

## ارزیابی ریزساختار و رفتار خوردگی اتصالات غیرمشابه لیزری سوپرآلیاژ پایه نیکل 625 به فولاد زنگ نزن فریتی AISI 430

محمد عمادی<sup>1</sup>، حسین مستعان<sup>2\*</sup>، مهدی رفیعی<sup>1</sup>

1- مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

2- گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

(دریافت مقاله: 1398/02/25؛ پذیرش مقاله: 1398/07/19)

### چکیده

در این پژوهش، ریزساختار و خواص خوردگی جوشکاری غیرمشابه سوپر آلیاژ اینکونل 625 به فولاد زنگ نزن فریتی AISI 430 با استفاده از لیزر Nd:YAG ضربانی با توان متوسط 700 وات به صورت اتصال لبه روی هم مورد بررسی قرار گرفت. فولادهای زنگ نزن آستنیتی نسبت به فولادهای فریتی گران قیمت تر است و لذا با توجه به اینکه فولادهای زنگ نزن فریتی دارای خواص مغناطیسی هستند و قیمت بسیار کمتری دارند و اگر در جایی نیاز باشد که فلز پایه علاوه بر خواص فولادهای زنگ نزن خاصیت مغناطیسی را نیز داشته باشد در صنعت جایگزین خوبی بجای فولاد آستنیتی است. پس از جوشکاری، ریزساختار مناطق مختلف اتصال بهینه که شامل فلز جوش و مناطق متأثر حرارت بود، با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل شده نشانگر تشکیل ساختار دندریتی بسیار ظریف در فلز جوش بود که در جهات مختلف بصورت رقابتی رشد کرده اند. در فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی و فلز جوش رشد اپی تکسیال مشاهده شد و در ناحیه متأثر از حرارت اینکونل 625، هیچ تغییری در ابعاد دانه ها مشاهده نشد. 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 به ترتیب از سمت فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی 430 به سمت اینکونل 625 افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن فریتی 430، اینکونل 625، خواص خوردگی، خواص متالورژیکی، جوش لیزر Nd:YAG.

## Evaluation of microstructure and corrosion behavior of dissimilar laser joint between Inconel 625 and AISI 430 ferritic stainless steel

M. Emadi<sup>1</sup>, H. Mostaan<sup>2</sup>, M. Rafiei<sup>1</sup>

1-Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2-Faculty of Engineering, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

(Received 15 May 2019 ; Accepted 11 October 2019)

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: [hossein.mostaan@gmail.com](mailto:hossein.mostaan@gmail.com)

## Abstract

Dissimilar weld joints between stainless steels and nickel based super alloys are extensively used in petrochemical, gas and oil applications. These joints have great challenges from metallurgical transformations point of view. In this research, microstructural evolutions and corrosion behavior of laser weld joint between Inconel 625 and AISI 430 ferritic stainless steel were investigated. Ferritic stainless steels are less expensive and have magnetic properties in comparison with austenitic stainless steels. Scanning electron microscope and optical microscope were used in order to study the microstructures of weld metal and heat affected zone. It was found that fine dendritic microstructures are formed in the weld metal which is grown in a competition manner. An epitaxial growth was observed in the interface between AISI base metal and weld metal. No considerable grain growth was observed in the heat affected zone on Inconel 625. Corrosion resistance of weld joint was investigated in 3.5 % wtNaCl solution using potentiodynamic polarization test. It was concluded that corrosion resistance is increased from AISI 430 base metal toward Inconel 625 base metal.

**Keywords:** AISI 430 ferritic stainless steel; Inconel 625; Corrosion properties; Metallurgical features; Nd:YAG laser.

## 1- مقدمه

خواص مغناطیسی نرم است که در کاربردهایی که نیاز به جوشکاری ندارند از بیشترین استفاده برخوردار می باشند. در این میان فولاد زنگ نزن فریتی 430 به علت دارا بودن خواص مغناطیسی بسیار نرم و قابلیت ماشینکاری عالی در هسته پیستون های مغناطیسی شیرهای سولونوئیدی که در محیط های شیمیایی استفاده می شوند کاربرد فراوان دارد. مقاومت مطلوب در برابر ترک های ناشی از خوردگی تنشی (SCC)، خوردگی حفره ای، خوردگی شیار (به خصوص در محیط های کلراید)، از خواص مهم این آلیاژها می باشد. از این رو فولادهای زنگ نزن در کاربردهایی که مقاومت در برابر خوردگی، خواص مکانیکی (استحکام، چقرمگی و انعطاف پذیری)، از ملزومات اصلی شرایط کاری است، استفاده می شوند. محدوده دمایی کاربرد فولادهای زنگ نزن فریتی، به دلیل قابلیت تشکیل فازهای ترد کمتر از  $400^{\circ}\text{C}$  است. از نظر متالورژیکی، فلز جوش این آلیاژها، غالباً فریتی می باشد، اگرچه تحت شرایط خاص، مارتنزیت نیز می تواند حضور داشته باشند، ضمن آنکه رسوب کاربیدها و نیتریدها نیز اتفاق می افتد. اصلی ترین جنبه جوش پذیری فولادهای زنگ نزن فریتی، حفظ چقرمگی و انعطاف پذیری کافی در شرایط جوش داده شده می باشد [5 و 6].

امروزه عمدتاً از روش جوشکاری با قوسی الکتروود تنگستنی تحت گاز محافظ به منظور ایجاد اتصال بین ورق های مورد اشاره استفاده می شود. استفاده از این روش ها علاوه بر این که

سوپرآلیاژها 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 بالا مورد استفاده قرار می گیرند. سوپرآلیاژها از لحاظ ترکیب شیمیایی به سه گروه عمده تقسیم می شوند که شامل سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل، پایه نیکل و پایه کبالت می باشد. سوپرآلیاژهای پایه نیکل به عنوان پرمصرف ترین گروه در صنایع مختلفی مانند صنایع نفت و گاز، پالایشگاه، پتروشیمی، هوافضا، هسته ای، نیروگاه های تولید برق و تجهیزات پزشکی به کار گرفته می شوند. بررسی ها نشان دهنده گسترش روزافزون مصرف سوپرآلیاژها در شش دهه گذشته است و هم اکنون نیز تحقیقات وسیعی در زمینه گسترش و به کارگیری سوپرآلیاژها در حال انجام است [1 و 2].

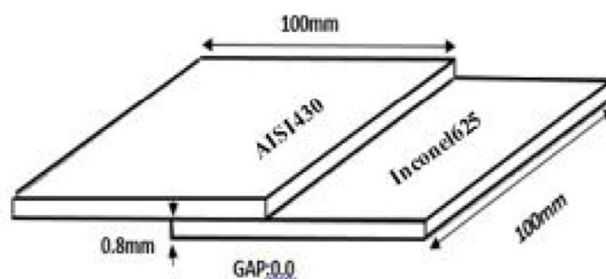
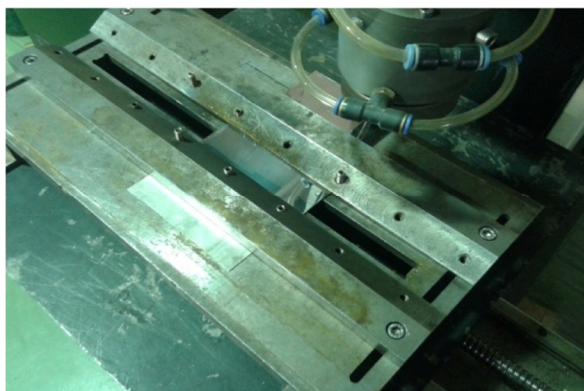
اینکونل 625 یک سوپرآلیاژ پایه نیکل است و وجود مقادیر قابل توجهی از عناصری چون کروم، مولیبدن و نیوبوم در ترکیب آن، خواص ممتاز بی نظیری را به آن داده است. مقاومت به خوردگی داغ و اکسیداسیون بالا در حدود دمای 1000 درجه سانتیگراد، به همراه استحکام خزشی و کششی عالی در دمای بالا باعث کاربرد وسیع اینکونل 625، در نیروگاه های گازی، بخار و سیکل ترکیبی، صنایع نفت، پتروشیمی و صنایع هسته ای شده است [3 و 4].

فولادهای زنگ نزن فریتی دارای مقاومت به خوردگی خوب و

بیشتر مطالعات انجام شده روی اینکونل 625 بیشتر در زمینه‌هایی غیر از جوشکاری و اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی و دوفازی می باشد [3 و 4]. در پژوهشی که توسط اکبری و همکارانش [12] انجام گرفت، جوشکاری غیرمشابه سوپرآلیاژ پایه نیکل 625 به فولاد استحکام بالای کوئچ تمپر شده A 517 با استفاده از لیزر پالسی مورد بررسی قرار دادند. با بررسی‌ها انجام شده نشان دادند که ساختار فلز جوش به صورت دندریتی ظریف است که رسوبات کاربید نیوبوم و فاز یوتکتیک لاه در ریزساختار آن به‌وفور پیدا کردند. با نتایج آنالیز عنصری نشان دادند که جدایش مولیدن و نیوبوم به مناطق بین دندریتی در فلز جوش بوده و رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت سوپرآلیاژ پایه نیکل رخ نداده است، ولی رسوبات بسیار ریزی در این نواحی تشکیل شد تاسکین و همکاران [23]، به بررسی خصوصیات ریزساختاری اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ نزن آستنیتی AISI304 و فولاد فریتی AISI430 توسط جوشکاری پرتو لیزر (LBW) CO<sub>2</sub> مورد بررسی پرداختند. آن‌ها دریافتند که با توجه به افزایش سرعت جوشکاری، عرض جوشکاری و HAZ بسیار کوچک‌تر می‌شود و با افزایش حرارت ورودی، بیشتر می‌شود. مقادیر استحکام کششی نیز این نتیجه را تأیید کرد. خان و همکارانش [30] جوشکاری پرتو لیزر فولاد فریتی 430 و فولاد مارتنزیتی 440 از جنس فولاد زنگ نزن مورد بررسی قرار دادند. در تحقیقاتی که انجام دادند از جوشکاری ترکیبی و برای جلوگیری از تشکیل ترک‌های ریز از پیشگرم و پسگرم استفاده کردند که بسیار موفقیت‌آمیز بود. همچنین به بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر و انرژی خط در هندسه جوش و سعی برای به دست آوردن و بهینه‌سازی جوش داده‌شده توسط لیزر مشترک با استفاده از روش تکنیک فاکتوریل انجام دادند. مدل‌های توسعه‌یافته برای تعیین پارامترهای بهینه برای به دست آوردن معیارهای هندسی مطلوب مورد استفاده قرار دادند. تمام ویژگی‌های مهره‌های جوش به‌طور قابل‌توجهی با افزایش قدرت لیزر سرعت جوشکاری کاهش یافت. در پژوهش دیگر ژو و همکارانش [32] به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد

نیاز به استفاده از فلز پرکننده را به همراه دارد، موجب ایجاد معایبی همچون ترک هیدروژنی، سوختگی کناره جوش، آخال‌های سرباره، ذوب ناقص و تخلخل در محل اتصال می‌شود که موجب عدم ایجاد استحکام و سایر خواص مورد نظر در محل اتصال می‌گردد. اما با استفاده از جوشکاری لیزری تمامی معایب فوق تا حد قابل قبولی مرتفع شده‌اند. جوشکاری با پرتو لیزر به علت باریک و کوچک بودن نقطه اثر پرتو لیزر و در نتیجه کم بودن حرارت ورودی به قطعه، منطقه تحت تاثیر حرارت باریک و کوچک دارد. به این ترتیب تنش پسماند آن ناچیز و احتمال اعوجاج قطعه کار بسیار کم است [7 و 8]. با بررسی مراجع ملاحظه شد که تاکنون تحقیقات قابل توجهی درباره اتصال غیرمشابه سوپرآلیاژ اینکونل 625 به فولاد زنگ نزن فریتی 430 در دسترس نمی‌باشد.

در سال 2015، رامکومار و همکاران [18] به بررسی اتصال غیرمشابه اینکونل 718 با فولاد پایه فریتی 430 با فرایند GTAW که در این اتصال از فلز پرکننده ER2553 و ERNiCrMo-4 استفاده شد پرداختند. براساس نتایج به دست آمده منطقه کامل هم‌جوشی در محل اتصال این دو فلز پایه توسط این دو فلز پرکننده در چند مرحله ایجاد شد و درشت شدن دانه‌ها در منطقه متأثر حرارت 430 و همچنین فاز غنی از Nb در منطقه متأثر حرارت فلز پایه 718 بوجود آمد. فازهای لاه و فازهای TCP مانند سیگما و پرلیت در ناحیه جوش فلز پرکننده ERNiCrMo-4 مشاهده نکردند و همچنین به دلیل عدم حضور عناصر آلیاژی قوی Nb,Mo در منطقه متأثر حرارت هیچ ترک‌خوردگی انجمادی و ترک گرمی مشاهده نکردند. در نتایج آزمون سختی سنجی نشان داد که در فلز پرکننده ER5325 سختی بالاتری نسبت به فلز پرکننده دیگری به علت حضور فریت دلتا اسکلتی دارد. نتایج آزمون خمش نیز تأیید کرد که در هر دو نوع جوش ایجاد شده هیچ نوع ترک یا ورقه‌ای شدن یا درز و شکاف و شکستگی مشاهده نشد. نتایج آزمون سختی که گزارش کردند به‌وضوح نشان داد که جوش ایجاد شده با فلز پرکننده ERNiCrMo-4 سختی بهتری نسبت به فلز پایه فولاد فریتی 430 داشته است.



شکل 1- نمایی از طرح اتصال و نگهدارنده مورد استفاده و راه اندازی آزمایش

ضربانی IQL20 با پمپاژ لامپی که مشخصات فنی دستگاه (محدوده و متغیرهای آن) در جدول (1) ارائه شده، انجام شد. نمونه های اولیه سوپرآلیاژ اینکونل 625 و فولاد زنگ نزن فریتی 430 به شکل ورق به ضخامت 0/8 میلیمتر نمونه ها پس از فرزکاری سطحی و تمیزکاری ورق، توسط گیوتین برش خورده و مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول 1- مشخصات فنی دستگاه لیزر IQL20

نوع لیزر	Nd:YAG حالت جامد
طول موج لیزر	۱۰۶۴ نانومتر
توان متوسط	۷۰۰ وات
فرکانس	۱۰۰۰ هرتز (قابل تنظیم)
لامپ	زنون
عرض پالس	۰/۲۵ تا ۲۵ میلی ثانیه قابل تنظیم
انرژی پالس	۰/۵ تا ۷۵ ژول (قابل تنظیم)
توان قله	۱۰ کیلووات
قطر باریکه	۰/۴ میلی متر
توان ورودی	۲۰ کیلووات
منبع تغذیه	سه فاز - ۳۸۰ ولت
سیستم خنک کننده	چیلر

ابعاد و نحوه قرارگیری ورقها در کنار هم به صورت طرح اتصال لبه روی هم به صورتی که فلز پایه فریتی 430 در بالا و اینکونل 625، آماده سازی شدند. شماتیک طرح اتصال و مشخصات در شکل (1) آمده است.

زنگ نزن 304 و سوپر آلیاژ پایه نیکل C-276 توسط فرایند لیزر پالسی با طرح اتصال لب روی هم پرداختند. در نتایج محققان مشاهده کردند که منطقه خالص در فصل مشترک بین فلز جوش (WM) و 304، تعداد کمی رسوبات بین دندریتی و احتمال وجود رسوبات فاز  $\mu$ , P وجود دارد. در مقایسه با ساختار فلز در C-276، ساختار فاز غالب در WM نیز فاز آستنیت بود، با این وجود، ثابت شبکه به علت کاهش محتوای نیکل، مولیبدن و تنگستن کاهش یافت. توزیع عناصر درشت با توجه به نرخ خنک کننده سریع در جوشکاری لیزر پالسی و منطقه ناهمگن انتقالی عناصر مجاور فلز جوش C-276 نسبت به منطقه مجاور 304 وسیع تر بود. حالت شکستگی جوش لبه روی هم در آزمون کششی و برشی، استحکام شکست، استحکام کششی 17٪ نسبت به C-276 کاهش یافت. همچنین مقدار ریزسختی فلز جوش کمتر از فلز پایه نبود. در این پژوهش سعی بر آن شده است که با انتخاب پارامترهای بهینه و دقت در چپش فلزات در محل اتصال، به جوشی عاری از نقص و در عین حال دارای نفوذ کامل دست پیدا شود. اما نکته مهم تر، احراز شرایط فوق در جوشکاری تک پاسه می باشد که موجب صرفه جویی فراوان در وقت و هزینه می گردد، لذا جوشکاری غیرمشابه سوپرآلیاژ اینکونل 625 به فولاد زنگ نزن فریتی 430 و ارزیابی خواص اتصال از اهداف اصلی این تحقیق می باشد.

## 2- مواد و روش انجام تحقیق

جوشکاری به صورت تک پاس با دستگاه لیزر از نوع Nd:YAG

جدول 2- ترکیب شیمیایی فلزات پایه مورد استفاده در این تحقیق (درصد وزنی)

درصد وزنی عناصر											
فلز پایه	Fe	Ni	Cr	Mo	Mn	Nb	C	Si	Cu	Ti	
<b>Inconel625</b>	۴/۸۵	پایه	۲۱/۰۷	۸/۵۹	-	۳/۷۰	۰/۰۴۳	*	۰/۰۳	۰/۲۷	Al-۰/۱۶ Co-۰/۰۹ S-۰/۰۰۸ P-۰/۱۵ B-۰/۰۰۳
<b>AISI430</b>	پایه	۰/۱۴	۱۷/۰۹	۰/۰۲	۰/۳۶	۰/۰۶	۰/۳۰	۰/۳۲	۰/۰۲	۰/۰۰۹	S-۰/۰۰۵ P-۰/۰۱۸ B-۰/۰۰۳

لیزری ابتدا اقدام به انجام یک سری آزمایش‌های اولیه شد. در این آزمایش‌ها، پارامترهای جریان لامپ، سرعت جوشکاری و پهنای زمانی ضربان مورد بررسی قرار گرفت. پس از دستیابی به یک جوش خوب بانفوذ عالی و رضایت‌بخش و عاری از ترک بر روی ورق فولاد زنگ نزن فریتی 430 و اینکونل 625 محدوده مناسب این پارامترها جهت طراحی آزمایش مشخص گردید، سپس به بررسی خواص متالورژیکی و ریزساختار جوش حاصله پرداخته و سایر پارامترها با توجه به نتایج بخش قبل ثابت در نظر گرفته شد. شرایط این آزمایش‌ها در جدول (3) آمده است.

## 2-2- آزمایش‌های متالوگرافی

به منظور بررسی ریزساختار و تغییرات متالورژیکی فلز جوش، نمونه‌های جوشکاری شده با عمق نفوذ کامل، انتخاب شد و از سطح مقطع عرضی خط جوش برش داده شدند. فرآیند اچ در قطعات در دو مرحله یکی جهت اچ کردن فولاد زنگ‌نزن فریتی 430 و مرحله بعد جهت اچ کردن اینکونل 625 انجام شد. برای حکاکی ماکرو نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن فریتی 430 از محلول ظاهرکننده Vilella و برای اینکونل 625 از محلول ظاهر کننده Kalling طبق استاندارد استفاده شد. نمونه‌ها سپس توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند.

## 3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ‌نزن فریتی 430 در شکل (2) تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار فولاد

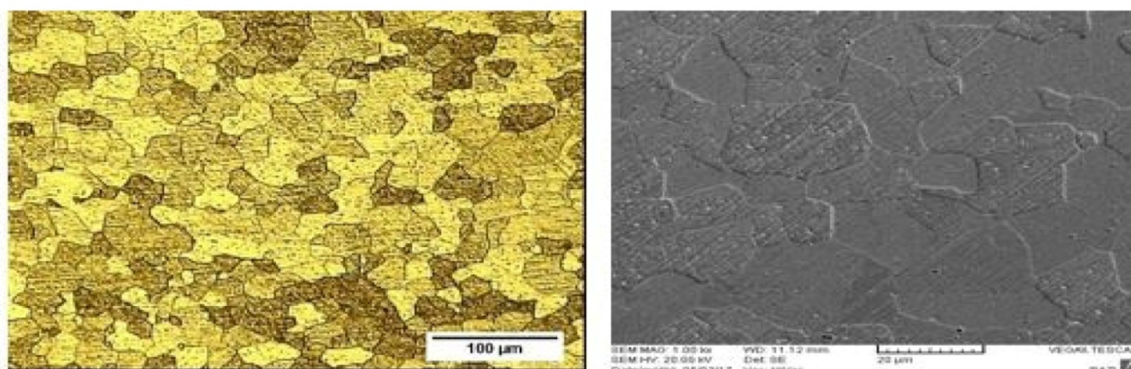
قبل از جوشکاری نمونه‌ها به منظور حذف هرگونه لایه اکسیدی و آلودگی سطحی، موقعیت اتصال با برس سیمی تمیز و با استون با خلوص تجاری چربی زدایی و سپس خشک شدند و از یک نگه‌دارنده طراحی شده که در شکل (1) مشخص شده جهت قرار دادن لبه‌ها و حفظ موقعیتشان در طول فرایند استفاده شد. در طول فرایند جوشکاری، گاز آرگون با دبی 2 بار در محل اتصال دمیده شده و موضع اتصال را از وجود گازهای مخرب تهی می‌سازد. فاصله کانونی در تمام موارد 4 میلیمتر و فرکانس نیز 20 هرتز است. ترکیب شیمیایی سوپراآلیاژ اینکونل 625 و فولاد زنگ نزن فریتی 430 به ترتیب در جدول (2) نشان داده شده است. بعد از قرار گرفتن نمونه‌ها در داخل فیکسچر، اشعه لیزر به صورت خطی و با سرعت قابل تنظیم حرکت می‌کند.

جدول 3- محدوده مناسب پارامترهای مورد آزمایش

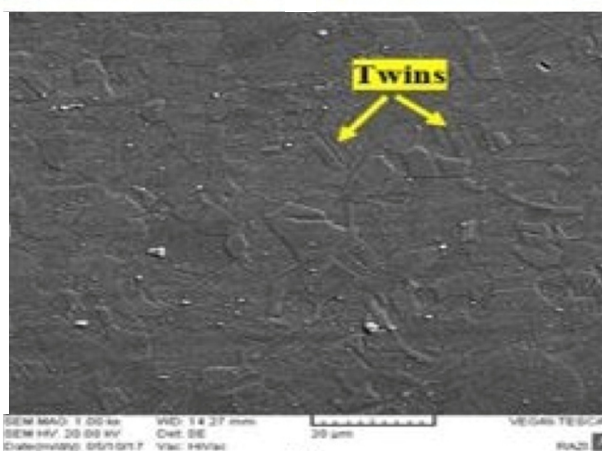
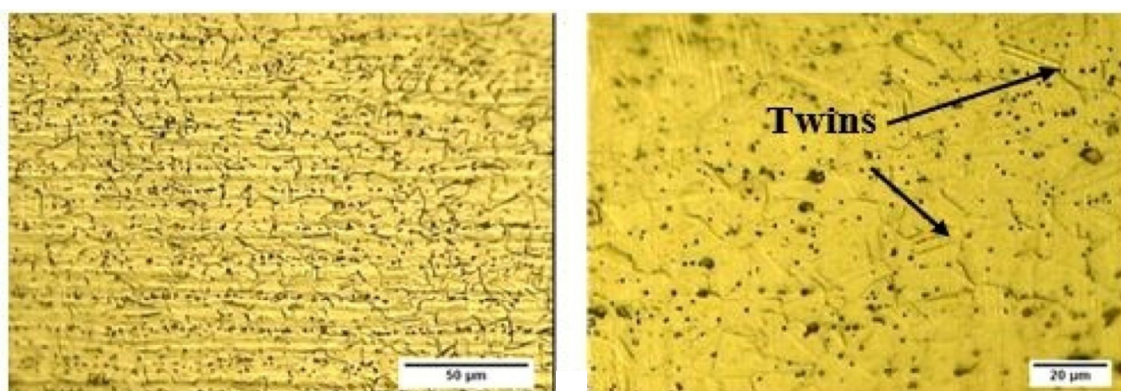
پارامتر	مقدار
سرعت جوشکاری (mm/s)	۸-۵
توان متوسط (W)	۳۵۰-۲۲
پهنای زمانی پالس (ms)	۹-۶
جریان لامپ (A)	۱۸۵-۱۳۰
فرکانس (Hz)	۲۰
فاصله کانونی (mm)	۴
فشاردبی گاز آرگون (Bar)	۲

## 2-1- آزمایش‌های اولیه

با توجه به تعداد پارامترهای جوشکاری لیزر و جهت شناسایی پارامترهای دستگاه لیزر و چگونگی تأثیر این پارامترها بر جوش



شکل 2- تصاویر میکروسکوپی نوری و میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی 430.



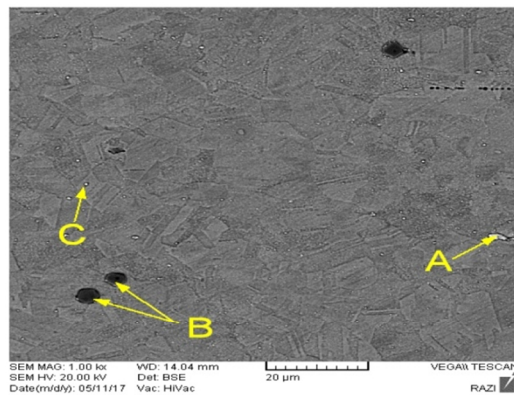
شکل 3- تصویر میکروسکوپی نوری و میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به ریزساختار اینکونل 625.

تشکیل مارتنزیت در طول سریع سرد شدن منطقه ذوب جوشکاری را افزایش می‌دهد [11-20]. در شکل (2) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ریزساختار فولاد زنگ نزن فریتی 430 ارائه شده است.

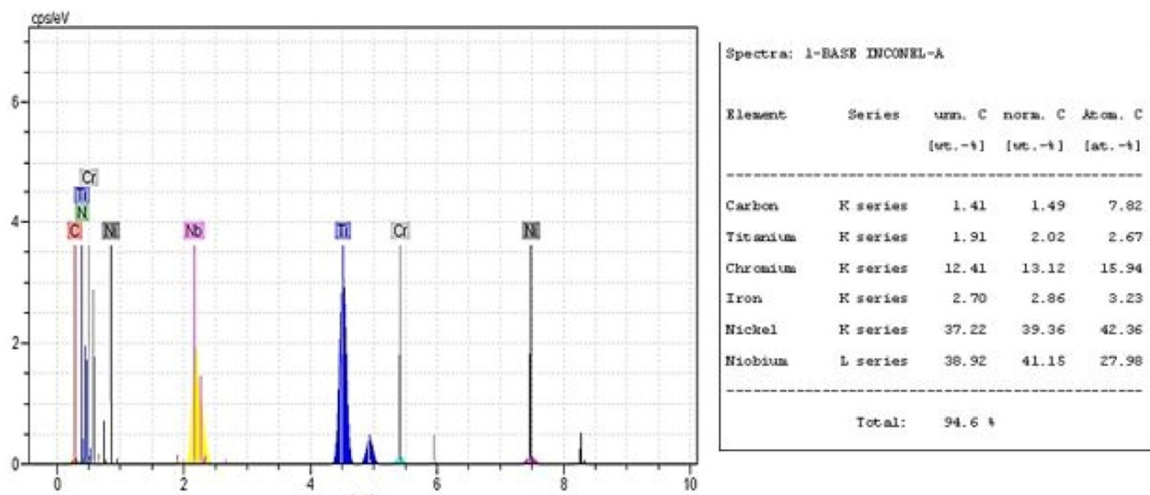
2-3- بررسی ریزساختار فلز پایه سوپر آلیاژ اینکونل 625 در شکل (3) تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار اینکونل

زنگ نزن فریتی 430 نشان داده شده است. این ساختار حاوی فریت با دانه‌های درشت هم محور و رسوبات مرزدانه ای کاربید و نیتريد می باشد [9 و 10].

حضور C و Cr برخی دیگر از عناصر باقی مانده در محلول جامد در فولاد زنگ نزن فریتی 430 به معنای گسترش حلقه گاما ( $\gamma$ ) است. این امر موجب افزایش تشکیل فاز آستنیتی در منطقه متأثر درجه حرارت بالا (A3) که همواره تمایل به



شکل 4- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات A، B و C نمونه با حرارت ورودی بالا.

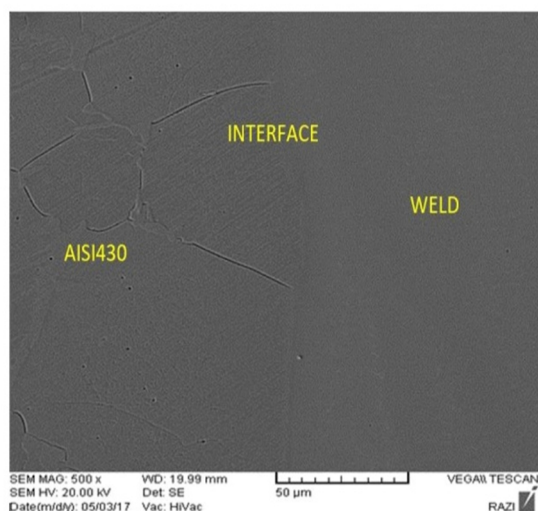


شکل 5- نتایج طیف‌نگاری آنالیز عنصری EDS در نقطه A نمونه با حرارت ورودی بالا.

در شکل (4) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از آلیاژ اینکونل 625 ارائه شده است. ذرات A، B و C در زمینه مشاهده شد. به منظور بررسی دقیق‌تر ذرات توزیع شده در زمینه که آیا کاربید هستند، از ذرات طیف‌نگاری آنالیز عنصری EDS به عمل آمد. دلیل تفاوت در شکل شناسی ذرات از سه نقطه A، B و C طیف‌نگاری EDS انجام گرفت. نتایج آنالیز عنصری طیف‌نگاری EDS در نقطه A (ذرات متوسط) در شکل (5) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با توجه به درصد وزنی عناصر موجود در نقاط A می‌توان نتیجه گرفت این نقاط غنی از عناصر تیتانیوم، مولیبدن، کروم، نیکل، نیوبیوم است. ذرات موجود در زمینه در نقاط A کاربیدهای غنی از عنصر مولیبدن و کاربیدهای  $M_6C$  و کاربید NbC می‌باشند. کروم و نیکل موجود در ترکیب، مربوط به مقدار بالای آن‌ها در زمینه است. علاوه بر این رسوبات، در مرزها و به‌ویژه محل

625 را نشان می‌دهد. ریزساختار، شبیه به ریزساختار معمول سوپر آلیاژ پایه نیکل است. همان‌طور که مشخص است ریزساختار شامل دانه‌های هم‌محور آستنیتی (فاز گاما) است. با انجام عملیات آنیل انحلالی علاوه بر یکنواختی در ترکیب شیمیایی، در اثر وقوع فرآیند تبلور مجدد ساختاری با دانه‌های هم‌محور ایجاد می‌شود. علاوه بر این دوقلوبی‌های ناشی از آنیل به همراه ذرات کاربید پراکنده در سرتاسر ساختار دیده می‌شود. به دلیل جلوگیری از حرکت نابجایی‌ها توسط این دوقلوبی‌ها استحکام ماده تا حدودی افزایش می‌یابد [12-14]. در شکل (3) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ریزساختار فلز پایه اینکونل 625 ارائه شده است و همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ساختار آلیاژ شامل دانه‌های هم‌محور آستنیتی (فاز گاما) و ذرات ریزی است که به‌صورت شبکه‌های نامنظم در زمینه مشاهده می‌شود [12-14].

این فاز به فریت (همراه با تشکیل کاربید) تبدیل می‌شود. با توجه به ترکیب شیمیایی آلیاژ، HAZ در دماهای بالا کاملاً فریتی است. با توجه به عدم حضور رسوبات و آستنیت مرزانه‌ای، دانه‌های فریت به سرعت رشد می‌کنند و HAZ نسبتاً درشت تشکیل می‌شود.



شکل 6- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی با فلز جوش.

در شکل‌های (7 و 8) HAZ در فولاد زنگ نزن 430 مشاهده می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود در نزدیکی خط ذوب دانه‌های فریت کاملاً درشت و مرزانه‌ها شامل لایه پیوسته مارتنزیت می‌باشند که در نتیجه تشکیل آستنیت در دمای بالا و دور از خط ذوب دانه‌ها ریز هستند. با این حال میزان رشد دانه در قسمت‌های مختلف در امتداد ذوب کاملاً متفاوت است. برای بررسی بیشتر ذرات تشکیل شده فصل مشترک و HAZ و فلز جوش طیف نگاری آنالیز عنصری EDS انجام شد که نتایج آن در شکل (7) ارائه شده است. با توجه به نتایج مشخص شد که رسوبات درون‌دانه‌ای شامل کاربیدها، کربونیت‌ریدها و نیت‌ریدها که هنگام سرد شدن تشکیل شده‌اند نیز در شکل مشخص است. ساختار دانه و عرض HAZ نیز در امتداد خط جوش متغیر است. در فرایند جوشکاری لیزر اندازه دانه‌های زیر حوضچه جوش نسبت به دانه‌های روی آن و یا نزدیک به سطح بالا بسیار کوچک‌تر است و HAZ بسیار باریک است. دلیل این است که نفوذ جوش در جوشکاری لیزر عمدتاً توسط

تلاقی آن‌ها فاز یوتکتیک لایه و جوه دارد که این فاز نیز غنی Nb است. ضریب توزیع Nb در آلیاژهای پایه نیکل کمتر از یک است. این عنصر میل زیادی به جدایی به مناطق بین دندریتی دارد. علاوه بر این حضور سایر عناصر آلیاژی قابلیت انحلال این عنصر در نیکل را کاهش می‌دهد [15 و 16].

جدول 4- پارمترهای بهینه دستگاه جهت کسب جوش با عمق نفوذ کامل و عاری از ترک

پارامتر	مقدار
پهنای زمانی ضربان (ms)	۷/۵
سرعت جوشکاری (mm/s)	۶/۷
جریان لامپ (A)	۱۵۷

### 3-3- بررسی ریزساختار فصل مشترک‌ها

در جوشکاری غیرمشابه فصل مشترک‌های بین فلز جوش و فلز پایه نیز می‌تواند تحت تأثیر شرایط جوشکاری، بر خواص اتصال تأثیرگذار باشد؛ بنابراین مشخصه یابی و ارزیابی این نواحی و ارتباط دادن آن با خواص اتصال حائز اهمیت است.

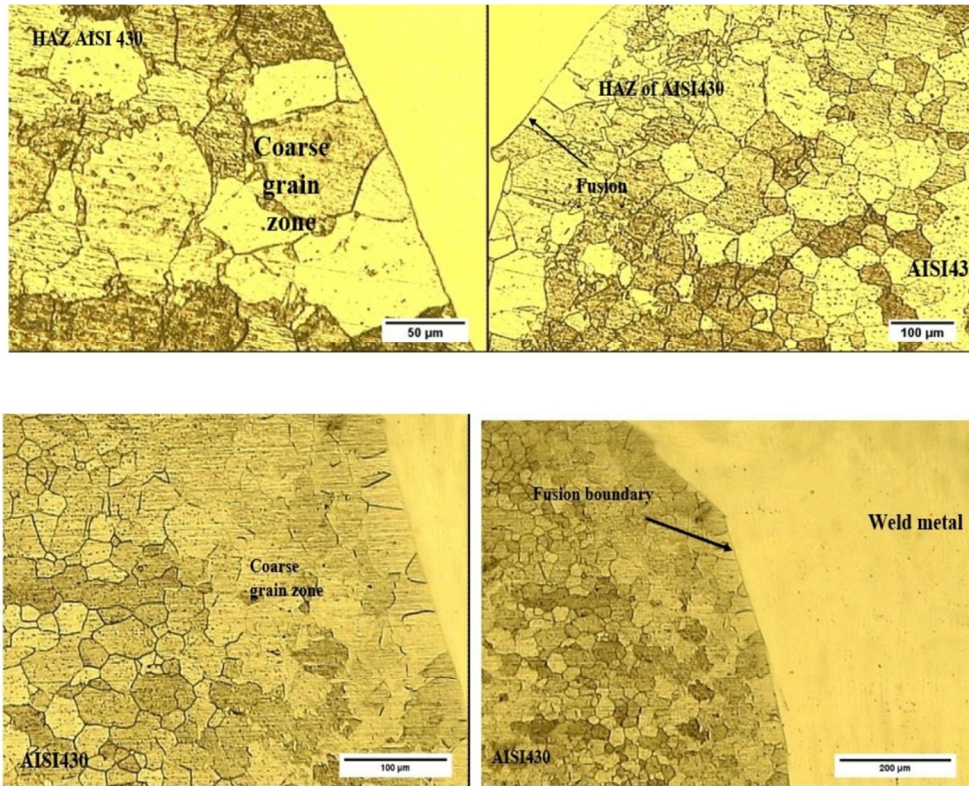
در ادامه بحث با تمرکز بر روی فصل مشترک بین فلز جوش و پایه، به تشریح ریزساختار و مکانیزم‌های مرتبط با آن پرداخته می‌شود.

### 3-3-1- بررسی ریزساختار فصل مشترک فلز پایه فریتی 430 / فلز جوش

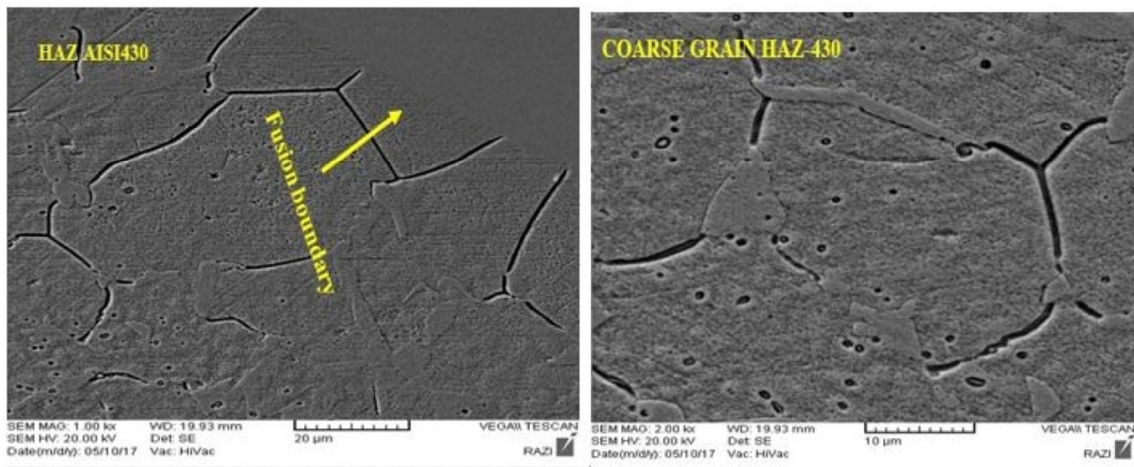
شکل (6) فصل مشترک بین فلز پایه فریتی AISI 430 را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شد، ریزساختار منطقه ذوب ممکن است به‌طور کامل فریتی ورگه‌های بسیار کمی مارتنزیت در مرزهای دانه فریت باشد.

ریزساختار اغلب فولادهای زنگ نزن فریتی شامل مخلوطی از فریت و کاربید (کربونیت‌رید) است. زمانی که این ساختار در منطقه HAZ تا دمای بالا حرارت داده می‌شود. کاربیدها و دیگر رسوب‌ها حل می‌شوند و با وجود حضور رگه‌های مارتنزیتی،





شکل 7- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار منطقه HAZ فلز زنگ نزن فریتی



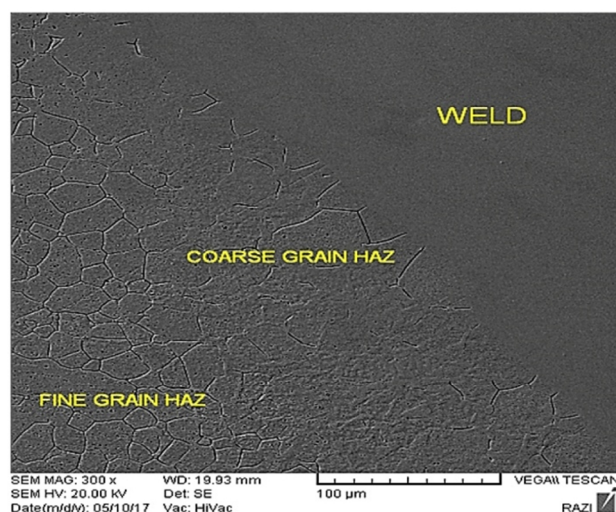
شکل 8- تصویر میکروسکوپی الکترونی از ریزساختار HAZ فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی 430 با فلز جوش (نمونه حرارت ورودی کم).

دما و زمان است.

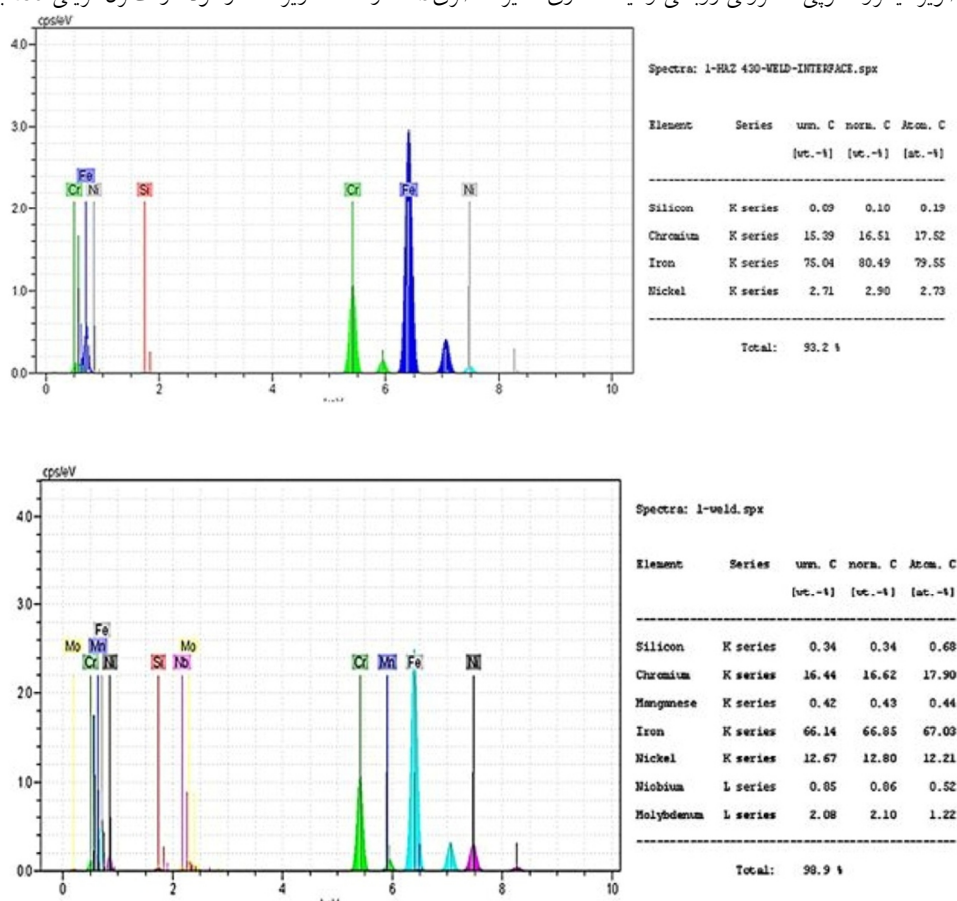
همانطور که در شکل (7) مشاهده می شود که اندازه میانگین دانه و وسعت HAZ در نزدیکی سطح بالا با افزایش حرارت ورودی افزایش می یابد، درحالی که تغییرات در سطوح پایین واضح نیست. نمونه شماره شش دارای بیشترین حرارت ورودی است. به همین دلیل ماکزیمم رشد دانه و عرض HAZ در سطوح بالا را دارد. نمونه شماره یک کمترین حرارت

پرتو لیزر و سرعت گرم و سرد شدن (که زمان بسیار کوتاهی برای رشد دانه وجود دارد) تعیین می شود.

روشن است که سیکل های حرارتی در موقعیت های مختلف، متفاوت هستند و سیکل های حرارتی روی سطح بالایی حوضچه جوش و یا نزدیک به سطح بالایی حوضچه جوش بسیار قوی تر از سطح زیر حوضچه جوش است. همه مطالب فوق بیان کننده این است که رشد دانه به شدت وابسته به روابط



شکل 9- تصویر میکروسکوپی الکترونی روشی و طیف نگاری آنالیز عنصری EDS از HAZ ریزساختار فولاد زنگ‌نزن فریتی 430 با فلز جوش.



شکل 10- طیف نگاری آنالیز عنصری EDS فصل مشترک و HAZ فلز پایه فولاد زنگ‌نزن 430.

به شدت تحت تأثیر حرارت ورودی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد افزایش حرارت ورودی جوشکاری، باعث رشد دانه‌ها در مواد نورد گرم و یا تبلور مجدد و رشد دانه‌ها در موارد کار سرد شده می‌شود که می‌تواند تا حدودی منجر به نرم شدن

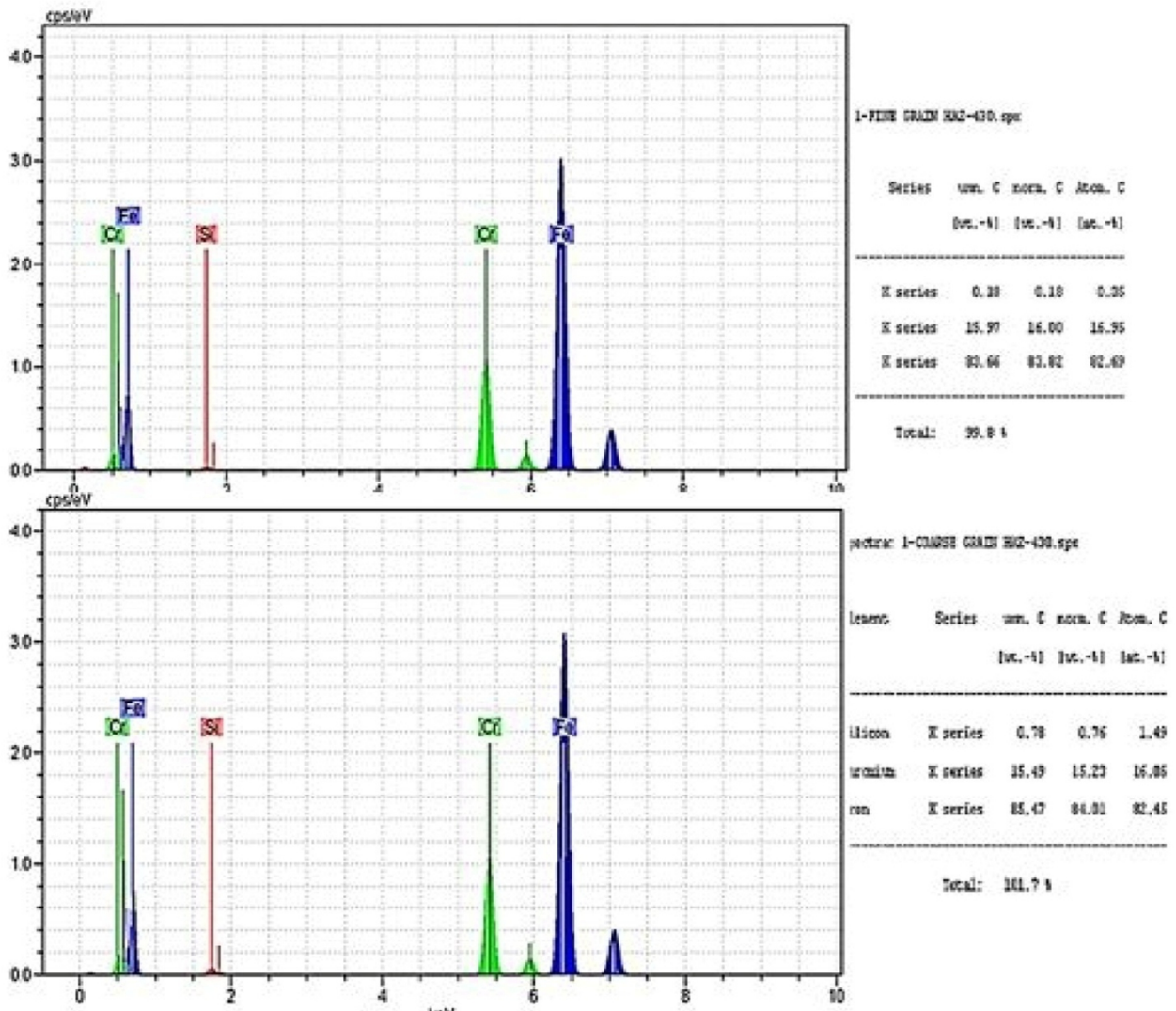
ورودی را دارد. در شکل (8) تصویر میکروسکوپی الکترونی از ریزساختار HAZ فلز پایه مجاور فلز جوش این نمونه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ریزترین دانه‌ها و کمترین عرض HAZ را شامل می‌شود؛ که نشان می‌دهد رشد دانه

### 3-3-2- بررسی ریزساختار فصل مشترک فلز پایه اینکونل 625 با فلز جوش

شکل (12) فصل مشترک فلز پایه اینکونل 625 و فلز جوش را نشان می‌دهد. با دقت در این اشکال به‌وضوح مشخص است که منطقه متأثر از حرارت مقدار آستنیت کمتری نسبت به فلز پایه و فلز جوش دارد.

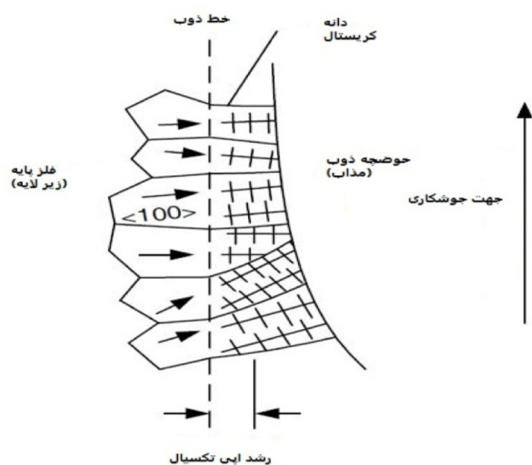
برای روشن شدن این موضوع به بررسی رشد اپی تکسیال در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه پرداخته می‌شود. در حین جوشکاری بدون استفاده از فلز پرکننده، اتم‌های فلز مذاب تغییر مکان می‌دهند و بدون تغییر در جهت‌های بلوری روی دانه‌های زمینه قرار می‌گیرند.

منطقه HAZ گردد. در این حالت اندازه دانه‌ها به‌طور مشخصی بزرگ‌تر از فلز پایه خواهد بود. رشد دانه‌ها در HAZ منجر به اثرات مخربی بر روی خواص کششی اتصال به وجود آمده می‌شود. در شکل (9) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و طیف نگاری آنالیز عنصری EDS HAZ فولاد زنگ‌نزن 430 نشان داده شده است. در شکل های (10 و 11) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی منطقه طیف نگاری آنالیز عنصری EDS منطقه رشد HAZ شامل ریز دانه و درشت دانه نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده ترکیب شیمیایی این نقاط مشابه بوده و تنها تفاوت آنها در درصد عناصر موجود بوده است.

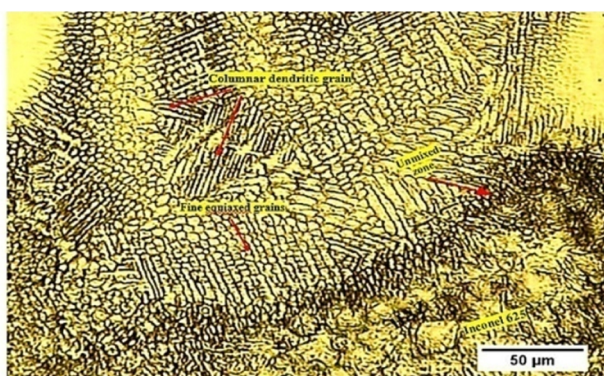


شکل 11- طیف نگاری آنالیز عنصری EDS مناطق دانه ریز و دانه درشت در منطقه HAZ فلز پایه فولاد زنگ نزن 430.

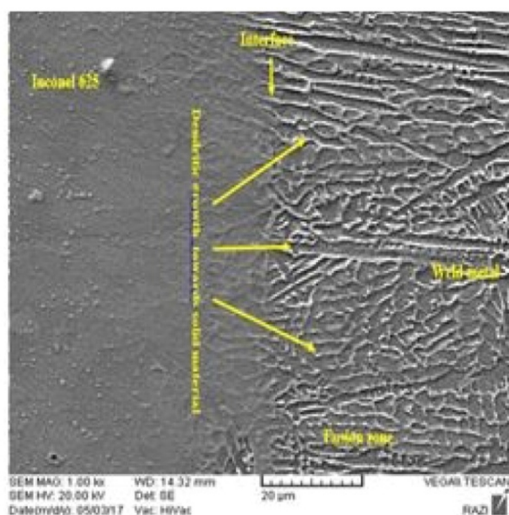
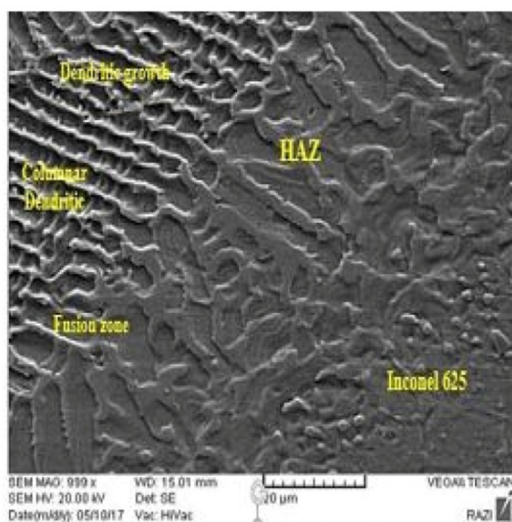
این فرایند به رشد اپی تکسیال معروف است. (شکل 13) در این رشد بدنه اصلی دندریتهای ستونی در جهات خاصی رشد می کنند [6-20]. همانطور که در شکل نمایش داده شده به سبب رشد اپی تکسیال مرزخانهها در ناحیه تحت تأثیر حرارت مرزخانهها در ناحیه جوش متصل شده اند، در شکل (14) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختار فصل مشترک فلز پایه اینکونل 625 و فلز جوش و شکل (15) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی HAZ ارائه شده است.



شکل 13- رشد اپی تکسیال در نزدیکی منطقه ذوب [8].

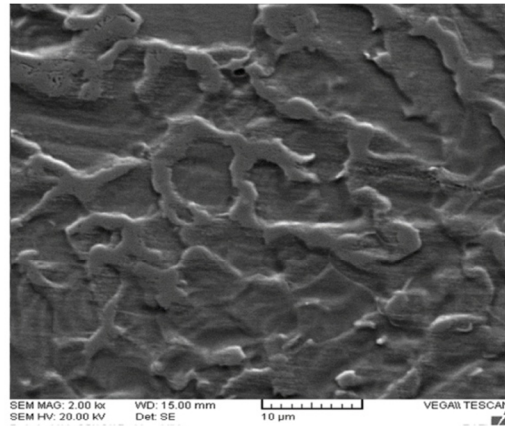


شکل 12- تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فصل مشترک فلز پایه اینکونل 625 با فلز جوش.

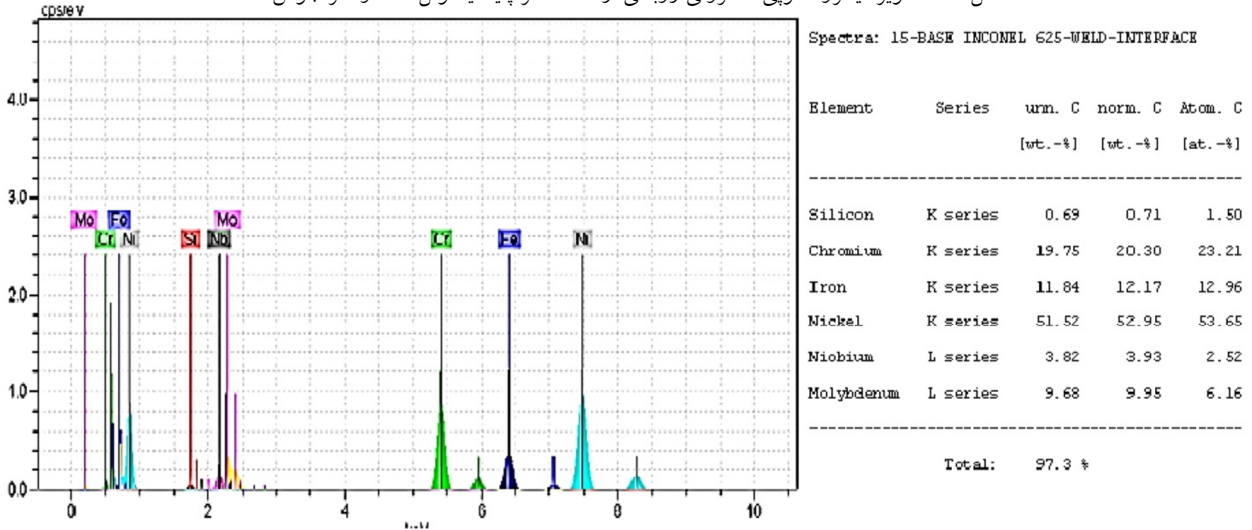


شکل 14- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختار فصل مشترک فلز پایه اینکونل 625 با فلز جوش.

همانطور که در شکل مشخص شده رشد اپی تکسیال در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه انجام شده و تمامی دندریتهایی که رشد آنها از یک دانه است در یک جهت قرار دارند که این جهت از یک دانه تا دانه مجاور آن دانه متفاوت است. در شکل یک منطقه مخلوط نشده باریک در امتداد خط ذوب تشکیل شده که عمل اختلاط به نیکل بهتر انجام شده است. در واقع با وجود اختلاف در ترکیب شیمیایی و محدودههای دمای ذوب دو فلز پایه، منطقه مخلوط نشده ناچیزی به وجود آمد. لذا باید در نظر داشت که عدم تشکیل قابل توجه نواحی مخلوط نشده به عواملی از جمله طرح اتصال، مقدار حرارت ورودی و سرعت سرد شدن ممکن است بستگی داشته باشد. در شکل (16) نتایج طیف نگاری آنالیز عنصری EDS فصل مشترک HAZ و فلز پایه ارائه شده است. برای بررسی بیشتر آنالیز خطی از فلز جوش و فلز پایه اینکونل 625 انجام گرفت.



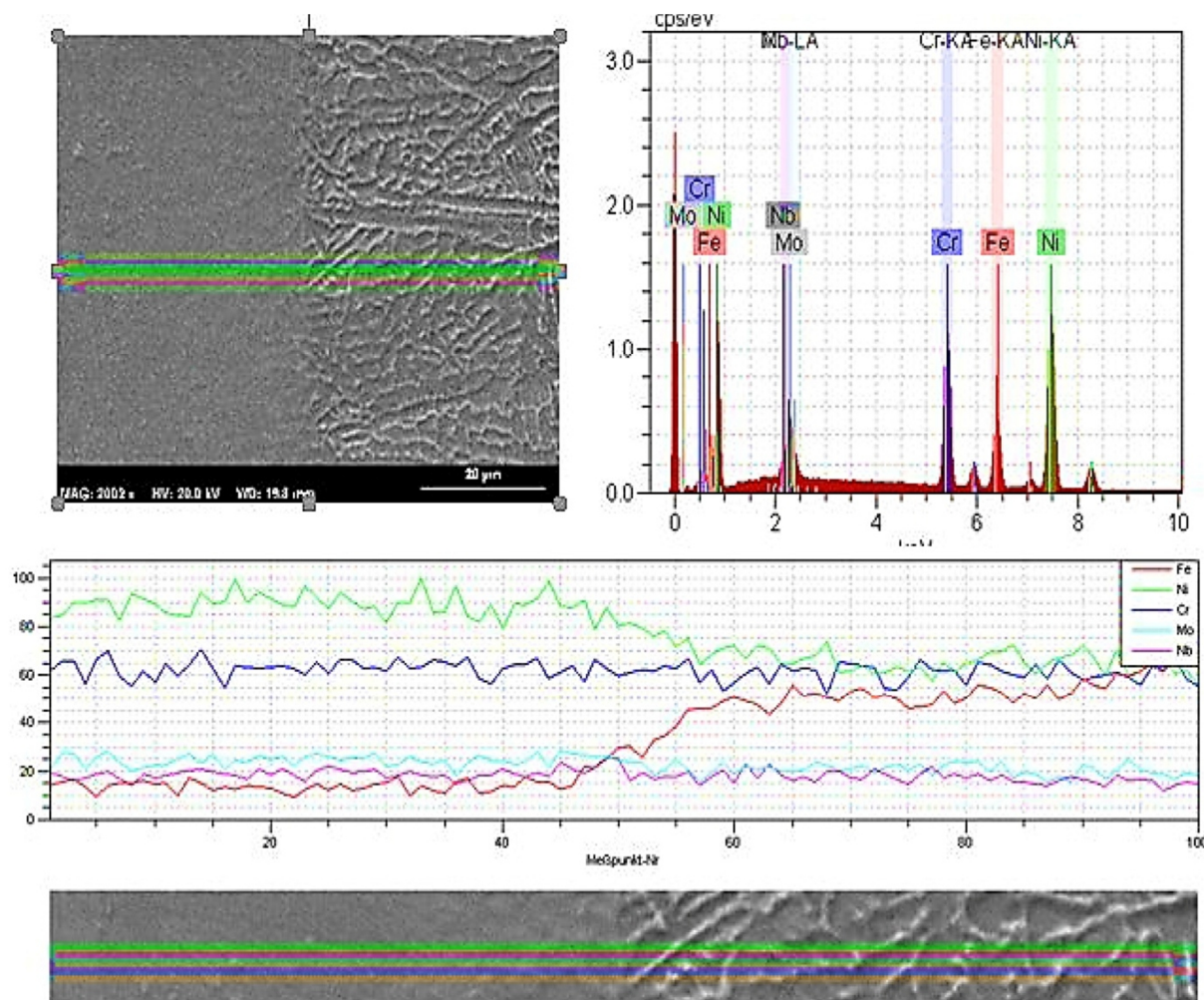
شکل 15- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از HAZ فلز پایه اینکونل 625 و فلز جوش .



شکل 16- طیف نگاری آنالیز عنصری EDS فلز پایه اینکونل 625، جوش و فصل مشترک.

فصل مشترک و فلز پایه ذرات ریزی در نواحی بین دندردیتی مشاهده شد. به منظور آشکار شدن بیشتر ذراتی که با طیف‌نگاری EDS قابلیت شناسایی نبود، از زمینه نقشه عنصری گرفته شد. برای آشکار کردن کاربیدهای  $M_{23}C_6$  غنی از کروم، از زمینه نقشه عنصری کروم و مولیبدن گرفته شد. نقشه عنصری در حقیقت همان آنالیز تصویری است که در مبحث متالوگرافی برای تعیین درصد فازها، عناصر محلول جامد مورد بررسی قرار می‌گیرد. درصد فراوانی یک عنصر در یک تصویر را نقشه عنصری گفته می‌شود که به منظور تفکیک عناصر از همدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که از زمینه نقشه عنصری گرفته می‌شود در هر نقطه از زمینه که عناصر وجود داشته باشد، با کنتراست شدیدتری دیده می‌شود. در شکل (19) تصویر نقشه عنصری، عناصر آهن، نیکل، کروم،

در شکل‌های (17 و 18) نتایج آنالیز طیف‌نگاری EDS به صورت خطی ارائه شده است. چنین استنباط می‌شود مقداری از عنصر Fe به منطقه ذوب فولاد زنگ نزن فریتی 430 مهاجرت کرده در حالی که حرکت Mo و Nb از سمت فلز پایه اینکونل 625 به منطقه ذوب رانده شده است. فازهای بسیار کوچکی در منطقه ذوب و HAZ فلز پایه اینکونل 625 که غنی از عناصر Cr و Fe و Ni دیده می‌شود. رسوبات سفیدرنگ کوچکی در بین بازوهای دندردیتی مشاهده می‌شود از عناصر Nb، Cr و Mo غنی شده است. از آنالیز خطی مشاهده شده می‌توان این چنین استنباط کرد که حرکت عنصری که در بین دانه‌ها برای تشکیل رسوبات ثانویه به وجود می‌آید. در منطقه فلز جوش مشاهده نمی‌شود [7-28]. در بررسی‌های بیشتر توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی در ریزساختار HAZ، فلز جوش،



شکل 17- طیف نگاری آنالیز عنصری خطی فلز جوش و اینکونل 625 (نمونه شماره 15).

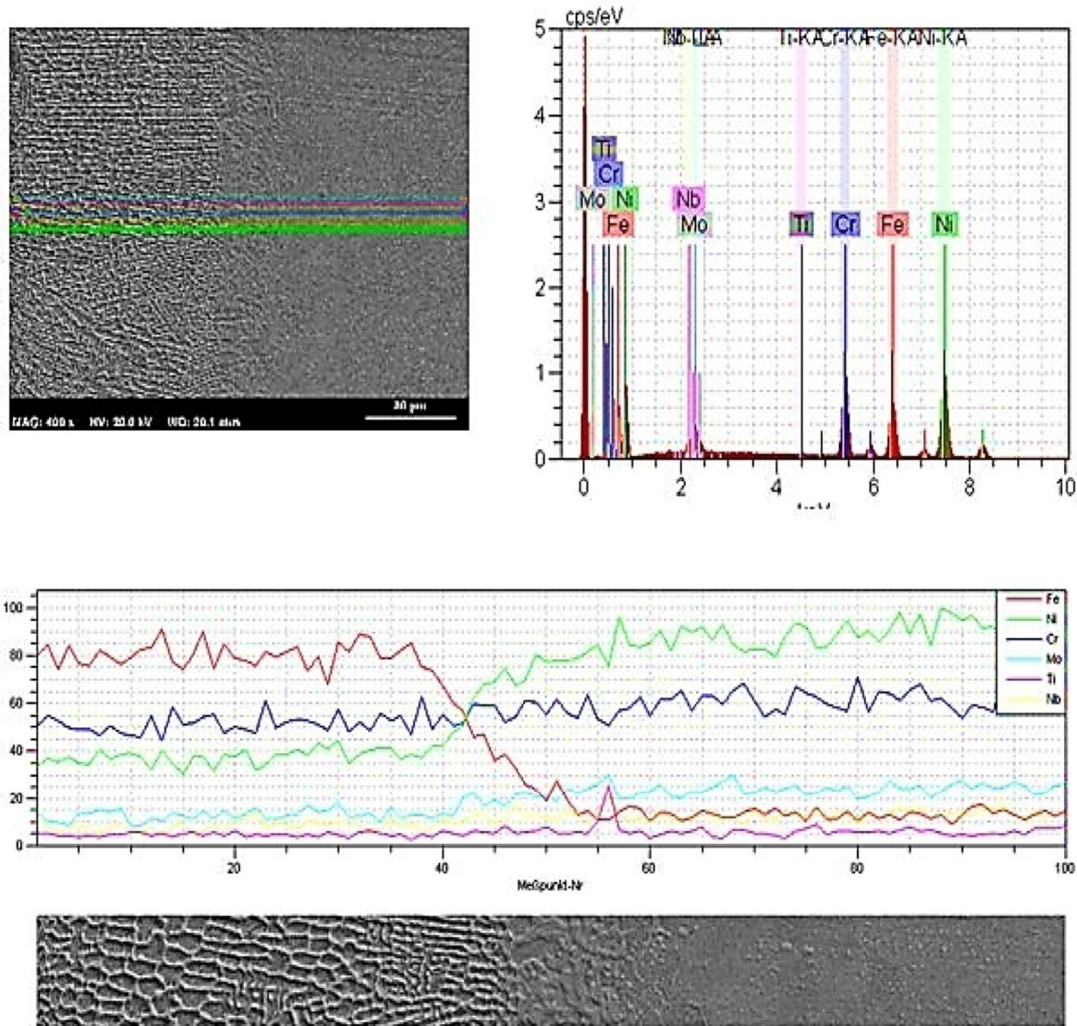
همانطور که مشاهده می شود، منحنی مربوط به فلز پایه اینکونل 625 نسبت به فلز جوش و فلز پایه فریتی 430 به سمت بالا و سمت چپ منتقل شده است؛ به عبارت دیگر، فلز پایه اینکونل پتانسیل خوردگی بالاتر (نجیب تر) و جریان خوردگی کمتر نشان می دهد. این امر نشان می دهد این فلز پایه مقاومت به خوردگی بهتری در محیط مذکور دارد. با مشاهده شکل می توان گفت که فلز پایه اینکونل 625 دارای بالاترین مقاومت به خوردگی می باشد. فلز جوش و فولاد فریتی 430 به ترتیب در رتبه های بعدی قرار دارند. به منظور مقایسه رفتار خوردگی نمونه شیب تافل کاتدی ( $b_c$ ) و شیب تافل آندی ( $b_a$ ) جهت به دست آوردن جریان و پتانسیل خوردگی رسم شدند. در جدول (5) جریان ( $I_{corr}$ ) و پتانسیل خوردگی ( $E_{corr}$ ) محاسبه شده آورده شده است. کاهش مقاومت به خوردگی فلز جوش نسبت به اینکونل 625 کاهش

تیتانیوم، مولیبدن و نیوبیوم در ریزساختار HAZ، فلز جوش، فصل مشترک و فلز پایه ارائه شده است.

همانطور که مشاهده می شود در زمینه غنی از عناصر مولیبدن و کروم و مولیبدن و نیوبیوم است لذا ذرات ریز می توانند کاربیدهای  $M_6C$  و  $NbC$  است. کاربیدها در فلز جوش بسیار ریزتر از فلز پایه است.

### 3-4- بررسی رفتار خوردگی

در این بخش رفتار خوردگی مقطع جوش نمونه شماره 15 که نمونه بهینه جوشکاری شده می باشد، مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور بررسی رفتار خوردگی از آزمون پلاریزاسیون تافلی استفاده شده است. در شکل (20) منحنی پلاریزاسیون مربوط به فلزات پایه و فلز جوش در محلول 3/5 درصد وزنی کلرید سدیم و در دمای محیط به منظور مقایسه ارائه شده است.

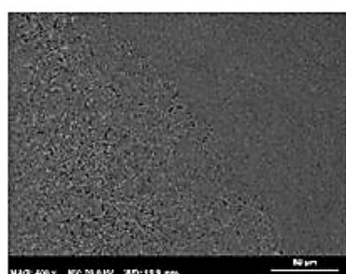
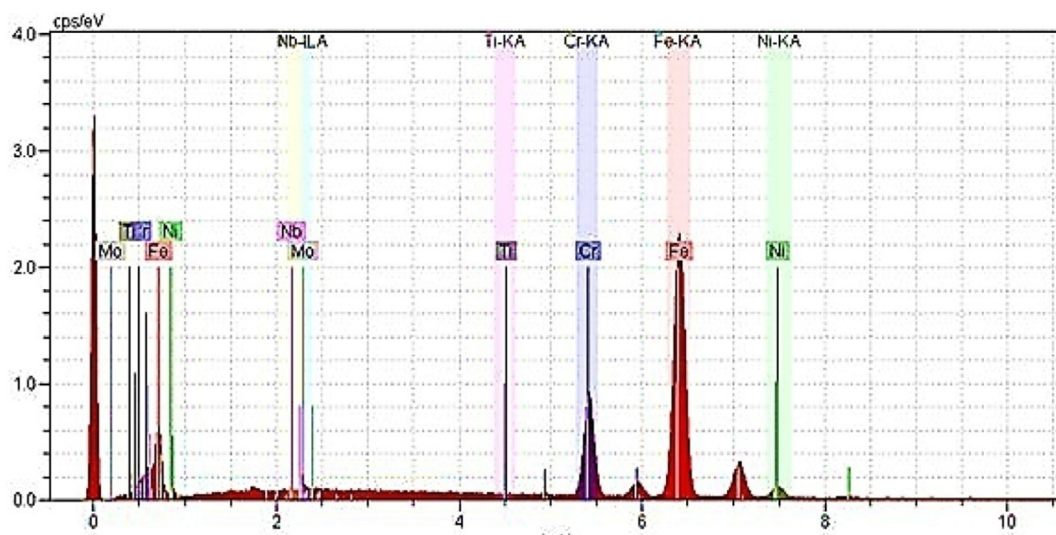


شکل 18- طیف نگاری آنالیز عنصری خطی فلز جوش و اینکونل 625 (نمونه شماره 6).

می کند. گزارش شده که مولیبدن با تشکیل مولیبدات از خوردگی جلوگیری می کند. آنیون های مولیبدن در محل حفرات جذب می شود و با تغییر لایه روئین موجب غیر فعال شدن حفره ها می شود. همان طور که در بالا شرح داده شد، تفاوت عمده دو فلز پایه مورد استفاده در این تحقیق از لحاظ ترکیب شیمیایی، تفاوت در مقدار کروم و مولیبدن بود. فلز پایه اینکونل 625 دارای حدود 4 درصد کروم بیشتر در مقایسه با فلز پایه فریتی 430 است. این مقدار کروم بیشتر باعث بهبود مقاومت به خوردگی عمومی این فلز پایه می شود. عنصر مولیبدن در منطقه جوش می تواند با کلر در محیط ترکیب شده و تشکیل یک فیلم نمک کلرید سدیم می دهد که خوردگی حفره ای در سطح فلز جوش مهار می شود [8].

مقاومت به خوردگی فلز جوش نسبت به اینکونل 625 بخاطر جدایش ناشی از مولیبدن، نایوبیوم و کروم به مناطق بین دندریتی می باشد که این امر موجب حساس شدن مناطق اطراف مرزها از این عناصر شده و موجب تشدید جهات خوردگی در این نواحی و لذا حساس شدن مرز دانه می گردد [12-14].

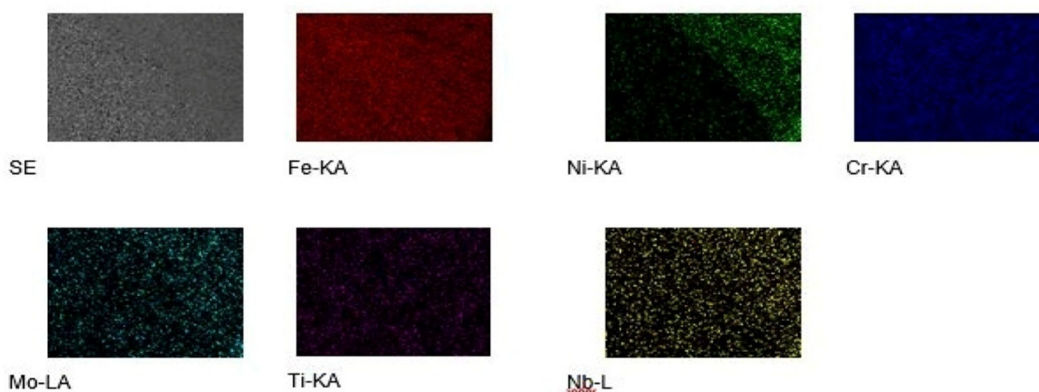
محققین بر این باورند که مولیبدن در فولاد های زنگ نزن با محیط کلریدی بر هم کنش دارد و یک لایه سطحی ایجاد می کند، این لایه سطحی از تخریب لایه روئین به وسیله یون های تخریب گر Cl<sup>-</sup> جلوگیری می کند [15 و 29]. از سوی دیگر، باور تعدادی از محققان بر آن است که مولیبدن به غیرفعال شدن سطح به عبارتی افزایش مقاومت لایه روئین کمک



SEM image



Map data



شکل 19- تصویر زمینه HAZ، فصل مشترک، فلز جوش، فلز پایه اینکونل 625 با نقشه عناصر Fe، Ni، Cr، Mo، Ti.

استحکام بالای این آلیاژ موجب شده این آلیاژ کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف به‌خصوص صنایع نفت و گاز پیدا کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از رفتار خوردگی منطقه جوش اتصال غیرمشابه مورد بحث در این پژوهش اگر جوشکاری با حرارت ورودی بهینه انجام شود، فلز جوش مقاومت به خوردگی خوبی را از خود نشان خواهد داد (شکل 21).

به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان بیان داشت که با توجه به شکل ارائه شده اینکونل 625 در مقایسه با فولاد زنگ نزن فریتی 430 مقاومت به خوردگی عمومی به‌ویژه مقاومت به خوردگی موضعی بسیار بهتری نشان می‌دهد که این بهبود مقاومت به خوردگی به خاطر وجود ترکیب شیمیایی آن به‌ویژه عناصر کروم و مولیبدن است. این تفاوت به خوردگی عالی به همراه



جدول 5- نتایج حاصل از پلاریزاسیون Tafel نمونه جوشکاری شده و فلزات پایه.

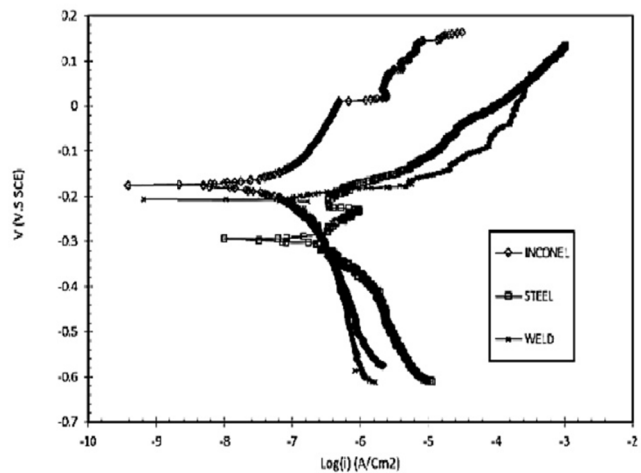
نمونه	$I_{Corr}$	$E_{Corr}$	$b_a$	$b_c$
Inconel 625	$5.8854 \times 10^{-8}$	0.18418	0.1841	0.156
Weld	$1.82064 \times 10^{-7}$	0.26719	0.0718	0.2573
AISI430	$2.288048 \times 10^{-7}$	0.275238	0.598	0.1358

#### 4- نتیجه گیری

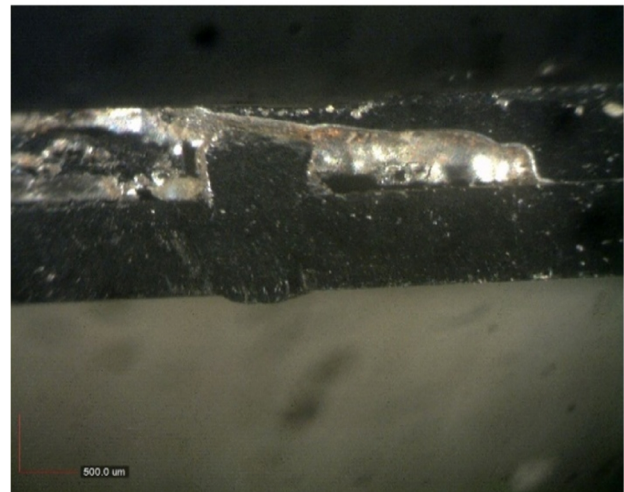
- رشد دانه های فلز جوش در نمونه های لیزر تماماً به صورت ساختار دندردیتی بسیار ظریف است که در جهات مختلف بصورت رقابتی رشد کرده اند.
- در فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی و فلز جوش رشد اپی تکسیال مشاهده شد و در ناحیه متأثر از حرارت اینکونل، هیچ تغییری در ابعاد دانه ها مشاهده نشد.
- کاربیدهای تشکیل شده در فلز جوش بیشتر به صورت کاربیدهای غنی از نیوبوم هستند. انجام دندردیتی فلز جوش با تجمع عناصر نیکل و آهن در هسته دندردیت و پس زده شدن عناصری مانند مولیبدن و نیوبوم به نواحی بین دندردیتی همراه است.
- عرض ناحیه متأثر از حرارت در نمونه بهینه بسیار کم بود و تنها رسوبات ریزی مشاهده شد. در صورتی که در نمونه با حرارت ورودی بالا منطقه متأثر حرارت پهنای بیشتری داشت و رشد دانه ها در این ناحیه مشاهده شد.
- مقاومت در برابر خوردگی از سمت فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی 430 به سمت اینکونل 625 بیشتر می شود.

#### منابع

- [1] M.J. Donachie, S.J. Donachie, "Superalloys A Technical Guide", 2nd Edition, ASM International, 2002.
- [2] C.T.Sims and, W.C.Hugel ed," The Superalloys Wiley", 1972.
- [3] D.Charre, The Microdtructure of Superalloys, First Edition ,Gordon and Breach Since Publisher, France, Amsterdam,1989
- [4] Shakil,M. Amad,M. Hasan,B.A. Iqbal,M, "Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel 625 and stain less steel 304L", Vacuum, Vol.110, pp.121-126, 2014.



شکل 20- مقایسه نمودار پلاریزاسیون Tafel نمونه های اتصال و فلزات پایه.



شکل 21- تصویر میکروسکوپی نوری از نمونه بهینه جوشکاری شده بعد از تست خوردگی.

این امر هدف یک جوشکاری موفق است. اصولاً در جوشکاری هدف آن است که با کنترل پارامترهای مختلف، جوشی حاصل شود که خواص آن، از جمله خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی بهتر یا برابر فلزات پایه باشد [15,12,8 و 29].

- microstruct .anal .DOI 10.1007/s13632-015- 02008 - 2.2015
- [19]. K.gokul Kumar. K.devendranath Ramkumar. N,Arivazhagn , "Characterization of metallurgical and mechanical properties on the multi-pass welding of Inconel 625 and AISI316L", journal of mechanical science and technology, Vol. 29, pp. 1039-1047, 2015.
- [20]. N.Sheik Thavudu, S.Kamatchisankaran S.Roseline Dr.S.Guharaja "An Experimental Investigation and Evaluation of SS430 Using Nd- YAG Laser Welding Process" Vol. 5, 2016
- [21]. Nikhil Kumar,n, ManidiptoMukherjee, AsishBandyopadhyay" Comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels" , Optics & LaserTechnology Vol. 88 , PP. 24–39, 2017
- [22]. M .M . A. Khana, L. Romolia, M. Fiaschib, G. Dinia, F. Sarri" Laser beam welding of dissimilar stainless steels in a fillet joint configuration", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212 , PP. 856–867, 2012
- [23]. U. Caligulu, M. Turkmen , A. Ozer , M. Taskin, and M. Ozer," The Fatigue Strength of AISI 430—304 Stainless Steels Welded by CO2 Laser Beam Welding" Metallofiz. Noveishie Tekhnol,Vol. 6, PP. 839—852, 2015
- [24]. M.M.A. Khan n, L. Romoli, G. Dini," Laser beam welding of dissimilar ferritic/martensitic stainless steels in a butt joint configuration", Optics & Laser Technology , Vol. 49 , PP.125–136, 2013
- [25]. S. Zhou, D. Chai, Jingling Yu, G. Ma, Dongjiang Wu," Microstructure characteristic and Mechanical Property of pulsed laser lap-welded nickel-based superalloy and stainless steel", Journal of Manufacturing Processes Vol. 25, pp.220 –226 , 2017
- [26]. Malek Ghaini,F,Hamed. M.J,Torkamany .M,J,Shabbaghzadeh,"weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd:YAG laser welding ",Scripta Materialia,Vol.56,pp. 955-958,2007
- [27].G.D.Janaki Ram, A.Venugopal Reddy, K.Prasad Rao," Microstructur and tensile propertis of Inconel 718 pulsed Nd-YAG laser welding ", journal of matrials Porocessing Technology, No. 167, pp. 73-82, 2005
- [28]. Bina.m, shamanian.m ,jamali.m, sabet.h," Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel", International Journal of Advanced Manufacturing Technology · December, Vol. 75, pp. 1371–1379 , 2014
- [29].H. Shah Hosseini, M. Shamanian &A. Kermanpur, "Characterization ofMicrostructures and MechanicalProperties ofInconel 617/310 Stainless Steel DissimilarWelds", Materials Characterization, Vol. 62, pp. 425-431, 2011.
- [30]. M.M.A. Khan n, L. Romoli, G. Dini," Laser beam welding of dissimilar ferritic/martensitic stainless steels in a butt joint configuration", Optics & Laser Technology , Vol. 49 , PP.125–136, 2013
- [31]. S. Zhou, D. Chai, Jingling Yu, G. Ma, Dongjiang Wu," Microstructure characteristic and Mechanical
- [5] Kou S." Welding metallurgy. Wiley",. pp. 383–6 , 1987
- [6] Folkhard E." Welding metallurgy of stainless steels". New York,Spring-Verlag Wien; 1988
- [7] Devendranath Ramkumar,K . Oza,S. Arivazhagan,N " Investigations on the structure Property relationships of electron beam welded Inconel 625 and UNS 32205" , Materials and Design, Vol.68, pp.158-166, 2015.
- [8] Li,Gang . Hang,J . W,Yixiong , " An investigation on microstructure and properties dissimilar welded Inconel 625 and SUS 304 using high – power CO2 Laser", int j adv Manuf Technol, Vol.76, pp.1203-1214, 2015.
- [9]. John C. Lippold and Damian J .Kotecki., Welding Metallurgy and weldability of Stainless Steels.,published simultaneously in Canada,2005
- [10]. Lokesh Kumar G, Karthikeyan.P, Narasimma Raj.C, Prasanna.B, George Oliver" Microstructure and Mechanical Properties of ass (304)-fss (430) Dissimilar joints in smaw & gtaw process" International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, ,Vol. 6, pp. 367-378, 2015
- [11].M.o.h. amuda , S. Mridha,"Microstructural features of aisi 430 ferritic stainless steel (fss) weld produced under varying process parameters"Department of Manufacturing and Materials engineeringInternational journal of Mechanical and materials engineering (ijmme), Vol. 4, pp. 160-166, 2009.
- [12]. Ramezani H, Akbari Musavi S A A , "Characterization of microstructural and mechanical properties of Inconel 625/A517 high strength quenched and tempered steel dissimilar welds"Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, pp.331-336, 2015
- [13]. Ming ,pang , Gang Yu,Heng.hai wang, Cai-Yan Zheng," Microstructure Study of Laser Welding Nickel-Based Superahhoy K418", Jornal of Materials Porocessing Technology ,Vol.207, pp.271-275, 2008
- [14].G.D.Janaki Ram, A.Venugopal Reddy, K.Prasad Rao," Microstructur and tensile propertis of Inconel 718 pulsed Nd-YAG laser welding ", journal of matrials Porocessing Technology, No. 167, pp. 73-82, 2005
- [15].H.Shah Hosseini, M.Shamanian, A.Kermanpur"Microstructural and weldability analysis of Inconel617/AISI 310 stainless steel dissimilar welds", Vol. 144, Pages 18-24, August 2016
- [16].GuangyiMaabDongjiangWuabFangyongNiuabHelin Zou" Microstructure evolution and mechanical property of pulsed laser welded Ni-based superalloy" Vol . 72, Pages 39-46, September 2015,
- [17] Lokesh Kumar G, Karthikeyan.P, Narasimma Raj.C, Prasanna.B, George Oliver" Microstructure and Mechanical Properties of ass (304)-fss (430) Dissimilar joints in smaw & gtaw process" International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, ,Vol.6,pp367-378,2015
- [18] . K.Devendraneth Ramkumar,Aditya Chandrasekhar,N.Arivazhagan" Investigations on Structure – property Relation ships of Inconel 718 and AISI430 Dissimilar Weld ments "Metalloger .

[32].Pollard , B.” Effect of titanium on the ductility of 26% chromium, Low in titanium ferritic stainless steel ,Metals Technology,Vol. 1, pp. 31, 1974

Property of pulsed laser lap-welded nickel-based superalloy and stainless steel”, Journal of Manufacturing Processes Vol. 25, pp.220 –226 , 2017.