



The effect of filler metal type on the quality of gas tungsten arc welded DIN 34CrAlNi7 nitriding steel in the nitrided condition

M. M. Taghvaei , H. Mostaan* , A. Sonboli , H. R. Mansouri Gavari

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

Received 30 June 2022 ; Accepted 14 August 2022

Abstract

In this study, DIN 34CrAlNi7 Nitriding steel in two states before and after nitriding, were welded by tungsten-gas arc welding process using two types of fillers (ER309L and ER312). The aim of this research was to investigate the best conditions for welding (before or after nitriding) and also to choose the best filler metal. The microstructure of the joint was examined using an optical microscope. A tensile strength test was also used to evaluate the mechanical properties. Fracture surfaces were also studied using a scanning electron microscope (SEM). According to the results Welding of these steels with ER309L filler is allowed only in the pre-nitriding state. If the base metal is nitriding, due to microstructural changes in the weld metal, filler metal ER309L cannot be used. However, the results of samples welded with ER312 filler metal show that if the base metal mixing percentage is less than 30%, this filler can be used for welding base metals in both before and after nitriding.

Keywords: Nitriding, tungsten-gas arc process, filler metal, weld metal, mixed zone.

Corresponding Author: h-mostaan@araku.ac.ir



بررسی تاثیرپذیری نوع پرکننده بر کیفیت جوش فولاد نایترایدینگ DIN 34CrAlNi7

در شرایط نیتروژندهی شده سطحی با استفاده از روش قوسی تنگستن-گاز

محمد مهدی تقوایی^{ID}، حسین مستعان^{ID*}، علی سنبلی^{ID}، حمیدرضا منصوری گواری^{ID}

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

دریافت مقاله: 1401/04/09؛ پذیرش مقاله: 1401/05/23

چکیده

در این پژوهش فولاد نایترایدینگ DIN 34CrAlNi7 در دو حالت قبل و بعد از نیتروژندهی سطحی با فرایند قوسی تنگستن-گاز، توسط دو نوع پرکننده (ER309 L و ER312) مورد بررسی قرار گرفتند. هدف از این پژوهش بررسی بهترین شرایط برای جوشکاری، (قبل یا بعد از نیتروژندهی) و نیز انتخاب بهترین فلزپرکننده بود. ریزساختار اتصال با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور ارزیابی خواص مکانیکی از آزمایش استحکام کششی استفاده شد. سطوح شکست اتصالات نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت. جوشکاری این فولادها با پرکننده ER309L با توجه به نتایج به دست آمده، فقط در حالت قبل از نیتروژندهی مجاز است. در حالتی که سطوح لبه اتصال نیتروژندهی شده باشد به علت تغییرات ریزساختاری در فلزجوش نمی تواند در شرایط سرویس پاسخ قابل قبولی ارائه دهد. اما نتایج نمونه های جوشکاری شده با فلزپرکننده ER312 نشان داد در صورتی که درصد امتزاج فلز پایه به مقدار کمتر از 30 درصد باشد می توان از این نوع پرکننده برای جوشکاری فلزات پایه در هر دو حالت قبل و بعد از نیتروژندهی استفاده کرد.

کلمات کلیدی: نیتروژندهی، فرایند قوسی تنگستن-گاز، فلزپرکننده، فلزجوش، ناحیه امتزاج.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h-mostaan@araku.ac.ir

1- مقدمه

ایجاد بیشترین عملکرد ممکن استفاده می شود. روش های بهبود سطح یک ماده شامل اعمال یک لایه سخت، مانند کربن شبه الماس [2-4] و نیتروژندهی سطح است [5-7]. روش های پوشش دهی به دلیل تنوع بسیار زیاد کاربردها و نیازها در زمینه های مختلف در طیف گسترده ای در دسترس هستند.

در سال های اخیر، تقاضا برای موادی با عملکرد بهبود یافته و طول عمر بیشتر که می توانند در شرایط بارگذاری سنگین استفاده شوند، رو به رشد بوده است [1]. روش هایی برای افزودن و آلیاژ کردن عناصر افزودنی مختلف به مواد فلزی و

[14، 15]. اگرچه در دماهای مناسب و در حضور نیتروژن اتمی، تمام فولادها قادر به تشکیل نیتريد آهن هستند، ولی بهبود خواص نیتروژن دهی عمدتاً در فولادهایی که حاوی عناصر آلیاژی نیتريد ساز هستند، مشهودتر است. فولادهای کربنی غیرآلیاژی برای نیتروژن دهی مناسب نیستند، زیرا این فولادها لایه بسیار تردی را در سطح تشکیل می دهند که به راحتی خرد می شود، همچنین افزایش سختی در ناحیه نفوذی این فولادها کم است [16].

فولاد نایترایدینگ DIN 34CrAlNi7 با توجه به عناصر آلیاژی موجود در ترکیب آن جزء فولادهای مستعد جهت نیتروژن دهی است. به علت وجود این عناصر (آلومینیوم و کروم)، در صورت نفوذ نیتروژن در سطح آن ها سختی بالایی تا بیش از 950 ویکرز پیدا می کنند. این افزایش قابل ملاحظه در سختی و در نتیجه افزایش مقاومت به سایش و خستگی پس از نیتروژن دهی، باعث شده این فولاد را بیشتر برای ساخت پیچ ها، بولت های صنعتی، چرخ دنده های مختلف، میله های پیستون، شفت هواپیما و قسمت های عمومی مواد مهندسی مورد استفاده قرار دهند. این فولادها را به طور معمول در حالت سریع سرد شده و تمپر شده تولید می کنند [17]. استفاده از فرایندهای جوشکاری در کاربردهای مذکور باهدف اتصال، تعمیر سطوح تخریب شده و روکش کاری امری متداول هست. بسیاری از مواد و فرایندهای اتصال در حال حاضر برای استفاده در صنایع در دسترس هستند. جوشکاری یک فرایند اتصال فلزی قابل اعتماد و کارآمد است [18، 19]. یکی از قابل اعتمادترین روش برای جوشکاری فولادها، فرایند گاز بی اثر تنگستن (TIG) است که به عنوان جوشکاری قوس تنگستن گاز (GTAW) نیز شناخته می شود [20-22]. جوشکاری TIG مزیت یک مهره جوش کوچک را دارد زیرا به حرارت ورودی کمتری نیاز دارد و فلزپرکننده اختیاری است [21، 23].

آلفونسو و همکاران [19] در مطالعه خود به بررسی جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 پس از نیتروژن دهی پلاسمایی پرداختند. نتایج به دست آمده نشان دهنده وجود لایه های نیتريدی CrN ، Fe_3N ، Fe_4N و فاز γ هست. همچنین اتصال جوش که در

روش های پوشش دهی در کاربردهای خاص با توجه به عملکرد مورد نظر مفید هستند که در میان آن ها محافظت در برابر خوردگی و سایش مهم ترین هستند [8]. خواص مکانیکی مواد با فرایند خوردگی کاهش می یابد درحالی که محصولات خوردگی به اشکال مختلف آزاد می شوند که ممکن است باعث ایجاد محیط خورنده شدیدتر یا عوارض جانبی مضر در کاربردهای مختلف شود [9-10].

نیتروژن دهی یکی از روش های سخت شدن سطحی است که در آن غنی سازی نیتروژن سطح نمونه فولادی در محدوده دمایی 500 تا 575 درجه سانتی گراد (زمانی که فولاد فریتی است) در اتمسفر 15 تا 30 درصد آمونیاک تفکیک شده برای یک زمان طولانی انجام می شود. نیتروژن دهی کردن نیازی به حرارت دادن فولاد به ناحیه آستنیتی و پس از آن کوئنچ برای تشکیل مارتنزیت ندارد. بنابراین، حداقل اعوجاج را شامل می شود و کنترل ابعادی عالی را فراهم می کند. فولادهایی که تحت نیتروژن دهی قرار می گیرند، معمولاً فولادهای کربن متوسط هستند. توزیع ذرات ریز به طور یکنواخت، چگالی بالای نابجایی ها و تشکیل اتمسفر کوترل توسط اتم های نیتروژن از دلایل اصلی سختی سطح بالای فولادهای نیتروژن دهی شده است [11].

در اوایل فرایند نیتروژن دهی، آدولف فری دریافت که گروهی از فولادها در فرایند نیتروژن دهی از نقطه نظر متالورژیکی مانند سختی سطح، سختی مغز قطعه، اعوجاج، مدت زمان سیکل در دمای نیتروژن دهی و تشکیل نیتريد های پایدار، بهتر عمل می کنند. فری دریافت که در طی فرایند نیتروژن دهی عناصر مشخصی نسبت به سایر عناصر، نیتريد های پایدارتری را تشکیل می دهند، که این امر منجر به توسعه دسته ای از فولادهای نیتروژن پذیر شد [12 و 13]. مهم ترین عناصر آلیاژی در فولادهای تجاری که در فرایند نیتروژن دهی مفید هستند شامل آلومینیوم، کروم، وانادیوم، تنگستن و مولیبدن است. علت این امر، تمایل این عناصر به تشکیل نیتريد هایی است که در دمای نیتروژن دهی پایدارند. عناصر آلیاژی دیگر نظیر نیکل، مس و منگنز تمایلی به تشکیل نیتريد نداشته و یا اینکه اثرات آن ها بسیار کم است

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی %)									فلزات پایه و پرکننده
C	Al	Si	P	S	Mn	Mo	Ni	Cr	
۰/۳ - ۰/۳۷	۱/۱ - ۲/۸	۰/۴	۰/۰۲۵	۰/۰۳۵	۰/۶	۰/۱۵ - ۰/۲۵	۰/۸۵ - ۱/۵	۱/۵ - ۱/۸	فلز پایه
۰/۰۳	-	۰/۳ - ۰/۶۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۱ - ۲/۵	۰/۷۵	۱۴ - ۱۲	۲۵ - ۲۳	ER۳۰۹L
۰/۱۲	-	۰/۰۵	-	-	۱/۴۸	-	۹/۰۵	۲۹/۸۵	ER۳۱۲

جدول 2- خواص مکانیکی فولاد DIN 34CrAlNi7 در شرایط سریع سرد شده و بازیخت شده براساس استاندارد DIN10085

قطر میل	۴۰ ≤ قطر ≤ ۱۶	۱۰۰ ≤ قطر ≤ ۴۰	۱۶۰ ≤ قطر ≤ ۱۰۰	۲۵۰ ≤ قطر ≤ ۱۶۰
استحکام تسلیم N/mm^2	حداقل ۶۸۰	حداقل ۶۵۰	حداقل ۶۰۰	حداقل ۶۰۰
استحکام کششی نهایی N/mm^2	۱۱۰۰ - ۹۰۰	۱۰۵۰ - ۸۵۰	۱۰۰۰ - ۸۰۰	۱۰۰۰ - ۸۰۰
درصد ازدیاد طول قبل از گسست	حداقل ۱۰	حداقل ۱۲	حداقل ۱۳	حداقل ۱۳

جدول 3- خواص مکانیکی فلزات پرکننده

ER۳۱۲	ER۳۰۹L	
۶۲۰	۵۰۰	استحکام تسلیم
۷۷۰	۷۰۰ - ۶۰۰	استحکام کششی
٪۲۷	بیشتر از ٪۲۱	ازدیاد طول٪

انجام شده، به کاوش در مورد نوع پرکننده و روش جوشکاری بهتر فولاد نایترایدینگ DIN 34CrAlNi7 قبل و بعد از نیتروژن دهی پرداخته است.

2- مواد و روش انجام پژوهش

در این پژوهش جهت تهیه نمونه های جوش از ورق فولاد مستعد جهت اعمال فرایند نیتروژن دهی (DIN 34CrAlNi7) در دو حالت قبل و بعد از نیتروژن دهی سطحی و با ضخامت 5 میلی متر و دو نوع پرکننده (ER309L، ER312) جهت پیدا کردن بهترین وضعیت جوشکاری (قبل یا بعد از نیتروژن دهی) و نیز بهترین سیم پرکننده، جوشکاری و بررسی شد. ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلزات پرکننده مورد استفاده در این پژوهش توسط دستگاه کوانتومتری مدل ARUN 2500 بررسی و در جدول (1) نشان داده شده است.

خواص مکانیکی لازم برای فولاد DIN 34CrAlNi7 پس از عملیات سریع سرد شدن و بازیخت براساس استاندارد DIN10085 برای نیم ساخته های با مقطع گرد از این آلیاژ طبق جدول (2) است. علاوه بر این، جدول (3) خواص مکانیکی فلزات پرکننده مورد استفاده در پژوهش که توسط شرکت سازنده

آن ها از تکنیک چند مرحله ای استفاده شده نتایج نیتزیده شدن بهتری از فلزات جوش تک مرحله داشتند. در تکنیک چند مرحله ای به علت تغییرات ساختاری و متغیرهای فرایند نتایج سختی حدود سه برابر بهتر از نتایج حاصل از جوشکاری تک بود.

پورکبیران و همکاران [24] در تحقیقی به بررسی اتصال غیرمشابه فولاد کم آلیاژ 4130 به فولاد زنگ نزن 316L به روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز پرداختند. نتایج نشان داد که در آزمایش ضربه، شکست نمونه ها به صورت نرم هست. در آزمایش کشش نمونه جوش داده شده با سیم جوش ER309 L از فلز پایه 316L دچار شکست شد، اما نمونه جوشکاری شده با پرکننده ER NiCr-3 از محل جوش دچار شکست شد. بررسی ها نشان دهنده وجود ساختار دندریتی در فلزات جوش پایه نیکلی بود. ریزساختار فلز پرکننده ER309 L به صورت سلولی دندریتی شد، و به دلیل وجود فاز فریت دلتا در نواحی بین دندریتی، آستنیت زمینه، هیچ گونه ترکی در این ناحیه مشاهده نشد و در نهایت فلز پرکننده ER309 L مناسب تر از پرکننده ER NiCr-3 تشخیص داده شد. این پژوهش که با انجام مطالعه و بررسی ها بر روی متون علمی به عنوان اولین بار

برحسب آمپر، S سرعت حرکت دست جوشکار برحسب میلی‌متر بر ثانیه و η راندمان حرارتی فرایند جوشکاری است که برای این فرایند 0/7 در نظر گرفته شد. جدول (4) نیز کمیت‌های مربوط به متغیرهای جوشکاری قطعات، در این پژوهش را نشان می‌دهد.

پس از پایان فرایند جوشکاری، ابتدا آزمایش متالوگرافی جهت شناسایی ریزساختار فلزات پایه و فلزات جوش انجام شد. به‌منظور مشاهده فازهای موجود در فولاد مورد مطالعه و ناحیه HAZ، جوش‌های مختلف که بخشی از فلز پایه است و نیز فلز جوش ER309L، از محلول اچ نایتال 2% استفاده شد. همچنین برای مشاهده فازهای موجود در فلز جوش ER312 از محلول سه اسید (اسید استیک، اسید نیتریک و اسید سولفوریک) استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ نوری به وسیله میکروسکوپ نوری گرفته شد.

سپس آزمایش مکانیکی کشش روی نمونه‌ها انجام شد و مقاطع شکست آزمایش کشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویربرداری شده و آنالیز و طیف‌نگاری EDS از رسوبات مورد مشاهده در آزمایش الکترون روبشی انجام شده و بعد از آن آزمایش سختی سنجی جهت تعیین سختی فلزات جوش نمونه‌های مورد مطالعه انجام و سختی نمونه‌ها مشخص شد.

3- نتایج و بحث

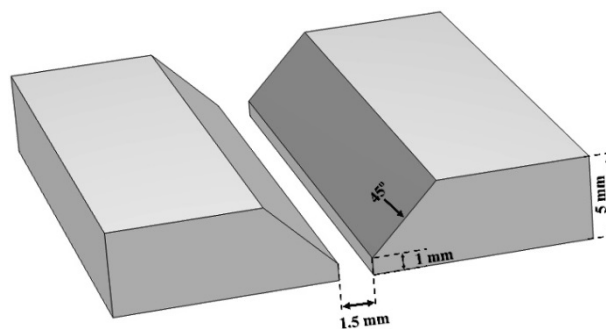
3-1- ارزیابی ریزساختار فلز پایه

ریزساختار فلز پایه فولاد DIN 34CrAlNi7 پیش از انجام عملیات جوشکاری توسط میکروسکوپ نوری در شکل (2) نشان داده شده است. همان‌گونه که از این تصویر مشخص است فلز پایه در حالت کوئنچ شده قرار دارد. تیغه‌های مارتنزیتی به همراه فاز آستنیت باقیمانده که نشان از شدت پایین محیط سردکننده برای این فولاد بوده است، مشهود است.

ریزساختار فلز پایه نیتروژن‌دهی شده فولاد 1/8550 پیش از انجام عملیات جوشکاری توسط میکروسکوپ نوری در شکل (3) نشان داده شده است.

ارائه شده است را نشان می‌دهد.

آماده‌سازی قطعات جهت اتصال جوشکاری برای جلوگیری از تغییرات ریزساختاری در اثر حرارت، با روش‌های مکانیکی و بدون ایجاد حرارت انجام شد. برشکاری قطعات توسط کمان اره دستی و ایجاد پخ و پاشنه مناسب توسط سوهان تخت مطابق با زاویه پیشنهادی استاندارد انجمن جوشکاران آمریکا انجام شد. شکل (1) تصویر طرح اتصال را نشان می‌دهد.



شکل 1- تصویر طرح اتصال جوشکاری فولاد DIN 34CrAlNi7 اجرا شده برای نمونه‌های مورد مطالعه.

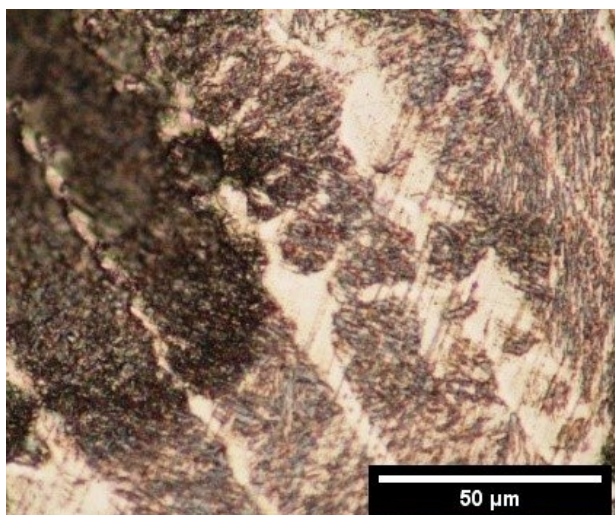
با تنظیم بهینه دستگاه جوشکاری نمونه‌ها با پرکننده‌های مختلف در دو حالت قبل و بعد از نیتروژن‌دهی در مجموع به تعداد چهار نمونه طبق طرح اتصال شکل (1) آماده‌سازی شد. در این فرایند جهت تأمین اتمسفر خنثی از گاز آرگون با خلوص 99/999 درصد استفاده شد. جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) به صورت دستی انجام شد. با توجه به ضخامت پخ با زاویه 45 درجه یک‌طرفه روی دو قطعه ایجاد شده و شیار V شکل به دست آمده از قرارگیری دو قطعه به صورت لب‌به‌لب با پاشنه اتصال 1 میلی‌متر، درز اتصال 1/5 میلی‌متر، در وضعیت 1G و در دو پاس جوشکاری انجام شد. متغیرهای جوشکاری مثل قطر سیم جوش، آمپراژ، ولتاژ، جریان، سرعت جوشکاری، دمای بین پاسی و دیگر متغیرها برای همه نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد. حرارت ورودی جوشکاری در این محاسبات برحسب kJ/mm و توسط فرمول $Q = \eta IV/S$ به دست آمده است. در این فرمول V ولتاژ برحسب ولت، I جریان

جدول 4- متغیرهای جوشکاری اتصال فولاد DIN 34CrAlNi7 با پرکننده‌های مورد استفاده در پژوهش

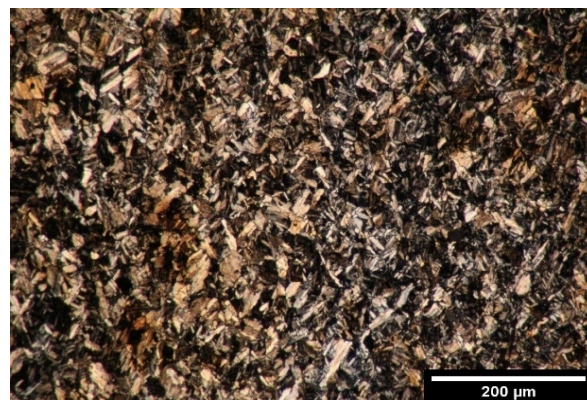
متغیر جوشکاری	A جریان	ولتاژ V	سرعت دست جوشکاری mm/s	حرارت ورودی kJ/mm	قطر سیم جوش
پاس ریشه	۱۰۰	۱۲	۰/۷۵	۱/۱۲	۲/۴
پاس رویه	۱۲۰	۱۲	۰/۷۵	۱/۳۴۴	۲/۴

همان‌گونه که از این تصویر مشخص است فلزپایه در حالت نیتروژن‌دهی شده دارای عمق لایه سخت شده 400 میکرومتری است.

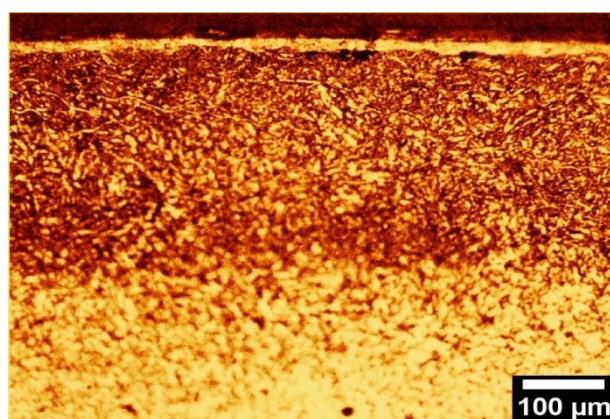
قبل از نیتروژن‌دهی، منطقه متأثر از حرارت و ناحیه رقت جوش را نمایش می‌دهد.



شکل 4- تصویر میکروسکوپ نوری فلزجوش حاصل از پرکننده ER309L بر روی فلزپایه قبل از نیتروژن‌دهی.



شکل 2- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد DIN 34CrAlNi7.



شکل 3- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلزپایه ER309L نیتروژن‌دهی شده

2-3- ارزیابی اتصالات جوشکاری شده با فلزپرکننده

ER309L

1-2-3- نتایج حاصل از فلزجوش با پرکننده

ER309L بر روی فلزپایه قبل از نیتروژن‌دهی فلزپایه

شکل (4) تصویر میکروسکوپ نوری فازهای سخت در داخل فلزجوش حاصل از اختلاط پرکننده ER309L و فلزپایه

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد فاز سفیدرنگ مربوط به فاز نرم آستنیت و قسمت تیره مربوط به نواحی مارتزیت است. این پرکننده از نوع فولاد زنگ‌نزن آستنیتی بوده و دارای چقرمگی و انعطاف‌پذیری بسیار بالاست که جهت جلوگیری از خوردگی بین‌دانه‌ای یا تشکیل کاربید کروم، کربن آن را تا حد زیادی کاهش داده‌اند. برطبق آزمون سختی سنجی مقدار سختی این نمونه حدودا 42 راکول سی است. استحکام نهایی کششی براساس داده‌های کارخانه سازنده الکتروود حدود 520MPa است. در آزمایش کشش از فلزپایه نیتروژن‌دهی نشده گسست از داخل فلزجوش با تحمل تنش کششی خیلی بالاتر از مشخصات اعلامی کارخانه سازنده برای فلزجوش حاصل از سیم‌جوش بدون ناحیه اختلاط و باتحمل تنش کششی 860MPa اتفاق افتاده است.

جدول 5- نتیجه آنالیز EDS منطقه مختلف مشخص شده در شکل 5 از فلزجوش حاصل از پرکننده ER309L بر روی فولاد DIN 34CrAlNi7 قبل از نیتروژن دهی.

درصد عناصر (درصد وزنی %)					نوع درصد
Ni	Fe	Cr	Al	O	
۲	۳۵	۱	۶۲	-	درصد وزنی
۱	۲۱	۱	۷۷	-	درصد اتمی

جدول 6- ترکیب شیمیایی جوش ایجاد شده توسط الکترود ER309 در حالت فلز پایه بدون نیتروژن دهی

ترکیب شیمیایی فلز پایه	$\times 30\%$	ترکیب شیمیایی الکترود	$\times 70\%$	نهایی
Cr	۱/۸ %	۲۵ %	۱۷/۵ %	۱۸/۰۴ %
Mo	۰/۲۵ %	۰/۷۵ %	۰/۵۲۵ %	۰/۶ %
Ni	۱/۵ %	۱۴ %	۹/۸ %	۱۰/۲۵ %
C	۰/۳ %	۰/۰۳ %	۰/۰۲۱ %	۰/۱۱۱ %
N	-	-	-	-

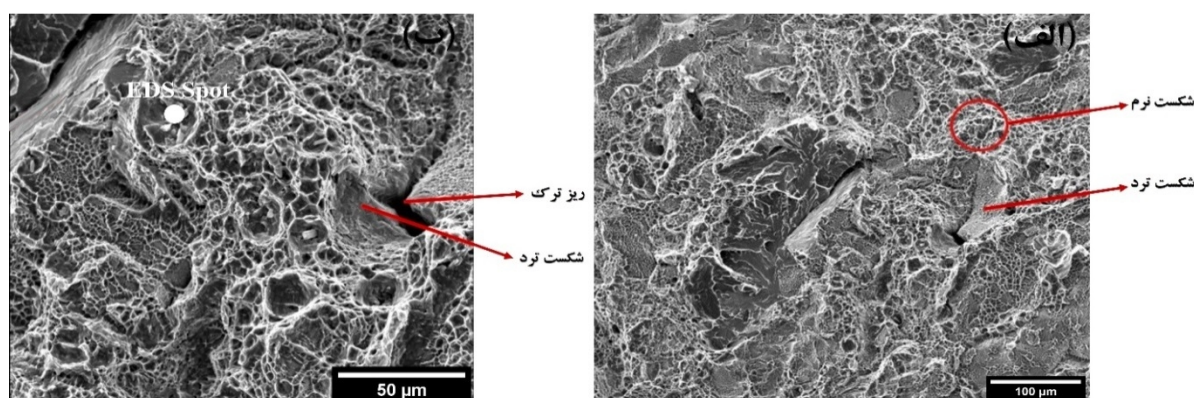
بزرگنمایی های بالاتر وجود ریزترک هایی مشاهده می شود. این ریزترک ها که در شکل (4-ب) نشان داده شده است که می توانند در فصل مشترک بین فاز مارتنزیت و آستنیت تشکیل شوند. در جوشکاری با این نوع پرکننده با در نظر گرفتن درصد رقت 30 درصد، درصد تقریبی عناصر مورد نظر مطابق جدول (6) به دست آمده و مقدار کروم معادل و نیکل معادل آن برابر با 18/64 درصد و 14/135 خواهد بود. براساس نمودار WRC-1992 نشان داده شده در شکل (6) می توان دریافت فلزجوش کاملاً آستنیتی است. ورود کربن و عناصر جزیی سخت کننده ناشی از ناحیه رقت جوش با حضور کروم موجود در پرکننده باعث افزایش سختی و استحکام کششی زیاد فلزجوش نسبت به فلز پایه می شود. در شکل (5-ب) و جدول (5) نتایج آنالیز EDS و مربوط به رسوب موجود در فلزجوش حاصل از پرکننده ER309L قبل از نیتروژن دهی فلز پایه نشان داده شده که در آن درصد عنصر آلومینیوم بیشتر از بقیه عناصر است

3-3- نتایج حاصل از فلزجوش با پرکننده ER309L

بر روی فلز پایه بعد از نیتروژن دهی فلز پایه

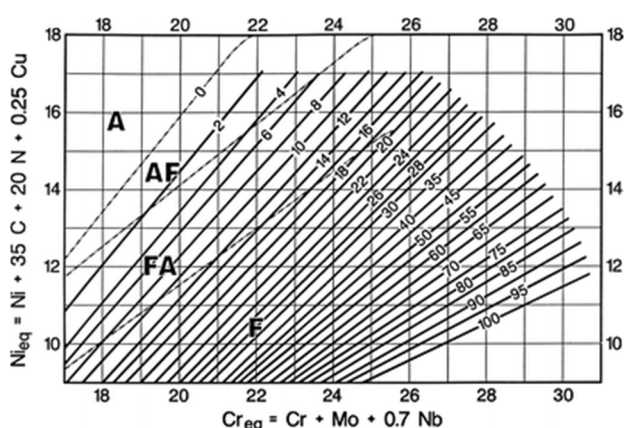
تصویر میکروسکوپ نوری فلزجوش ER309L پس از

از دلایل اصلی این افزایش استحکام ورود کربن ناشی از ناحیه امتزاج فلز پایه به داخل فلزجوش است که به سختی پذیری فلزجوش افزوده است. در اثر افزایش سختی پذیری احتمال تشکیل فاز مارتنزیت افزایش پیدا کرده که تصویر میکروسکوپ نوری نشان داده شده در شکل (4) نیز تأیید کننده این موضوع است. همچنین تشکیل کاربید کروم و رسوب کاربیدهای آلیاژی دیگر مانند کاربید منگنز باعث افزایش استحکام کششی در فلزجوش می شود. این افزایش خواص مکانیکی تا حد زیادی ناشی از ورود کربن از فلز پایه به درون فلزجوش هست که می تواند باعث تغییرات دیگری در فلزجوش مثل کاهش مقاومت به خوردگی و وقوع پدیده حساس شدن شود. علاوه بر این در تصویر میکروسکوپ نوری شکل (4) وقوع پدیده نواری شده نیز مشهود است. شکل (5) تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع شکسته شده این فلزجوش را نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می گردد سطح مقطع شکست متشکل از نواحی نرم و ترد هست؛ به عبارت دیگر در این شرایط شکست به صورت نیمه ترد اتفاق افتاده است. با توجه به تصویر میکروسکوپ نوری نشان داده شده در شکل (5-الف) حضور هر دو فاز آستنیت و مارتنزیت مشهود است و وقوع شکست نیمه ترد طبیعی به نظر می رسد. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در



شکل 5- تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع شکست جوش حاصل از فلز پرکننده ER309L بر روی آلیاژ 1/8550 قبل از نیتروژن دهی، الف - بزرگنمایی 500 X و ب - بزرگنمایی 1500 X

دردمای بالا به نظر می‌رسد. همانطور که مشخص است فولادهای دارای عناصر آستنیت زا حساسیت بالایی جهت وقوع ترک‌های ناشی از افت انعطاف‌پذیری دردمای بالا یا DDC دارند. در جوشکاری با این نوع پرکننده و فلز پایه حاوی 0/12 درصد نیتروژن، با در نظر گرفتن 30 درصد رقت، درصد تقریبی عناصر مورد نظر مطابق جدول (8) به دست آمده و مقدار کروم معادل و نیکل معادل آن برابر با 18/64 درصد و 16/535 خواهد بود. براساس نمودار WRC-1992 نشان داده شده در شکل (6) می‌توان دریافت فلز جوش کاملاً آستنیتی است.



شکل 6- نمودار WRC-1992 برای تخمین میزان فریت جوش و حالت انجماد

همان‌طور که در آنالیز EDS مشاهده می‌شود درصد آلومینیوم موجود در رسوب داخل مقطع شکست جوش به شدت نسبت به حالت جوشکاری قبل از نیتروژن دهی کاهش پیدا کرده و با توجه به اینکه آلومینیوم موجود در فلز جوش ناشی از ناحیه

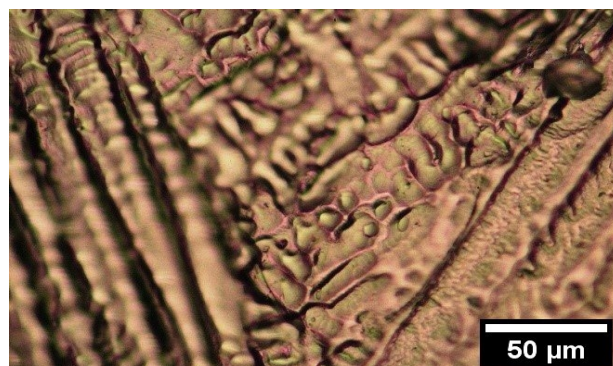
نیتروژن دهی شده فلز پایه در شکل (7) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود حالت انجماد به صورت دندردیتی ستونی هست و ریز ساختار از فاز آستنیت تشکیل شده است. سختی فلز جوش در این حالت نسبت به حالت قبل کاهش پیدا کرده است و به حدود 36 راکول سی رسیده است. علت غالب شدن فاز آستنیت نسبت به مارتنزیت آن است که نیتrideهای آهن و نیتrideهای آلیاژی تشکیل شده در فرایند نیتروژن دهی بر روی سطح قطعه در حین جوشکاری حل شده‌اند و نیتروژن آزاد شده به فلز جوش نفوذ کرده است. با توجه به قدرت آستنیت زایی بالای نیتروژن به عنوان یک عنصر بین نشین، ترغیب فلز جوش به تشکیل فاز آستنیت طبیعی به نظر می‌رسد. در آزمایش کشش جوش حاصل از پرکننده ER309L بر روی فلز پایه بعد از نیتروژن دهی نشان از استحکام کشش نهایی 120MPa برای فلز جوش دارد. نتیجه آزمایش کشش این نوع پرکننده بیانگر استحکام کششی خیلی پایین هست. با بررسی تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص می‌شود شکست از نوع کاملاً ترد است ولی نکته مهم دیگری در نتیجه شکست این نمونه وجود دارد که آن تحمل تنش بسیار پایین این نمونه قبل از گسست هست و باعث شده نمونه رفتاری شبیه به نمونه ترک‌دار نشان دهد. با بررسی بیشتر وجود ترک‌های زیاد در منطقه عدم اختلاط (UMZ) قابل مشاهده است زیرا این گسست در فصل مشترک HAZ و فلز جوش رخ داده است. در شکل (8) تصویر سطح این شکست ارائه شده است. دلیل وقوع این ترک‌ها عدم انعطاف‌پذیری

آستینیتی است که از آن برای جوشکاری فولادهای با استحکام کششی و تسلیم بالا و با مقاومت سایش بالا در دماهای کاری کمتر از 420 درجه سانتی گراد استفاده می شود. براساس نتیجه حاصل از آنالیز EDS (جدول 9) ترکیب شیمیایی فلزجوش تغییر کرده و نسبت آستینیت به فریت در فلزجوش افزایش می یابد، نوع انجماد با توجه به شکل و تغییر نسبت Cr_{eq}/Ni_{eq} با در نظر گرفتن 30 درصد درجه رقت یا شرکت فلزپایه در فلزجوش نسبت کروم معادل به نیکل معادل که برای فلزپرکننده ER312 حدود 2/3 هست به حدود تقریبی 1/8 می رسد. این کاهش شدید نسبت کرم معادل به نیکل معادل نوع فازهای موجود در فلزجوش را تغییر می دهد و باعث بیشتر شدن فاز آستینیت نسبت به فریت می شود. در جوشکاری با این نوع پرکننده با در نظر گرفتن 30 درصد رقت، درصد تقریبی عناصر موردنظر مطابق جدول (10) به دست آمده و مقدار کروم معادل و نیکل معادل آن برابر با 21/515 درصد و 12/88 خواهد بود. براساس نمودار WRC-1992 نشان داده شده در شکل (6) می توان دریافت فلزجوش آستینیتی با عدد فریت 12 است. استحکام نهایی کششی براساس داده های کارخانه سازنده الکتروود ER312 حدود 770MPa است. در آزمایش کشش جوش حاصل از پرکننده ER312 بر روی فولاد مورد مطالعه قبل از نیتروژن دهی نشان از استحکام کشش نهایی 922MPa برای فلزجوش دارد. علاوه بر این نتایج آزمایش سختی سنجی نشان داد مقدار سختی حاصل شده برای این نمونه حدودا 51 راکول سی است.

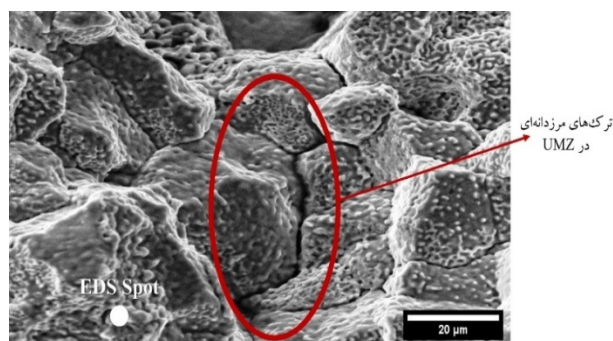
3-5- نتایج حاصل از فلزجوش با پرکننده ER312 بر روی فلزپایه بعد از نیتروژن دهی فلزپایه

جوشکاری با این پرکننده در صورتی که لایه نیتروژن دهی شده به همراه ناحیه رقت در جوش شرکت می کند با در نظر گرفتن 0/4 میلی متر ضخامت لایه نیتروژن دهی شده و وجود یک درصد وزنی نیتروژن در داخل لایه نیتروژن دهی شده و در نظر گرفتن 30 درصد ناحیه رقت، درصد تقریبی نیتروژن فلزجوش 0/12% به دست می آید. با ورود نیتروژن در فلزجوش با توجه

اختلاط یا (Dialution Zone) هست، این موضوع نیز اثبات کننده نتیجه گیری درباره نبود یا کمبود ناحیه اختلاط در حالت جوشکاری پس از نیتروژن دهی هست که باعث به وجود آمدن ناحیه UMZ و ترک ناشی از افت انعطاف پذیری در ناحیه مخلوط نشده که به علت نیتروژن دهی سختی سطحی خیلی بالایی داشته است، یا فصل مشترک جوش و فلزپایه شده است. دلیل وقوع این ترکها تردی زیاد لایه نیتروژن دهی شده هست که این تردی و شکنندگی باعث شده سطح پخ نیتروژن دهی شده، انعطاف پذیری لازم و در نتیجه تحمل تنش های ناشی از جوشکاری را نداشته باشد.



شکل 7- تصویر میکروسکوپ نوری فلزجوش حاصل از پرکننده ER309L بر روی فلزپایه بعد از نیتروژن دهی.



شکل 8- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع شکست جوش حاصل از فلزپرکننده ER309L بر روی فلزپایه بعد از نیتروژن دهی.

3-4- نتایج حاصل از فلزجوش با پرکننده ER312 بر روی فلزپایه قبل از نیتروژن دهی فلزپایه

یکی دیگر از مواد پرکننده مورد استفاده برای اتصال مشابه در این تحقیق ER312 هست. این سیم پرکننده یک سیم جوش

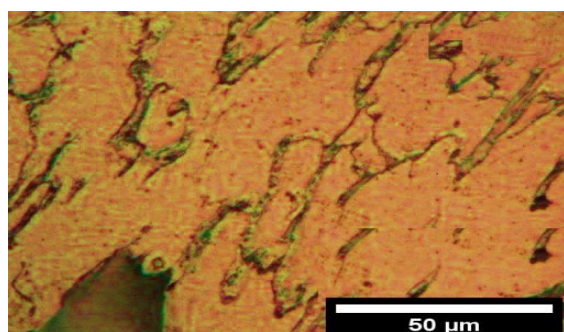
جدول 7- نتیجه آنالیز EDS منطقه مختلف مشخص شده در شکل 8 از فلزجوش حاصل از پرکننده ER309L بر روی فلزپایه بعد از نیتروژن

نوع درصد	درصد عناصر (درصد وزنی %)				
	Ni	Fe	Cr	Al	O
درصد وزنی	۱	۹۲	۲	۲	۳
درصد اتمی	۱	۸۴	۲	۳	۱۰

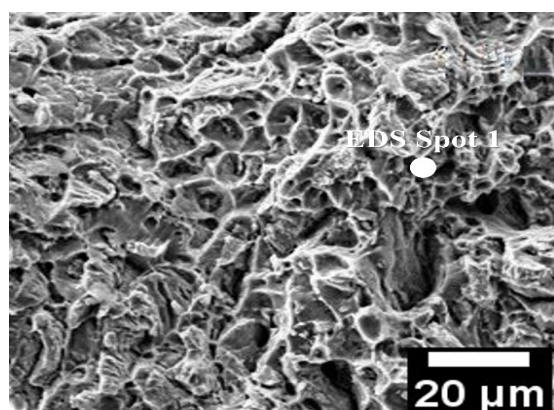
جدول 8- ترکیب شیمیایی جوش ایجاد شده توسط الکتروود ER309L در حالت فلزپایه نیتروژن دهی

	ترکیب شیمیایی فلز پایه	$\times 30\%$	ترکیب شیمیایی الکتروود	$\times 70\%$	نهایی
Cr	۱/۸ %	۰/۵۴ %	۲۵ %	۱۷/۵ %	۱۸/۰۴ %
Mo	۰/۲۵ %	۰/۰۷۵ %	۰/۷۵ %	۰/۵۲۵ %	۰/۶ %
Ni	۱/۵ %	۰/۴۵ %	۱۴	۹/۸ %	۱۰/۲۵ %
C	۰/۳ %	۰/۰۹ %	۰/۰۳ %	۰/۰۲۱ %	۰/۱۱۱ %
N	۰/۴ %	۰/۱۲ %	-	-	۰/۱۲ %

همان طور که در شکل (12) و جدول (11) آنالیز EDS (نقطه 1) از رسوبات موجود در فلزجوش پس از نیتروژن دهی فلزپایه نشان داده شده عنصر گوگرد (S) وجود دارد.



شکل 9- تصویر میکروسکوپ نوری فلزجوش حاصل از پرکننده ER312 بر روی فلزپایه قبل از نیتروژن دهی.



شکل 10- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع شکست جوش حاصل از فلزپرکننده ER312 بر روی فولاد DIN 34CrAlNi7 قبل از نیتروژن دهی

به آستنیت زایی آن و کاهش نسبت کروم معادل به نیکل معادل تا حدود 1/55 فلزجوش به صورت آستنیتی-فریتی با درصد فریت بین 8-10 درصد منجمد خواهد شد. فلزجوش حداقل فریت لازم برای جلوگیری از ترک انجمادی در این نسبت رقت را دارا هست. باید توجه داشت که میزان رقت بیشتر از این حد نشود در صورت افزایش نسبت رقت از 30% و کاهش نسبت کروم معادل به نیکل معادل از معیار 1/5 افزایش شدید حساسیت جوش به ترک انجمادی در جوش های ذوبی این دسته از فولادها رخ خواهد داد.

در جوشکاری با این نوع پرکننده و فلزپایه حاوی 0/12 درصد نیتروژن، با در نظر گرفتن 30 درصد رقت، درصد تقریبی عناصر مورد نظر مطابق جدول (12) به دست آمده و مقدار کروم معادل و نیکل معادل آن برابر با 21/515 درصد و 15/28 خواهد بود. براساس نمودار WRC-1992 نشان داده شده در شکل (6) می توان دریافت فلزجوش آستنیتی با عدد فریت 4 است. در آزمایش کشش جوش حاصل از پرکننده ER312 بر روی فلزپایه DIN 34CrAlNi7 بعد از نیتروژن دهی نشان از استحکام کشش نهایی 759MPa برای فلزجوش می دهد که تقریباً نزدیک به مقدار استحکام کشش نهایی فلزجوش حاصل از پرکننده ER312 براساس ادعای کارخانه سازنده الکتروود که برابر 770MPa است. همچنین مقدار سختی نمونه حاصل شده حدوداً 48 راکول سی است.

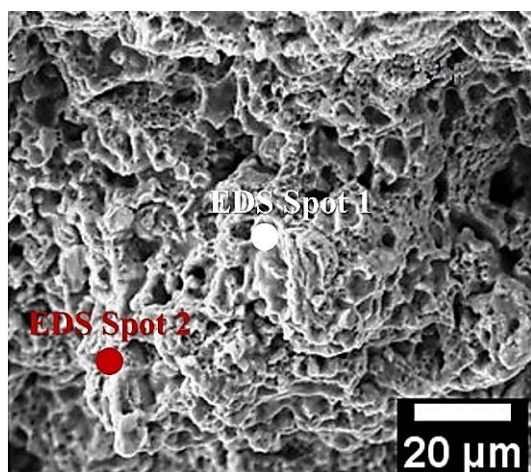
جدول 9- نتیجه آنالیز EDS منطقه مختلف مشخص شده در شکل 10 از فلز جوش حاصل از پرکننده ER312 بر روی فولاد DIN 34CrAlNi7 قبل از نیتروژن دهی.

درصد عناصر (درصد وزنی %)						نوع درصد
Ni	Fe	Cr	Si	O	C	
۵	۷۰	۲۴	-	۰/۴	۰/۶	درصد وزنی
۴	۶۶	۲۵	-	۲	۳	درصد اتمی

جدول 10- ترکیب شیمیایی جوش ایجاد شده توسط الکترود ER312 در حالت فلز پایه بدون نیتروژن دهی

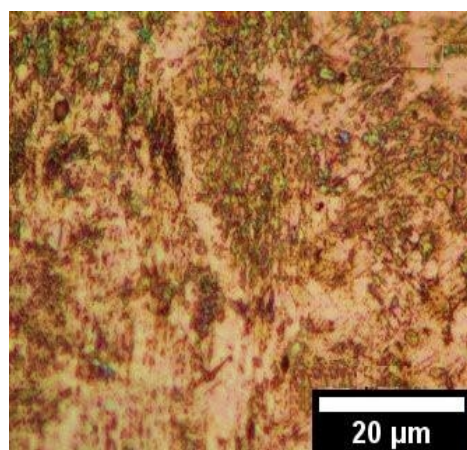
ترکیب شیمیایی فلز پایه	× ۳۰٪	ترکیب شیمیایی الکترو د	× ۷۰٪	نهایی
Cr	۱/۸٪	۰/۵۴٪	۲۹/۸۵٪	۱۷/۵٪
Mo	۰/۲۵٪	۰/۰۷۵٪	—	۰/۰۷۵٪
Ni	۱/۵٪	۰/۴۵٪	۹/۰۵٪	۶/۳۴٪
C	۰/۳٪	۰/۰۹٪	۰/۱۲٪	۰/۰۸۴٪
N	—	—	—	—

یا تجزیه نیتريد آلومینیوم روی سطح پخ یا لبه جوش فلز نیتروژن دهی شده و رسوب آلومینیوم به طور جداگانه دانست. با توجه به نقطه ذوب آلومینیوم و در نتیجه افزایش بازه انجماد، این عنصر نیز می تواند حساسیت به ترک انجمادی را در فلز جوش افزایش دهد.



شکل 12- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع شکست جوش حاصل از فلز پرکننده ER312 بر روی فولاد DIN 34CrAlNi7 بعد از نیتروژن دهی.

این دلیل محکمی برافزایش حساسیت به ترک انجمادی در این فلز جوش است. زیرا گوگرد از جبهه انجماد آستنیتی پس زده شده و در نهایت در صورت کمبود یا نبود Mn کافی در مذاب، مرز دانه ها را تر کرده و باعث ترک گرم می شود. در صورتی که با عنصر Mn ترکیب شده و تشکیل MnS دهد، باعث افت استحکام می شود. در جوش حاصل از پرکننده ER312 بعد از نیتروژن دهی این کاهش مشهود است.



شکل 11- تصویر میکروسکوپ نوری فلز جوش حاصل از پرکننده ER312 بر روی فلز پایه بعد از نیتروژن دهی.

واضح است که در حالت جوشکاری پس از نیتروژن دهی فلز پایه، میزان عناصر خطر ساز و رسوبات، افزایش پیدا کرده که از دلایل مهم آن تغییر الگوی انجماد و افزایش نسبت آستنیت به فريت به خاطر حضور نیتروژن و کربن ورودی از ناحیه رقت

با توجه به ناحیه رقت فلز جوش در حالت نیتروژن دهی شده در آنالیز EDS (نقطه 2) مشخص است درصد مهمی از رسوب را Al به خود اختصاص داده است. دلیل آن را می توان جدا شدن

جدول 11- نتیجه آنالیز EDS منطقه مختلف مشخص شده در شکل 12 از فلزجوش حاصل از پرکننده ER312 بر روی فولاد DIN 34CrAlNi7 بعد از نیتروژن دهی.

درصد عناصر (درصد وزنی %)								نقاط	نوع درصد
Si	S	Mn	Ni	Fe	Cr	Al	O		
-	۹	۱۵	۴	۵۱	۲۰	۰/۲	۰/۸	درصد وزنی	EDS Spot 1
-	۱۵	۱۳	۳	۴۵	۱۹	۱/۵	۳/۵	درصد اتمی	
-	۱	۲/۵	۱	۵۳/۵	۱۹	۱۹	۴	درصد وزنی	EDS Spot 2
-	۱/۵	۳/۵	۲	۳۸	۱۶	۲۹	۱۰	درصد اتمی	

جدول 12- ترکیب شیمیایی جوش ایجاد شده توسط الکتروود ER312 در حالت فلز پایه نیتروژن دهی

ترکیب شیمیایی فلز پایه	% × ۳۰	ترکیب شیمیایی الکتروود	% × ۷۰	نهایی
Cr	% ۱/۸	% ۲۹/۸۵	% ۱۷/۵	% ۲۱/۴۴
Mo	% ۰/۲۵	-	-	% ۰/۰۷۵
Ni	% ۱/۵	% ۹/۰۵	% ۶/۳۴	% ۶/۷۹
C	% ۰/۳	% ۰/۱۲	% ۰/۰۸۴	% ۰/۱۷۴
N	% ۰/۴	-	-	% ۰/۱۲

هست. همین موضوع می تواند باعث افزایش عیوب و رسوب ترکیبات ناخواسته مثل MnS و در نتیجه افت استحکام کششی، انعطاف پذیری و در کل چقرمگی فلزجوش شود.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی کیفیت جوش های حاصل از پرکننده های (ER312، ER 309 L) روی فلز پایه نایترایدینگ DIN 34CrAlNi7 قبل و بعد از نیتروژن دهی پرداخته شد.

- با توجه به اثرات مخرب لایه نیتروژن دهی شده بر روی استحکام اتصال بهتر است جوشکاری این فولادها قبل از نیتروژن دهی فلز پایه انجام شود.

- در جوشکاری این فولادها پس از توجه به اینکه نیتروژن دهی سطحی انجام شده یا نه، در صورتی که نیتروژن دهی انجام شده باشد لازم است، به عمق، نوع نیتريد های موجود، و درصد نیتروژن موجود در سطح توجه نموده، ترکیب نهایی و نحوه انجماد فلزجوش نیز پیش بینی شود.

- استفاده از فلز پرکننده ER309L در حالت پس از نیتروژن دهی فلز پایه با توجه به تغییر نحوه انجماد آن و افزایش احتمال ترک گرم، مجاز نیست. از این پرکننده فقط جهت جوشکاری این فولادها در شرایط قبل از نیتروژن دهی فلز پایه با نسبت رقت کمتر از 30% استفاده می شود.

- در حالت جوشکاری پس از نیتروژن دهی با استفاده از فلز پرکننده ER309L، به دلیل ورود نیتروژن که یک آستینیت زایی قوی است علاوه بر عناصر دیگر از ناحیه رقت به داخل فلزجوش، نوع انجماد به طور کامل در منطقه تک فازی آستینیتی قرار می گیرد که این تغییر باعث افزایش حساسیت جوش به ترک گرم شده منجر به کاهش استحکام کششی و سختی فلزجوش می شود.

- با توجه به سختی و استحکام بالای جوش حاصل از فلز پرکننده ER312 و نیز کاربردهای فولاد نایترایدینگ 1/8550 که اغلب در محیط های سایشی است می توان با رعایت نکات فنی و الزامات جوشکاری این فولادها را قبل و بعد از نیتروژن دهی با این نوع پرکننده جوشکاری نمود.

- در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER312 ورود کربن از ناحیه رقت در فلزجوش در حالت قبل از نیتروژن دهی تشکیل کاربید و همچنین افزایش سختی پذیری، سختی و استحکام فلزجوش را در پی خواهد داشت. ولی در حالت بعد از نیتروژن دهی ورود نیتروژن علاوه بر کربن و عناصر دیگر از ناحیه رقت، باعث آستینیت زایی بیشتر و در نتیجه رسوب رسوبات ناخواسته مثل MnS می شود.

منابع

1-Kovacı, H., Seğer, Y., "Improved tribological

14- اشرفی، ف.ا، صالحی، م، "متالورژی سطح و تریبولوژی، انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران، 1374.

15- بشارت، ا، عملیات حرارتی: نیترایدینگ و نیتروکربورایزینگ، فدک ایساتیس، 1391.

16-Davis, J.R., *Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics*, ASM International, 2002.

17-Wegst, M., *Stahlschlüssel - Key to Steel 2019*, German Edi, French & European Pubns, 2019.

18- رحیمی نگار، سعید توحید. مطالعه ریزساختار و ریزسختی

جوش فولاد زنگ‌نزن 316 L جوشکاری شده به روش TIG, A-

TIG, FB-TIG. علوم و فناوری جوشکاری ایران. 1398;

5(2): 39-50

19- Rayjada, P.A., Raole, P., Jhala, G., "Plasma nitriding on welded joints of AISI 304 stainless steel", *Surface and Coatings Technology*, pp. 306-311, 2013.

20- غلامی محمد، مستعان حسین، نعمت زاده فردین، سنبل

علی. توسعه اتصالات ذوبی غیرمشابه فولاد 4130 به فولاد

زنگ‌نزن آستینیتی 201 و بررسی اثر فلزات پرکننده مختلف با

هدف دستیابی به خواص مکانیکی و مشخصه‌های ریزساختاری

بهبود یافته با استفاده از روش قوسی تنگستن-گاز. علوم و

فناوری جوشکاری ایران. 1397; 4(2): 1-12.

[21-D.L. Olson, T.A. Siewert, S. Liu, G.R.E., *ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International, 1993.

22- صمدی محمدرضا، مستعان حسین، رفیعی مهدی، صالحی

مصطفی. بررسی تأثیر متغیرهای جریان پالسی در جوشکاری

قوسی تنگستن-گاز آلومینیوم 5456 بر تحولات ریزساختاری،

رفتار خوردگی و خواص مکانیکی اتصالات، علوم و فناوری

جوشکاری ایران. 1399; 6(1): 133-146.

23-Nawrocki, J.G., Dupont, J.N., Robino, C.V., Puskar, J.D. and Marder, A., "The mechanism of stress-relief cracking in a ferritic alloy steel", *WELDING JOURNAL-NEW YORK*, Vol. 82(2), pp. 25-s, 2003.

24- Poorkabirian M, Mostaan H, Rafiei M. The Effect of Filler Metal on Properties of AISI 4130 to AISI 316L Dissimilar Joint. *jame*. 2017; 36 (2): 33-46.

performance of AISI 316L stainless steel by a combined surface treatment: Surface texturing by selective laser melting and plasma nitriding", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 400, pp. 126178, 2020.

2-Voevodin, A.A., Donley, M.S., Zabinski, J.S., "Pulsed laser deposition of diamond-like carbon wear protective coatings: a review", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 92, No. 1, pp. 42-49, 1997.

3-Anders, S., Anders, A., Brown, I.G., Wei, B., Komvopoulos, K., Ager, J.W., Yu, K.M., "Effect of vacuum arc deposition parameters on the properties of amorphous carbon thin films", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 68-69, pp. 388-393, 1994.

4- Ichimura, S., Takashima, S., Tsuru, I., Ohkubo, D., Matsuo, H., Goto, M., "Application and evaluation of nitriding treatment using active screen plasma", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 374, pp. 210-221, 2019.

5- Dong, H., "S-phase surface engineering of Fe-Cr, Co-Cr and Ni-Cr alloys", *International Materials Reviews*, Vol. 55, No. 2, pp. 65-98, 2010.

6-Adachi, S., Ueda, N., "Formation of S-phase layer on plasma sprayed AISI 316L stainless steel coating by plasma nitriding at low temperature", *Thin Solid Films*, Vol. 523, pp. 11-14, 2012.

7- Nagamatsu, H., Ichiki, R., Yasumatsu, Y., Inoue, T., Yoshida, M., Akamine, S., Kanazawa, S., "Steel nitriding by atmospheric-pressure plasma jet using N₂/H₂ mixture gas", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 225, pp. 26-33, 2013.

8- Dehghanghadikolaei, A., Mohammadian, B., Namdari, N., Fotovvati, B., "Abrasive Machining Techniques for Biomedical Device Applications", Vol. 5, pp. 1-11, 2018.

9-Mary O Amdur, John Doull, C.D.K., "Casarett and Doull's toxicology: the basic science of poisons", *Journal of occupational and environmental medicine*, Vol. 35, No. 1, pp. 76, 1993.

10-Fotovvati, B., Namdari, N., Dehghanghadikolaei, A., *On Coating Techniques for Surface Protection: A Review*, 2019.

11-Bankim Chandra Ray, Rajesh Kumar Prusty, D.N., *Phase Transformations and Heat Treatments of Steels 1st Edition*, 2020.

12-Shetty, D.K., Kumar, S., Rao, P., "Effect of Ion Nitriding on the Microstructure and Properties of Maraging Steel (250 Grade)", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 203, pp. 1530-1536, 2009.

13-Pye, D., *Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing*, ASM International, 2003.