نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره2، پاییز و زمستان1398، صفحه 121-103

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

محمد عمادی[1]، حسین مستعان [*2]، مهدی رفیعی[1]

1- مرکزتحقیقات موادپیشرفته، دانشکده مهندسی مواد،واحد نجف آباد، دانشگاه آزاداسلامی، نجف آباد، ایران

2-گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه 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 لیزرNd:YAG ضربانی با توان متوسط 700 وات به‌صورت اتصال لبه روی‌هم مورد بررسی قرار گرفت.فولادهای زنگ نزن آستنیتی نسبت به فولادهای فریتی گران قیمت‌تر است و لذا با توجه به اینکه فولادهای زنگ نزن فریتی دارای خواص مغناطیسی هستند و قیمت بسیار کمتری دارند و اگر درجایی 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 اپی‌تکسیال مشاهده شد و در ناحیه متأثر از حرارت اینکونل 625، هیچ تغییری در ابعاد دانه‌ها 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 لیزرNd:YAG.

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

M. Emadi[1], H. Mostaan[2], M. Rafiei[1]

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

Abstract
Dissimilar weld joints between stainless steels and nickel based super alloys are extensively used in petrochemical, gas and oil applications. These joints jave 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 microstructuresare formed in the weld metal which isgrown 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 potantiodynamic 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

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 می‌گیرند. 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، هسته‌ای، نیروگاه‌های تولید برق و تجهیزات پزشکی به کار گرفته می‌شوند. بررسی‌ها 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[1و2].

اینکونل 625 یک سوپرآلیاژ پایه نیکل است و وجود مقادیر قابل توجهی از عناصری چوم کروم، مولیبدن و نیوبیوم در ترکیب آن، خواص ممتاز بی‌نظیری 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 نیروگاه‌های گازی، بخار و سیکل ترکیبی، صنایع نفت، پتروشیمی و صنایع هسته ای شده است[3و4].

فولادهای زنگ نزن فریتی دارای مقاومت به خوردگی خوب و خواص مغناطیسی نرم است که در کاربردهایی که نیاز به جوشکاری ندارند از بیشترین استفاده برخوردار می باشند. دراین میان فولاد زنگ نزن فریتی 430به علت دارا بودن خواص مغناطیسی بسیار نرم و قابیلت ماشینکاری عالی در هسته پیستون های مغناطیسی شیرهای سولونوئیدی که در محیط های شیمیایی استفاده می شوند کاربرد فراوان دارد. مقاومت مطلوب در برابر ترک‌های ناشی از خوردگی تنشی(SCC)، خوردگی حفره‌ای، خوردگی شیاری (به‌خصوص در محیط‌های کلراید)، از خواص مهم این آلیاژها می‌باشد. ازاین‌رو فولادهای زنگ نزن در کاربردهایی که مقاومت در برابر خوردگی، خواص مکانیکی (استحکام، چقرمگی و انعطاف پذیری)، از ملزومات اصلی شرایط کاری است، استفاده می‌شوند. محدوده دمایی کاربرد فولادهای زنگ نزن فریتی، به دلیل قابلیت تشکیل فازهای ترد کمتر از°C 400است. ازنظرمتالورژیکی، فلز جوش این آلیاژها، غالباً فریتی می‌باشد، اگرچه تحت شرایط خاص، مارتنزیت نیزمی‌تواند حضورداشته باشند، ضمن آنکه رسوب کاربیدها و نیتریدها نیز اتفاق می‌افتد. اصلی‌ترین جنبه جوش‌پذیری فولادهای زنگ‌نزن فریتی، حفظ چقرمگی و انعطاف پذیری کافی در شرایط جوش داده‌شده می‌باشند [5و6].

امروزه عمدتاً از روش جوشکاری با قوسی الکترود 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

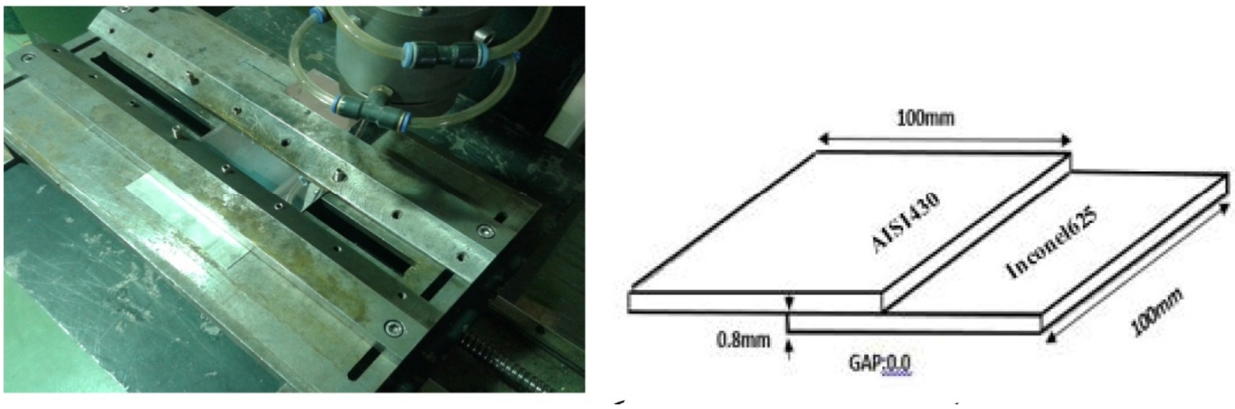
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

نیاز به استفاده از فلـز پـرکنـنده را به همـراه دارد، موجب ایجاد معایبی همچون ترک هیدروژنی، سوختگی کناره جوش، آخال‌های سرباره، ذوب ناقص و تخلل در محل اتصال می شود که موجب عدم ایجاد استحکام و سایر خواص مورد نظر در محل اتصال می گردد. اما با استفاده از جوشکاری لیزری تمامی معایب فوق تا حد قابل قبولی مرتفع شده اند. 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[7و8]. با بررسی مراجع ملاحظه شد که تاکنون تحقیقات قابل توجهی درباره اتصال غیرمشابه سوپرآلیاژ اینکونل 625به فولاد زنگ نزن فریتی 430 در دسترس نمی باشد.

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 Nbدر منطقه متأثر حرارت فلز پایه 718 بوجود آمد. فازهای لاوه 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 هردو نوع جوش ایجادشده 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 ایجادشده با فلز پرکننده ERNiCrMo-4 سختی بهتری نسبت به فلز پایه فولاد فریتی 430 داشته است.

بیش‌تر مطالعات انجام شده روی اینکونل 625 بیشتر در زمینه‌هایی غیر از جوشکاری و اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی و دوفازی می باشد[3و4]. در پژوهشی که توسط اکبری و همکارانش [12] انجام گرفت، جوشکاری غیرمشابه سوپرآلیاژ پایه نیکل 625 به فولاد استحکام بالای کوئنچ تمپرشده A 517 با استفاده از لیزر پالسی موردبررسی قرار دادند. با بررسی‌ها انجام شده نشان‌دادند که ساختار فلز جوش به صورت دندریتی ظریف است که رسوبات کاربید نیوبیوم و فاز یوتکتیک لاوه در ریزساختار آن به‌وفور پیدا کردند. با نتایج آنالیز عنصری نشان دادند که جدایش مولیبدن و نیوبیوم 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 تشگیل شد تاسکین و همکاران [23] ، به بررسی خصوصیات ریزساختاری اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ نزن آستنیتیAISI304 و فولاد فریتی AISI430 توسط جوشکاری پرتو لیزر (CO_2 (LBW) موردبررسی 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 وفولاد مارتنزیتی 440از 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 مورداستفاده قرار دادند. تمام ویژگی‌های مهره‌های جوش به‌طور قابل‌توجهی با افزایش قدرت لیزریا سرعت جوشکاری کاهش یافت. در پژوهش دیگر ژو و همکارانش [32] به بررسی ریزسـاختار و خواص مکـانیـکی اتصـال فولاد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل1- نمایی از طرح اتصال و نگهدارنده مورد استفاده و راه اندازی آزمایش

زنگ نزن 304 و سوپر آلیاژ پایه نیکل C-276 توسط فرایند لیزر پالسی با طرح اتصال لب روی‌هم پرداختند.درنتایج 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 P ,μ وجود دارد. در مقایسه با ساختار فلز در C-276، ساختار فاز غالب در WM نیز فاز آستنیت بود، بااین‌وجود، ثابت شبکه به علت کاهش محتوای نیکل، مولیبدن و تنگستن کاهش یافت. توزیع عناصر درشت با توجه به نرخ خنک‌کننده سریع در جوشکاری لیزر پالسی و منطقه ناهمگن انتقالی عناصر مجاور فلز جوشC-276 نسبت به منطقه مجاور 304 وسیع‌تر بود. حالت شکستگی جوش لبه روی‌هم در آزمون کششی وبرشی، استحکام شکست، استحکام کششی 17٪ نسبت بهC-276 کاهش یافت. همچنین مقدار ریزسختی فلز جوش کمتر از فلز پایه نبود. در این پژوهش سعی برآن شده است که با انتخاب پارامتر های بهینه و دقت در چینش فلزات در محل اتصال، به جوشی عاری از نقص و در عین حال دارای نفوذ کامل دست پیدا شود. اما نکته مهم‌تر، 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 زنگنزن فریتی 430 و ارزیابی خواص اتصال از اهداف اصلی این تحقیق می باشد.

2- مواد و روش انجام تحقیق

جوشکاری به‌صورت تک پاس با دستگاه لیزر از نوعNd:YAG ضربانی IQL20 با پمپاژ لامپی که مشخصات فنی دستگاه (محدوده و متغیرهای آن) در جدول(1) ارائه‌شده، انجام شد. نمونه های اولیه سوپرآلیاژ اینکونل 625 و فولاد زنگ نزن فریتی430 به شکل ورق به ضخامت 0/8 میلیمتر نمونه‌ها پس از فرزکاری سطحی و تمیزکاری ورق، توسط گیوتین برش‌خورده و مورداستفاده قرار گرفتند.

جدول1- مشخصات فنی دستگاه لیزرIQL20

نوع لیزر	Nd:YANGحالت‌جامد
طول‌موج لیزر	۱۰۶۴ نانومتر
توان متوسط	۷۰۰وات
فرکانس	۱تا ۱۰۰۰هرتز(قابل تنظیم)
لامپ	زنون
عرض پالس	۰/۲۵تا ۲۵ میلی‌ثانیه قابل تنظیم
انرژی پالس	۰/۵ تا ۷۵ ژول(قابل تنظیم)
توان قله	۱۰ کیلووات
قطرباریکه	۰/۴ میلی‌متر
توانورودی	۲۰کیلووات
منبع تغذیه	سه فاز-۳۸۰ولت
سیستم خنک‌کننده	چیلر

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

جدول2- ترکیب شیمیایی فلزات پایه مورداستفاده در این تحقیق (درصد وزنی)

فلز پایه	درصد وزنی عناصر										
	Fe	*Ni*	*Cr*	*Mo*	*Mn*	*Nb*	*C*	*Si*	*Cu*	*Ti*	
Inconel625	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
AISI430	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

قبل از جوشکاری نمونه‌ها به‌منظور 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 طراحی‌شده که در شکل(1) مشخص‌شده 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 سوپرآلیاژ اینکونل 625 و فولاد زنگ نزن فریتی 430 به ترتیب در جدول(2) نشان داده شده است. بعد از قرار گرفتن نمونه ها در داخل فیکسچر، اشعه لیزر به صورت خطی و با سرعت قابل تنظیم حرکت می کند .

جدول3- 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 گازآرگون(Bar)	۲

2-1- آزمایش های اولیه

با توجه به تعداد پارامترهای جوشکاری لیزر و جهت شناسایی پارامترهای دستگاه لیزر و چگونگی تأثیر این پارامترها برجوش لیزری ابتدا اقدام به انجام یک سری آزمایش‌های اولیه شد. در این آزمایش‌ها، پارامترهای جریان لامپ، سرعت جوشکاری و پهنای زمانی ضربان موردبررسی 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 متالوژیکی و ریزساختار جوش حاصله پرداخته و سایر پارامترها با توجه به نتایج بخش قبل ثابت در نظر گرفته شد. شرایط این آزمایش ها در جدول(3) آمده است.

2-2- آزمایش‌های متالوگرافی

به منظور بررسی ریزساختار و تغییرات متالوژیکی فلز جوش، نمونه های جوشکاری شده با عمق نفوذ کامل، انتخاب شد و از سطح مقطع عرضی خط جوش برش داده شدند.

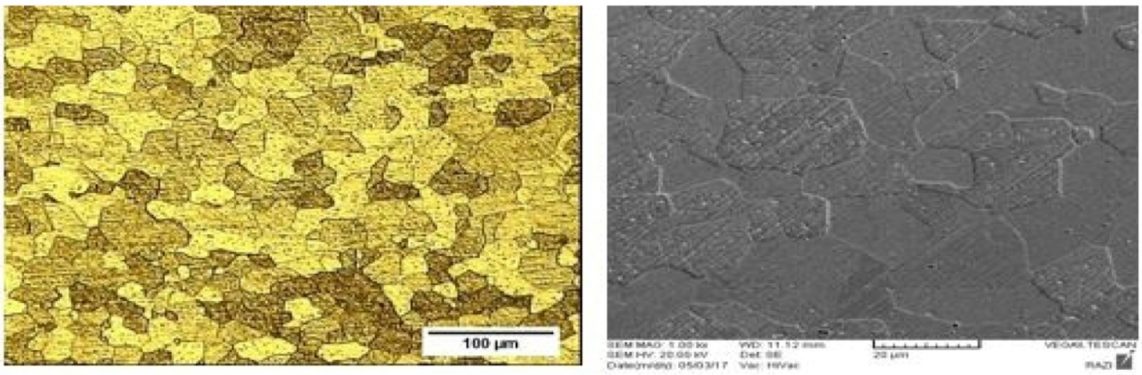
فرآیند اچ در قطعات در دو مرحله یکی جهت اچ کردن فولاد زنگ‌نزن فریتی 430 و مرحله بعد جهت اچ کردن اینکونل 625 انجام شد. برای حکاکی ماکرو نمونه های فولاد زنگ‌نزن فریتی 430 از محلول ظاهرکننده Vilella و برای اینکونل 625 از محلول ظاهر کننده Kalling طبق استانداردا‌ستفاده شد. نمونه‌ها سپس توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند.

3- نتایج و بحث

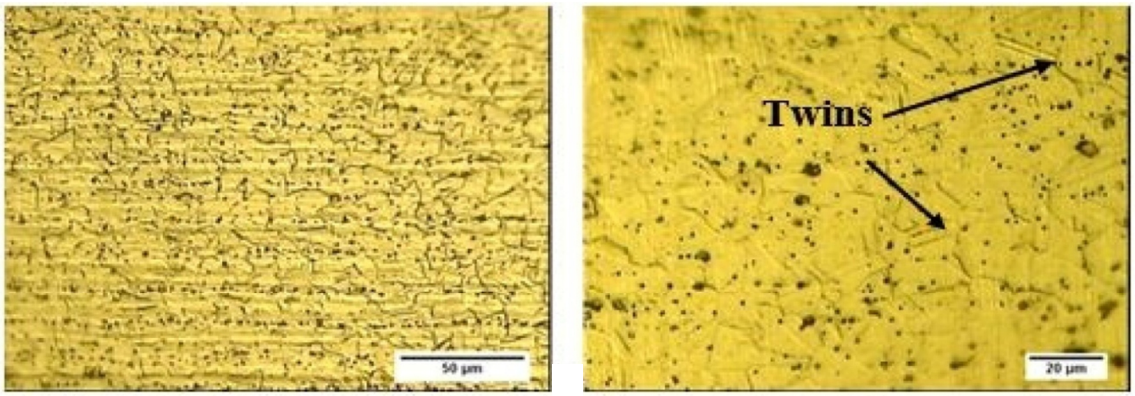
3-1-بررسی ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ‌نزن فریتی 430

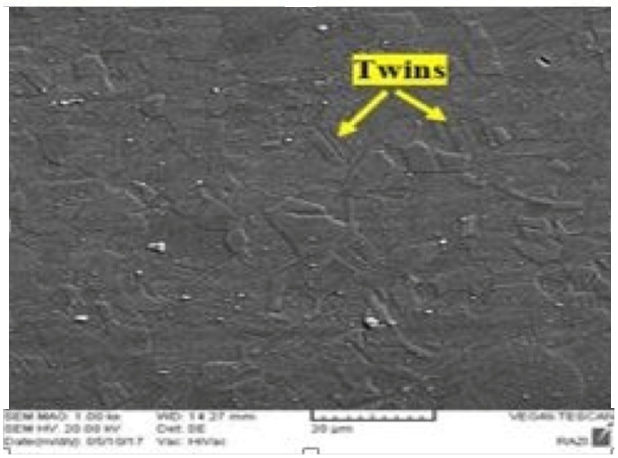
در شکل(2) تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار فولاد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل2- تصاویر میکروسکوپی نوری و میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی 430 .





شکل3- تصویر میکروسکوپی نوری و میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به ریزساختار اینکونل 625.

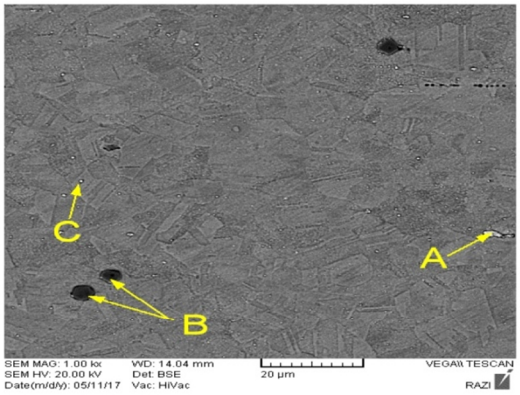
زنگ نزن فریتی 430 نشان داده‌شده است. این ساختار حاوی فریت با دانه‌های درشت هم محور و رسوبات مرزدانه ای کاربید و نیترید می باشد [9 و 10].

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

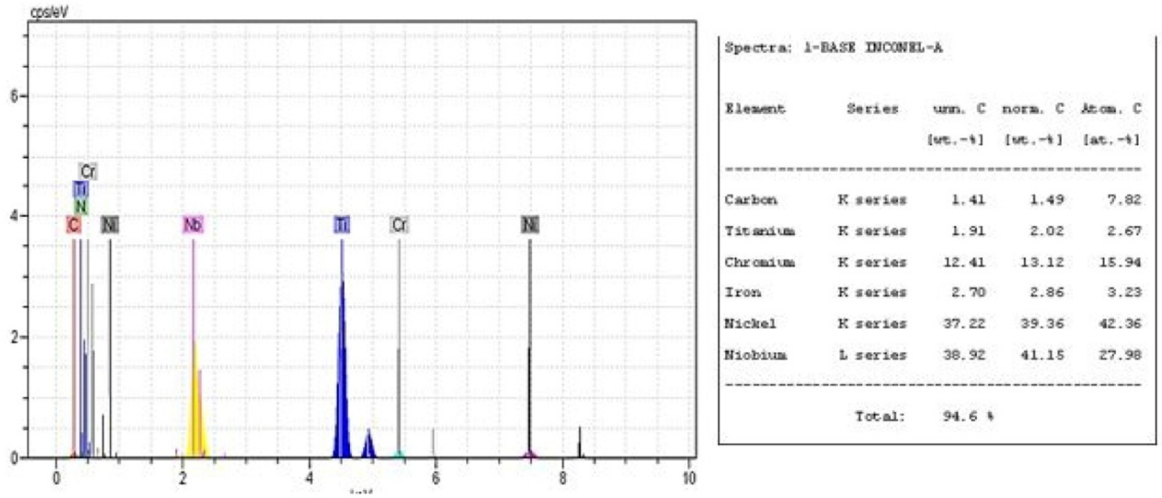
3-2- بررسی ریزساختار فلز پایه سوپر آلیاژ اینکونل 625

در شکل(3) تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار اینکونل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل4- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات A، B و C نمونه با حرارت ورودی بالا.



Spectra: 1-BASE INCONEL-A

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Carbon	K series	1.41	1.49	7.82
Titanium	K series	1.91	2.02	2.67
Chromium	K series	12.41	13.12	15.94
Iron	K series	2.70	2.86	3.23
Nickel	K series	37.22	39.36	42.36
Niobium	L series	38.92	41.15	27.98
	Total:	94.6 %		

شکل5- نتایج طیف‌نگاری آنالیز عنصریEDS در نقطه A نمونه با حرارت ورودی بالا.

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 براین دوقلویی‌های ناشی از آنیل به همراه ذرات کاربید پراکنده در سرتاسر ساختار دیده می‌شود. به دلیل جلوگیری از حرکت نابجایی‌ها توسط این دوقلویی‌ها استحکام ماده تا حدودی افزایش می‌یابد [12-14].

در شکل(3) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ریزساختار فلز پایه اینکونل 625 ارائه‌شده است و همان‌طور که درشکل مشاهده می‌شود، ساختار آلیاژ شامل دانه‌های هم‌محور آستنیتی (فاز گاما) و ذرات ریزی است که به‌صورتشبکه‌های نامنظم درزمینه مشاهده می‌شود [12-14].

در شکل(4) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از آلیاژ اینکونل 625 ارائه‌شده است. ذرات A، B و Cدرزمینه مشاهده شد. به منظور بررسی دقیق‌تر ذرات توزیع‌شده درزمینه که آیا کاربید هستند، از ذرات طیف‌نگاری آنالیز عنصری EDS به عمل آمد. دلیل تفاوت در شکل شناسی ذرات از سه‌نقطه 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 کاربید های 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

تلاقی آن‌ها فاز یوتکتیک لاوه وجوه 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 [15و16].

جدول4- 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

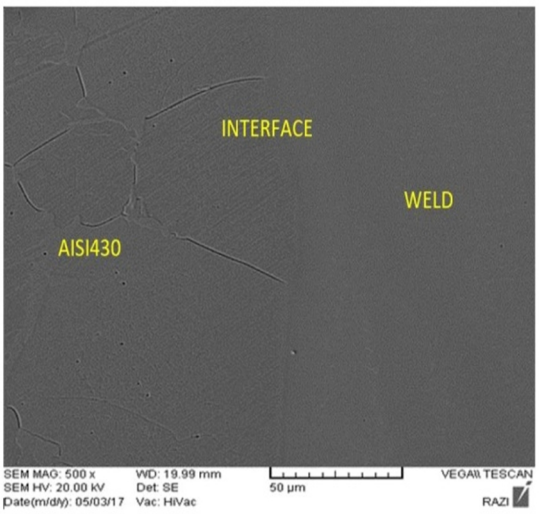
در جوشکاری غیرمشابه فصل مشترک‌های بین فلز جوش و فلز پایه نیز می‌تواند تحت تأثیر شرایط جوشکاری، بر خواص اتصال تأثیرگذار باشد؛ بنابراین مشخصه یابی و ارزیابی این نواحی و ارتباط دادن آن با خواص اتصال حائز اهمیت است.

در ادامه مبحث با تمرکز بر روی فصل مشترک بین فلز جوش و پایه، به تشریح ریزساختار و مکانیزم های 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 ورگه های بسیار کمی مارتنزیت در مرزهای دانه فریت باشد.

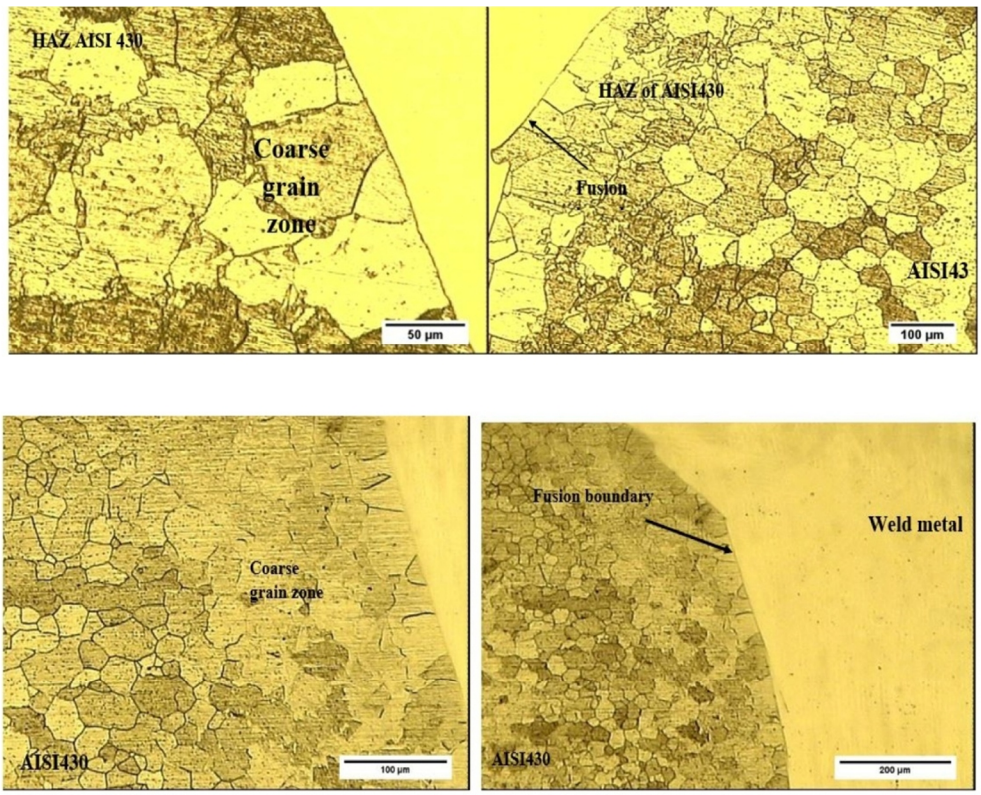
ریزساختاراغلب فولادهای زنگ نزن فریتی شامل مخلوطی از فریت و کاربید (کربونیترید) است. زمانی که این ساختار در منطقه HAZ تا دمای بالا حرارت داده می‌شود. کاربیدها و دیگر رسوب‌ها حل می‌شوند و باوجود حضور رگه‌های مارتنزیتی، این فاز به فریت (همراه با تشکیل کاربید) تبدیل می‌شود. با توجه به ترکیب شیمیایی آلیاژ، HAZ در دماهای بالا کاملاً فریتی است. با توجه به عدم حضور رسوبات و آستنیت مرزدانه‌ای، دانه‌های فریت به‌سرعت رشد می‌کنند و HAZ نسبتاً درشت تشکیل می‌شود.



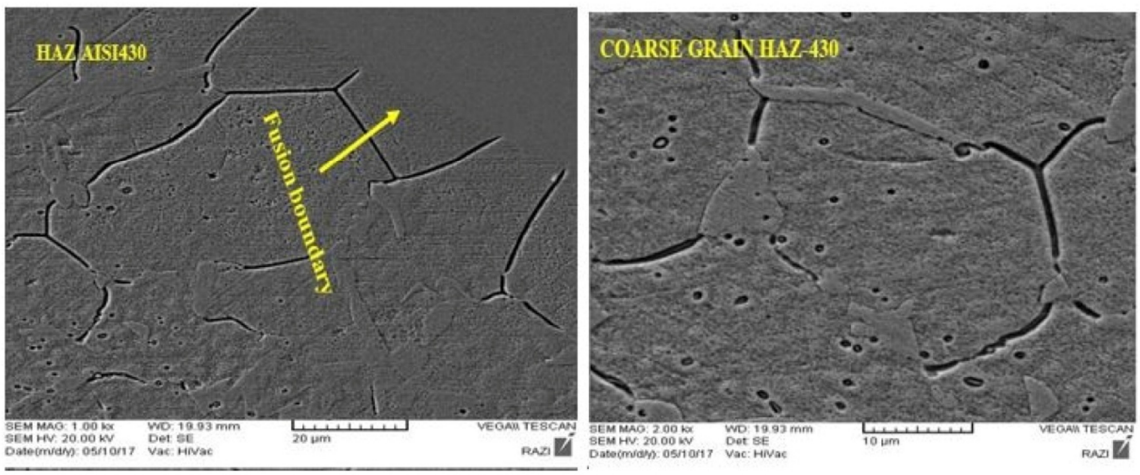
شکل6- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی با فلز جوش.

در شکل‌های(7و8) HAZ در فولاد زنگ نزن 430 مشاهده می‌شود. همان‌طور که انتظار می رووددر نزدیکی خط ذوب دانه‌های فریت کاملاً درشت و مرزدانه‌ها شامل لایه پیوسته مارتنزیت می‌باشند که درنتیجه تشکیل آستینت در دمای بالا و دور از خط ذوب دانه‌ها ریز هستند. بااین‌حال 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 تشکیل‌شده‌اند 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل7- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار منطقه HAZ فلز زنگ نزن فریتی



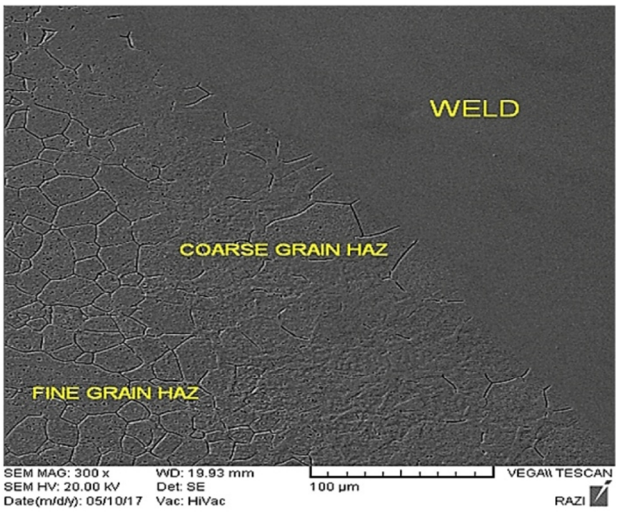
شکل8- تصویر میکروسکوپی الکترونی از ریزساختارHAZ فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی 430 با فلز جوش(نمونه حرارت ورودی کم).

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

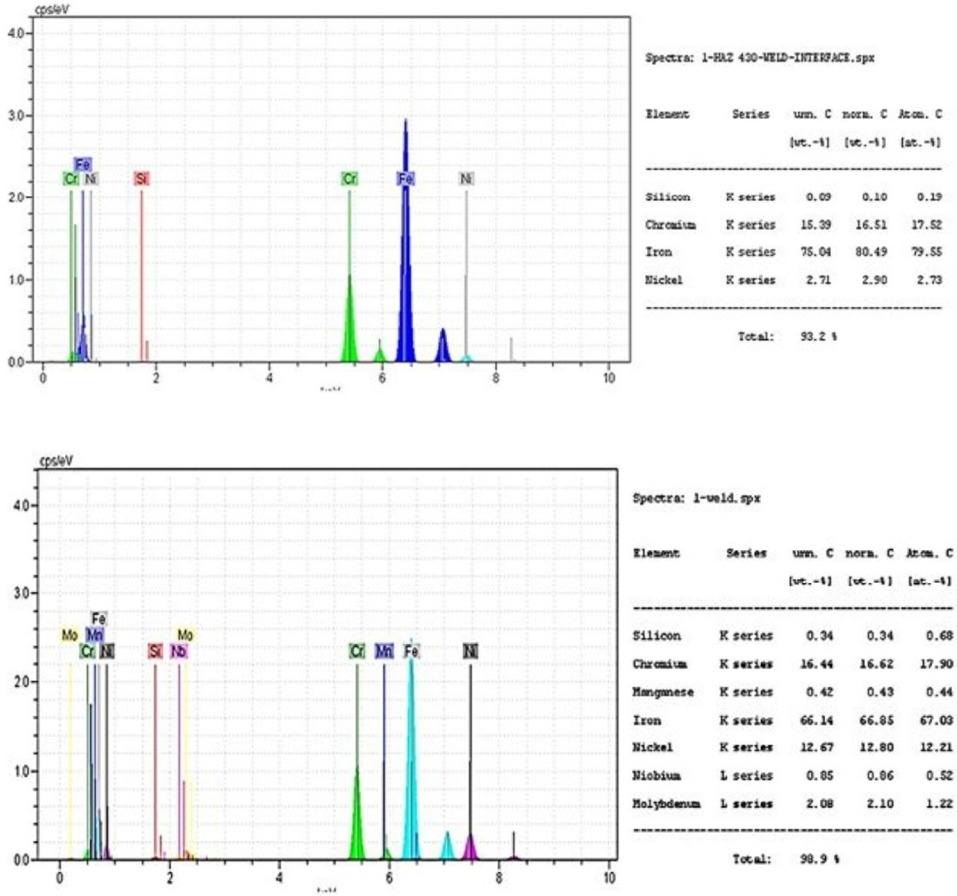
روشن است که سیکل‌های حرارتی در موقعیت‌های مختلف، متفاوت هستند و سیکل‌های حرارتی روی سطح بالایی حوضچه جوش و یا نزدیک به سطح بالایی حوضچه جوش بسیار قوی‌تر از سطح زیر حوضچه جوش است. همه مطالب فوق بیان‌کننده این است که رشد دانه به‌شدت وابسته به روابط دما و زمان است.

همانطور که در شکل (7) مشاهده می‌شود که اندازه میانگین دانه و وسعت HAZ در نزدیکی سطح بالا با افزایش حرارت ورودی افزایش می‌یابد، 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل9-تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی وطیف نگاری آنالیز عنصریEDS از HAZ ریزساختار فولاد زنگ‌نزن فریتی 430 با فلز جوش.



شکل10- طیف نگاری آنالیز عنصریEDS فصل مشترک و HAZ فلز پایه فولاد زنگ‌نزن 430.

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

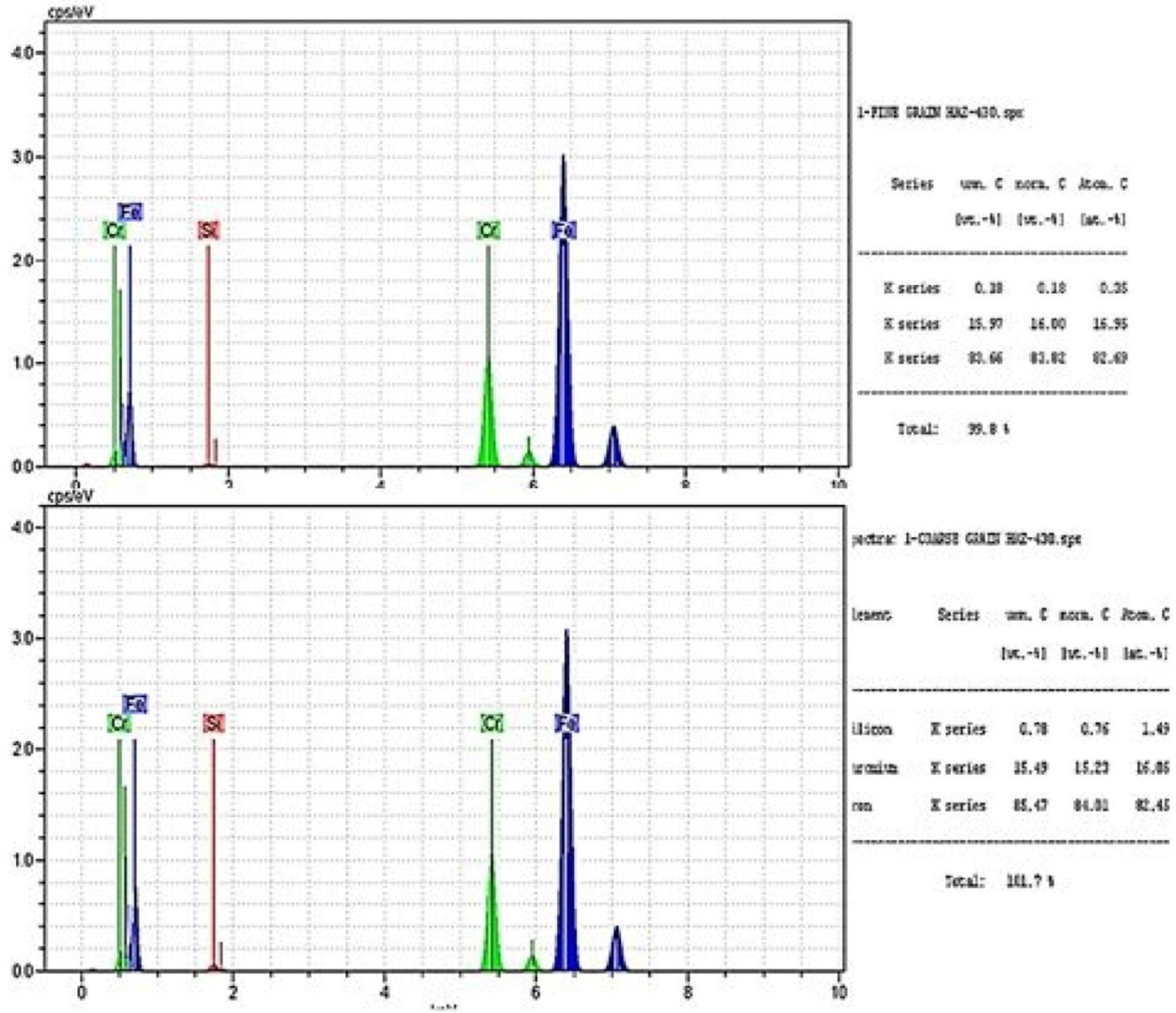
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

منطقه HAZ گردد. در این حالت اندازه دانه‌هابه‌طور مشخصی بزرگ‌تر از فلزپایه خواهد بود. رشددانه‌ها 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 عنصریEDS HAZ فولاد زنگ‌نزن 430 نشان داده شده است. در شکل های (10و11) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی منطقه طیف نگاری آنالیز عنصریEDS 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.

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.

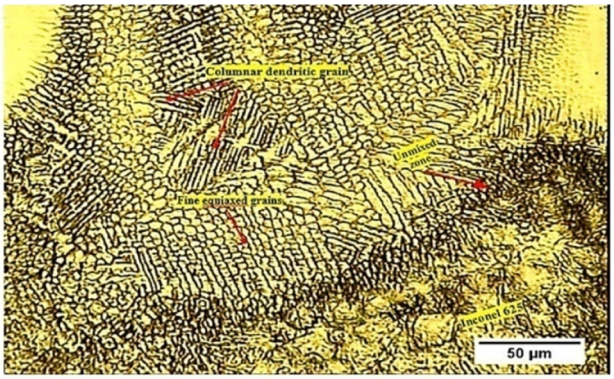
برای روشن شدن این موضوع به بررسی رشد اپی تکسیال در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه پرداخته می‌شود. در حین جوشکاری بدون استفاده از فلز پرکننده، اتم‌های فلزمذاب تغییر مکان می‌دهند و بدون تغییر در جهت‌های بلوری روی دانه‌های زمینه قرار می‌گیرند .



شکل11- طیف نگاری آنالیز عنصریEDS مناطق دانه ریز و دانه درشت در منطقهHAZ فلز پایه فولاد زنگ نزن 430.

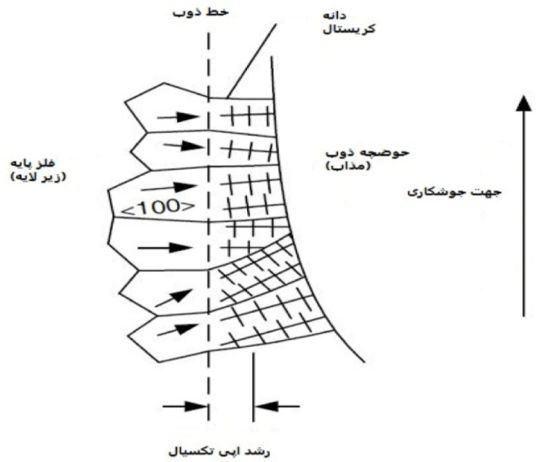
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

این فرایند به رشد اپی تکسیال معروف است. (شکل13) در این رشد بدنه اصلی دندریت‌های ستونی در جهات خاصی رشد می‌کنند [6-20]. همان‌طور که در شکل نمایش داده‌شده به سبب رشد اپی تکسیال مرزدانه‌ها در ناحیه تحت تأثیر حرارت مرزدانه‌ها در ناحیه جوش متصل شده‌اند، در شکل(14) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختارفصل مشترک فلز پایه اینکونل 625 و فلز جوش وشکل(15) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی HAZ ارائه شده است.

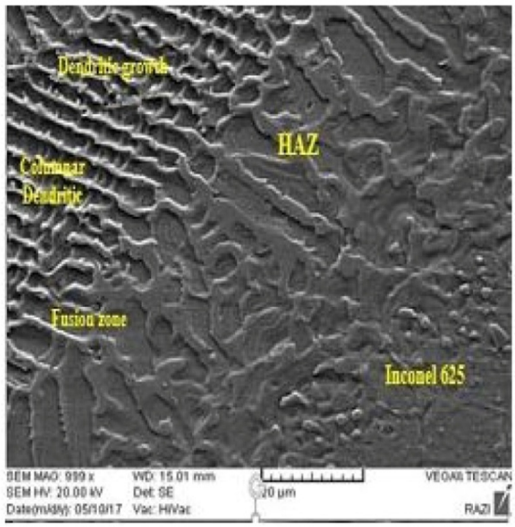


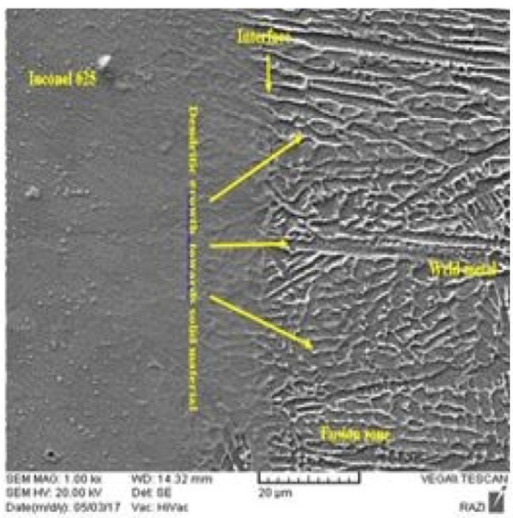
شکل12- تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فصل مشترک فلز پایه اینکونل 625 با فلز جوش.

همان‌طور که در شکل مشخص‌شده رشد اپی تکسیال در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه انجام‌شده و تمامی دندریت‌هایی که رشد آن‌ها از یک‌دانه است در یک‌جهت قرار دارند که این جهت از یک‌دانه تا دانه مجاور آن دانه متفاوت است.در شکل یک منطقه مخلوط نشده باریک در امتداد خط ذوب تشکیل‌شده که عمل اختلاط به نیکل بهتر انجام‌شده است. درواقع باوجود 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 قابل‌توجه نواحی مخلوط نشده به عواملی ازجمله 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.



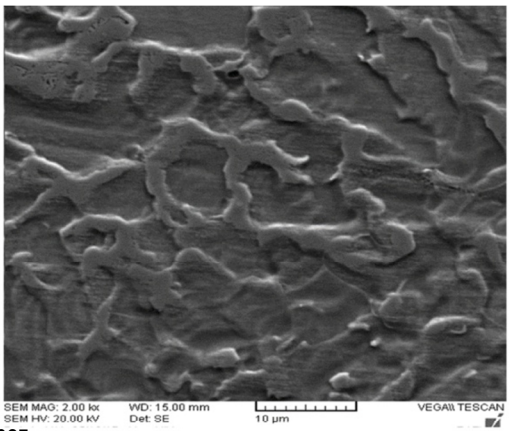
شکل13-رشد اپی تکسیال درنزدیکی منطقه ذوب[8].



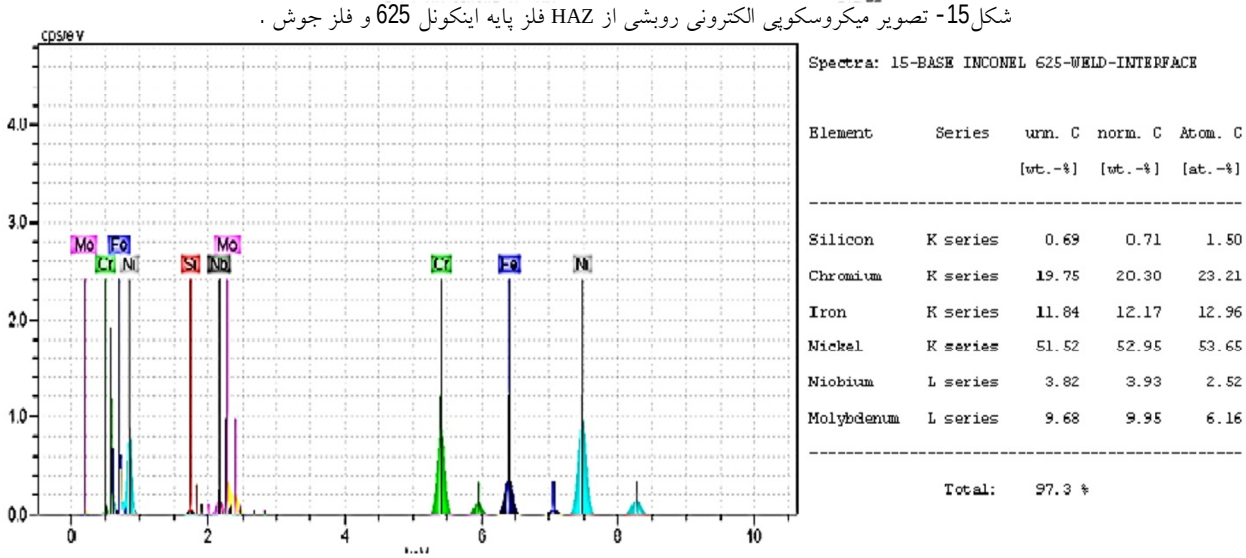


شکل14- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختارفصل مشترک فلز پایه اینکونل 625 با فلز جوش.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



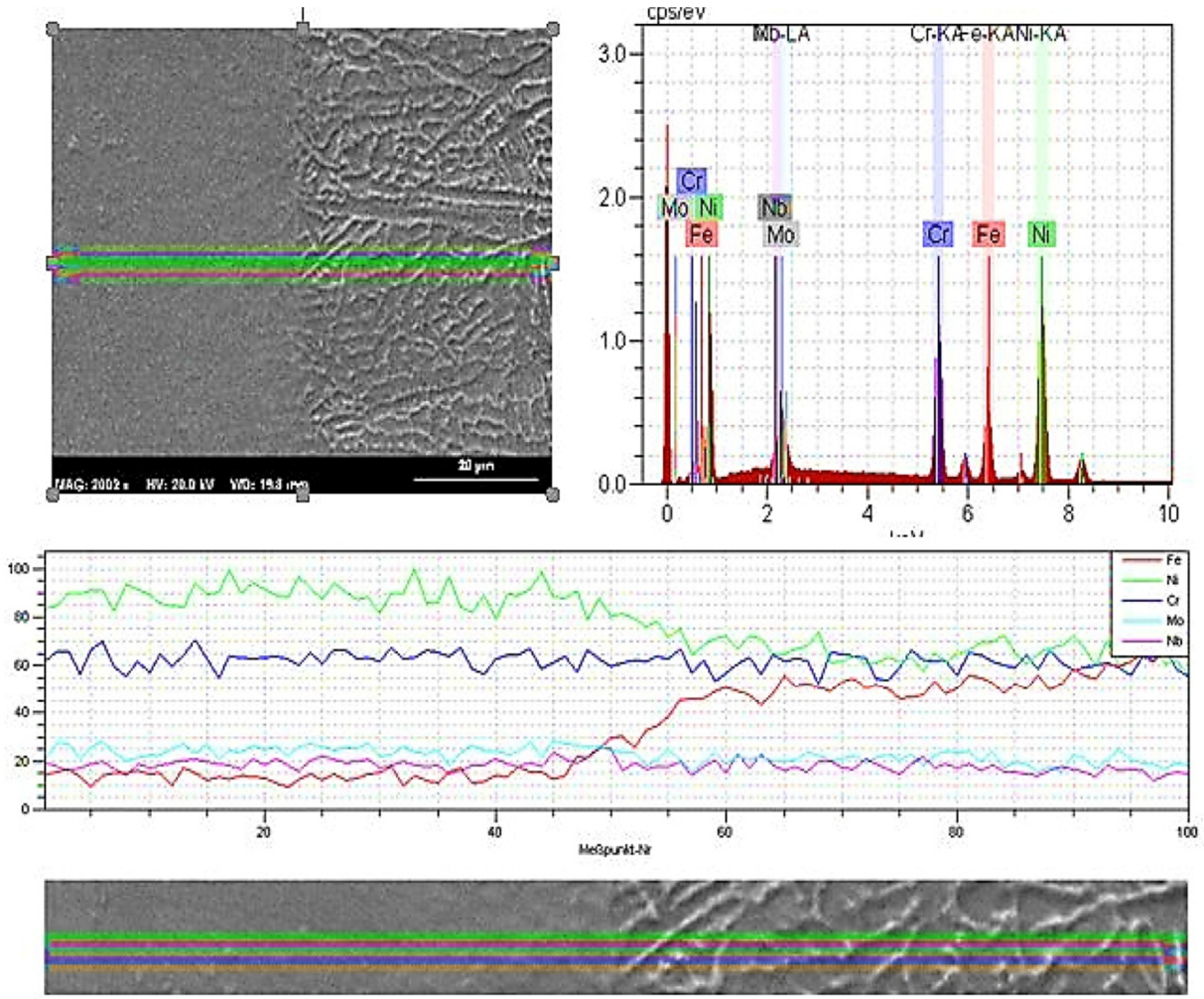
شکل15- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از HAZ فلز پایه اینکونل 625 و فلز جوش .



شکل16- طیف نگاری آنالیز عنصری EDS فلز پایه اینکونل 625، جوش و فصل مشترک.

در شکل های(17و18) نتایج آنالیز طیف‌نگاریEDS به‌صورت خطی ارائه‌شده است. چنین استنباط می‌شود مقداری از عنصر Fe به منطقه ذوب فولاد زنگ نزن فریتی 430 مهاجرت کرده درحالی 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 دندریتی مشاهده می‌شود از عناصر Nb، Cr و Moغنی‌شده است. از آنالیز خطی مشاهده‌شده می‌توان این‌چنین 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 ریزساختارHAZ، فلز جوش، فصل مشترک و فلز پایه ذرات ریزی در نواحی بین دندریتی مشاهده شد. به‌منظور آشکار شدن بیشتر ذراتی که با طیف‌نگاریEDS 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 موردبررسی قرار می‌گیرد. درصد فراوانی یک عنصر در یک تصویر را نقشه عنصری گفته می‌شود که به‌منظور تفکیک عناصر از همدیگر مورداستفاده قرار می‌گیرد. هنگامی‌که 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،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل17- طیف نگاری آنالیز عنصری خطی فلز جوش و اینکونل 625(نمونه شماره15).

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

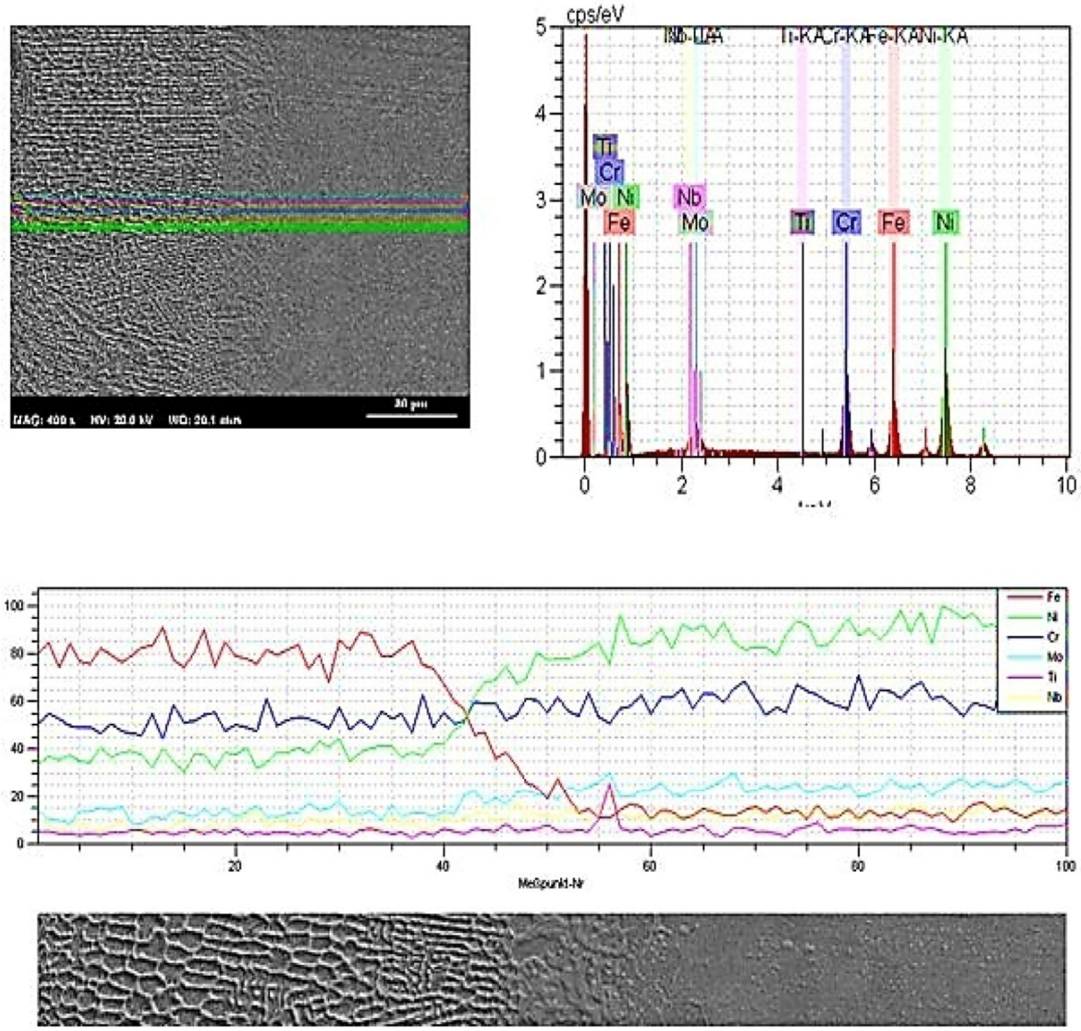
همان‌طور که مشاهده می‌شود در زمینه غنی از عناصر مولیبدن و کروم و مولیبدن و نیوبیوم است لذا ذرات ریز می توانند کاربیدهای M_6C و NbC است. کاربیدها در فلز جوش بسیار ریزتر از فلز پایه است.

3-4-بررسی رفتار خوردگی

در این بخش رفتار خورردگی 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 کلریدسدیم و در دمای محیط به منظور مقایسه ارائه شده است.

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 می‌توان 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 رفتارخوردگی نمونه شیب تافل کاتدی (b_c) و شیب تافل آندی (b_a) جهت به دست آوردن جریان و پتانسیل خوردگی رسم شدند. درجدول(5) جریان(I_{corr}) و پتانسل خوردگی (E_{corr}) محاسبه شده آورده شده است. کاهش مقـاومت به خوردگی فلز جوش نسبت به اینکونل 625 کاهش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

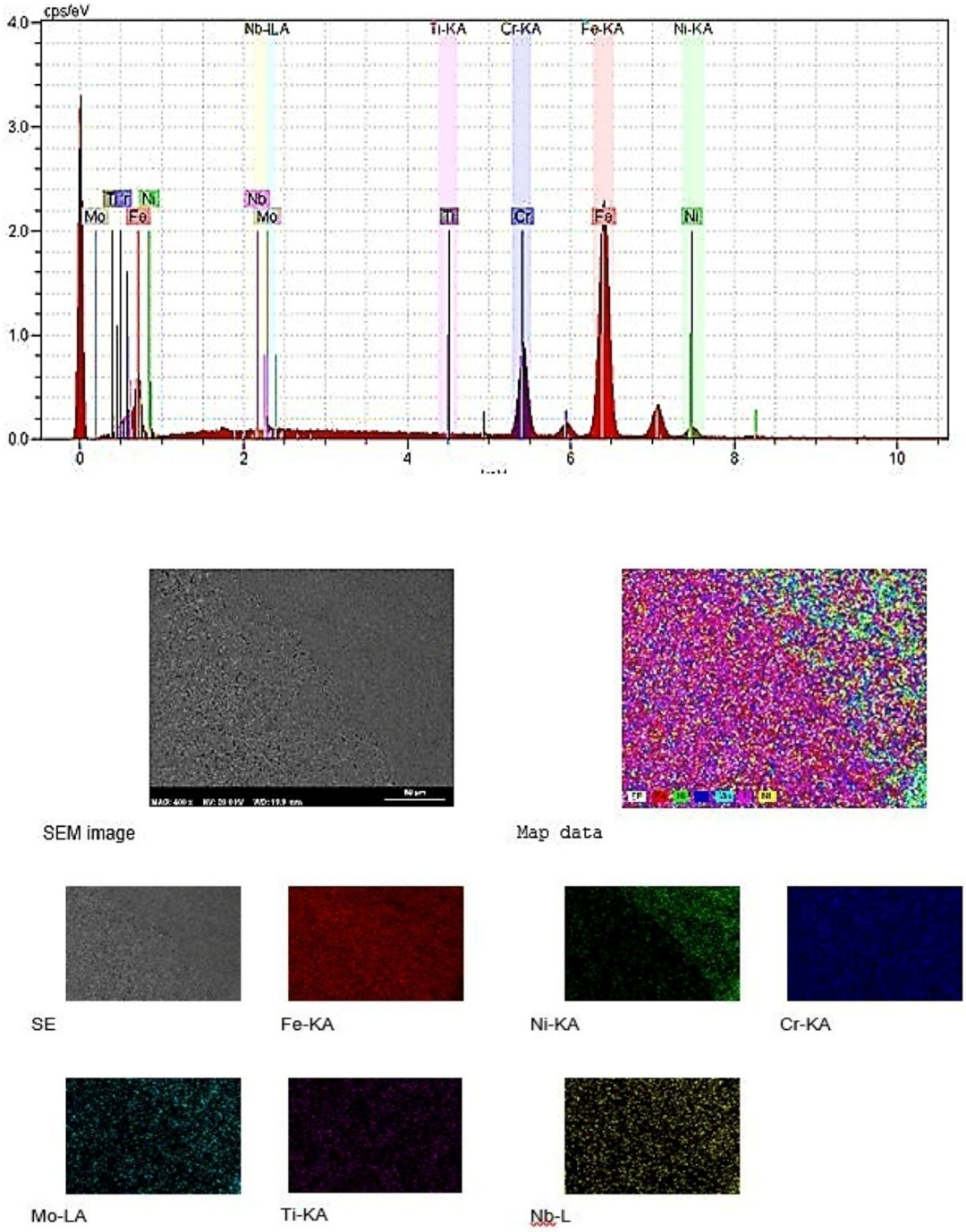


شکل 18- طیف نگاری آنالیز عنصری خطی فلز جوش و اینکونل 625(نمونه شماره 6).

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 می‌گردد[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 می‌کند، این لایه سطحی از تخریب لایه رویین به وسیله یون‌های تخریب گر Cl جلوگیری می کند [15و29]. از سوی دیگر، باور تعدادی از محققان بر آن است که مولیبدن به غیرفعال‌شدن سطح به عبارتی افزایش مقاومت لایه رویین کمک می کند. گزارش شده که مولیبدن با تشکیل مولیبدات از خوردگی جلوگیری می کند. آنیون های مولیبدن در محل حفرات جذب می‌شود و با تغییر لایه رویین موجب غیر فعال شدن حفره ها می‌شود. 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 می‌تواند با کلر در محیط ترکیب شده و تشکیل یک فیلم نمک کلرید سدیم می دهد که خوردگی حفره‌ای در سطح فلز جوش مهار می شود [8].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



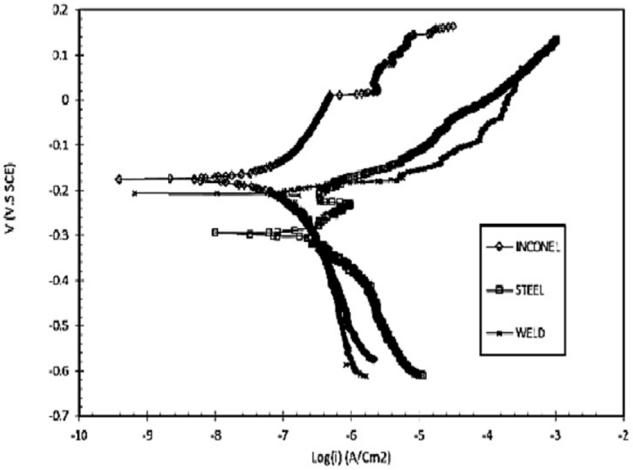
شکل19- تصویر زمینه HAZ، فصل مشترک،فلز جوش، فلز پایه اینکونل 625 با نقشه عناصر Ti، Mo، Cr، Ni و Fe.

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 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).

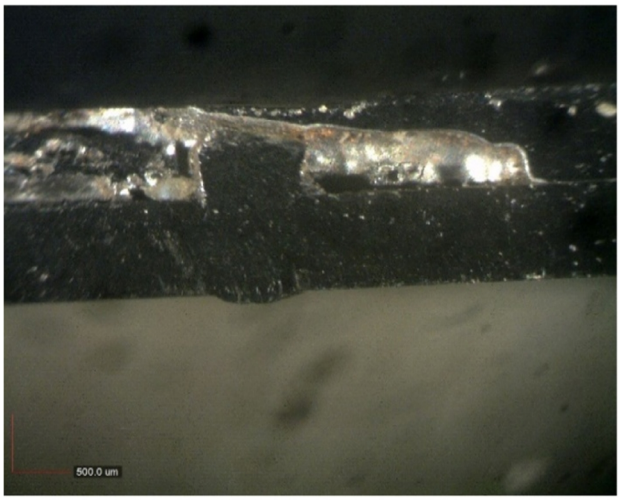
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

جدول5- نتایج حاصل از پلاریزاسیون تافل نمونه جوشکاری شده و فلزات پایه.

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



شکل 20- مقایسه نمودار پلاریزاسیون تافل نمونه‌های اتصال و فلزات پایه.



شکل21- 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، ازجمله خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی بهتر یا برابر فلزات پایه باشد [8،12،15 و29].

4- نتیجه گیری

- رشد دانه های فلز جوش در نمونه های لیزر تماماً به صورت ساختار دندریتی 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 درناحیه متأثر از حرارت اینکونل، هیچ تغییری در ابعاد دانه‌ها مشاهده نشد.

- کاربیدهای تشکیل شده در فلز جوش بیشتر به صورت کاربیدهای غنی از نیوبیوم هستند . انجماد دندریتی فلز جوش با تجمع عناصر نیکل و آهن در هسته دندریت و پس زده شدن عناصری مانند مولیبدن و نیوبیوم به نواحی بین دندریتی همراه است.

- عرض ناحیه متاثر از حرارت در نمونه بهینه بسیار کم بود و تنها رسوبات ریزی مشاهده شد. در صورتی‌که در نمونه با حرارت ورودی بالا منطقه متاثر حرارت پهنای بیشتری داشت و رشد دانه ها در این ناحیه مشاهده شد.

- مقاومت در برابر خوردگی از سمت فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی430 به سمت اینکونل 625 بیشتر می‌شود.

منابع

[1] M.J. Donachie, S.J. Donachie, "Superalloys ATechnical Guide", 2nd Edition,
ASM International, 2002 .
[2] C.T.Simsand, 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. lqbal,M, "Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel 625 and stain less steel 304L" , Vacuum, Vol.110, pp.121-126, 2014.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

microstrruct .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 scince 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,.Hamedi. M.J,Torkamany .M,J,Shabbaghzadeh,”weld metal microstructural characterisics 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 Poroccessing 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 Cast Nikel-Based Superahhoy K418”, Jornal of Materials Poroccessing 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 Poroccessing 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 .

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

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

[32].Pollard , B." Effect of titaniumon the ductility of 26% chromium, Low in ters titial ferritic stainless steel ,M etals Technology,Vol. 1, pp. 31, 1974

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]