

مطالعه اثر پارامترهای فرآیند جوشکاری نوسانی قوسی تنگستن-گاز بر ریزساختار فولاد مقاوم به حرارت HP

علی رضا نامجو*^۱، رضا دهملائی^۲، علی اشرفی^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد- جوشکاری، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

۲- استادیار، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

*a.namjou@cbasco.ir

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۱/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۴/۰۱)

چکیده

در این پژوهش فولاد مقاوم به حرارت HP ریختگی توسط فلز پرکننده ER-NiCr3 با استفاده از روش‌های جوشکاری نوسانی قوس تنگستن-گاز (جوشکاری پالسی) و جوشکاری قوس تنگستن-گاز (جوشکاری بدون پالس) انجام و تاثیر فرآیند جوشکاری بر ریزساختار آن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در شرایط ریختگی و با استفاده از روش جوشکاری قوس تنگستن-گاز، در فصل مشترک فولاد مقاوم به حرارت HP و فلز پرکننده ER-NiCr3 یک ناحیه مخلوط نشده به دلیل عدم اختلاط مکانیکی کامل مشاهده شد. با استفاده از جوشکاری پالسی در شدت جریان بالایی ۱۸۰ آمپر، شدت جریان زمینه ۶۰ آمپر، فرکانس ۱۰-۱۲ هرتز و دوره کاری ۴۰ درصد، این ناحیه حذف و ریزساختار فلز جوش ریزدانه‌تر گردید.

واژه‌های کلیدی:

فولاد مقاوم به حرارت HP، جوشکاری نوسانی قوس تنگستن-گاز، ناحیه مخلوط نشده، فلز پرکننده ER-NiCr3

۱- مقدمه

مناسب در دمای بالا کاربرد وسیعی را در صنایع گوناگون پیدا کرده است [۴-۵]. بنابراین، مطالعه و بررسی جوشکاری و جوش پذیری این فولاد ضروری می‌باشد. تحقیقات انجام شده در ارتباط با جوشکاری قوسی تنگستن-گاز این آلیاژ نشان می‌دهد که جوش‌پذیری این فولاد در شرایط ریختگی مناسب بوده و جوش حاصل فاقد ترک و از پیوستگی مطلوبی با زمینه برخوردار است [۶-۷]. در تحقیقات صورت گرفته در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه

فولاد مقاوم به حرارت HP نخستین بار در سال ۱۹۶۰ در طی تحقیقات گسترده بر روی توسعه فولادهای مقاوم به حرارت معرفی گردید [۱]. این آلیاژ در شرایط ریختگی دارای انعطاف‌پذیری و قابلیت جوشکاری مناسبی است. ساختار این فولاد در تمام دماها آستنیتی بوده و به دلیل درصد نیکل بالا، حساس به تشکیل فاز سیگما نیست [۲-۳]. امروزه فولاد مقاوم به حرارت HP به دلایلی مثل استحکام بالا، ظرفیت تحمل حرارت‌های بالا، مقاومت خستگی حرارتی و مقاومت خزشی

حوضچه مذاب در حین جوشکاری) می‌تواند بر ناحیه مخلوط نشده^۱ مؤثر باشد [۱۴]. در این مقاله، مطالعه اثر پارامترهای فرآیند جوشکاری نوسانی قوسی تنگستن-گاز (جوشکاری پالسی) و مقایسه آن با روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (جوشکاری بدون پالس) بر ریز ساختار فولاد مقاوم به حرارت HP و تاثیر بر ناحیه مخلوط نشده مورد بررسی قرار گرفته است.

یک ناحیه مخلوط نشده گزارش شده است [۸]. در محیط‌هایی که فلز پایه و جوش مقاوم به خوردگی هستند، خوردگی ترجیحاً در این نواحی بیشتر از سایر قسمت‌ها صورت می‌گیرد [۹-۱۰]. ایجاد فرکانس‌های بالا در جوشکاری پالسی باعث ایجاد نوسان دمایی و لرزش حوضچه مذاب می‌شود [۱۱-۱۳]. هم‌چنین تکنولوژی جوشکاری (فرآیند جوشکاری، هندسه و لرزش

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد مقاوم به حرارت HP و فلز پرکننده (درصد وزنی).

Fe	Ni	Cr	C	Nb	Ti	Al	Mo	Mn	Si	
۳۵/۴	۳۵/۸	۲۴/۴	۰/۴	۱/۳	-----	-----	۰/۰۴	۱/۳	۱/۳	فولاد HP
۳	۶۷	/۲۲ ۱۸	۰/۱	۲-۳	۰/۷۵	۰/۳	-----	۲/۵	۰/۵	اینکونل ER-NiCr3

جدول (۲): مشخصات جوشکاری نمونه‌ها در اختلاف پتانسیل ۱۴ ولت.

نمونه	جریان بالایی (آمپر)	جریان زمينه (آمپر)	فرکانس (هرتز)	درصد دوره کاری ^۳	سرعت جوشکاری پاس اول (میلی متر بر ثانیه)	سرعت جوشکاری پاس دوم تا چهارم (میلی متر بر ثانیه)
۱	۱۲۰	-----	-----	-----	۱/۵	۱/۱
۲	۱۸۰	۶۰	۶	۵۰	۱/۵	۱/۱
۳	۱۸۰	۶۰	۶	۴۰	۱/۵	۱/۱
۴	۱۸۰	۶۰	۶	۶۰	۱/۵	۱/۱
۵	۱۸۰	۶۰	۸	۴۰	۱/۵	۱/۱
۶	۱۸۰	۶۰	۱۰	۴۰	۱/۵	۱/۱
۷	۱۸۰	۶۰	۱۲	۴۰	۱/۵	۱/۱

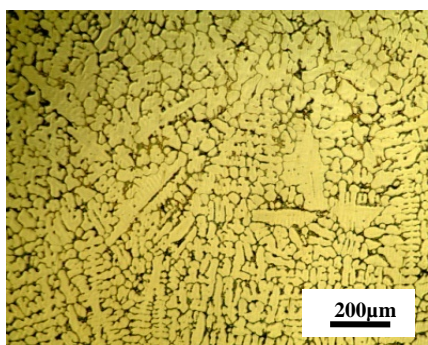
۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد مقاوم به حرارت HP به عنوان فلز پایه و فلز پرکننده ER-NiCr3 به عنوان فلز جوش استفاده شده است. فلز پرکننده مطابق با استاندارد الکترودها و سیم جوش‌های A5.14 WS که در بیشتر کاربردهای جوشکاری فولاد مقاوم به حرارت HP استفاده می‌شوند، جوشکاری شد [۹-۱۵]. ترکیب شیمیایی فلز پایه و پرکننده در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به تولید ریختگی فولاد مقاوم به حرارت HP به صورت لوله، نمونه‌ها از لوله‌های با قطر ۲۳۵ میلی‌متر و ضخامت ۱۳

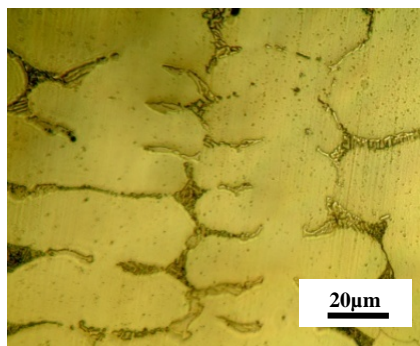
در این پژوهش از فولاد مقاوم به حرارت HP به عنوان فلز پایه و فلز پرکننده ER-NiCr3 به عنوان فلز جوش استفاده شده است. فلز پرکننده مطابق با استاندارد الکترودها و سیم جوش‌های A5.14 WS که در بیشتر کاربردهای جوشکاری فولاد مقاوم به

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) ریز ساختار فولاد HP را در دو بزرگنمایی مختلف نشان می‌دهد. شکل (۱-الف) نشان می‌دهد که ریز ساختار فولاد مقاوم به حرارت HP در شرایط ریختگی دارای زمینه آستینیتی همراه با شبکه پیوسته‌ای از کاربیدهای دندریتی یوتکتیک در مرز دانه‌ها است.



الف



ب

شکل (۱): ساختار فولاد HP در دو بزرگنمایی مختلف

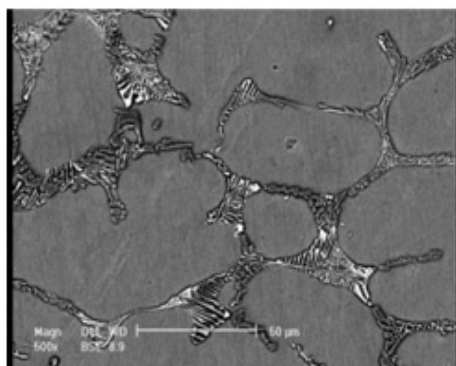
بررسی ساختار همین نمونه (شکل ۲-الف) توسط میکروسکوپ الکترونی با دتکتور الکترون‌های برگشتی نشان می‌دهد که شبکه کاربیدهای اولیه در مرز دانه‌ها متشکل از دو نوع کاربید با رنگ-های تیره و روشن است. نتایج آنالیز EDS این کاربیدها در (شکل ۲-ب) نشان می‌دهد که کاربیدهای تیره غنی از کرم و آهن می‌باشد. با توجه به (شکل ۲-ج) کاربیدهای روشن غنی از

میلی‌متر تهیه شد. نمونه‌هایی به ابعاد 10×10 cm با استفاده از ماشینکاری از لوله‌های اولیه جدا گردید. به منظور انجام جوشکاری و بر اساس استاندارد ASME IX از طرح اتصال جناغی یک طرفه با زاویه پخ ۷۵ درجه و فاصله ریشه ۲/۴ میلی‌متر (معادل قطر سیم جوش‌های مصرفی) استفاده شد. جوشکاری در شرایط مختلف بدون پیشگرم کردن و با استفاده از جوشکاری نوسانی قوسی تنگستن-گاز (PGTAW-DCEN) و جوشکاری قوسی تنگستن گاز (GTAW-DCEN) در شرایط تخت انجام گردید.

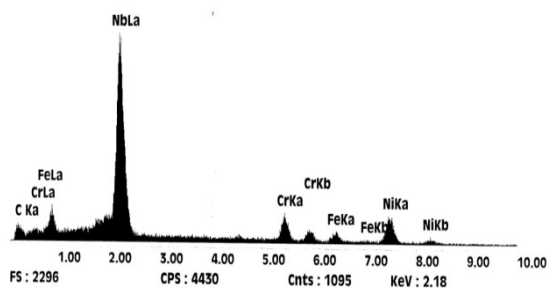
گاز مصرفی در همه موارد جوشکاری، آرگون خالص با نرخ جریان 40 CFH^2 برای حفاظت روی جوش و 25 CFH برای حفاظت پشت بوده است. پس از پایان جوشکاری، نمونه‌ها در هوا خشک شدند و هیچ گونه عملیات حرارتی پس از جوشکاری روی آنها انجام نشد. مشخصات جوشکاری نمونه‌ها در جدول (۲) مشاهده می‌شود. برای مطالعه و بررسی ریز ساختار فلز پایه و جوش و ترک‌های ناحیه مجاور جوش در شرایط مختلف جوشکاری از متالوگرافی استفاده گردید. بدین منظور نمونه‌هایی از فلز پایه و قطعات جوش با ابعاد $1 \times 2 \times 4$ cm از قطعات جوش در شرایط جوشکاری شده با پارامترهای مختلف تهیه گردید. نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های کاربید سیلیسیوم از ۸۰ تا ۱۲۰۰ سنباده زنی شده و سپس به کمک پودر آلومینا با اندازه ذرات $0.3 \mu\text{m}$ پولیش شدند.

نمونه‌ها توسط محلول ماربل به مدت ۲۵ ثانیه اچ شدند. سپس ریز ساختار نواحی مختلف جوش و فلز پایه با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی ترکیب شیمیایی و شناسایی فازها و مناطق مختلف ساختاری فولاد HP از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیزکننده نقطه ای (EDS) استفاده شد.

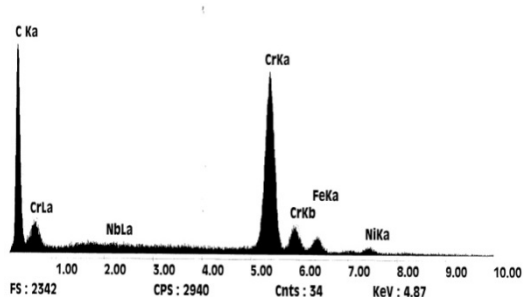
(درصد دوره کاری^۳)، ۵۰ استفاده شده است. این شرایط اجازه می‌دهد ذوب و انجماد فلز جوش به صورت نوسانی انجام شود. بنابراین، حرارت با نرخ کم‌تری به سمت فلز پایه منتقل می‌شود و ناحیه مخلوط نشده نسبت به جوشکاری قوس تنگستن-گاز کوچک‌تر می‌شود. در شکل (۳) فصل مشترک فلز جوش ER-NiCr3 و فولاد مقاوم به حرارت HP نشان داده شده است. در شکل مشاهده می‌شود که منطقه جوش دارای ساختار ریزتر از فلز پایه است ولی هم‌چنان زمینه آستنیتی به همراه کاربیدهای یوتکتیک اولیه است.



الف



ب



ج

شکل (۲): تصویر میکروسکوپ الکترونی (الف): فولاد HP، (ب): آنالیز EDS فاز روشن، (ج): آنالیز EDS فاز تیره.

نیویم بوده و از نوع NbC است. تحقیقات سایر پژوهشگران نیز نتایج مشابهی را در مورد کاربیدهای اولیه این فولادها نشان داده است [۱۶، ۱۷].

با توجه به پارامترهای جوشکاری جدول (۲) و معادله (۱)، شدت جریان میانگین جوشکاری پالسی نمونه دوم (I_m) به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$I_m = \frac{I_p * t_p + I_b * t_b}{t_p + t_b} \quad \text{معادله (۱)}$$

$$= \frac{180 * 0.5 + 60 * 0.5}{0.5 + 0.5} = 120A$$

در معادله (۱)، I_p شدت جریان بالایی، t_p مدت زمان جریان بالایی، I_b شدت جریان پایینی، t_b مدت زمان جریان پایینی می‌باشد. با توجه به معادله (۲) و (۳) و برابر شدن شدت جریان در نمونه (۱) و (۲)، حرارت ورودی نمونه پالسی (QPULSED) و بدون پالس (Q_{CON}) برابر با ۱۱۲۰ ژول بر میلی‌متر بدست می‌آید.

$$Q_{PULSED} = \frac{I_m * E}{V} \quad \text{معادله (۲)}$$

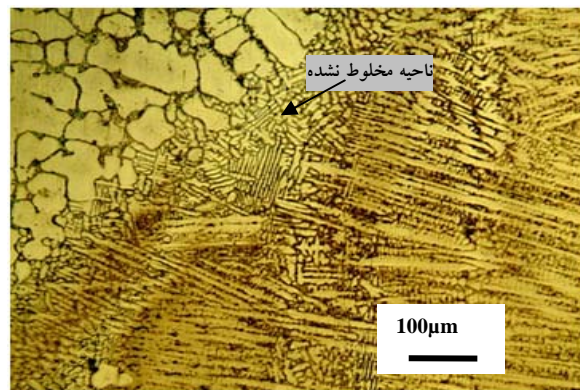
$$Q_{PULSED} = \frac{120 * 14}{1.2} = 1120 \text{ j/mm}$$

$$Q_{CON} = \frac{I * E}{V} = \frac{120 * 14}{1.2} = 1120 \text{ j/mm}$$

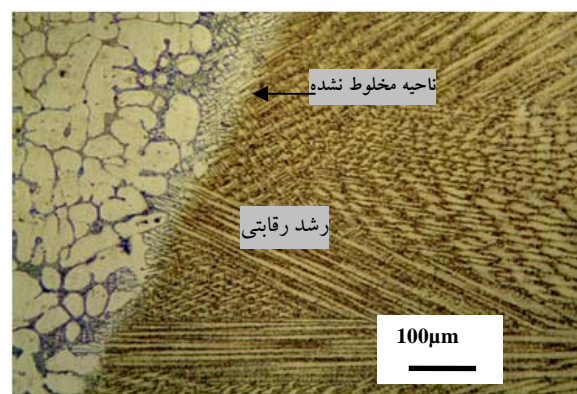
در معادله (۲) و (۳)، I_m شدت جریان میانگین، E اختلاف پتانسیل و V سرعت جوشکاری می‌باشد.

با توجه به یکسان بودن حرارت ورودی، تفاوت اصلی ریز ساختاری در تغییر فرآیند جوشکاری ایجاد می‌شود. در نمونه دوم (بر اساس جدول ۲)، از روش جوشکاری نوسانی قوس تنگستن-گاز یا به اختصار جوشکاری تیگ پالسی در فرکانس ۶ هرتز و درصد زمان ماندن در شدت جریان بالایی به زمان کل

(سلولی-دندریتی) و شاخه‌های ثانویه دندریتی تقریباً دیده نمی‌شوند. شکل (۳-ب) ریز ساختار ناحیه فصل مشترک جوشکاری نوسانی قوس تنگستن-گاز را نشان می‌دهد. با توجه به پارامترهای انتخاب شده برای جوشکاری پالسی و ریزساختار مربوطه در شکل (۳-ب) ناحیه مخلوط نشده به طور کامل حذف نشده است. بنابراین میزان فرکانس ۶ هرتز برای حذف این ناحیه مناسب نمی‌باشد. از طرف دیگر در شرایط یکسان حرارت ورودی ۱۱۲۰ ژول بر میلی‌متر، ریز ساختار در دو روش پالسی و معمولی تغییر قابل ملاحظه نکرده است و ساختار فلز جوش یک ساختار کاملاً آستنیتی است، زیرا هیچ استحاله‌ای در حین انجماد در آن رخ نداده ولی مورفولوژی دندریت‌ها دچار تغییر شده است. در شکل (۳-ب) رشد رقابتی دانه‌های ستونی در فلز جوش به خوبی قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۳)، دندریت‌های تشکیل شده در روش جوشکاری پالسی به دلیل نرخ حرارت ورودی کمتر نسبت به روش جوشکاری تیگ معمولی، ریزتر می‌باشند. تحقیقات پژوهشگران در مورد جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم با روش تیگ پالسی نتایج مشابهی را نشان می‌دهد [۱۸-۱۹]. این در حالی است که به واسطه انجام عملیات حرارتی پس گرم تغییر قابل ملاحظه‌ای در اندازه دانه‌های فلز جوش آلیاژهای آلومینیوم مشاهده نشده است [۲۰]. در ادامه با توجه به اهمیت بالای درصد دوره کاری، با ثابت گرفتن دیگر پارامترهای جوشکاری، بررسی درصد دوره کاری در ۴۰، ۵۰ و ۶۰ صورت گرفت. درصد دوره کاری باعث تغییر حرارت ورودی به قطعه می‌گردد ولی در این قسمت زمان تشکیل و رها شدن فلز مذاب جوش مهم است. اگر این زمان کم باشد، مذاب تشکیل شده به سمت الکتروود بر می‌گردد و چنانچه زیاد باشد در فرود آمدن متناوب و پشت سر هم وقفه ایجاد می‌شود و در نتیجه قوس جوش ناپایدار می‌شود. در دوره کاری ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد، جوشکاری در شرایط قوس پایدار انجام گرفت. بنابراین مدت زمان ماندن در شدت جریان بالایی از لحاظ پایداری قوس و ایجاد جوشکاری روان در یک بازه مشخص رخ می‌دهد و چنانچه از این بازه خارج گردد، امکان ایجاد قوس



الف



ب

شکل (۳): ریز ساختار فصل مشترک فولاد HP: الف) نمونه ۱ روش جوشکاری بدون پالس، ب) نمونه ۲ روش جوشکاری پالسی.

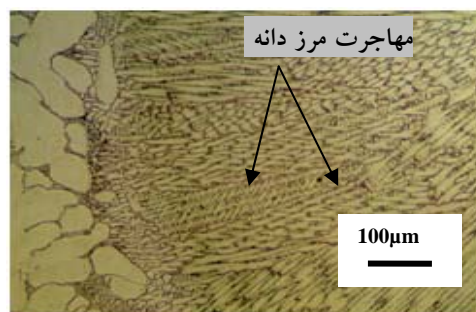
تفاوت ساختار میکروسکوپی منطقه جوش و فلز پایه ناشی از اختلاف در سرعت سرد شدن و لذا تفاوت در نحوه انجماد فلز جوش با فلز پایه است. شکل (۳-الف) نشان می‌دهد که فولاد HP جوشکاری شده بوسیله فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (بدون پالس) دارای فصل مشترک پیوسته و مطلوبی با فلز جوش بوده و هیچ گونه اثری از ترک در فصل مشترک یا ناحیه مجاور جوش مشاهده نمی‌شود. تحقیقات اخیر نیز نشان می‌دهد که جوشکاری این فولاد در شرایط ریختگی با استفاده از فلز جوش ER-NiCr3، فاقد هر گونه ترک در این ناحیه است [۸]. اما در ناحیه مجاور جوش فولاد HP و در امتداد مرز ذوب یک ناحیه مخلوط نشده وجود دارد که به دلیل عدم اختلاط کامل مکانیکی فلز جوش و فلز پایه تشکیل شده است. با توجه به شکل (۳-الف) ساختار فلز جوش شامل دانه‌های ستونی

تأثیری در حذف ناحیه مخلوط نشده مشاهده نشد. با توجه به کاهش زمان ماندن جریان در بیشینه خود به همان میزان، مدت زمان ماندن در جریان زمینه، افزایش می‌یابد. برای نمونه‌ای که مدت زمان ماندن در جریان بالایی ۴۰ درصد است، مدت زمان ماندن در جریان زمینه ۶۰ درصد می‌باشد. این امر علاوه بر کاستن دمای قطرات مذاب، باعث سرد شدن بیشتر حوضچه جوش در جریان زمینه می‌شود. در شکل (۴-الف) آستینت‌های ستونی تشکیل شده در مرز جوش به صورت موجی شکل به دلیل قوس پالسی مشاهده و مهاجرت مرز دانه‌ها بیشتر شده است. در هر سه نمونه دندریت‌های سلولی به همراه دندریت‌های سلولی شکسته شده، مشاهده می‌شود. با مقایسه شکل (۴-الف) و (۴-ج) که درصد دوره کاری به ترتیب ۶۰ و ۵۰ است، افزایش رشد دندریت‌ها باعث بزرگ شدن دانه‌ها نسبت به نمونه بادوره کاری ۴۰ درصد شده است. دلیل این افزایش فوق‌گداز فلز مذاب و در نتیجه کاهش نرخ سرد شدن فلز جوش است.

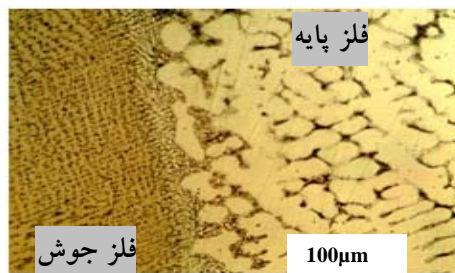
ناپایدار وجود دارد. در مدت زمان ماندگاری در شدت جریان بالایی (دوره کاری) حرارت ورودی بیشتری به فلز پایه منتقل می‌شود. در نتیجه، زمانیکه سطح جریان به حد پایینی خود در شدت جریان زمینه می‌رسد، زمان سرد شدن قطعه طولانی‌تر شده و دانه‌ها اجازه رشد پیدا می‌کنند. بنابراین هر چه درصد دوره کاری در بازه مجاز خود کاهش یابد، میزان فوق‌گداز فلز جوش کاهش پیدا می‌کند. با توجه به شکل (۴-الف) با افزایش دوره کاری به ۶۰ درصد، تغییری در عرض ناحیه مخلوط نشده صورت نگرفت. این امر می‌تواند به دلیل افزایش فوق‌گداز فلز جوش ترسیمی که متأثر از دمای قطرات مذاب است، باشد. در ادامه با توجه به شکل (۴-ب) با کاهش زمان ماندن در شدت جریان بالایی (دوره کاری) به ۴۰ درصد، عرض ناحیه مخلوط نشده در مقایسه با حالت ۵۰ درصد تغییری پیدا نکرده است. بنابراین در بازه مجاز جهت انجام جوشکاری در شرایط قوس پایدار با افزایش و کاهش مدت زمان ماندن در جریان بالایی،



ب



الف



ج

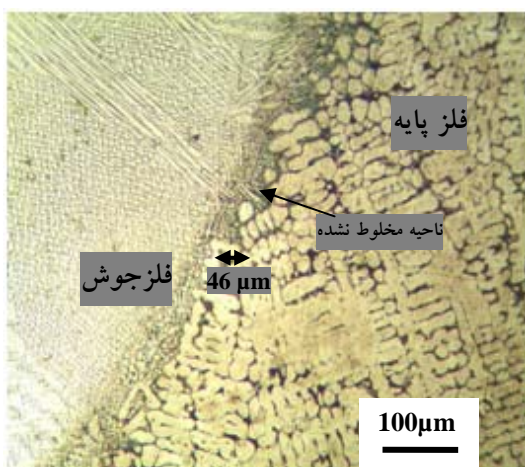
شکل (۴): ریزساختار فولاد HP در فرکانس ۶ هرتز، شدت جریان بالایی ۱۸۰ و زمینه ۶۰ آمپر: الف) نمونه ۴، دوره کاری ۶۰ درصد، ب) نمونه ۳، دوره کاری ۴۰ درصد و ج) نمونه ۲، دوره کاری ۵۰ درصد.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میزان نوسان مورد نیاز برای شکستن ریزساختار دندریتی - سلولی ایجاد نشده است. در

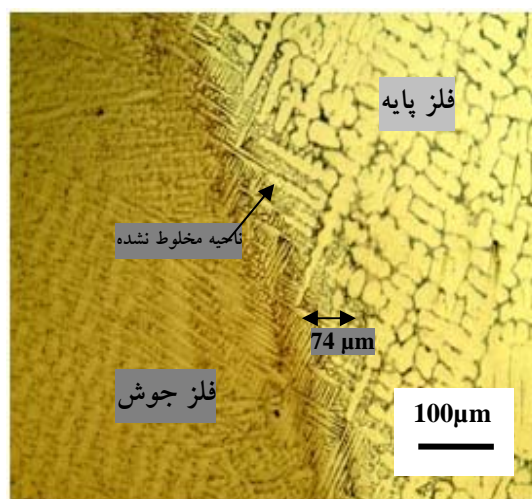
با توجه به شکل‌های (۴-الف)، (۴-ب) و (۴-ج) در هیچ یک از نمونه‌ها، دندریت‌های سلولی به طور کامل شکسته نشده است.

شدت جریان بالایی ۱۸۰ آمپر و شدت جریان زمینه ۶۰ آمپر، نمونه‌های جوشکاری شده در فرکانس‌های مختلف ۱۲، ۱۰، ۸، ۶ هرتز مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس بررسی ریز ساختاری انجام شده در شکل (۵-الف) مشخص شد که در فرکانس ۶ هرتز میزان اختلاط پالسی برای شکستن دندریت‌های سلولی کافی نبود.

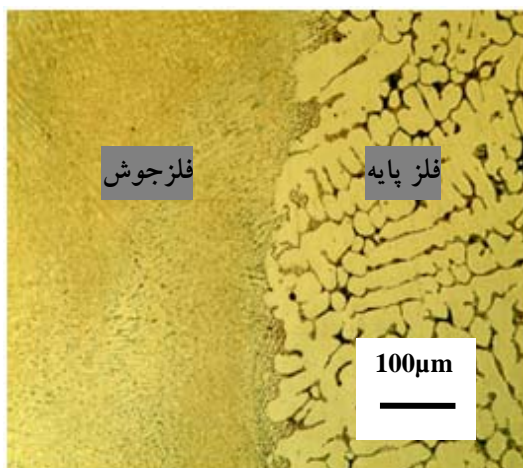
صورتی که دوره کاری (مدت زمان ماندگاری در جریان بالایی به مدت زمان کل) ثابت در نظر گرفته شود، میزان جریان میانگین ثابت می‌ماند. در نتیجه با ثابت ماندن جریان میانگین، میزان نرخ ذوب شدن الکتروود و حرارت ورودی به قطعه ثابت می‌ماند و شرایط برای بررسی فرکانس مطلوب ایجاد می‌شود. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در دوره کار ۴۰ درصد،



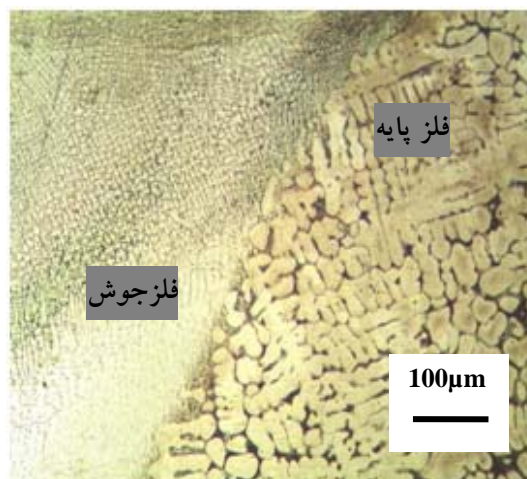
ب



الف



د



ج

شکل (۵): ساختار جوشکاری نوسانی قوس تنگستن-گاز در جریان بالایی ۱۸۰ و زمینه ۶۰ آمپر و دوره کاری ۴۰ درصد: الف) نمونه ۳، فرکانس ۶ هرتز، ب) نمونه ۵، فرکانس ۸ هرتز، ج) نمونه ۶، فرکانس ۱۰ هرتز و د) نمونه ۷، فرکانس ۱۲ هرتز.

سانتی گراد است [۲]. با توجه به نقطه ذوب بالاتر فلز جوش ER-NiCr3 از فلز پایه فولاد مقاوم به حرارت HP، نواحی

در بررسی اخیر دامنه دمایی ذوب فولاد HP، ۱۳۴۸-۱۳۴۰ و دامنه دمایی ذوب فلز جوش ER-NiCr3، ۱۳۵۵-۱۳۴۰ درجه

یک پالس و t_B مدت زمان شدت جریان زمینه در یک پالس می‌باشد. در نتیجه با افزایش فرکانس، مدت زمان جریان بالایی در هر سیکل کاهش می‌یابد. در حالی که درصد دوره کاری و حرارت ورودی به فلز پایه ثابت است. در نتیجه با افزایش فرکانس از ۶ هرتز به ۸ هرتز، میزان حرارت ایجاد شده در یک ثانیه در تعداد دفعات بیشتری به فلز جوش و پایه منتقل می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵-ب) دیده می‌شود دندریتهای سلولی نزدیک خط ذوب در فرکانس ۸ هرتز تا حدودی شکسته شده است. نمونه‌های جوشکاری شده با فرکانس ۱۰ و ۱۲ هرتز دارای فصل مشترک پیوسته و مطلوبی با فلز جوش بوده و هیچ گونه اثری از ترک در فصل مشترک با ناحیه مجاور جوش مشاهده نمی‌شود. شکل (۵-ج) و شکل (۵-د) که به ترتیب مربوط به نمونه جوشکاری شده در ۱۰ و ۱۲ هرتز است، نشان دهنده حذف کامل ناحیه مخلوط نشده به دلیل اختلاط کامل مکانیکی فلز جوش و فلز پایه در فرکانس ۱۰ و ۱۲ هرتز است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ریز ساختار جوشکاری فولاد مقاوم به حرارت HP و فلز پرکننده ER-NiCr3 با استفاده از فرآیندهای جوشکاری نوسانی قوسی تنگستن-گاز و جوشکاری قوسی تنگستن-گاز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج این بررسی به صورت خلاصه در زیر آورده شده است.

۱- با استفاده از انتخاب پارامترهای مناسب جوشکاری نوسانی قوسی تنگستن-گاز، ناحیه مخلوط نشده به طور کامل حذف گردید، در حالی که این ناحیه در جوشکاری قوسی تنگستن-گاز وجود دارد.

۲- به دلیل نرخ حرارت ورودی کمتر در روش جوشکاری نوسانی قوسی تنگستن-گاز، ریز ساختار دندریتهای تشکیل شده ریزتر از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز است.

۳- با افزایش و کاهش مدت زمان ماندن در جریان بالایی به مدت زمان کل (دوره کاری)، تغییری در عرض ناحیه مخلوط

نزدیک خط ذوب به دلیل حرارت بالا ناشی از فلز جوش مذاب ER-NiCr3، ذوب گردیده ولی با فلز جوش مخلوط نمی‌شود و در زمان سرد شدن به علت سرعت سرمایش بالا، دانه‌های آن‌ها ریزتر شده و باعث تشکیل ناحیه مخلوط نشده می‌گردد. انجماد فلز جوش باعث انقباض و در نتیجه اعمال تنش کششی بر روی آن (ناحیه ذوب شده و انجماد یافته) می‌گردد، که این امر می‌تواند سبب تشکیل ترک گردد. در بررسی‌های صورت گرفته در مورد جوشکاری این فولاد بوسیله فلز جوش زنگ نزن ۳۰۹ علاوه بر وجود ناحیه مخلوط نشده، ترک‌هایی در این ناحیه گزارش شده است [۸]. شکل (۵) نشان می‌دهد که فولاد HP دارای ناحیه مخلوط نشده و فصل مشترک پیوسته و مطلوبی با فلز جوش بوده و هیچ گونه اثری از ترک در فصل مشترک یا ناحیه مجاور جوش مشاهده نمی‌شود. بنابراین در جوشکاری نوسانی قوسی تنگستن-گاز (جوشکاری تیگ پالسی) برای ایجاد اختلاط مکانیکی مناسب جهت حذف ناحیه مخلوط نشده و شکستن دندریتهای به میزان بیشتر فرکانس نیاز است. همان‌طور که گفته شد درصد دوره کاری تاثیر قابل قبولی در حذف ناحیه مخلوط نشده ندارد. از طرفی با توجه به شکل (۵-الف) ایجاد اختلاط مکانیکی در فرکانس ۶ هرتز به طور کامل این ناحیه را حذف نکرده است و عرض این مناطق در این شرایط ۷۴ میکرومتر می‌باشد. بنابراین برای حذف کامل این ناحیه به اختلاط مکانیکی بیشتری نیاز است. شکل (۵-ب) نمونه جوشکاری شده در فرکانس ۸ هرتز را نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که ناحیه مخلوط نشده به طور کامل حذف نشده و عرض این ناحیه ۴۶ میکرومتر است. بنابراین در این فرکانس میزان اختلاط مورد نیاز برای حذف این ناحیه ایجاد نشده است. با توجه به معادله (۴)، میزان فرکانس ۸ هرتز به معنی ایجاد هر پالس در مدت زمان ۰/۱۲۵ ثانیه می‌باشد. از طرفی در بررسی‌های ریز ساختاری دوره کاری بهینه ۰/۴ مشخص شد.

$$F = \frac{1}{t_p + t_B} \quad \text{معادله (۴)}$$

در معادله بالا F فرکانس، t_p مدت زمان شدت جریان بالایی در

- Sons, Inc, New Jersey, 2005.
- [11] W. Wu, "Influence of Vibration Frequency on Solidification of weldments", Scripta Materialia, Vol. 42, pp. 661-666, 2000.
- [12] S. Kou, Welding Metallurgy, 2nd ed., John Wiley & Sons, New Jersey, Inc, 2003.
- [13] G. Padnanaban, "Optimization of Pulsed Current Gas Tungsten arc Welding Process Parameters to Attain Maximum Tensile Strength in AZ31B Magnesium Alloy", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 21, pp. 467-476, 2011.
- [14] T. Senthil Kumar, V. Balasubramanian, M. Sanavullah, "Influences of Pulsed Current Tungsten Inert Gas Welding Parameters on the Tensile Properties of AA 6061 Aluminium Alloy", Materials Design, Vol. 28, pp. 2080-2092, 2007.
- [15] R. Dehmlae, M. Shamanian and A. Kermanpour, "Factors Affecting Weldability Improvement of Dissimilar Welds of Aged HP Stainless Steel and Alloy 800", Iron & Steel Society of Iron, Vol. 5, pp. 15-21, 2008.
- [16] X. Q. Wu., H. M. Jing, Z. M. Zheng, Z. M. Yao, W. Ke and Z. Q. Hu, "The Eutectic Carbides and Creep Rupture Strength of 25Cr-20Ni Heat-Resistant Steel Tubes Centrifugally Cast with Different Solidification Conditions", Materials Science and Engineering A, Vol. A293, pp. 252-260, 2000.
- [17] S. Haro, E. Ramirez, J. Rodriguez and R. Colas, "Microstructural Analysis of Heat-Resistant Welded Repair Pipes", Materials Characterization, Vol. 51, pp. 21-27, 2003.
- [18] V. R. Balasubramanian and G. Madhusudhan, "Reddy GM. Effect of Pulsed Current Welding on Fatigue Behaviour of High Strength Aluminium Alloy Joints", Materials Design, Vol. 29(2), pp. 492-500, 2008.
- [19] V. R. Balasubramanian and G. Madhusudhan, "Reddy GM. Effect of Pulsed Current Welding on Mechanical Properties of High Strength Aluminum Alloy", Advance Manufacturing Technology, Vol. 36(3-4), pp. 254-262, 2008.
- [20] V. R. Balasubramanian and V. Ravisankar, "Reddy GM. Effect of Pulsed Current and Post Weld Aging Treatment on Tensile Properties of Argon arc Welded High Strength Aluminium Alloy", Materials Science and Engineering A, Vol. 459, pp. 19-34, 2007.

۶- پی نوشت:

- 1- Unmixed zone
- 2- Cubic foot per hour
- 3- Duty cycle percentage

نشده، مشاهده نگردید. در حالی که با افزایش مدت زمان ماندن در جریان بالایی به مدت زمان کل (دوره کاری)، ریزساختار دندریتها درشت تر می شود.

۴- در تمام فرکانس های جوشکاری، فصل مشترک پیوسته و بدون اثری از ترک مشاهده شد. در فرکانس های ۶ و ۸ هرتز ناحیه مخلوط نشده حذف نشد و در فرکانس های ۱۰ و ۱۲ هرتز ناحیه مخلوط نشده به طور کامل حذف گردید.

۵- بهترین شرایط جوشکاری به منظور حذف ناحیه مخلوط نشده و ایجاد ساختار ریزدانه تر در شدت جریان بالایی ۱۸۰ آمپر، شدت جریان زمینه ۶۰ آمپر، فرکانس ۱۰-۱۲ هرتز و دوره کاری ۴۰ درصد مشاهده می شود.

۵- مراجع

- [1] J. R. Davis, Alloy Digest Sourcebook Stainless Steels, ASM International, United States of America, 2000.
- [2] P. Allen, J. R. Davis, S. Lampman, Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, Vol. 2, ASM International, United States of America, 1990.
- [3] S. Lamb, Stainless Steel & Nickel Alloys, 2nd ed., Inc, Canada, 2003.
- [4] R. M. T. Borges, L. H. Almeida, T. D. Silveria and M. Le, "Niobium Addition in HP Heat- Resistant Cast Stainless Steel", Materials Characterization, Vol. 29, pp. 387-400, 1992.
- [5] R. A. Pedro Ibanez and G. D. Almeida Soares, "Effects of Silicon Content on the Microstructural of Modified-HP Austenitic Steels", Materials Characterization, Vol. 30, pp. 229-234, 1993.
- [6] L. H. Almeida, A. F. Ribeiro and I. Le May, "Microstructural Characterization of Modified 25Cr-35Ni Centrifugally Cast Steel Furnace Tubes", Materials Characterization, Vol. 49, pp. 219-229, 2002.
- [7] R. Avery and C. Schillmoller, "Repair Welding High Alloy Furnace Tubes", Hydrocarbon processing, Vol. 67, pp. 43-45, 1988.
- [8] R. Dehmlae, M. Shamanian and A. Kermanpour, "The Effect of the Aging and Solution Annealing on the Weldability of Incoloy 800 to HP Heat Resistant Steel", Majlesi Journal of Materials Engineering, Vol. 3. 2010.
- [9] R. Dehmlae, M. Shamanian and A. Kermanpour, "Microstructural Characterization of Dissimilar Welds Between Alloy 800 and HP Heat-Resistant Steel", Materials Characterization, Vol. 59, pp. 1447-1454, 2008.
- [10] J. C. Lippold, and D. J. Koteki, Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, p. 151, John Wiley &