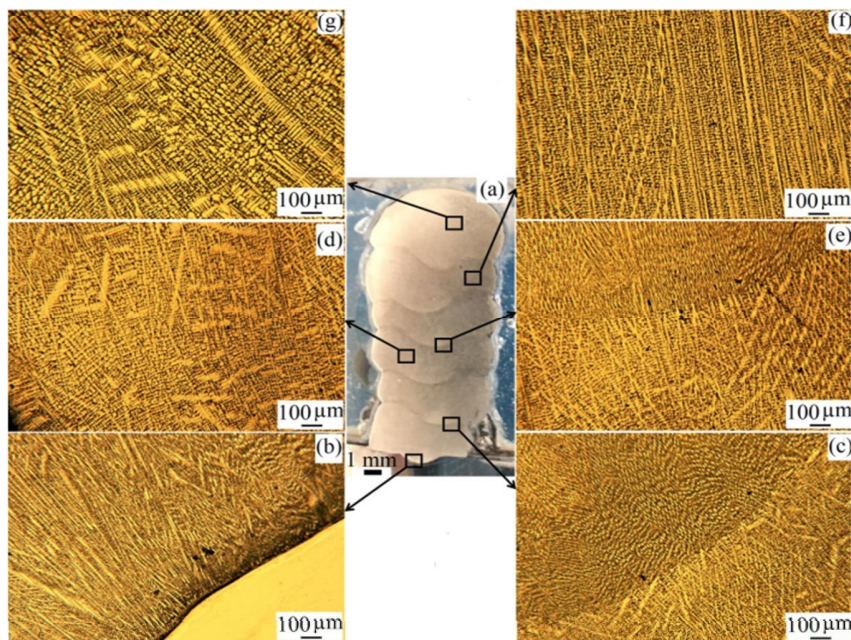
الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) مربوط به دیواره تولید شده در شکل (2) نشان داده شده است. محلول جامد پایه نیکل (00-003-1016) با ساختار کریستالی FCC، تنها فازی بود که مشاهده شد.

### - بررسی ریزساختار

در روش‌های ساخت افزایشی فلزی مانند WAAM، یک بخش مطلوب فرایند، همپوشانی فلز جوش به شکل لایه به لایه است، این در حالی است که ساختار انجمادی، اندازه دانه و جهت‌گیری دانه، وابستگی شدیدی به مکان لایه جوشکاری شده نسبت به زیرلایه و همچنین نحوه رویش لایه‌ها دارد. بر اساس تئوری انجماد فلزات جوشکاری، بیشتر دانه‌ها رشدی ستونی به سمت حوضچه جوش مشترک دارند، زیرا آن‌ها مسیر جریان حرارتی با بیشترین گرادیان دمایی را پیروی می‌کنند. این باعث می‌شود که یک دانه با جهت ترجیحی در قطعه تولیدی ایجاد شود و نتیجتاً ناهمسانگردی در خواص مکانیکی ایجاد شود. شکل (3-الف) تصویر ماکروگرافی نوری از دیواره 1,6 سانتی‌متری که از 6 پاس رفت و برگشتی ساخته شده است را نشان می‌دهد. لایه‌ها به خوبی مشخص هستند و در این تصویر می‌توان آن‌ها را به خوبی تشخیص داد. دیواره جوشکاری شده کاملاً سالم و عاری از تخلخل است. تصاویر میکروگرافی نوری فلز جوشکاری شده از نقاط مختلف دیواره، در شکل (3-الف تا 3-ج) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (3-ب) مشخص است، یک اتصال خوب و واضح بین فلز جوش و زیرلایه فولاد زنگ نزن 304L وجود دارد. ریزساختار فلز جوش در نزدیکی فصل مشترک شامل دانه‌های سلولی و دندریتی با بازوهای ثانویه خیلی ریز است. بیشتر دندریت‌ها به صورت ترجیحی و در راستای محور Z که عمود بر سطح مشترک زیرلایه است، رشد کرده‌اند. با وجود رشد اپیتکسیال برخی دانه‌های بین لایه‌ها که در شکل (3-ج) و (3-و) مشخص است، تغییرات شدیدی در ساختار دانه در فصل مشترک لایه‌ها وجود دارد، که به احتمال زیاد به خاطر ذوب دانه‌های قبلی در اثر رسوب دادن پاس جدید و انجماد مجدد آن است. با افزایش ارتفاع دیواره، فاصله بازوهای ثانویه دندریتی (SDAS) از حدود 6 میکرومتر در نزدیکی فصل مشترک، به حدود 15 میکرومتر افزایش یافته است. ساختار انجمادی به سرعت انجماد (R)، شیب حرارتی (G)، ترکیب مذاب و غیره وابسته است. به خوبی قابل درک

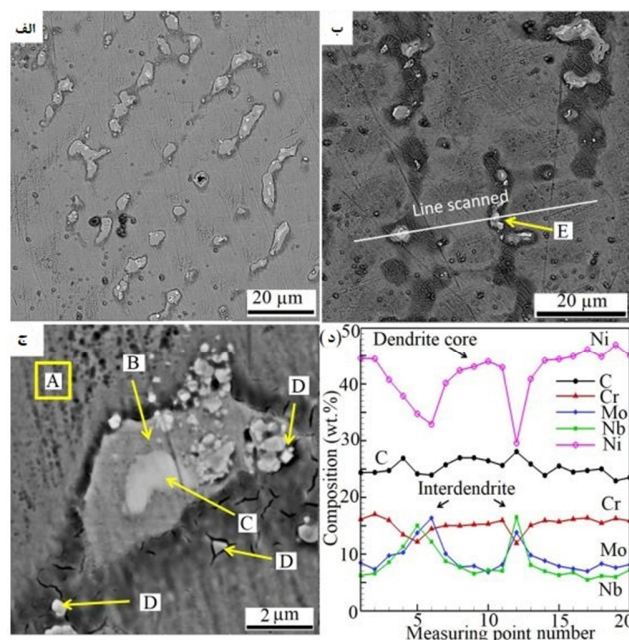
به خوبی قابل درک است که نوع ساختار دانه، توسط نسبت  $G/R$  تعیین می‌گردد. در حالی که اندازه ساختار انجمادی با حاصل  $G.R$  کنترل می‌شود. مورفولوژی ساختار انجمادی با کاهش نسبت  $G/R$ ، از ستونی به دندریتی تغییر می‌کند. بعلاوه سرعت انجماد بالاتر باعث ریزتر شدن ریزساختار می‌گردد. با رسوب لایه‌های اول، زیرلایه به‌عنوان یک خنک کننده عمل می‌کند که باعث افزایش شیب دمایی و سرعت سرد شدن می‌شود. بنابراین دانه‌های ستونی ریز نزدیک زیرلایه تشکیل شده است. در حالی که تراکم دمایی در لایه‌های بالاتر باعث کاهش شیب دمایی و سرعت سرد شدن شده است؛ که به نوبه خود، ساختار دانه‌ها را از ستونی به دندریتی تغییر داده است و به‌طور قابل ملاحظه‌ای  $SDAS$  را افزایش داده است.

جهت تولید یک قطعه مناسب به روش  $GMA-WAAM$ ، فلز جوش روی لایه فلز انجماد یافته جوشکاری شده است. بنابراین حرارت پاس بعدی می‌تواند ریزساختار پاس قبلی را تغییر دهد. تصویر (4-الف) و (4-ب) به ترتیب تصاویر  $FESEM$  منطقه حرارت دیده (مجدد) و لایه رسوب داده شده را نشان می‌دهد. در هر دو منطقه، برخی از فازهای ثانویه با کنتراست رنگ روشن در مناطق بین دندریتی تشکیل شده است. اندازه و کسر حجمی متوسط ذرات ثانویه در لایه بالایی توسط نرم‌افزار  $Image J$  اندازه‌گیری شد که به ترتیب  $6/7$  میکرومتر و  $3/0\%$  بود. در حالی که هر دو آن‌ها به‌صورت جداگانه در منطقه حرارت دیده تا  $8/4$  میکرومتر و  $3/7\%$  افزایش داشته‌اند. کسر حجمی محاسبه شده ذرات ثانویه کمتر از آستانه تشخیص ابزار اندازه‌گیری  $XRD$ ، یعنی  $5\%$  بود. ضمناً به‌نظر می‌رسد که افزایش ناچیز اندازه و کسر حجمی ذرات با حرارت بعدی در منطقه حرارت دیده شده، اتفاق افتاده است. تغییر در مورفولوژی و کسر حجمی فازهای ثانویه با افزایش ارتفاع دیوار طی فرایند ساخت افزایشی قوسی تنگستن- گاز آلیاژ اینکونل 625 توسط وانگ و همکارانش گزارش شده است.



شکل 3- الف) تصویر ماکروگرافی یک دیواره 6 پاسه  
ب تا ی) تصاویر میکروسکوپ نوری از نقاط مختلف دیواره

جهت بررسی توزیع عناصر آلیاژی در ریزساختار، اسکن خطی EDS در راستای خط نشان داده شده در تصویر (4-ب)، گرفته شد؛ که در شکل (4-د) توضیحات آن ارائه شده است. مشخص شد که اکثر عناصر آلیاژی به طور غیر یکنواخت و با تفکیک شدید توزیع شده‌اند. هسته دندریت از برخی عناصر مانند Ni و Cr غنی است، در حالی که در مناطق بین دندریتی عناصر Mo، Nb و C وجود دارد. بنابراین به نظر می‌رسد که جدایش عناصر به مناطق بین دندریتی منجر به تشکیل فازهای ثانویه شده است. تصاویر میکروگرافی فازهای ثانویه در شکل (4-ج) شان داده شده است. علاوه بر این، ترکیب شیمیایی این فازها و فاز زمینه توسط آنالیز EDS از نظر کمی اندازه‌گیری و در جدول (3) ارائه شده است (تمام مقادیر برحسب درصد است). به دلیل محدودیت ابزاری EDS برای اندازه‌گیری کمی عناصر روشن، غلظت کربن گزارش نشده است. زمینه یک محلول جامد پایه نیکل شامل Cr، Nb، Mo و Fe است. فازهای ثانویه که با مرفولوژی و کنتراست رنگی متفاوت در تصاویر FESEM ظاهر شده‌اند، در شکل (4-ج) ارائه شده‌اند. برخی ذرات سفید و ریز با شکل منظم که با D مشخص شده‌اند، علاوه بر آن در بعضی نواحی فازهای روشن نامنظم (نقطه C) با فازهای خاکستری روشن (نقطه B) احاطه شده‌اند. ذرات روشنی (که با D مشخص شده‌اند) که غنی از Nb، Mo و Ti هستند، کاربرد (Ti, Mo, Nb)C می‌باشند. در نقاط B و C غلظت Nb و Mo بیشتر از زمینه (نقطه A) است. ژو و همکارانش طی تحقیقات گسترده، نوع فازهای ثانویه تشکیل شده طی فرایند ساخت افزایشی قوس پلازما آلیاژ اینکونل 625 را توسط آنالیز EDS و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که فازهای بین فلزی مانند فاز لاهه، کاربیدهای MC و d-Ni<sub>3</sub>Nb در ساختار نمونه جوشکاری شده، تشکیل شده است. فاز لاهه یک ساختار A<sub>2</sub>B دارد که در آن A: Ni, Cr, Fe و B: Nb، Mo، Ti می‌باشند. بر اساس این تحقیقات، انجماد آلیاژ با تغییر شکل  $L \rightarrow \gamma$  شروع می‌شود که عناصر C، Mo، Ti و Nb را به مرزدانه مذاب می‌راند. سپس کاربرد MC توسط تغییر شکل بعدی  $(\gamma + MC) \rightarrow L$  یعنی واکنش یوتکتیک تشکیل شده است؛ و در نهایت باقی مایع با واکنش یوتکتیک سه‌تایی  $L \rightarrow \gamma + Laves$  جامد می‌شود. علاوه بر این، ژو و همکارانش نشان دادند که فاز d در مناطق بالایی دیواره و در مناطقی که دیواره حرارت دیده، نسبت به نواحی نزدیک به فصل مشترک، بیشتر تشکیل شده است. بنابراین آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش حرارت ورودی در فرایند ساخت، عناصر آلیاژی را در مناطق بین دندریتی متراکم می‌کند و شرایط را برای تشکیل فاز d-Ni<sub>3</sub>Nb فراهم می‌کند. همچنین حرارت مجدد، منجر به انحلال فاز لاهه و رسوب d حین سرد شدن بعدی شده است. ژو و همکارانش، در گزارشی مشابه که تحت عنوان ساخت افزایشی قوسی تنگستن- گاز ارائه شده بود، تشکیل فاز لاهه را تایید کردند. همانطور که در جدول (3) ارائه شده است، فاز براق مشخص شده با C دارای (Ni+Cr+Fe, %64.3) و (Nb+Mo+Ti, %35.7) است که با ساختار A<sub>2</sub>B مربوط به فاز لاهه مطابقت دارد. نقطه E که در شکل (4-ب) مشخص شده، ترکیبی مشابه با ترکیبی که در جدول (3) ارائه شده است، دارد.



شکل 4، تصویر FESEM مربوط به دیواره اینکونل 625 تولید شده به روش GMA-WAAM (الف) منطقه مجدد حرارت دیده، (ب) چند پاس جوشکاری

جدول 3، مقادیر کمی ترکیبات شیمیایی مربوط به چند فاز متنوع حاصل از آنالیز EDS

Analyzed point	Chemical composition (at.%)					
	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	Ti
A	25.1	2.6	60.4	4.6	7.3	---
B	23.0	0.5	58.3	8.6	9.6	---
C	19.0	1.5	43.8	20.4	15.3	---
D	12.3	0.9	26.1	48.4	9.2	3.1
E	21.7	0.3	47.6	16.8	13.6	---

از طرف دیگر فازهای خاکستری روشن که توسط فاز لایه احاطه شده‌اند دارای (Ni+Cr+Fe, %81.8) و (Nb+Mo+Ti, %18.2) است که مشابه ترکیب فاز  $\delta - (Ni, Cr, Fe)3(Nb, Mo)$  است. بنابراین نتیجه می‌شود که علاوه بر محلول جامد پایه نیکل، کاربید MC، فاز لایه و فاز d در ساختار دیواره جوشکاری شده، تشکیل شده است.

<https://jwsti.iut.ac.ir/>  
نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران