



## ارزیابی خواص ساختاری و خواص مکانیکی اتصال غیرهم جنس سوپر آلیاژ اینکونل 625 به فولاد استحکام بالای کوئنچ و تمپر شده

هادی رضانی<sup>1</sup>، سید علی اصغر اکبری موسوی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 11155-4563، akbarimusavi@ut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 اردیبهشت 1393

پذیرش: 01 تیر 1393

ارائه در سایت: 04 آبان 1393

کلید واژگان:

اینکونل 625

فولاد استحکام بالای کوئنچ تمپر شده

جوش لیزر

خواص مکانیکی

خواص خوردگی

در این پژوهش، جوشکاری غیرمشابه سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 625 به فولاد استحکام بالای کوئنچ تمپر شده A517 با استفاده از لیزر پالسی مورد بررسی قرار گرفت. این اتصال دارای کاربردهای ویژه در صنایع زیردریایی می‌باشد. پس از جوشکاری، ریز ساختار مناطق مختلف اتصال بهینه که شامل فلز جوش و مناطق متأثر از حرارت می‌باشد، با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روشی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان‌دهنده وجود ساختار دندریتی ظریف در فلز جوش بوده که رسوبات کاربید نیوبیم و فاز بوتکتیک لاه در ریز ساختار آن به وفور یافت می‌شوند. نتایج آنالیز عنصری نشانگر جدایش مولیبدن و نیوبیم به مناطق بین دندریتی در فلز جوش می‌باشد. رشد دانه در ناحیه منطقه متأثر از حرارت سوپر آلیاژ پایه نیکل رخ نداده ولی رسوبات بسیار ریزی در این نواحی تشکیل گردیدند. در فصل مشترک فولاد و فلز جوش، شاهد تشکیل یک ناحیه انتقالی با عرض تقریبی 65 میکرومتر خواهیم بود که شامل یک ناحیه مارتنزیتی (10-20 میکرومتر) در امتداد مرز جوش و یک ناحیه آستنیتی همراه با مقادیر بسیار کمی فریت در نزدیکی فلز پایه خواهیم بود. استحکام کششی و ریز سختی سنجی مقطع اتصال نمونه بهینه مورد بررسی قرار گرفت. رفتار الکتروشیمیایی فلز جوش در محلول 3/5% وزنی سدیم کلرید در دمای اتاق با استفاده از پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر خوردگی فلز جوش کمتر از اینکونل و بیشتر از فولاد می‌باشد. با انتخاب بهینه پارامترهای جوشکاری، امکان دست‌یابی به جوشی سالم بانفوذ کامل میسر گردید.

## Characterization of micro structural and mechanical properties of Inconel 625/A 517 high strength quenched and tempered steel dissimilar welds

Hadi Ramezani<sup>1</sup>, Seyyed Ali Asghar Akbari Mousavi<sup>2\*</sup>

1- Department of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Department of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, akbarimusavi@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 30 April 2014  
Accepted 22 June 2014  
Available Online 26 October 2014

**Keywords:**  
Inconel 625  
high strength quenched and tempered steel  
LBW  
Mechanical properties  
corrosion properties

### ABSTRACT

Dissimilar welding between Inconel 625 nickel base super alloy and high strength quenched and tempered A 517 Gr.B steel was investigated by pulsed ND:YAG laser beam welding equipment. This joint has special application in submarine components. After welding, the optimized joint microstructure including the weld metal and heat affected zones were characterized by optical and scanning electron microscopy (SEM). The results showed a fine dendritic structure and existence of large amount of Niobium carbide and Laves eutectic phase in the weld metal. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analysis showed Nb and Mo segregation to interdendritic zones at the weld metal. Grain growth in the heat affected zone of Inconel 625 did not occur, however, ultrafine precipitations were deposited at the heat affected zone. An approximately 65  $\mu\text{m}$  wide transition zone was observed at the steel and weld zone interface; consisting of a martensitic layer (10-20 $\mu\text{m}$ ) along the weld interface and the austenite phase region with a small amount of ferrite adjacent to the base metal. The tensile test and micro hardness test of the optimized sample was investigated. The electrochemical behavior of the weld metal was investigated at room temperature in 3.5% NaCl solution using potentiodynamic polarization. The results show that the corrosion resistance of weld metal is more than that of Inconel 625 and less than that of 517A Gr.B. It can be concluded that a proper selection of laser beam welding parameters provides sound, fully-penetrated welds.

### 1- مقدمه

بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. سوپر آلیاژها از لحاظ ترکیب شیمیایی به سه گروه عمده تقسیم می‌شوند که شامل سوپر آلیاژهای پایه آهن-نیکل، پایه نیکل و پایه کبالت می‌باشد. سوپر آلیاژهای پایه نیکل به عنوان پر مصرف‌ترین

سوپر آلیاژها مواد مهندسی هستند که به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فرد مانند استحکام، مقاومت به خزش و خوردگی داغ، به طور گسترده در دماهای

Please cite this article using:

H. Ramezani, S.A.A. Akbari Mousavi, Characterization of micro structural and mechanical properties of Inconel 625/A 517 high strength quenched and tempered steel dissimilar welds, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 331-336, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

**2- روش تحقیق**

برای جوشکاری لیزر، دستگاه میکرو لیزر ضربانی ساخت شرکت کاسمو لیزر<sup>1</sup> استفاده شده است. مشخصات فنی دستگاه لیزر (متغیرها و محدوده‌ی آنها) در جدول 1 نشان داده شده است. نمونه‌های اولیه فولاد A517 و سوپرآلیاژ اینکونل 625 به شکل ورق به ضخامت 1 میلی متر از ورق اولیه توسط وایرکات با لبه‌هایی کاملاً صاف بریده شدند. سپس نمونه‌ها در داخل محلول استون قرار گرفته و در داخل دستگاه آلتراسونیک مورد شستشو قرار گرفتند. از یک فیکسچر مخصوص جهت کنار هم قرار دادن لبه‌ها و حفظ موقعیتشان در طول فرآیند استفاده شد. در طول فرآیند جوشکاری، گاز آرگون با دبی 10 لیتر بر دقیقه، در محل اتصال دمیده شده و موضع اتصال را از وجود گازهای مخرب تهی می‌سازد. فاصله کانونی در تمام موارد برابر 16 میلی متر می‌باشد.

**جدول 1** مشخصات فنی دستگاه لیزر

پارامتر	مقدار
طول موج	1064nm
توان متوسط	W 100
بسامد	Hz(0/1-14)
تعداد لامپ	1
انرژی ضربه	J(0/5-6)
ولتاژ ضربه	v(550-0)
پهنای زمانی ضربه	(1-10) ms
قطر پرتو در حالت متمرکز	(0-2)mm
برق مصرفی	A25Hz/50v/220

**جدول 2** ترکیب شیمیایی فولاد A517 Gr.B مورد استفاده (بر حسب درصد وزنی)

نام عنصر	نماد	درصد
کربن	C	0/018
گوگرد	S	0/008
سلیسیم	Si	0/0252
منگنز	Mn	0/0738
کرم	Cr	0/0492
نیکل	Ni	0/0216
مولیبدن	Mo	0/0176
آلومینیوم	Al	0/0429
تیتانیوم	Ti	0/0221
وانادیوم	V	0/0413

**جدول 3** ترکیب شیمیایی آلیاژ اینکونل 625 (بر حسب درصد وزنی)

نام عنصر	نماد	درصد
نیکل	Ni	بالانس
کرم	Cr	21/990
آهن	Fe	3/240
مولیبدن	Mo	9/000
نیوبیم	Nb	3/530
کربن	C	0/010
منگنز	Mn	0/100
سلیسیم	Si	0/090
گوگرد	S	0/001
تیتانیوم	Ti	0/320
آلومینیوم	Al	0/180

گروه در صنایع مختلفی مانند صنایع نفت و گاز، پالایشگاه، پتروشیمی، هوافضا، هسته‌ای، نیروگاه‌های تولید برق و تجهیزات پزشکی به کار گرفته می‌شوند. بررسی‌ها نشان‌دهنده گسترش روزافزون مصرف سوپر آلیاژها در شش دهه گذشته بوده و هم اکنون نیز تحقیقات وسیعی در زمینه گسترش و به‌کارگیری سوپر آلیاژها در حال انجام است [1,2]. اینکونل 625 یک سوپر آلیاژ پایه نیکل بوده و وجود مقادیر قابل‌توجهی از عناصری چون کروم، مولیبدن و نیوبیم در ترکیب آن، خواص ممتاز و بی‌نظیری را به آن بخشیده است. مقاومت به خوردگی داغ و اکسیداسیون بالا در حدود دمای 1000°C، به همراه استحکام خزشی و کششی عالی در دمای بالا باعث کاربرد وسیع اینکونل 625، در نیروگاه‌های گازی، بخار و سیکل ترکیبی، صنایع نفت، پتروشیمی و صنایع هسته‌ای شده است [3,4].

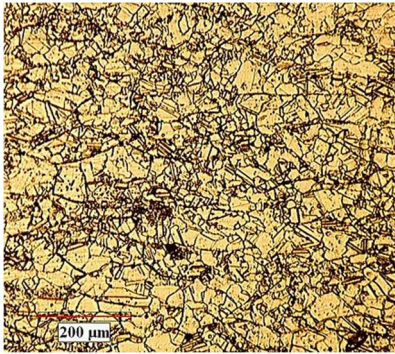
فولادهای کوئنچ و تمپر در گروه فولادهای استحکام بالا در تولید مخازن تحت فشار، زیردریایی‌ها و رآکتورهای هسته‌ای کاربرد گسترده‌ای دارند. این فولادها از استحکام بالا، چقرمگی مناسب، مقاومت به خوردگی محیطی و جوش پذیری عالی برخوردار هستند. این فولادها با دارا بودن درصد کربن کمتر از 0/2% و عناصر آلیاژی کمتر از 5% در گروه فولادهای کم آلیاژ قرار می‌گیرند. میزان کربن کم به علت حداقل رساندن سختی مارتنزیت و افزایش دمای شروع تشکیل مارتنزیت می‌باشد. به واسطه تشکیل مارتنزیت کم کربن، استحکام زیاد و چقرمگی خوبی در این فولادها حاصل می‌شود [5]. چقرمگی و بی‌عیب و نقص بودن این فولادها، می‌تواند توسط فرآیند جوشکاری که موجب تغییرات متالورژیکی در ساختار قطعه می‌گردد، تحت تأثیر قرار گیرد که این تغییرات به علت سیکل‌های حرارتی مختلفی می‌باشد که قطعه کار در طول فرآیند جوشکاری تجربه می‌کند؛ بنابراین پروسه‌های جوشکاری که در آن‌ها بتوان حرارت ورودی را کنترل کرد، ترجیح داده می‌شوند [6].

امروزه عمدتاً از روش جوش با قوس تنگستن به منظور ایجاد اتصال ما بین صفحات فوق الذکر استفاده می‌شود. استفاده از این روش‌ها علاوه بر این که نیاز به استفاده از فلز پر کننده (فیلر) را به همراه دارد، موجب ایجاد معایبی همچون ترک هیدروژنی، سوختگی کناره جوش، خال‌های سر باره، ذوب ناقص و تخلخل در محل اتصال می‌شود که موجب عدم کسب استحکام و سایر خواص مورد نظر در محل اتصال می‌گردد.

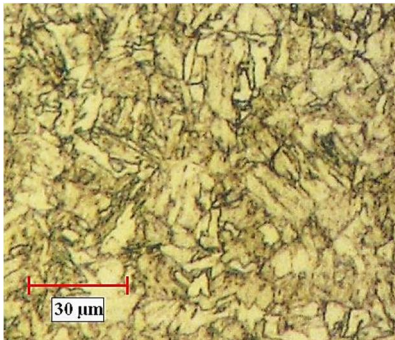
اما با استفاده از جوشکاری لیزری تمامی معایب فوق تا حد قابل قبولی مرتفع گردیده‌اند. جوشکاری با پرتو لیزر به علت باریک و کوچک بودن نقطه اثر پرتو لیزر و در نتیجه کم بودن حرارت ورودی به قطعه‌ی جوشکاری، منطقه‌ی تحت تأثیر حرارت باریک و کوچک دارد. به این ترتیب تنش پسماند آن ناچیز و احتمال اعوجاج قطعه کار بسیار کم است [7]. اخیراً با استفاده از روش جوشکاری انفجاری اتصال ما بین این دو ورق انجام پذیرفته است [8].

با بررسی مراجع ملاحظه می‌شود که تاکنون تحقیقات قابل‌توجهی درباره اتصال غیرهم جنس فولادهای استحکام بالای کوئنچ و تمپر شده به سوپرآلیاژهای پایه نیکل انجام شده است، ولی بررسی‌های خاص و متمرکزی راجع به اتصال ذوبی غیرمشابه سوپرآلیاژ اینکونل 625 به فولاد A517 در دسترس نمی‌باشد. در این پژوهش، سعی بر آن شده است که با انتخاب پارامترهای بهینه و دقت در چینش فلزات در محل اتصال، به جوشی عاری از نقص و درعین‌حال دارای نفوذ کامل دست یابیم. اما نکته مهم تر، احراز شرایط فوق در جوشکاری یک پاسه می‌باشد که موجب صرفه‌جویی فراوان در وقت و هزینه می‌گردد؛ لذا جوشکاری غیرمشابه سوپرآلیاژ اینکونل 625 به فولاد استحکام بالای کوئنچ و تمپر شده A517 و ارزیابی خواص اتصال از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد.

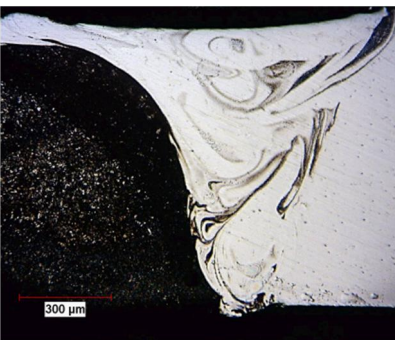
1- Cosmo Laser



شکل 1 ریز ساختار اینکونل 625 که نشانگر ساختار هم محور می باشد.



شکل 2 ریز ساختار مارتنزیت تمپر شده فولاد A517



شکل 3 اتصال سالم و بی عیب و نقص

جدول 5 پارامترهای بهینه دستگاه جهت کسب جوش با عمق نفوذ کامل و عاری از ترک

مقدار	پارامتر
515	ولتاژ (V)
0/4	قطر پرتو (mm)
3	فرکانس (Hz)
6	پهنای زمان پالسی (ms)
0/937	سرعت جوشکاری (mm/s)

سرعت انجام بالای فرآیند لیزر، سبب تحت تبرید و جوانه زنی و در نتیجه ساختار ریز می شود. تفاوت در میزان تحت انجام در جبهه انجام به دلیل وجود عناصر آلیاژی مختلف به ویژه آن دسته ای از عناصر آلیاژی که ضریب توزیع تعادلی انجام آن ها به اندازه کافی کوچک تر از یک است مانند مولیبدن و نیوبیوم، سبب شده است ریز ساختار به صورت دندریتی - ستونی درآمده و فازهای ثانویه در مناطق بین دندریتی شکل بگیرد. ریزساختار ناحیه جوش در نزدیکی فصل مشترک جوش با اینکونل و فولاد، شامل ساختارهای دندریتی می باشد که در جهت گرادین های دمایی که ناشی از سرعت سرد شدن بالا در اثر جوشکاری با پرتو لیزر می باشد، ایجاد شده اند.

ساختار حاصله در این قسمت می تواند توسط رابطه (1) توجیه شود [10]:

ترکیب شیمیایی فولاد A517 و سوپر آلیاژ اینکونل 625 به ترتیب در جداول 2 و 3 نشان داده شده است. بعد از قرار گرفتن نمونه ها در داخل فیکسچر، اشعه لیزر به صورت خطی و با سرعت قابل تنظیم در امتداد درز اتصال حرکت می کند. از یک قطعه مسی به ضخامت 12 میلی متر به عنوان پشتی<sup>1</sup> استفاده می شود.

## 2-1- آزمایش های اولیه

با توجه به تعداد زیاد پارامترهای جوشکاری لیزر و جهت شناسایی پارامترهای دستگاه لیزر و چگونگی تأثیر این پارامترها بر جوش لیزری، ابتدا اقدام به انجام یک سری آزمایش های اولیه شد. در این آزمایش ها، پارامترهای چشمه لیزر اعم از فرکانس، ولتاژ، قطر باریکه، مدت زمان اعمال پالس و سرعت جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت. پس از دستیابی به یک جوش بانفوذ رضایت بخش و عاری از ترک بر روی ورق فولادی و ورق اینکونل 625 محدوده مناسب این پارامترها جهت طراحی آزمایش ها مشخص گردید؛ سپس به بررسی خواص متالورژیکی و ریز ساختاری جوش حاصله پرداخته و سایر پارامترها با توجه به نتایج بخش قبل ثابت در نظر گرفته شد. شرایط این آزمایش ها در جدول 4 آمده است.

## 2-2- آزمایش های متالوگرافی

به منظور بررسی ریز ساختار و تغییرات متالورژیکی فلز جوش، نمونه های جوشکاری شده با عمق نفوذ کامل، انتخاب گردیده و از سطح مقطع عرضی خط جوش برش داده شدند. از محلول محتوی نایتال 2 درصد وزنی برای اچ کردن قسمت فولادی و از محلول پیکرال<sup>2</sup> برای حکاکی شیمیایی نمونه اینکونل استفاده گردید. نمونه ها سپس توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند.

## 3- بحث و نتیجه گیری

### 3-1- فلزهای پایه

تصویر میکروسکوپی نوری از ریز ساختار اینکونل 625 را نشان می دهد. ساختار شامل دانه های هم محور آستنیتی (فاز گاما) می باشد. اندازه متوسط این دانه ها در حدود 40 میکرون است که این نوع دانه بندی را می توان نتیجه فرآیند آنیل انحلالی انجام شده بر روی آلیاژ دانست. با انجام عملیات آنیل انحلالی علاوه بر یکنواختی در ترکیب شیمیایی، در اثر وقوع فرآیند تبلور مجدد ساختاری با دانه های هم محور ایجاد می شود. علاوه بر این دو قلوبی های ناشی از آنیل در سرتاسر ساختار به چشم می خورد. به دلیل جلوگیری از حرکت نابجایی ها توسط این دو قلوبی ها استحکام ماده تا حدودی افزایش می یابد (شکل 1) [9]. تصویر میکروسکوپی نوری از ریز ساختار A517 در شکل نشان داده شده است. ریز ساختار دارای مارتنزیت تمپر شده می باشد (شکل 2).

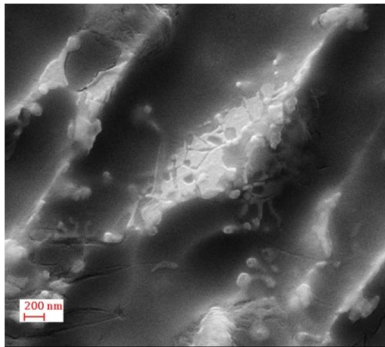
### 3-2- ریز ساختار فلزات جوش

تصویر مقطع جوش با نفوذ کامل، شکل مطلوب و عاری از ترک در شکل 3 مشاهده می شود. پارامترهای مربوطه به این اتصال در جدول 5 نشان داده شده اند.

جدول 4 محدوده مناسب پارامترهای مورد آزمایش

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
توان متوسط پالس (W)	0-60	فرکانس (Hz)	3-5
پهنای زمانی پالس (ms)	5-7	ولتاژ (V)	450-520
سرعت جوشکاری (mm.s <sup>-1</sup> )	0/9-1/8	قطر باریکه (mm)	0/5-0/7

1- Backing  
2- 3HCl+HNO3



شکل 5 تشکیل فاز لاهه در مناطق بین دندریتی

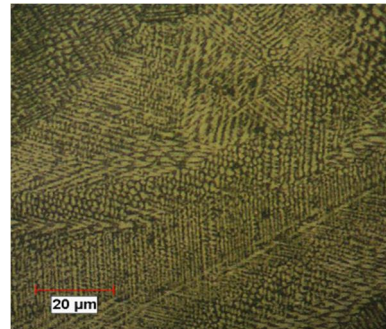
رفتار جدایش عناصر محلول می‌تواند به طور قابل توجهی از طریق سرعت رشد انجمادی تحت تأثیر قرار بگیرد و تئوری‌هایی نیز برای مرتبط کردن درجه ریز جدایش عناصر محلول به سرعت رشد انجماد شکل گرفته است. در شرایط سرعت بالای رشد، که در شرایط سرد شدن سریع جوشکاری لیزر مشهود است، میزان جدایش کاهش خواهد یافت. کاهش در میزان غنی شدن دندریتهای جامد و یا مذاب بین دندریتی از عناصر محلول، می‌تواند به تفاوت چشمگیری بین ریز ساختار منجمد شده آلیاژ ریختگی و آن چیزی که در فلز جوش مشاهده می‌شود، منجر گردد.

اما نتایج آنالیز عنصری نشانگر افزایش مقادیر مولیبدن و نیوبیم در نواحی بین دندریتی در شکل 4 پ می‌باشد. بر طبق محاسباتی که توسط کلایتون<sup>3</sup> و همکاران انجام گرفته است، ضریب توزیع عناصر  $k = C_s/C_0$  ترکیب نامی آلیاژ و  $C_0$  غلظت نواحی بین دندریتی) برای نیکل، کروم و آهن بزرگتر از یک می‌باشد که این امر منجر به جدایش بسیار اندک این عناصر به داخل فلز منجمد شده می‌شود. همچنین مقدار ضریب توزیع عناصر برای عنصر مولیبدن کمتر از یک می‌باشد که این امر منجر به جدایش این عنصر به سمت فلز مذاب و در نتیجه غنی شدن نواحی بین دندریتی از این عنصر در مراحل پایانی انجماد می‌گردد. نیوبیم هم مانند مولیبدن به داخل فلز مذاب رانده می‌شود ولی شدت جدایش این عنصر در مقایسه با مولیبدن بسیار بیشتر خواهد بود. ضریب توزیع نیوبیم در آلیاژهای پایه نیکل کمتر از یک بوده و در نتیجه این عنصر میل زیادی به جدایشی به مناطق بین دندریتی دارد. علاوه بر این حضور سایر عناصر آلیاژی قابلیت انحلال این عنصر در نیکل را کاهش می‌دهد. فاز یوتکتیک لاهه در دماهای بالا و یا در حالت انجماد در اثر جدایش نیوبیم در ساختار به وجود می‌آید (شکل 5).

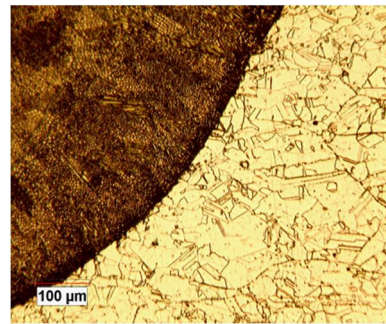
انجماد دندریتی در فلز جوش با تشکیل محصولات ثانویه انجماد در فضاهای بین دندریتی همراه بوده است. این ترکیبات بر اساس جدایش انجام شده در مراحل پایانی انجماد تشکیل شده و شامل ترکیبات یوتکتیک گاما- لاهه به همراه رسوبات کاربیدی می‌باشند. بررسی تغییرات ترکیب شیمیایی غنی بودن این ترکیبات از مولیبدن و نیوبیم و همچنین خالی بودن از کرم، نیکل و آهن را نشان می‌دهد.

با توجه به این نکته و نتایج آنالیز عنصری می‌توان گفت که علیرغم سرعت بالای انجماد در جوش لیزر باز هم جدایش عناصر آلیاژی به نواحی بین دندریتی و تشکیل فاز یوتکتیکی و ترد لاهه که برای خواص مکانیکی اتصال مضر می‌باشد، خواهیم داشت.

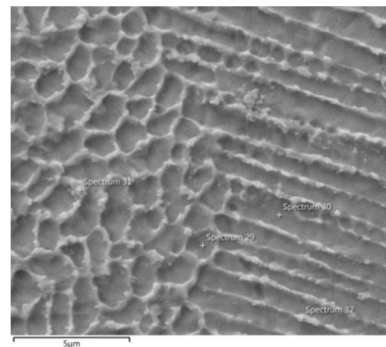
تغییرات ریز ساختاری که در منطقه متأثر از حرارت فولاد اتفاق می‌افتد، بستگی به سینتیک تشکیل آستنیت و اندازه دانه آن دارد. هر اندازه که به خط ذوب نزدیک تر می‌شویم، پیک دمایی بیشتر شده و مدت زمان نگهداری



الف



ب



پ

شکل 4 تصاویر (الف) تصویر میکروسکوپ نوری از فلز جوش (ب) نشانگر رشد ستونی در نواحی نزدیک فلز پایه اینکونل 625 (پ) متفاوت بودن جهت‌گیری رشد دانه‌ها در فلز جوش

$$\frac{-mc_0(1-k)}{kD_L} \leq \frac{G}{R} \quad (1)$$

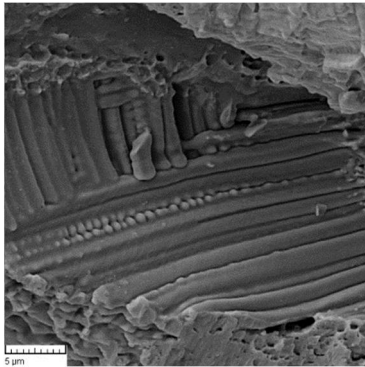
$G$  گرادیان دمایی بوده،  $D_L$  ضریب نفوذ در فاز مایع،  $m$  شیب خط مذاب،  $K$  ضریب جدایش و  $R$  آهنگ رشد می‌باشد. بنابراین انجماد بصورت دندریتی در مرکز فلز جوش آغاز شده و ساختارهای دندریتهای ستونی در امتداد جریان‌های دمایی رشد کرده‌اند. همه دانه‌های موجود در فلز جوش دارای ساختار ستونی بوده و تفاوت‌هایی که در تصاویر دیده می‌شوند، مربوط به این حقیقت می‌باشند که دانه‌های دندریتی در جهات مختلفی رشد کرده‌اند.

همان طور که در شکل 4 الف، ب و پ دیده می‌شود، جهت‌گیری رشد دندریتهای در هر دانه متفاوت است و در واقع یک نوع رشد رقابتی<sup>1</sup> در بین دانه‌های مختلف وجود دارد. مرز دانه‌های انجماد<sup>2</sup> در ساختار کاملاً مشخص هستند. در واقع این مرزها محل تقاطع بسته‌هایی است که در آن‌ها دندریتهای در یک جهت خاص رشد کرده‌اند. با حرکت به سمت خط ذوب دانه‌های ستونی و دندریتهای ستونی به وضوح در ساختار دیده می‌شود (شکل 4 ب) هر چند که دندریتهای هم محور هم در برخی از دانه‌ها وجود دارند.

1- Competitive Growth  
2- Sub Grain Boundary



شکل 8 منحنی میکرو سختی سنجی نمونه جوش بهینه



شکل 9 سطح مقطع شکست نمونه بهینه

جدول 6 نتایج آزمون کشش فلزهای پایه و نمونه جوشکاری شده

ماده	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	درصد ازدیاد طول
اینکونل 625	459	1024	21
فولاد A517	690	810	16
نمونه بهینه	457	650	7

در فصل مشترک فلز جوش و اینکونل، تغییر محسوس در مقدار سختی جوش دیده نمی‌شود. سختی فلز جوش در سمت اینکونل 625، بیشتر از سمت فولاد می‌باشد که دلیل آن وجود مقادیر کروم بیشتر، از دو طریق ایجاد محلول جامد و ایجاد رسوبات کاربید کروم می‌باشد که موجب افزایش سختی شده‌اند.

### 3-3-2- استحکام کششی

استحکام کششی نمونه بانفوذ کامل، با استفاده از دستگاه سانتام<sup>1</sup> و با نرخ 1mm/min مورد بررسی قرار گرفت. نمونه مذکور، از فلز جوش دچار گسیختگی گردید. اطلاعات مربوط به استحکام کششی و استحکام تسلیم فلزهای پایه و فلز جوش در جدول 6 قابل مشاهده می‌باشد.

استحکام کششی نمونه بهینه برابر 630 مگا پاسکال بود که در حدود 80 درصد استحکام فلز ضعیف‌تر (فولاد) بود. در شکل 9، سطح مقطع شکست نمونه تحت آزمون کشش قابل مشاهده است.

سطح شکست حاصل، مورفولوژی دندردیتی فلز جوش در حال انجام را نشان می‌دهد که تحت کرنش افزایشی شکسته شده است. در شکست بین دندردیتی، ترک از بین دندردیت‌ها شروع شده و دندردیت‌ها که هنوز پل‌های قوی را ایجاد نکرده‌اند از هم جدا شده و ترک گسترش می‌یابد. همچنین حفره‌های بین دندردیتی و دندردیت‌های شکسته کاملاً قابل مشاهده می‌باشد. این حفره‌ها همان انقباض‌ها در طی انجام است که نشان می‌دهد ساختار ماده کاملاً متراکم نیست و دندردیت‌های شکسته هم نشان‌دهنده این مطلب است

1- Santam

ناحیه مورد نظر در دماهای بالاتر هم افزایش می‌یابد. متعاقباً، بررسی‌های میکروسکوپی وجود نواحی زیر را برای ما در فصل مشترک فولاد و فلز جوش آشکار می‌کند:

پهنای ناحیه منطقه متأثر از حرارت در حدود 65 میکرون می‌باشد که شامل دو قسمت می‌باشد:

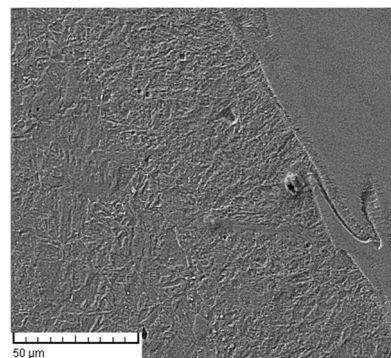
ناحیه اول که دارای پهنایی در حدود 10-15 میکرون می‌باشد، جایی که استحاله تشکیل آستنیت در اثر حرارت ورودی در دمایی بالاتر از دمای A<sub>3</sub> (در حدود 820°C) در حال انجام است که منجر به انجام کامل استحاله فریت به آستنیت می‌شود. در اثر سرد شدن، در این ناحیه شاهد تشکیل مخلوط مارتنزیت-بینیت خواهیم بود. ناحیه دوم که دارای پهنای 50-55 میکرون می‌باشد، جایی که دما در محدوده A<sub>1</sub> و A<sub>3</sub> می‌باشد (در حدود 720°C). جایی که استحاله آستنیتی شروع می‌شود، شاهد تشکیل دانه‌های آستنیتی و فریت استحاله نیافته در طول فرآیند سرد شدن خواهیم بود (شکل 6).

در ناحیه مربوط به منطقه متأثر از حرارت فلز جوش و اینکونل 625، هیچ‌گونه رشد دانه‌ای اتفاق نیافتاده است. تنها رسوبات بسیار ریزی در این ناحیه تشکیل شده‌اند. نتایج آنالیز عنصری مؤید این موضوع بود که این رسوبات احتمالاً مربوط به تشکیل کاربیدهای MC مانند NbC یا (Ti,Nb)C باشد (شکل 7).

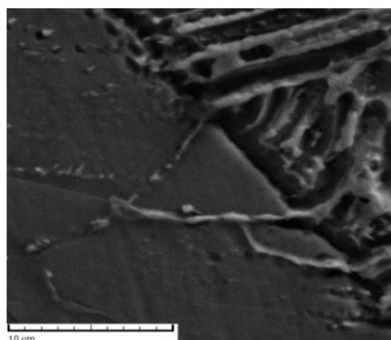
### 3-3- خواص مکانیکی

#### 3-3-1- ریز سختی سنجی

منحنی سختی سنجی مربوط به فلزهای پایه و فلز جوش در شکل 8 قابل مشاهده است. همانطور که قبلاً توضیح داده شد، شاهد تشکیل دو ناحیه مجزا در ناحیه متأثر از حرارت فولاد خواهیم بود. در ناحیه اول منطقه متأثر از حرارت فولاد، به علت حضور ساختار مارتنزیتی-بینیتی، شاهد سختی بالاتری (در حدود 400 ویکرز) خواهیم بود. دلیل پایین بودن مقدار سختی در ناحیه دوم منطقه متأثر از حرارت، نرم شدگی ناشی از تشکیل آستنیت باقیمانده و فریت می‌باشد (250 ویکرز).



شکل 6 به ترتیب از چپ به راست: فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت، فلز جوش



شکل 7 فصل مشترک فلز جوش و اینکونل 625

#### 4- نتیجه گیری

- رشد دانه‌های فلز جوش در نمونه‌های لیزر تماماً به صورت ستونی-دندریتی است. محصولات ثانویه تشکیل شده در مراحل پایانی انجماد شامل ترکیبات یوتکتیک گاما-لاوه به همراه رسوبات کاربیدی می‌باشند.
- کاربیدهای حاصله در فلز جوش به طور غالب کاربیدهای کمپلکس غنی از نیوبیم هستند. انجماد دندریتی فلز جوش با تجمع عناصر نیکل و آهن در مغز دندریت و پس زده شدن عناصری همچون مولیبدن و به ویژه نیوبیم به نواحی بین دندریتی همراه است.
- عرض ناحیه منطقه متأثر از حرارت در قسمت فولادی برابر 65 میکرون می‌باشد. درحالی‌که در سمت فلز پایه اینکونل هیچ‌گونه رشد دانه ای در این ناحیه رخ نداده و تنها رسوبات بسیار ریزی تشکیل شده‌اند.
- استحکام کششی فلز جوش در حدود 80 درصد استحکام فلز پایه فولاد می‌باشد. سختی در ناحیه اتصال، همواره کمتر از سختی اینکونل 625 می‌باشد.
- مقاومت در برابر خوردگی فلز جوش بیشتر از فلز پایه فولادی و اندکی کمتر از اینکونل 625 می‌باشد.

#### 5- مراجع

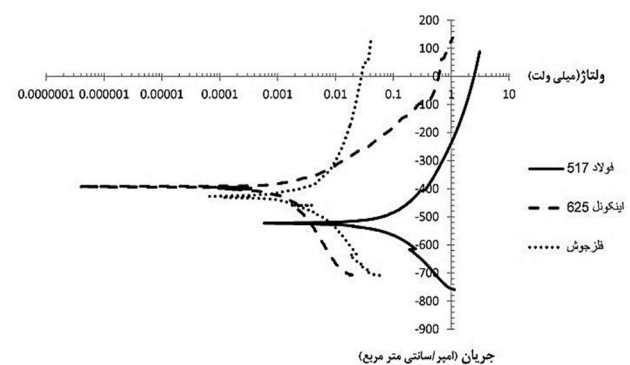
- [1] M.J. Donachie, S.J. Donachie, "Superalloys A Technical Guide", 2nd Edition, ASM International, 2002.
- [2] E.F. Bradley, "Superalloys A Technical Guide", 2nd Edition, ASM International, Metals park, OH 44073, 1988.
- [3] W.L. Mankins, J.C. Hosier, T.H. Bassford, "Microstructure and phase stability of Inconel alloy 625", *Metallurgical Transactions*, Vol. 5, pp. 2579-2590, 1974.
- [4] W. Ren, R. Swideman, "A review paper on aging effects in Alloy 617 for Gen IV Nuclear Reactor applications", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 131, 2009.
- [5] O. A. Erhayem, Welding and microalloying of weldable high strength (up to 1000 MPa) QT-steel weldment. *Proc. Int. Conf. on Weld. Tech. in Developing Countries*, Univ. of Roorkee, India, pp. 93-98, 1988.
- [6] AWS Welding Handbook- English Edition Vol. 4- Materials and Applications- Part 2- *American Welding Society*, MIAMI (Florida), 1998.
- [7] W.D. Doty, Welding of quenched and tempered steels. *Welding Journal Vol. 44 (9)*, pp. 289s- 309s, 1965.
- [8] H. R. Zareie Rajani, S. A. A. Akbari Mousavi, "The effect of explosive welding parameters on metallurgical and mechanical interfacial features of Inconel 625/plain carbon steel bimetal plate", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 556, pp. 454-464, 2012.
- [9] H. Shah Hosseini, M. Shamanian, A. Kermanpur, Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds, *Material Characterization*, Vol. 62, pp. 431-425, 2011.
- [10] S. Kou, "Welding metallurgy", John Wiley Publication, 2nd Edition, 2003.

که در مراحل آخر انجماد پس از اعمال تنش، دندریت های به هم متصل، شکسته شده است. ترک گرم عیبی است که نیاز به جوانه زنی و رشد دارد و حفره‌ها می‌توانند انرژی شروع ترک گرم را کاهش دهند و به اشاعه راحت تر این عیب کمک کنند.

#### 3-3-3- آزمون خوردگی

آزمون پلاریزاسیون در محلول 3/5 درصد نمک طعام و با الکتروود مرجع نقره/کلرید نقره و الکتروود کمکی پلاتین توسط دستگاه پتانسیواستات گالوانواستات مدل A273 ساخت شرکت ای جی<sup>1</sup> آمریکا صورت گرفت. این آزمون در دمای محیط و از سطحی به مساحت 9 میلی مترمربع حاصل شده است. سرعت پیمایش در کلیه آزمون‌ها 3 در نظر گرفته شد. پیش از انجام این آزمون هر نمونه برای رسیدن به حالت پایدار به مدت 30 دقیقه در محلول مربوطه قرار گرفت. در شکل 10 نمودارهای پلاریزاسیون نمونه‌ی بهینه به همراه فلزهای پایه نشان داده شده است. به منظور مقایسه بهتر رفتار خوردگی نمونه‌های مورد نظر از نمودار ترکیبی استفاده می‌کنیم.

با مشاهده شکل 10 می‌توان گفت که فلز پایه اینکونل 625 دارای بالاترین مقاومت به خوردگی می‌باشد و بعد از فلز جوش و فولاد A517 به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. به منظور مقایسه بهتر رفتار خوردگی نمونه‌ها، از شیب تافل کاتدی و آندی جهت به دست آوردن سرعت خوردگی<sup>2</sup> و پتانسیل خوردگی<sup>3</sup> استفاده می‌شود. در جدول 7 سرعت خوردگی و پتانسیل خوردگی محاسبه شده با استفاده از شیب تافل کاتدی و آندی آورده شده است. مبنای مقاومت به خوردگی، سرعت خوردگی می‌باشد. به عبارت دیگر هر چقدر سرعت خوردگی پایین تر باشد مقاومت به خوردگی بیشتر است. سرعت خوردگی نمونه جوشکاری شده، بسیار کمتر از فلز پایه فولاد می‌باشد که نشان‌دهنده مقاومت به خوردگی بالاتر این نمونه نسبت به فولاد می‌باشد. کاهش مقاومت به خوردگی فلز جوش نسبت به اینکونل 625 بخاطر جدایش ناشی از عناصر مولیبدن، نیوبیم و کرم به مناطق بین دندریتی می‌باشد که این امر موجب حساس شدن مناطق اطراف مرزها از این عناصر شده و موجب تشدید حملات خوردگی در این نواحی و لذا حساس شدن مرز دانه‌ها می‌گردد.



شکل 10 نمودار ترکیبی پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک فلزهای پایه و جوشکاری شده

جدول 7 نتایج آزمون خوردگی فلزهای پایه و نمونه جوشکاری شده

نمونه	پتانسیل خوردگی	جریان خوردگی
اینکونل 625	v-0/39	70 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
فولاد 517	v-0/52	27 $\text{mA}/\text{cm}^2$
فلز جوش	v-0/42	90 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

1- EG&G  
2- Icorr  
3- Ecorr