مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 49-58

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه آلیاژ مس نیکل به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی جوش‌کاری شده توسط فرایند GTAW

حسن جعفری[1]، سلمان نوروزی[2*]، حامد جمشیدی اول[3]، سید جمال حسینی‌پور[2]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

2- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

* بابل صندوق پستی 484 , s-nourouzi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 فروردین 1396

پذیرش: 20 تیر 1396

ارائه در سایت: 17 مرداد 1396

کلید واژگان:

آلیاژ مس نیکل

فولاد زنگ‌نزن AISI 304

اتصال غیرمشابه

جوش‌کاری قوس تنگستن با گاز محافظ

چکیده

در تحقیق حاضر خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 به آلیاژ مس نیکل C70600 ایجاد شده توسط فرایند جوش‌کاری قوس تنگستن با گاز محافظ مورد بررسی قرار گرفت. هدف از ایجاد این اتصال برخورداری از خواص متالورژیکی دوگانه، همانند هدایت حرارتی و مقاومت به‌خوردگی آلیاژ مس نیکل و خواص استحکامی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 است. جوش‌کاری دو فلز غیرمشابه فولاد به آلیاژ مس نیکل به‌دلیل اختلاف در دمای ذوب، تفاوت در هدایت حرارتی و همچنین سرعت انجماد بالای آلیاژ مس نیکل با مشکلات فراوانی روبرو می‌باشد. در این تحقیق به‌دلیل حلالیت و جوش‌پذیری مناسب نیکل با هر دو آلیاژ از فلزات پرکننده اینکونل 625، اینکونل 82 و اینکونل 61 استفاده شد. براساس بررسی ریزساختاری اتصال‌ها، فلز جوش نمونه‌های جوش‌کاری شده با فلز پرکننده‌ی اینکونل 625 و اینکونل 82 دندریت‌های هم‌محور ریزتری نسبت به فلز جوش اینکونل 61 نشان داد. استحکام کششی نمونه‌های مربوط به فلزات پرکننده اینکونل 625، 82 و 61 به ترتیب معادل 324، 323 و 293 مگاپاسکال بدست آمد، در حالی‌که درصد ازدیاد طول سه نمونه اختلاف اندکی با یکدیگر نشان داد. بنابراین براساس خواص مکانیکی اتصال‌ها دو فلز پرکننده اینکونل 625 و 82 برای جوش‌کاری غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 به آلیاژ مس نیکل C70600 مناسب می‌باشند.

A study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar joints of copper-nickel alloy and austenitic stainless steel welded by GTAW process

Hassan Jafari, Salman Nourouzi*, Hamed Jamshidi Aval, Seyed Jamal Hosseinipour

Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
* P.O.B 484, Babol, Iran, s-nourouzi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 April 2017
Accepted 11 July 2017
Available Online 08 August 2017

Keywords:
Copper-nickel alloy
Austenite Stainless steel of AISI 304
Dissimilar joining
Gas Tungsten Arc Welding process

ABSTRACT

In the present study, the mechanical and microstructural properties of dissimilar joint of 304 austenite stainless steel and C70600-copper-nickel alloy made by Gas Tungsten Arc Welding process has been investigated. The aim of this joint is using the twin metallurgical properties such as; heat dissipation and corrosion resistance of copper-nickel alloy and mechanical properties of 304 austenite stainless steel alloy. Welding of two dissimilar metal steel to copper-nickel alloys, due to differences in melting point, the difference in thermal conductivity, and rapid solidification of copper nickel face many problems. In this research due to solubility and weldability of nickel with two alloys, three filler metals Inconel 625, Inconel 82 and 61 were used. According to microstructural investigations, welds made by Inconel 625 and Inconel 82 show a finer equiaxed dendrite structure as compared with Inconel 61 filler metal. The tensile strength of the samples welded by Inconel 625, 82 and 61 filler metals was 324, 323 and 293 MPa, while the elongation percentage of three samples shows a small difference. According to mechanical properties of joints, the Inconel 625 and 82 filler metal are appropriate for dissimilar welding 304 austenite stainless steel and C70600-copper-nickel alloy.

1- مقدمه

آلیاژهای مس به دلیل هدایت حرارتی بالا، مقاومت به خوردگی و قابلیت کارپذیری خوب به طور وسیعی به‌عنوان چگالنده و مبدل‌های حرارتی در نیروگاه‌ها و صنایع مختلف صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بین آلیاژهای مس نیکل یک ترکیب قابل توجهی از مقاومت به خوردگی و عدم مواجه با مشکل رسوب‌های بیولوژیکی را دارند. از آن‌جا که این آلیاژها به‌آسانی می‌توانند جوش‌کاری و مونتاژ گردند، یک گزینه مناسب برای طراحی سیستم‌های لوله‌کشی، مبدل‌های حرارتی، بدنه‌ی کشتی‌ها و دیگر سازه‌های دریایی هستند. یکی از موارد استفاده از ورق‌های مس نیکل، اتصال ذوبی غیرهمجنس پوشش‌ها بر روی پایه‌های فولادی سکوهای دریایی با

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Jafari, S. Nourouzi, H. Jamshidi Aval, S. J. Hosseinipour, A study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar joints of copper-nickel alloy and austenitic stainless steel welded by GTAW process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 49-58, 2017 (in Persian)

تکنیک‌های مختلف می‌باشد که باعث جلوگیری از خوردگی آن‌ها می‌شود. از دیگر کاربرد می‌توان به اتصال لوله‌هایی از جنس مس نیکل به فلنج‌های فولادی و یا اتصال مستقیم این لوله‌ها به لوله‌های فولادی در صنایع دریایی اشاره کرد [1]. فولادهای زنگ‌نزن نقش مهمی را در صنایع مختلف دارند. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی از جمله فولادهای مهم می‌باشند که بیش از 60 درصد تولید فولادهای زنگ‌نزن را در دنیا به خود اختصاص داده‌اند. به‌دلیل جوش‌پذیری بهتر این نوع فولادها نسبت به سایر فولادهای زنگ‌نزن، این فولادها در اولویت قرار می‌گیرند. با این حال، برخی از تغییرات متالورژیکی در جوش‌کاری این نوع آلیاژها مانند تشکیل فاز فریت دلتا، ترک خوردگی انجمادی، رسوب‌گذاری کاربید کروم در مرزدانه‌ها باعث ایجاد نقص در جوش‌کاری این فولادها می‌شود. فولادهای زنگ‌نزن، هدایت حرارتی کمتری نسبت به مس دارند. وقتی از این فولادها در دماهای بالا استفاده می‌شود به‌دلیل هدایت حرارتی پایین، انتقال حرارت به محیط کم است. اتصال مس به فولادهای زنگ‌نزن می‌تواند باعث افزایش اتلاف حرارت این آلیاژها در کاربردهای دما بالا و کاهش احتمال تشکیل فازهای مضر مانند فاز سیگما پس از گرمایش طولانی مدت شود. هدایت حرارتی بالای مس یکی از محدودیت‌های اصلی در جوش‌کاری آن می‌باشد. به عبارت دیگر هدایت حرارتی بالای مس و آلیاژهای آن و تمایل به دفع حرارت سریع از منطقه جوش به اطراف منجربه مشکلاتی در رسیدن به دمای ذوب می‌شود [2]. اتصال غیرمشابه مس به فولاد یک عمل چالش برانگیز برای تولیدکنندگان در صنایع مدرن محسوب می‌شود. جوش‌کاری لب به لب غیرهمجنس مس به فولاد کم‌کربن امکان‌پذیراست. اما عدم تطابق این دو فلز با یکدیگر از لحاظ شیمیایی و حرارتی-مکانیکی، جوش‌کاری غیرهمجنس این دو فلز به یکدیگر را بسیار دشوار کرده است. همانطور که بسکو و همکاران [3] به آن اشاره کرده‌اند، نفوذ مس مذاب درون مرزدانه‌های فولاد و از همه مهم‌تر عدم حلالیت کامل مس و آهن در هم باعث تشکیل فازهای ترد و افت استحکام می‌گردد. به‌همین دلیل می‌بایست با استفاده از یک لایه واسط میانی از جنس آلیاژی که با هر دو فلز جوش‌پذیری مناسبی دارد از تماس مستقیم این دو آلیاژ جلوگیری شود.

در دهه‌های گذشته برخی از دانشمندان در تلاش برای تولید اتصال غیرهمجنس این آلیاژها به کمک جوش‌کاری پرتو الکترونی و لیزر برآمدند [4,3]. یاو و همکاران [4] شرایط اتصال آلیاژ مس به فولاد را با استفاده از جوش‌کاری لیزر بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شرایط خلاء تاثیر به‌سزایی بر کیفیت اتصال دارد. با این حال کیفیت جوش‌کاری در این روش متاثر از شرایط خلاء بوده که یک محدودیت برای این روش محسوب می‌شود. به‌همین دلیل در سال‌های اخیر استفاده از لیزر برای ساخت اتصالات غیرمشابه جذاب‌تر شده است [5,4]. مای و همکاران [5] نشان دادند که می‌توان اتصال‌های بدون عیبی توسط جوش‌کاری لیزر بین مس و فولاد بوجود آورد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که پارامترهای مختلفی در کنترل جوش‌پذیری فلزات غیرمشابه مانند قطر اتمی، ساختارکریستالی و قابلیت انحلال در حالت جامد و مذاب نقش دارند.

غلامی و همکاران [6] اتصال غیرهمجنس آلیاژ مس به فولادزنگ‌نزن 304 توسط فرایند جوش‌کاری قوس تنگستن با گاز محافظ را با سه نوع فلز پرکننده مختلف مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که تعدادی حفره در نزدیکی ورق پایه مس بوجود آمده است که دلیل به‌وجود آمدن این نقص را هدایت حرارتی بالای مس عنوان کردند. همچنین دریافتند که نفوذ عناصر آلیاژی در حوضچه مذاب اغلب منجربه تشکیل فازهای بین‌فلزی می‌شود. بسیاری از این فازها ترد و شکننده هستند و باعث تاثیرات مضری روی استحکام مکانیکی و انعطاف‌پذیری در فصل مشترک این اتصالات می‌شود. در تحقیقی دیگر روی و همکاران [7] و ولو و همکاران [8] نحوه اتصال غیرهمجنس مس خالص و فولاد زنگ‌نزن 304 با استفاده از فرایند جوش‌کاری الکترود دستی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که فلز پرکننده‌ی اینکونل 625 نسبت به فلز پرکننده‌ی برنز هم از لحاظ ریزساختار و هم از لحاظ خواص مکانیکی بهترین گزینه برای اتصال این دو فلز می‌باشد.

با توجه به تحقیقات انجام شده که تأثیر فلزات پرکننده و پارامترهای مختلف جوش‌کاری با لایه میانی بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات، مورد بررسی قرارگرفته است، هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر فلزات پرکننده‌ی پایه نیکل مختلف برروی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس آلیاژهای مس نیکل C70600 و فولاد زنگ‌نزن 304 با استفاده از فرایند جوش‌کاری قوس تنگستن با گاز محافظ می‌باشد. پس از انجام فرایند جوش‌کاری جهت اتصال این دو آلیاژ، از آزمون میکروسختی سنجی و کشش به‌ترتیب جهت مشخص کردن سختی نواحی مختلف جوش‌کاری و بدست آوردن استحکام کششی اتصال استفاده شد. همچنین برای بررسی ریزساختار و تشخیص فازهای ایجاد شده در نواحی مختلف جوش‌کاری از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی استفاده گردید.

2- روش آزمایش

2-1- مواد اولیه

در این پژوهش از دو ورق مس نیکل C70600 و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 با ابعاد 2×50×100 میلی‌متر مکعب استفاده شد. جهت اتصال این ورق‌ها فلزات پرکننده‌ی اینکونل 625، 82 و 61 به‌کار گرفته شد. جدول 1 و 2 به‌ترتیب ترکیب شیمیایی آلیاژها و فلزات پرکننده را نشان می‌دهد. همچنین در جدول 3 خواص مکانیکی آلیاژهای مورد استفاده دراین پژوهش آورده شده است.

2-2-آماده سازی نمونه‌ها و طرح اتصال

به‌منظور انجام فرایند جوش‌کاری توسط قوس تنگستن با گاز محافظ، در ابتدا سطح نمونه‌ها به‌منظور عاری شدن از هرگونه کثیفی و آلودگی‌های سطحی، با استفاده از سنباده و استون تمیز گردید.

در این تحقیق جوش‌کاری به صورت لب به لب بوده و درز اتصال 1.7 میلی‌متر در نظر گرفته شد. انتخاب فلزات پرکننده جهت اتصال، علاوه بر

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژها

Table 1 Chemical composition of alloys

آلیاژ	ترکیب شیمیایی					
	Fe	Cr	Cu	C	Ni	Mn
C70600	0.05	-	Base	0.05	10.90	0.21
SS304	Base	18.50	0.44	0.05	8.10	1.20

جدول 2 ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده

Table 2 Chemical composition of filler metals

فلزات پرکننده	ترکیب شیمیایی						
	Ni	Cr	Fe	Mn	Mo	Nb	Ti
اینکونل 625	Base	22.00	7.00	1.00	9.00	4.00	0.45
اینکونل 82	Base	18.00	3.00	3.00	2.50	3.00	0.75
اینکونل 61	Base	-	1.00	1.00	-	-	2.00

جدول3 خواص مکانیکی آلیاژها

Table 3 Mechanical properties of alloys

آلیاژ	خواص مکانیکی			
	استحکام کششی نهایی(MPa)	استحکام تسلیم(MPa)	سختی(Hv)	درصد ازدیاد طول (%)
C70600	358	168	90	35
SS304	621	290	190	55

ترکیب شیمیایی براساس پارامترهای مهم دیگر مانند خواص مکانیکی، پایداری حرارتی، مقاومت به‌خوردگی، در دسترس بودن و هزینه صورت گرفت. پارامترهای جوشکاری به‌گونه‌ای انتخاب گردید که ضمن جلوگیری از حرارت ورودی اضافی به حوضچه مذاب، بهترین سیالیت و نفوذپذیری حاصل شود. جدول 4 مشخصات پارامترهای جوش‌کاری مورد استفاده را نشان می‌دهد. از الکترود مصرف‌نشدنی نوع W-2%Th با قطر 2.4 میلی‌متر و همچنین از گاز محافظ آرگون در حین جوش‌کاری استفاده گردید.

2-3- مشخصات آزمایش‌ها

نمونه‌های کشش از مقاطع جوش‌کاری شده مطابق با استاندارد ASTM E-8 در جهت عمود بر جوش تهیه شد. آزمون کشش توسط دستگاه 25 تنی شرکت سنتام مدل STM-250 با سرعت آزمون 2 میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. نمونه‌ها برای بررسی‌های متالوگرافی به‌صورت عرضی برش داده شدند و پس از سنباده‌زنی و پولیش کردن جهت آشکارسازی ساختارفولاد زنگ نزن 304 از محلول ماربل و همچنین برای آلیاژ مس نیکل C70600 از محلول اسید نیتریک و آب مقطر استفاده شد. برای تعیین تقریبی ترکیب شیمیایی و شناسایی فازها در فلزات پایه و مناطق مختلف اتصال از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز عنصری با روش طیف‌سنجی تفکیک انرژی (EDS) استفاده گردید. همچنین برای بدست آوردن سختی مناطق مختلف جوش‌کاری نمونه‌ها از دستگاه میکروسختی سنجی ویکرز شرکت کوپا مدلMH3 با بار اعمالی 100 گرم به‌مدت زمان 10 ثانیه استفاده گردید.

3- نتایج و بحث

1-3- ریزساختار فلزات پایه

اکثر آلیاژهای مس نیکل با توجه به نمودار فازی این دو آلیاژ در حالت محلول جامد وجود دارند. این آلیاژها در حالت آنیل به بیشینه استحکام کششی حدود 300 مگاپاسکال می‌رسند [1].

در "شکل 1 (الف)" ریزساختار آلیاژ مس نیکل C70600 نشان داده شده است. همچنین "شکل 1 (ب)" ریزساختار فولاد زنگ‌نزن AISI 304 را نشان می‌دهد. ریزساختار شامل دانه‌های ریز و هم‌محور آستنیتی است. فاز فریت دلتا به صورت رشته‌های طولانی در جهت نورد در زمینه آستنیتی قابل مشاهده می‌باشد (فریت دلتا در "شکل 1 (ب)" با پیکان مشخص شده است). این فریت از جدایش عناصر فریت‌زا به‌ویژه کروم در طی فرآوری‌های حرارتی-مکانیکی به‌وجود می‌آید. حضور این فاز می‌تواند باعث کاهش چقرمگی و انعطاف‌پذیری فولادهای زنگ‌نزن شود. همچنین می‌تواند مناطقی برای رسوب‌گذاری ترجیحی کاربیدهای $M_{23}C_6$ و فاز سیگما باشد که از عوامل ترد کننده‌ی فولاد زنگ‌نزن می‌باشد [2].

1-1-3- ریزساختار جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل 625

"شکل 2" ریزساختار مربوط به فلز جوش اینکونل 625 را نشان می‌دهد.

جدول 4 مشخصات پارامترهای جوش‌کاری

Table 4 Welding process parameters

شدت جریان (A)	سرعت جوش‌کاری (mm/min)	دبی گاز (lit/min)	قطر نازل (mm)	حرارت ورودی (kJ/mm)
100	57	7	6	4.1

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ریزساختار به‌صورت کاملا آستنیتی با مورفولوژی دندریتی انجماد یافته است. ترکیب شیمیایی فلزپرکننده بر مورفولوژی انجماد در فلز جوش تاثیرگذار است. با توجه به مقادیر نیوبیم و مولیبدن در ترکیب فلز پرکننده‌ی اینکونل 625 (جدول 1) این دو عنصر میل شدیدی به جدایش در فلز جوش دارند. این میل به جدایش را می‌توان به مقدار ضریب توزیع تعادلی این دو عنصر نسبت داد [10,9]. نیوبیم و مولیبدن در بیشتر آلیاژهای پایه نیکل ضریب تعادلی کمتر از یک را دارا می‌باشند که میل به توزیع در حین انجماد و ایجاد انجماد ترکیبی در جلوی فصل مشترک دارند. در این شرایط امکان پایداری فصل مشترک صفحه‌ای وجود ندارد و مورفولوژی ریزساختار به سمت سلولی و یا دندریتی پیش می‌رود [10,9].

"شکل 3 (الف) و (ب)" به‌ترتیب ریزساختار فصل مشترک فلز پرکننده‌ی اینکونل 625 با آلیاژ مس نیکل و فولاد زنگ‌نزن 304 را نشان می‌دهد. با توجه به "شکل 3 (الف)" منطقه‌ی ذوب جزئی[1] و غیرمخلوط‌شده[2] در فصل مشترک جوش فلز پرکننده با آلیاژ مس نیکل C70600 مشاهده گردید که با پیکان مشخص شده است.

همچنین ایجاد منطقه غیرمخلوط‌شده می‌تواند به‌دلیل تفاوت در دمای ذوب و ترکیب شیمیایی فلز پرکننده با فلز پایه باشد. در اتصالات

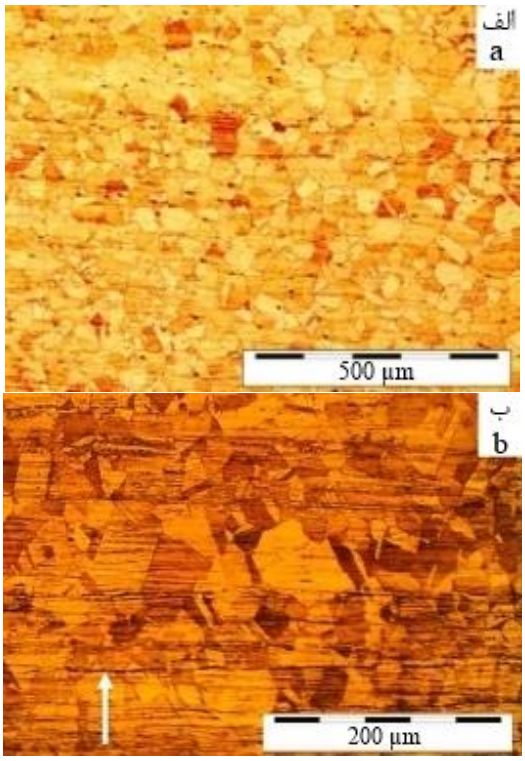

Fig. 1 Microstructure of base metals a) copper nickel alloy C70600 b) stainless steel AISI 304

شکل 1 ریزساختار فلزات پایه الف) آلیاژمس نیکل C70600 ب) فولاد زنگ نزنAISI304

[1] Partially melted zone
[2] Unmixed zone

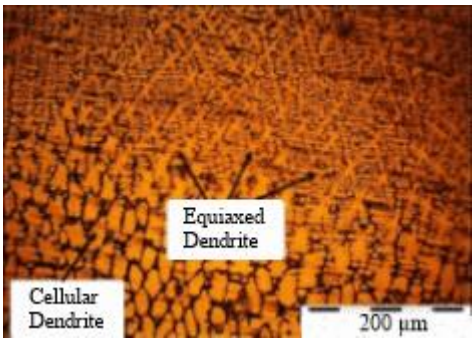

Fig. 2 Microstructure of Inconel 625 weld metal

شکل 2 ریزساختارفلز جوش اینکونل 625

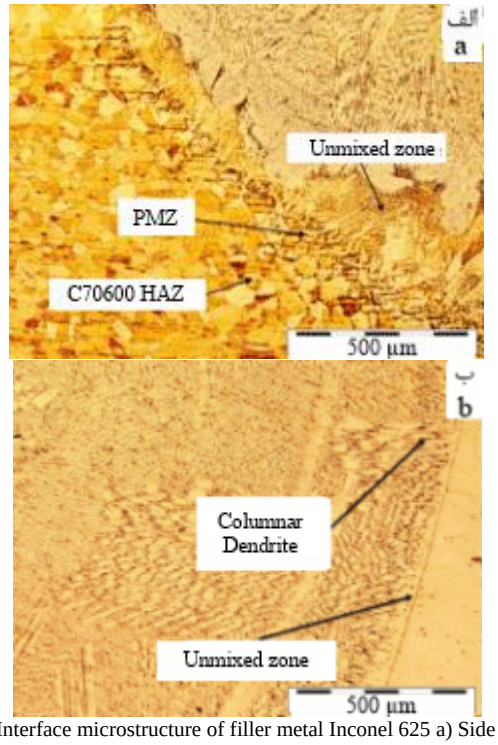

Fig. 3 Interface microstructure of filler metal Inconel 625 a) Side of C70600 alloy b) Side of AISI 304 alloy

شکل 3 ریزساختار فصل مشترک فلزپرکننده اینکونل 625 الف) سمت آلیاژ C70600 ب) سمت آلیاژ AISI304

غیرهمجنس هنگامی که دمای ذوب فلز پرکننده یکسان و یا بیش‌تر از فلزات پایه باشد، میزان کمی از فلزپایه ذوب می‌شود و رقت جوش[1] در مرحله‌ی انجماد مجدد ایجاد نمی‌شود. در چنین شرایطی یک منطقه غیرمخلوط شده در فصل مشترک شکل می‌گیرد. این مناطق غیرمخلوط شده به‌عنوان مکان‌های جوانه‌زنی برای رشد دندریت‌ها می‌باشند [11].

نواحی مختلف جوش حاصل از فلز پرکننده اینکونل 625 در "شکل4" نامگذاری شده است. باتوجه به اهمیت نواحی فصل مشترک این نواحی توسط آنالیز نقطه‌ای بررسی شد. در "شکل 5" تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فصل مشترک‌ها و مرکز جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل625 نشان داده شده است. نتایج حاصل از این آنالیز عنصری در جدول 5 آورده شده است.

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز عنصری مشاهده می‌شود که ترکیب شیمیایی مناطق 1 و 9 به ترتیب منطبق با فلزات پایه مس نیکل و فولاد می‌باشد. مناطق 2 و 8 که به ترتیب در مرز دانه منطقه متاثر از حرارت آلیاژ مس نیکل و فولاد قرار دارند، درصد پایینی از نیکل به ترتیب 13.5 و 28.3 درصد وزنی دارند. افزایش نیکل در سمت آلیاژ مس نیکل با توجه به دیاگرام فازی دوتایی مس و نیکل باعث افزایش دمای ذوب در منطقه نزدیک فصل مشترک فلز جوش و فلزپایه مس نیکل می‌گردد. اما با توجه به این‌که مقدار افزایش نیکل کم می‌باشد و عناصری همچون منگنز و کرم که تمایل بر کاهش دمای ذوب مس را دارند در این منطقه می‌توانند جدایش یابند، احتمال شکل‌گیری منطقه ذوب جزئی افزایش می‌یابد[12].

همچنین نفوذ ذاتی کم نیکل نسبت به مس و آهن [8] می‌تواند دلیل دیگری بر کمتر بودن این عناصر در نقاط 2 و 8 باشد. ترکیب نقاط 4، 5 و 6 نشان دهنده نفوذ عناصر فلزات پایه درون فلز جوش می‌باشد. ترکیب نقاط 3 و 7 تاییدی بر نفوذ و ترکیب فلزات پایه و فلز پرکننده در همدیگر است. در "شکل 6" تصویر آنالیز مکان‌نگاری عنصری به‌وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار و توزیع عناصر مولیبدن و نیوبیم در فلز پرکننده‌ی اینکونل 625 نشان داده شده‌است. مقدار متوسط عناصر مولیبدن و نیوبیم در فضای بین دندریتی به ترتیب 5.73 و 4.21 درصد می‌باشد. وجود این عناصر آلیاژی در مناطق بین دندریتی می‌تواند باعث احتمال تشکیل رسوبات و فازهای پیوسته بین‌فلزی مانند کاربید نیوبیم و کاربید مولیبدن دربین دندریت‌های فلز جوش شود [10,9].

براساس مطالعات دوپونت و همکاران [13] مقدار ضریب توزیع تعادلی نیوبیم و مولیبدن در آستنیت وابسته به مقدار آهن موجود در ترکیب شیمیایی آلیاژ است. به‌طوری که مقدار آهن موجود با کاهش حد حلالیت نیوبیم در آستنیت رابطه‌ی مستقیم دارد. روند مشابهی برای مولیبدن در آلیاژهای پایه نیکل زمانی که در جوش‌های غیر مشابه با آلیاژهای آهن بالا استفاده می‌شوند، نیز مشاهده شده است. به‌طور مشابه، مولیبدن نیز اولین فاز جامد ایجاد شده را برای تشکیل نواحی فقیر از مولیبدن ترک کرده و یک جدایش ترجیحی را ایجاد می‌کند. همچنین به‌دلیل نرخ نفوذ پایین مولیبدن در آستنیت، انجام نفوذ برگشتی به سمت هسته‌های دندریت برای حذف شیب غلظتی به‌وجود آمده امکان پذیر نیست. به‌همین دلیل نواحی غنی از

Fig. 4 Welded zones of Inconel 625 filler metal

شکل 4 مناطق جوش حاصل از فلزپرکننده‌ی اینکونل 625

جدول 5 آنالیزعنصری EDS مناطق مختلف جوش حاصل از فلز پرکننده اینکونل 625

Table 5 EDS element analysis at different zones of weld made using filler metal Inconel625

عناصر(درصد وزنی)								
Mo	Nb	C	Cr	Mn	Cu	Ni	Fe	مناطق
-	-	-	-	-	88.99	11.01	-	1
-	-	-	0.52	0.34	83.32	13.55	2.27	2
2.22	1.91	1.05	4.02	1.02	62.42	16.81	10.55	3
4.02	3.31	1.30	8.95	2.50	23.69	38.59	17.64	4
4.07	1.81	3.01	10.08	2.25	17.02	44.51	17.25	5
4.56	2.68	2.75	10.42	2.05	6.78	50.86	19.90	6
2.20	1.45	1.58	9.65	2.40	5.09	41.95	35.68	7
1.70	1.25	1.46	10.91	3.10	4.91	28.32	48.35	8
-	-	1.02	17.63	1.69	-	8.20	71.46	9

[1] Dilution

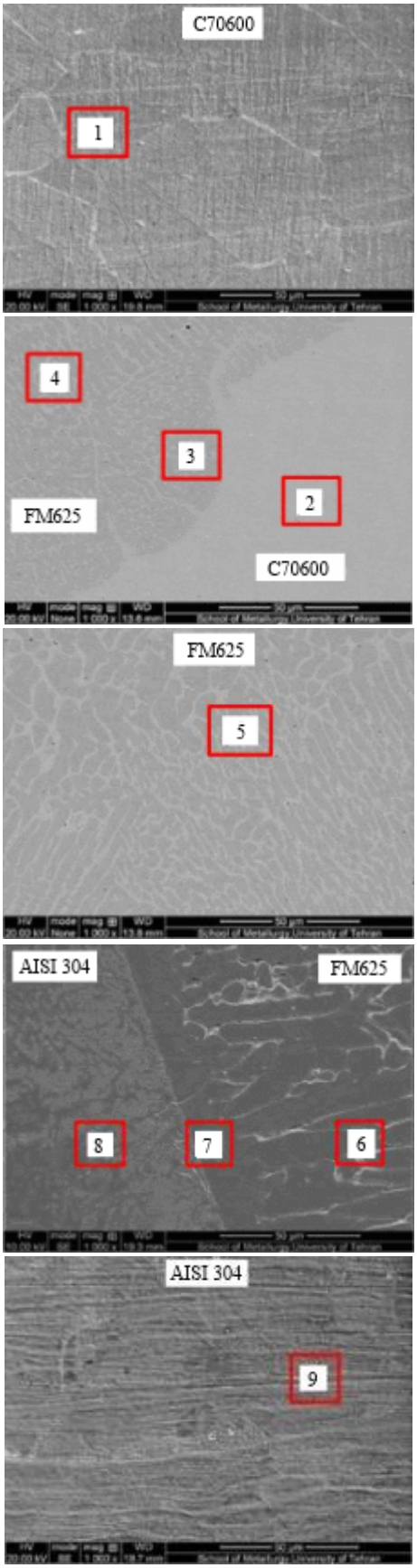

Fig. 5 SEM image of welded zones made by using filler metal Inconel625

شکل 5 تصویر میکروسکوپ SEM نواحی مختلف جوش حاصل از فلز پرکننده اینکونل 625

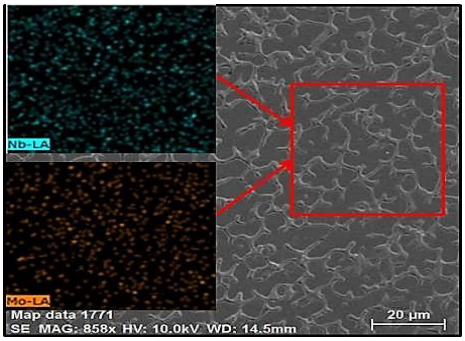

Fig. 6 Elemental mapping between dendrites of weld metal Inconel 625

شکل 6 آنالیز مکان‌نگاری عنصری از بین دندریت‌های فلزپرکننده اینکونل 62

مولیبدن و نیوبیم در نواحی بین دندریتی در طی مراحل مختلف انجماد ظاهر شده‌اند [13].

در منطقه‌های 7 و 8 که مناطق نزدیک فصل‌مشترک فلزجوش و فلزپایه فولادی است مقدار مس بیشتر از فلز پایه فولادی است. این مساله نفوذ مس در سمت قطعه کار فولادی را تایید می‌کند. حضور مس در این منطقه شکل گیری ترکیبات غنی از مس را ترغیب می‌کند. ترکیبات غنی از مس به همراه ضریب انبساط حرارتی بالای فولاد زنگ نزن آستنیتی احتمال شکل‌گیری ترک در این مناطق را زیاد می‌کند اما براساس بررسی های انجام شده در این تحقیق ترک در این مناطق مشاهده نشده است.

3-1-2- ریزساختار جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل 82

"شکل 7" ریزساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل 82 را نشان می‌دهد. ریزساختار نهایی منطقه جوش کاملاً آستنیتی و به‌صورت دندریت‌های هم محور در پایان انجماد شکل گرفته‌است. ساختار هم محور در نزدیکی و مرکز جوش ناشی از سرعت انجماد بالا در این منطقه می‌باشد. اگرچه مقدار نیوبیم فلز پرکننده‌ی اینکونل 82 نزدیک به مقدار آن در فلز پرکننده‌ی اینکونل625 است، اما مقدار مولیبدن بسیار کمتری دارد، به‌علاوه مقدار آهن موجود در ترکیب شیمیایی اینکونل 82 حدود 3 درصد وزنی می‌باشد که در مقایسه با مقدار آهن موجود در فلز پرکننده اینکونل 625 کمتر می‌باشد. با کاهش مقدار آهن در ترکیب شیمیایی فلز جوش حلالیت نیوبیم در آستنیت افزایش و توزیع مجدد نیوبیم درحین انجماد فلزجوش کاهش پیدا خواهد کرد و منجربه عدم وقوع تحت انجماد ترکیبی درجلوی جبهه‌ی انجماد خواهد شد. به‌همین علت ساختار دانه‌ای همگن برای این آلیاژ به وجود آمده است [9].

"شکل 8 (الف) و (ب)" به‌ترتیب ریزساختار فصل مشترک فلز پرکننده‌ی

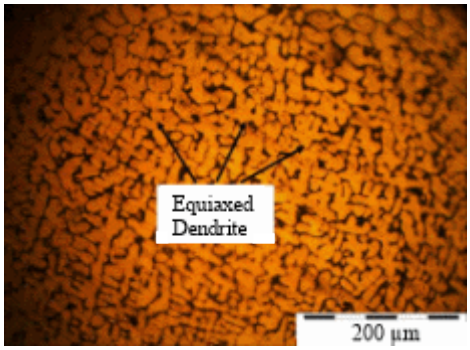

Fig. 7 Microstructure of Inconel 82 weld metal

شکل 7 ریزساختار فلز جوش اینکونل 82

اینکونل 82 با آلیاژ مس نیکل و فولاد زنگ‌نزن 304 را نشان می‌دهد. "شکل 8 (ب)" تشکیل مرز دانه‌های انجماد[1] (SGB) در پایان انجماد منطقه جوش را که با پیکان مشخص شده را نشان می‌دهد. در واقع این مرزها محل تقاطع بسته‌هایی است که در آن‌ها دندریت‌ها در یک جهت خاص رشد کرده‌اند. به‌طور کلی این نوع مرزدانه‌ها در فلزات جوش تک فاز مشاهده می‌شوند. همچنین محققین به این موضوع اشاره کرده‌اند که رسوبات و ناخالصی‌ها در مرزهای انجماد قرار می‌گیرند و امکان ایجاد ترک‌های انجمادی در این نواحی وجود دارد [14].

"شکل 9" نواحی مختلف جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل 82 را نشان می‌دهد. نواحی مشخص شده در این شکل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همانند نمونه جوش‌کاری شده با فلز پرکننده‌ی اینکونل 625 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نواحی مختلف و آنالیز عنصری نواحی مشخص شده در "شکل 10" و جدول 6 آورده شده است. نحوه‌ی توزیع عناصر مس، آهن و نیکل در نواحی مختلف جوش حاصل از این فلز پرکننده تقریبا مشابه باجوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل 625 می‌باشد. با این تفاوت که میزان نفوذ مس در مناطق 6، 7 و 8 (ناحیه فصل مشترک فولاد زنگ نزن 304) نسبت به فلز پرکننده اینکونل 625 بیشتر بوده است. همچنین میزان کروم و منگنز موجود در تمام نواحی جوش بیش‌تر از جوش حاصل از فلز پرکننده اینکونل 625 می‌باشد. "شکل 11" نحوه‌ی توزیع مولیبدن و نیوبیم را در مرکز فلز پرکننده اینکونل 82 نشان می‌دهد. مقدار متوسط عناصر مولیبدن و نیوبیم در فضای بین دندریتی به ترتیب 3.56 و 2.93 درصد می‌باشد. با توجه به اینکه در مناطق داخلی فلز جوش میزان مجموع عناصر مولیبدن و نیوبیم کمتر از فلزپرکننده اینکونل 625 است احتمال ایجاد کاربید این عناصر در این ناحیه می‌تواند کاهش یابد. از طرفی مشاهده می‌شود که با کاهش مقدار آهن موجود در فلز جوش میزان جدایش مولیبدن و نیوبیم در فضای بین دندریتی در مقایسه با فلز پرکننده اینکونل 625 کاهش یافته است.

3-1-3- ریزساختار جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل 61

با توجه به جدول 2، ترکیب شیمیایی فلز پرکننده‌ی اینکونل 61 دارای 96 درصد نیکل و 2 درصد وزنی تیتانیوم می‌باشد. وجود تیتانیوم در این فلز پرکننده باعث کاهش میزان تخلخل در جوش می‌شود [15]. این فلز جوش بیشتر برای اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن به فلزات دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در"شکل 12" ریزساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل 61 آورده شده است. ریزساختار فلز جوش پس از انجماد در اکثر مناطق دارای دندریت‌های ستونی و سلولی می‌باشد (این دندریت‌ها در شکل با پیکان مشخص شده است). باتوجه به "شکل 13" در ناحیه‌ی فصل مشترک اتصال مناطق غیرمخلوط شده به دلیل دمای ذوب و ترکیب متفاوت فلز پرکننده و فلزات پایه مشاهده می‌شود. همچنین نواحی فصل مشترک دندریت‌های سلولی و مرزهای انجماد حاصل از اتصال دو آلیاژ مس نیکل و فولاد زنگ‌نزن 304 با اینکونل 61 با پیکان نمایش داده شده است.

"شکل 14" نواحی مختلف جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل 61 را نشان می‌دهد. نواحی مشخص شده در این شکل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همانند نمونه جوش‌کاری شده با سایر فلزات پرکننده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نواحی مختلف و آنالیز عنصری نواحی مشخص شده در "شکل 15" و جدول 7 آورده شده است. باتوجه به نتایج به‌دست آمده از آنالیز نقطه‌ای جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل 61 می‌توان به افزایش میزان نفوذ مس در تمامی نواحی جوش نسبت به سایرفلزات پرکننده اشاره کرد.

همچنین باتوجه به نتایج آنالیز نقطه‌ای در مناطق مختلف جوش حاصل ازاین فلز پرکننده نفوذ بیشتر مس نسبت به اهن وکروم به چشم می‌خورد. که این افزایش نفوذ می‌تواند به‌دلیل بیشتر بودن نفوذ ذاتی مس نسبت به

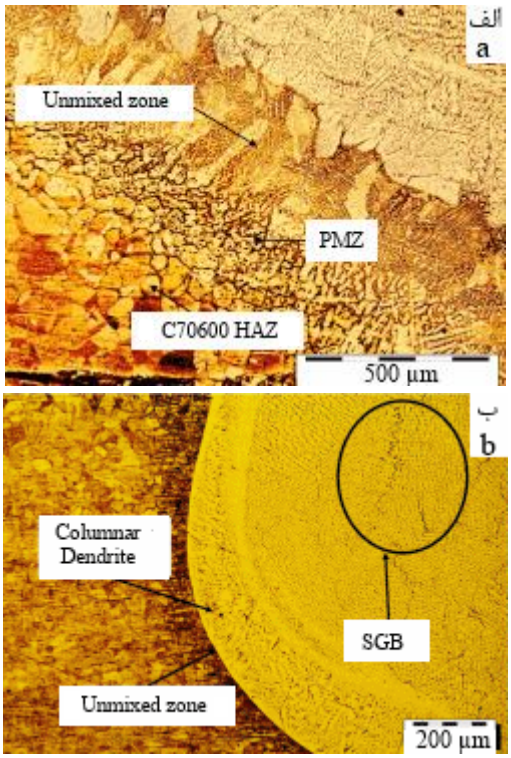

Fig. 8 Interface microstructure of filler metal Inconel Inconel 82 a) Side of C70600 alloy b) Side of AISI 304 alloy

شکل 8 ریزساختار فصل مشترک فلزپرکننده اینکونل 82 الف)سمت آلیاژ C70600 ب) سمت آلیاژ AISI 304

Fig. 9 Welded zones of Inconel 82 filler metal

شکل 9 مناطق جوش حاصل از فلزپرکننده‌ی اینکونل 82

جدول 6 آنالیزعنصری EDS مناطق مختلف جوش حاصل از فلز پرکننده اینکونل 82

Table 6 EDS element analysis at different zones of welded made using filler metal Inconel82

عناصر(درصد وزنی)								
Mo	Nb	C	Cr	Mn	Cu	Ni	Fe	مناطق
-	-	-	-	-	89.03	10.97	-	1
-	-	-	2.20	0.34	77.92	16.97	2.57	2
2.17	2.02	1.86	6.91	2.16	52.42	18.60	13.86	3
3.04	3.31	2.09	16.91	2.70	14.42	42.34	15.19	4
2.97	3.81	2.75	13.91	4.10	9.49	48.63	14.34	5
2.97	1.59	2.76	12.91	4.65	8.25	51.86	15.10	6
0.90	0.81	1.20	11.91	5.40	7.42	38.72	33.64	7
-	0.81	1.30	12.91	3.30	5.01	26.32	50.35	8
-	-	1.54	18.07	1.90	-	7.86	70.63	9

[1] Sub Grain Boundary

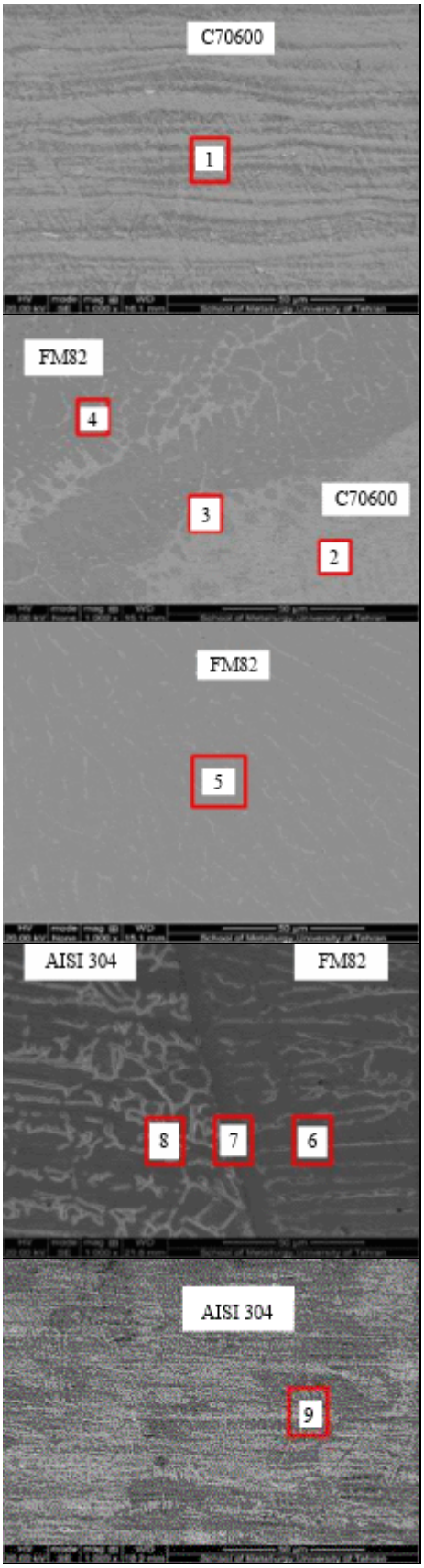

Fig. 10 SEM image of welded zones made by using filler metal Inconel 82

شکل 10 تصویر میکروسکوپ SEM نواحی مختلف جوش حاصل از فلز پرکننده اینکونل 82

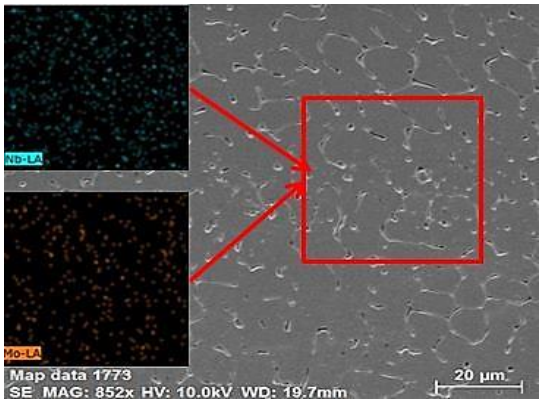

Fig. 11 Elemental mapping between dendrites of weld metal Inconel 82

شکل 11 آنالیز مکان‌نگاری عنصری بین دندریت‌های فلزپرکننده اینکونل 82

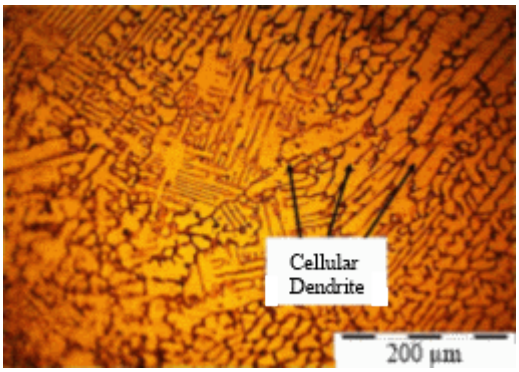

Fig. 12 Microstructure of Inconel 61 weld metal

شکل 12 ریزساختار فلز پرکننده اینکونل61

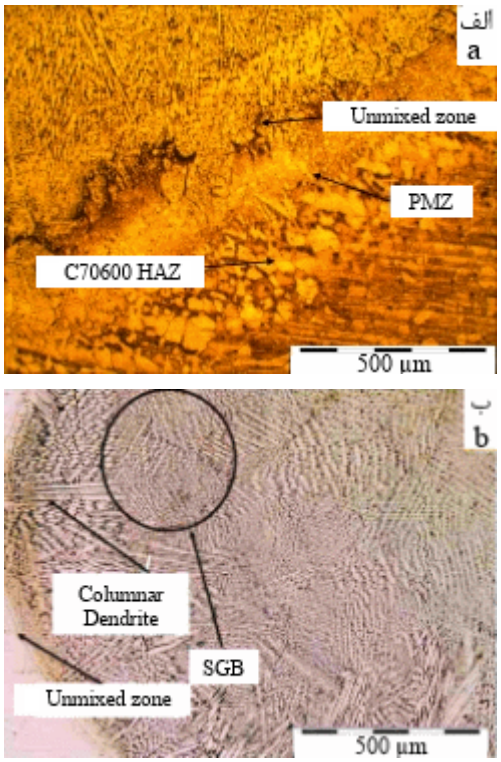

Fig. 13 Interface microstructure of filler metal Inconel 61 a) Side of C70600 alloy b) Side of AISI 304 alloy

شکل 13 ریزساختار فصل مشترک فلز پرکننده اینکونل 61 الف)سمت آلیاژ C70600 ب) سمت آلیاژ AISI 304

Fig. 14 Welded zones of Inconel 61 filler metal

شکل 14 مناطق جوش حاصل از فلزپرکننده‌ی اینکونل 61

جدول 7 آنالیزعنصری EDS مناطق مختلف جوش حاصل از فلز پرکننده اینکونل 61

Table 7 EDS element analysis at different zones of welded made using filler metal Inconel61

عناصر(درصد وزنی)							
Ti	C	Cr	Mn	Cu	Ni	Fe	مناطق
-	-	-	-	88.80	11.20	-	1
0.06	-	-	-	81.98	17.16	0.80	2
0.41	0.32	2.12	1.97	66.25	18.64	4.21	3
0.55	0.21	2.44	1.32	28.84	51.32	6.65	4
1.65	1.02	3.23	1.02	17.02	67.84	8.22	5
1.02	1.05	5.23	2.13	10.62	65.44	14.51	6
0.99	1.22	7.43	2.12	7.23	48.14	32.87	7
1.25	1.46	11.91	3.10	5.91	30.87	46.35	8
-	0.89	18.41	1.42	-	7.93	71.35	9

آهن باشد [14]. باتوجه به این‌که فلزپرکننده‌ی اینکونل 61 مانند سایر فلزات پرکننده دیگر دراین پژوهش جز آلیاژهای استحکام یافته به صورت محلول جامد می‌باشد، وجود برخی عناصرآلیاژی مانند Cr، Fe، Mo، Nb، Cu و W باعث افزایش استحکام این نوع آلیاژهای پایه نیکل می‌شود. عناصر Nb، Ti، Mo و W کاربیدهای نوع MC را تشکیل خواهند داد. این عناصر برای استحکام‌دهی به این آلیاژها استفاده می‌شوند. ولی با توجه به ترکیب آلیاژی این فلز پرکننده مقدار عناصرآلیاژی استحکام دهنده بسیار ناچیز می‌باشند. "شکل 16" تصویر میکروسکوپ الکترونی از مرکز فلز جوش و آنالیز مکان-نگاری از آن را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل که آنالیز مکان‌نگاری منطقه جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی اینکونل 61 را نشان می‌دهد، می‌توان به‌وجود و توزیع ذرات کربن و تیتانیم در ریزساختار فلز جوش اشاره کرد. وجود این دو عنصر احتمال تشکیل ذرات TiC در مکان‌های بین دندریتی را افزایش می‌دهد.

3-2- خواص مکانیکی اتصالات

3-2-1- میکروسختی

نتایج سختی برای نمونه‌های مختلف در نواحی مختلف جوش در"شکل 17" آورده شده است. برای تمامی نمونه‌های جوش‌کاری شده سختی ناحیه‌ی جوش کمتر از سختی فلزپایه‌ی فولاد زنگ‌نزن 304 و بیش‌تر از فلزپایه C70600 می‌باشد. سختی مرکز جوش با توجه به نتایج آنالیز نقطه‌ای در جداول 5، 6 و 7 می‌تواند به علت وجود عناصری مانند کربن، مولیبدن، نیوبیم و تیتانیم که باعث شکل‌گیری برخی فازهای سخت مانند NbC، TiC و کاربید مولیبدن می‌شود، افزایش یافته باشد. همچنین با توجه پژوهش کومار و همکاران [14]، افزایش سختی منطقه فلز جوش می‌تواند در اثر افزایش میزان نیوبیم در منطقه جوش و در نتیجه باعث ایجاد ریزساختار دندریتی هم محور باشد. در مرکز جوش نمونه‌های جوش‌کاری شده، به‌علت نرخ سرد شدن بالا نسبت به نواحی کناری و تا نزدیک خط ذوب، فاصله‌ی بین بازوهای دندریتی از خط ذوب به‌سمت خط مرکزی جوش کاهش می‌یابد. به‌همین دلیل می‌توان گفت میزان سختی در مرکز جوش نسبت به سایر نواحی جوش بالاتر می‌باشد [16]. همان‌طور که در"شکل 17" مشاهده می‌شود، بیش‌ترین میزان سختی برای فلزات پرکننده اینکونل 625 و اینکونل 82 و کم‌ترین این میزان برای فلز پرکننده‌ی اینکونل 61 می‌باشد. کم‌ترین میزان سختی در فصل مشترک منطقه‌ی متاثر از حرارت و فلز پایه آلیاژ مس نیکل C70600

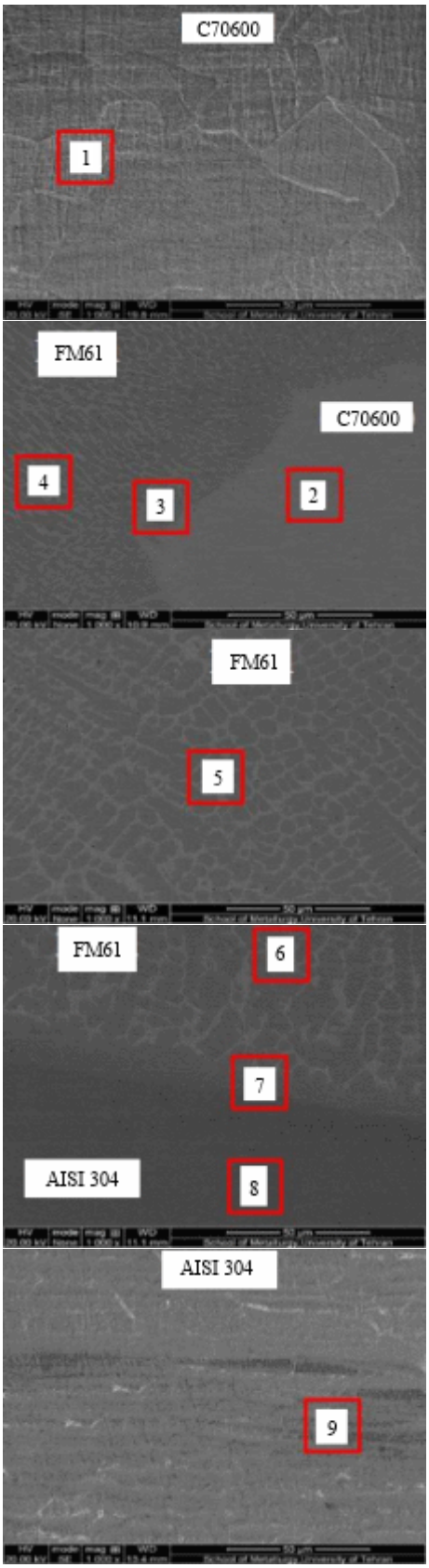

Fig. 15 SEM image of welded zones made by using filler metal Inconel61

شکل 15 تصویر میکروسکوپ SEM نواحی مختلف جوش حاصل از فلز پرکننده اینکونل61

به‌دست آمده است. دلیل این کاهش می‌تواند افزایش درجه حرارت و رشد دانه در منطقه متاثر از حرارت باشد. همچنین رشد دانه در منطقه متاثر از حرارت فولاد زنگ نزن 304 باعث کاهش سختی در این ناحیه شده است. کمتر بودن سختی در فصل مشترک جوش و منطقه متاثر از حرارت جوش در سمت فولاد زنگ نزن 304 را می‌توان براساس نتایج آنالیز نقطه‌ای عناصر، به کمتر بودن عناصر کاربید ساز مانند مولیبدن و نایوبیوم نسبت به فلز جوش مرتبط ساخت.

3-2-2- استحکام کششی

"شکل 18" نتایج آزمون کشش نمونه‌های جوش‌کاری را با فلزات پرکننده‌ی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج استحکام نهایی برای نمونه‌های جوش با دو فلز پرکننده‌ی اینکونل 625 و اینکونل 82 به‌ترتیب 324±2 و 323±6 مگاپاسکال و حدود 91 درصد فلزپایه‌ی مس نیکل می‌باشد. همچنین درصد ازدیاد طول به‌ترتیب برای این دو فلز جوش 15±0.25 و 14±0.9 درصد و حدود 43 درصد فلز پایه مس نیکل است. کم‌ترین میزان استحکام نهایی و بیشترین درصد ازدیاد طول نیز برای نمونه جوش‌کاری شده با فلز جوش اینکونل 61، 293±10 مگاپاسکال و 16.2±0.3 درصد که به‌ترتیب 83 درصد و 46 درصد فلز پایه مس نیکل می‌باشد.

شکست در کلیه نمونه‌ها مطابق "شکل 19" در منطقه‌ی متاثر از حرارت آلیاژ مس نیکل اتفاق افتاده است. کمتر بودن سختی در فصل مشترک جوش و منطقه متاثر از حرارت جوش در سمت آلیاژ مس نیکل می‌تواند منجر به

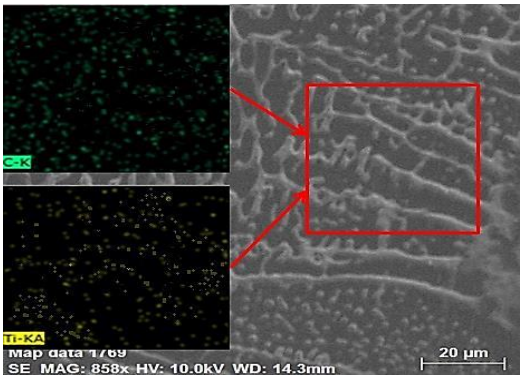

Fig. 16 Elemental mapping between dendrites of weld metal Inconel 61

شکل 16 آنالیز مکان‌نگاری عنصری بین دندریت‌های فلزپرکننده اینکونل 61

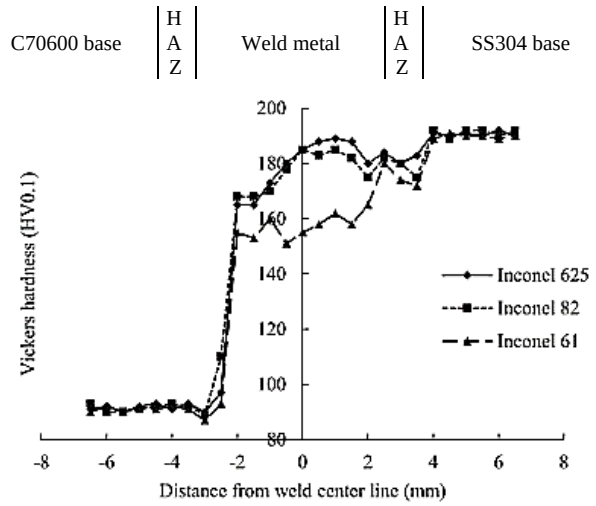

Fig. 17 Hardness profiles of welded samples

شکل 17 پروفیل سختی نمونه های جوش‌کاری شده

ضعف اتصال و وقوع شکست در این ناحیه شود. با توجه به نتایج ولو و همکاران [8] نفوذ مس در ناحیه‌ی نزدیک فصل مشترک به داخل فلز جوش می‌تواند باعث ایجاد ریز ترک‌ها در این ناحیه شود. نتایج حاصل از آنالیز نقطه‌ای در این پژوهش کاهش میزان مس در ناحیه‌ی نزدیک فصل مشترک را نشان می‌دهد. پس می‌توان احتمال داد که خروج مس در این نواحی و ورود آن به داخل فلز جوش باعث ایجاد ریز ترک‌ها و درنتیجه‌ی آن کاهش میزان استحکام منطقه‌ی تحت تاثیر حرارت شود. براساس بررسی‌های انجام شده ریزترک‌ها در این ناحیه مشاهده نشد، اما ترک‌های انجمادی در مرز ذوبی سمت آلیاژ مس نیکل همان‌طور که در "شکل 20" نشان داده شده است می‌تواند باعث ضعیف شدن اتصال و کاهش درصد ازدیاد طول شود.

در "شکل 21" تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه‌ی شکست نمونه‌های آزمون کشش نشان داده شده است. در سطح شکست تمامی نمونه‌ها دیمپل مشاهده می‌شود.

مورفولوژی این حفرات به شکل و اندازه ذرات و میزان قابلیت تغییر فرم پلاستیک و شرایط تنشی وارده بر ناپیوستگی ایجاد شده وابسته می‌باشد. با توجه به تصاویر مقاطع شکست نمونه‌های آزمون کشش می‌توان به این نتیجه رسید که شکست حاصل از آزمون کشش نمونه‌های جوش‌کاری شده با فلزات پرکننده‌ی اینکونل625، 82 و 61 دارای حفره‌های عمیق و بزرگ می‌باشند. نوع شکست برای این نمونه‌ها به صورت نرم بوده است.

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اتصال غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن 304 به آلیاژ مس نیکل C70600 بااستفاده از سه فلزپرکننده پایه نیکل با موفقیت انجام شد و نتایج زیر حاصل گردید:

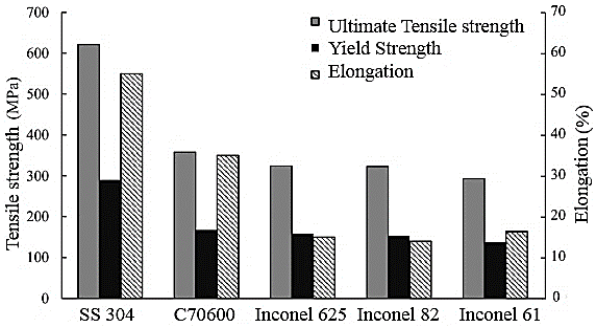

Fig. 18 The results of tensile testing of welded samples

شکل 18 نتایج آزمون کشش نمونه های مختلف

Fig. 19 The image of fracture zone of the fractured specimens in tensile test

شکل 19 تصوی ناحیه شکست نمونه‌های شکسته شده در آزمون کشش

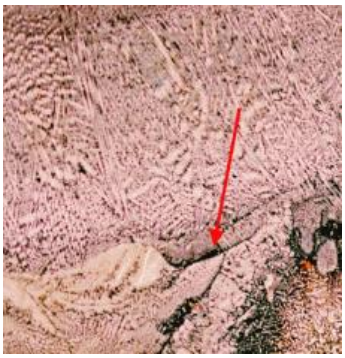

Fig. 20 The solidification cracking in fusion boundary of copper nickel alloy side

شکل 20 ترک انجمادی در مرز ذوبی سمت آلیاژ مس نیکل

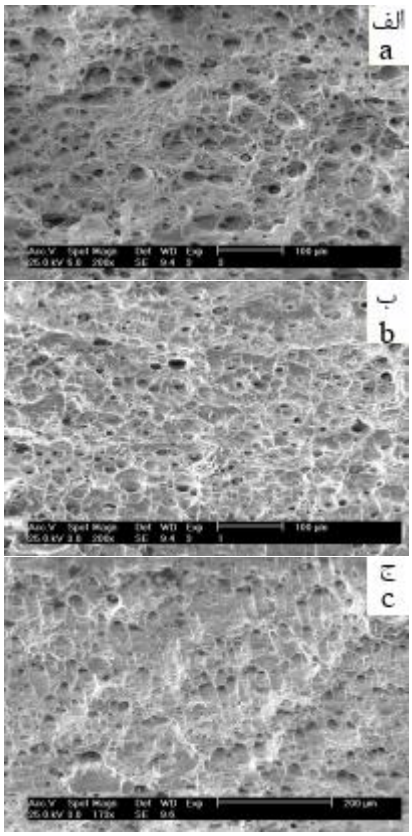

Fig. 21 Fracturegraphy of tensile testing samples a)In625 b)In82 c)In61

شکل 21 تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح مقطع شکست الف) اتصال با اینکونل 625 ب) اتصال با اینکونل 82 ج) اتصال با اینکونل61

1- نتایج حاصل از آنالیز عنصری نقطه‌ای در فصل مشترک‌های جوش نشان داد که نفوذ اتمی عناصر مس و آهن در نیکل بیشتر از نفوذ نیکل در مس و آهن می‌باشد. همچنین وجود برخی عناصر مانندکروم، کربن، نیوبیم و مولیبدن درمرکز جوش و سایر نواحی فلز جوش می‌تواند باعث تشکیل ترکیب‌های سخت مانند کاربید نایوبیوم و مولیبدن در نواحی مختلف مخصوصا در مناطق بین دندریتی در مرکز جوش شود.

2- حضور عناصر کاربید ساز قوی و ساختار دندریتی هم محور در مرکز فلز جوش باعث افزایش سختی در این ناحیه می‌شود. همچنین افزایش درجه حرارت و رشد دانه در منطقه متاثر از حرارت به همراه کاهش عناصر کاربید ساز نسبت به فلز جوش باعث کاهش سختی در منطقه متاثر از حرارت نسبت به فلز جوش می‌شود.

3- نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد که خواص استحکامی نهایی دو فلز پرکننده‌ی اینکونل 625 و اینکونل82 بسیار نزدیک به‌هم و حدود 91 درصد فلزپایه‌ی مس نیکل می‌باشد. کم‌ترین میزان استحکام نهایی مربوط به نمونه جوش‌کاری شده با فلزپرکننده‌ی اینکونل 61 و حدود 83 درصد فلزپایه‌ی مس نیکل است. بیش‌ترین میزان درصد ازدیاد طول مربوط به نمونه‌جوش داده شده با فلز پرکننده اینکونل 61 می‌باشد.

4- کلیه‌ی نمونه‌های آزمون کشش از منطقه‌ی تحت تاثیرحرارت آلیاژ مس نیکل شکسته شدند. تصاویر سطح مقاطع شکست این نمونه‌ها نشان داد که شکست در کلیه نمونه‌ها از نوع نرم می‌باشد.

5- مراجع

[1] P. Carol, Corrosion and biofouling resistance evaluation of 90-10 copper-nickel, *Copper Development Association*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-10, 2004.

[2] J. Lippol, J. K. Damian, *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, John Wiley & Sons, New York, pp. 3-225, 2005.

[3] I. Magnabosco, P. Ferro, F. Bonollo, L. Arnberg, An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper–stainless steel, *Materials Science and Engineering*, Vol. 424, No. 1-2, pp. 163−173, 2006.

[4] C. Yao, B. Xu, X. Zhang, J. Huang, J. Fu, Y. Wu, Interface microstructure and mechanical properties of laser welding copper– steel dissimilar joint, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 47, No. 7-8, pp. 807−814, 2009.

[5] T. A. May, A. C. Spoatage, Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel–kovar, copper–steel and copper–aluminium, *Materials Science and Engineering*, Vol. 374, No. 1-2, pp. 224−233, 2004.

[6] S. Gholami, M. Nazarzadeh, M. Shariftabar, M. Sh. Afarani, Gas tungsten arc welding of CP-copper to 304 stainless steel using different filler materials, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 12, pp. 2937−2942, 2012.

[7] C. Roy, V. Pavanan, G. Vishnu, P. R. Arivarasu, Characterization of metallurgical and mechanical properties of commercially pure copper and AISI 304 dissimilar weldments, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 2503-2512, 2014.

[8] M. Velu, S. Bhat, Metallurgical and mechanical examinations of steel–copper joints arc welded using bronze and nickel-base superalloy filler materials, *Materials and Design*, Vol. 47, No. 1, pp. 793-809, 2013.

[9] H. Naffakh, M. Shamanian, F. Ashrafizadeh, Microstructural evolutions in dissimilar welds between AISI 310 austenitic stainless steel and Inconel 657, *Journal of Materials Science*, Vol. 45, No. 10, pp. 2564-2573, 2010.

[10] E. Ahmadi Zadeh, , M. Masaeli, R. Dehmolaye, Effect of welding heat input on the microstructure of dissimilar metals Inconel 625 and 316L stainless, *Journal of Basic and Applied Advances in Sciences*, Vol. 4, No. 2, pp. 2573, 2016.

[11] H. S. Hosseini, M. Shamanian, A. Kermanpur, Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds, *Materials Characterization*, Vol. 62, No. 4, pp. 425-431, 2011.

[12] W. F. Savage, E. F. Nippes, T. W. Miller, Microsegregation in partially melted regions of 70Cu-30Ni weldments, *Welding Journal*, Vol. 55, No. 1, pp. 181s-187s, 1976.

[13] J. N. Dupont, S. W. Banovic, A. R. Marder, Microstructural evolution and weld ability of dissimilar welds between a super austenitic stainless steel and nickel-based alloys, *Welding Journal*, Vol. 82, No. 6, pp. 125-136, 2003.

[14] K. D. Ramkumar, P. Mithilesh, D. Varun, A. R. Gopi reddy, N. Arivazhaghan, S. Narayanan, K. Gokul kumar, Characterization of microstructure and mechanical properties of Inconel 625 and AISI 304 dissimilar weldments, *ISIJ international*, Vol. 54, No. 4, pp. 900-908., 2014.

[15] *Specification for nickel and nickel-alloy bare welding electrodes*, American National Standards Institute, AWS A5.14, 1997.

[16] S. Kou, *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, New York, pp. 110-140, 2002.