

## بررسی تأثیر جایگزینی عنصر وانادیوم به جای نیوبیوم بر ریزساختار و رفتار خوردگی فلز جوش الکتروود E347-16

غلامرضا صابری ثانی<sup>۱</sup>، حامد ثابت<sup>۲\*</sup>، سیدرضا امیرآبادی زاده<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۳، ش ص: ۴۲-۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹)

### چکیده

در این پژوهش به بررسی اثر افزودن عنصر وانادیوم به جای نیوبیوم بر ریزساختار و مقاومت به خوردگی فلز جوش الکتروود E347-16 پرداخته شده است. بدین منظور الکترودهایی حاوی فرونیوبیوم و فرووانادیوم در پوشش الکتروود ساخته و مطابق استاندارد AWS A5.4 نمونه‌هایی از هر دو الکتروود بر روی ورق فولادی جوشکاری گردیدند، سپس آزمون‌های آنالیز شیمیایی، متالوگرافی و انواع خوردگی بر روی آن‌ها انجام شد. بررسی نتایج آزمون آنالیز شیمیایی و تطابق آن با دیاگرام شفلر مشخص نمود که ریزساختار فلز جوش نمونه‌ها از فریت و آستنیت تشکیل شده است، نتایج بررسی‌های متالوگرافی مشخص نمودند که فلز جوش نمونه حاصل از الکتروود حاوی وانادیم از درصد حجمی فریت بیشتری نسبت به الکتروود حاوی نیوبیوم برخوردار است. نتایج آزمون‌های خوردگی مشخص نمودند که با جایگزینی عنصر وانادیم به جای نیوبیوم در الکتروود E347-16، حساسیت به خوردگی بین دانه‌های فلز جوش نمونه‌های مختلف در محدوده قابل قبول بوده و مقاومت به خوردگی آن‌ها تغییر چندانی نمی‌یابد، همچنین در رفتار خوردگی الکتروشیمیایی فلز جوش نمونه‌های مختلف تفاوت چندانی مشاهده نشد، نتایج بدست آمده از آزمون‌های فوق مشخص نمودند که جایگزینی عنصر وانادیم به جای نیوبیوم در الکتروود E347-16 از نظر متالورژیکی امکانپذیر می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** وانادیم، نیوبیوم، الکتروود E347-16، ریزساختار، خوردگی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۳- عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*- نویسنده مسئول مقاله: [h-sabet@kiau.ac.ir](mailto:h-sabet@kiau.ac.ir)

## پیشگفتار

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی (سری 300)، آلیاژی با استحکام بالا، انعطاف‌پذیری قابل قبول و مقاومت به خوردگی عالی هستند. مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون این فولادها با افزایش عنصر کروم، افزایش می‌یابد. لذا این آلیاژها در طیف گسترده‌ای از محیط‌های خوردنده در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد به خوردگی یکنواخت، خوردگی سایشی و pH بالای محلول-ها مقاوم هستند. فولاد زنگ‌نزن 347 یکی از رایج‌ترین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی می‌باشد که کاربرد زیادی در صنایع نفت، گاز، پالایشگاه، مبدل‌های حرارتی و ... دارد [۱-۵].

دو نوع خوردگی موضعی در فولادهای زنگ‌نزن رخ می‌دهد که شامل خوردگی حفره‌ای و خوردگی شیاری است که مکانیزم و علت وقوع هر دو نوع خوردگی مشابه و ناشی از حملات شدید موضعی عوامل خوردنده است. جوشکاری می‌تواند خوردگی موضعی را با تشکیل ریزساختارهایی که باعث تسریع خوردگی حفره‌ای می‌شود یا ایجاد شیارها (نفوذ ناقص، محبوس شدن سرباره و غیره) تشویق و تسریع نماید [۴-۶]. از سوی دیگر جوشکاری می‌تواند با تخریب لایه اکسیدی در سطح، باعث کاهش مقاومت به خوردگی شود. خطرناک‌ترین نوع خوردگی در فولادهای زنگ‌نزن جوشکاری شده حمله بین‌دانه‌ای<sup>۱</sup> و پدیده‌های مرتبط با آن یعنی ترک خوردن خوردگی تنش بین‌دانه‌ای<sup>۲</sup> است. این نوع خوردگی معمولاً در ناحیه متاثر از حرارت (Heat Affected Zone) فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی رخ می‌دهد و حساس شدن نامیده می‌شود [۷-۹]. حساس شدن در دماهای بالا رخ می‌دهد. در این دماها، کربن که از لحاظ ترمودینامیکی میل ترکیبی زیادی با کروم دارد، کاربید کروم تشکیل می‌دهد. در دمای بالا، نفوذ مرزدانه‌ای خیلی بیش‌تر از نفوذ درون‌دانه‌ای است و مرزدانه‌ها مکان‌های مناسبی برای جوانه‌زنی این کاربیدها هستند، از طرفی نفوذ عنصر کربن به علت قطر اتمی کم‌تر، چندین برابر بیش‌تر از نفوذ عنصر کروم است. بنابراین، از آنجایی که تشکیل کاربید کروم در پی نفوذ کربن به مرزدانه‌ها صورت می‌پذیرد، اطراف مرزدانه‌ها از

کروم تهی می‌شود. کاهش مقادیر کروم این مناطق به حدی است که سبب کاهش مقاومت به خوردگی این مناطق نسبت به مناطق دیگر می‌گردد [۵و۶].

از سوی دیگر، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در حین جوشکاری به شدت مستعد ترک گرم نیز هستند. بدین منظور در اغلب موارد برای جوشکاری این فولادها از فلز پرکننده‌ای استفاده می‌شود که جوش حاصل از آن دارای مقداری فاز فریت باشد. حضور فاز فریت برای کاهش ریسک بروز ترک گرم در جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی نقش موثری ایفا می‌کند. اثبات شده که فاز فریت در مقایسه با فاز آستنیت، ناخالصی‌هایی مانند گوگرد، فسفر، سرب و قلع را بهتر در خود حل می‌کند. لذا این عناصر می‌توانند از فاز آستنیت خارج شده و در مرزدانه‌ها، فازهای ثانویه‌ای با دمای ذوب پایین تشکیل دهند که در خلال سرد شدن فلز جوش می‌توانند ایجاد ترک گرم نمایند [۸و۱]. این موضوع متاثر از نحوه انجماد و مقدار تنش‌های انقباضی و یا به عبارت دیگر ضریب انقباض فلز جوش است؛ اما در حضور فاز فریت احتمال وقوع این پدیده بسیار کم است، چراکه از یک طرف مقدار حلالیت عناصر ناخالصی مزبور در فاز فریت بیش‌تر از آستنیت بوده و در نتیجه احتمال ایجاد فازهای زود ذوب ناشی از غنی شدن این عناصر در لایه‌های مذاب باقیمانده بین‌دانه‌ها بسیار کم‌تر خواهد شد. از طرف دیگر ضریب انبساط و انقباض فاز فریت تقریباً دو سوم فاز آستنیت بوده و به تبع آن تنش‌های انقباضی ایجاد شده حین انجماد در آن نیز کم‌تر خواهد بود [۱]. لذا برای کاهش تشکیل ترک گرم در جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی باید فلز پرکننده (الکتروود، مفتول یا سیم جوش) به گونه‌ای انتخاب شود که ترکیب فلز جوش (بعد از امتزاج با فلز پایه) به نحوی باشد که به صورت فریتی منجمد گردد. به عبارت ساده‌تر، فلز جوش دارای میزان (درصد حجمی) فریت باقیمانده یا عدد فریتی معادل حدود ۳-۱۲ درصد باشد. بدین منظور در الکترودهای جوشکاری فولادهای آستنیتی از عناصر فریت‌زا مانند نیوبیوم و تیتانیوم (با اضافه نمودن در پوشش الکتروود) استفاده می‌شود. برای غلبه بر خوردگی فلز جوش در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی نیز توصیه می‌گردد تا از فلز پرکننده و یا الکترودهای پایدار شده، مانند نوع 321 (پایدار شده با تیتانیوم) و نوع 347 (پایدار شده با نیوبیوم)

۱- Intergranular attack

۲- Intergranular stress corrosion cracking

می‌دهد [۱۳ و ۱۴]. از آنجایی که عنصر وانادیم نیز از عناصر پایدارکننده فولاد زنگ‌نزن می‌باشد و خواصی مشابه نیوبیوم دارد، انتظار می‌رود که بتوان از آن به عنوان جایگزینی در ساخت الکترودهای فوق‌الذکر بهره برد. با در نظر گرفتن اینکه قیمت عنصر وانادیم و ترکیبات آن (فرو وانادیم) در بازارهای جهانی حدود ۳۰ درصد کم‌تر از عنصر نیوبیوم و ترکیبات آن (فرو نیوبیوم) است، امکان جایگزینی وانادیم به جای نیوبیوم برای تولیدکنندگان الکتروده E347-16 صرفه اقتصادی قابل توجهی را به همراه خواهد داشت. از سوی دیگر، با توجه به کمبود عنصر نیوبیوم و مشکلات تامین آن برای تولیدکننده‌های الکتروده E347-16، اهمیت بررسی جایگزینی این عنصر به جای نیوبیوم را پررنگ‌تر و برای کشور استراتژیک می‌نماید. بنابراین، در تحقیق حاضر سعی شده تا امکان جایگزینی نیوبیوم با عنصر وانادیم در الکتروده E347-16 مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

### مواد و روش‌ها

مقدار ۵ کیلوگرم الکتروده E347-16 با عنصر وانادیم که در این تحقیق به اختصار الکتروده E347-V نامیده می‌شود و مقدار ۵ کیلوگرم الکتروده E347-16 با عنصر نیوبیوم که در این تحقیق به اختصار الکتروده E347-Nb نام‌گذاری شده بر اساس استاندارد AWS A5.4 [۱۵] و با قطر (اندازه)  $3/2$  mm در شرکت صنعتی آما ساخته شد. در فرمولاسیون پوشش الکتروده E347-V از روتایل ( $TiO_2$ ) و فرووانادیم و برای الکتروده E347-Nb از روتایل و فرونیوبیوم استفاده گردید. پس از ساخت الکترودها عملیات جوشکاری توسط جوشکار ماهر و دارای صلاحیت مطابق استاندارد AWS QC12 به روش SMAW و براساس پارامترهای جوشکاری ذکر شده در جدول ۱ بر روی ورق‌هایی از جنس فولاد ساده کربنی به ابعاد  $100 \times 70 \times 10$  میلی‌متر بصورت رویه در ۸ لایه انجام شد. بعد از عملیات جوشکاری نمونه‌های مورد نیاز جهت آزمون‌ها، مطابق استاندارد AWS A4.0 [۱۶] از بین لایه‌های هفتم و هشتم تهیه شدند.

ترکیب شیمیایی عناصر موجود در فلز جوش به روش فلورسکوپی اشعه ایکس (XRF) و با دستگاه مدل ARL-X8410 اندازه‌گیری و با مقادیر استاندارد مقایسه

استفاده نمود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که عناصر تیتانیوم و نیوبیوم تمایل بیشتری برای تشکیل کاربید نسبت به عنصر کروم دارند و از تشکیل رسوب  $Cr_{23}C_6$  جلوگیری می‌کنند که در نتیجه باعث بهبود مقاومت به خوردگی فلز جوش می‌شود [۱۰ و ۱۱].

نیوبیوم دارای ساختار کریستالی bcc بوده و در فولاد، یک عنصر فریت‌زای قوی به‌شمار می‌رود. با افزودن نیوبیوم به فولاد به دلیل تمایل زیاد ترکیب این عنصر با کربن (ناشی از انرژی آزاد)، کاربید نیوبیوم به سرعت تشکیل شده و با جلوگیری از تشکیل کاربید کروم، باعث افزایش مقاومت به خوردگی بین‌دانه‌ای می‌شود. فولادهای نیوبیوم‌دار به دلیل تشکیل ترکیب بین‌فلزی قابل حل  $Fe_3Nb_2$  دارای استحکام بالایی نیز هستند. فولادهای حاوی نیوبیوم ریزدانه بوده و در نتیجه خواص انرژی ضربه در دمای پایین بهتری نیز ارائه می‌دهند. نیوبیوم قویترین عنصر برای ریزدانه نمودن ساختار فولادهای آلیاژی محسوب می‌شود که در فولادهای زنگ‌نزن به‌تنهایی و یا به‌همراه تیتانیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دو عنصر با تشکیل کاربیدهای بسیار پایدار با کربن، از ترکیب شدن کربن با کروم و کاهش مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ‌نزن جلوگیری می‌نمایند. افزودن نیوبیوم به فولاد سختی‌پذیری آن را نیز کاهش می‌دهد [۱۱-۱۳]. همچنین طبق تحقیقات انجام شده [۱۲ و ۱۳] افزودن نیوبیوم بیش‌تر از ۰/۵ درصد در فولاد های زنگ نزن آستنیتی، باعث تشکیل فازهای لایه می‌گردد. فازهای لایه و سیگما، باعث کاهش مقاومت به خوردگی حفره‌ای و افزایش مقاومت سایشی و سختی این فولادها می‌شود. افزودن نیوبیوم از دو نقطه‌نظر مهندسی و اقتصادی حائز اهمیت است، از نقطه نظر مهندسی، حضور نیوبیوم در فلز جوش منجر به تثبیت ساختار شده و ریسک‌هایی همچون وقوع خوردگی بین‌دانه‌ای و ترک گرم را کاهش می‌دهد؛ اما از نقطه‌نظر اقتصادی، قیمت بالای فلز نیوبیوم در بازارهای جهانی، بهای تمام‌شده الکتروده E347-16 را برای تولیدکنندگان الکتروده بالا می‌برد. از سوی دیگر، وانادیم نیز دارای ساختار کریستالی bcc بوده و پایدارکننده فاز فریت است و تمایل زیادی به تشکیل کاربید دارد. وانادیم از درشت شدن دانه‌های آستنیت نیز جلوگیری می‌کند. وانادیم با کربن واکنش داده و کاربید وانادیم  $V_4C_3$  را تشکیل

تا ۱۲۰ بدون تولید گرمای اضافی صاف و هموار شده و سپس با سنباده‌های ۴۰۰ الی ۲۵۰۰ به ترتیب تحت آماده سازی قرار گرفتند. محلول حکاکی الکتروشیمیایی، با حل نمودن ۱۰۰ gr کریستال اسید اگزالیک ( $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$ ) در ۹۰۰ mL آب مقطر تهیه شد. میزان جریان مدار برای حکاکی الکتروشیمیایی با تغییر مقاومت مدار به میزان  $1A/cm^2$  تنظیم گردید. عملیات حکاکی الکتروشیمیایی به مدت ۱/۵ min با جریان فوق انجام و سپس نمونه‌ها از داخل محلول خارج شده و پس از شستشو با آب گرم، با استن خشک شدند. سطوح حکاکی شده نمونه‌ها با میکروسکوپ OLYMPUS CX22 مورد ارزیابی قرار گرفت و با تصاویر استاندارد مقایسه شدند.

آزمون مقاومت به خوردگی حفره‌ای براساس استاندارد ASTM G48 (Method A) [۱۸] انجام شد. بدین منظور نمونه‌های مورد نیاز با ابعاد  $15 \times 10 \text{ mm}^2$  تهیه و سطح نمونه‌ها با سنباده ۱۲۰ به روش‌تر آماده سازی شدند، سپس ابعاد نمونه‌ها مجدد اندازه‌گیری و مساحت سطوح تماس نمونه‌ها محاسبه شد. پس از تمیز نمودن سطح نمونه‌ها با خمیر اکسید منیزیم و شستشو با آب و خشک کردن با استن، با ترازوی دیجیتال با دقت  $\pm 0.1 \text{ mgr}$  وزن شده و آماده انجام آزمایش گردیدند. محلول فریک کلرید ( $FeCl_3$ ) با حل نمودن ۱۰۰ گرم  $FeCl_3$  در ۹۰۰ ml آب مقطر تهیه شد. ۶۰۰ ml از محلول، داخل بشر ریخته شد و بشر داخل حمام آب گرم با دمای  $22 \pm 2^\circ C$  قرار داده شد تا به دمای تعادل برسد، سپس نمونه‌ها با ترازو توزین شده و روی پایه شیشه‌ای و در بشر به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شدند. پس از پایان زمان آزمون، نمونه‌ها با آب و برس نایلونی و سپس با دستگاه التراسونیک تمیز شدند تا اثرات خوردگی از روی سطوح حذف شود. در مرحله بعد نمونه‌ها در استن قرار گرفته و بعد با هوا خشک شدند، در انتها مجدد نمونه‌ها با ترازو وزن شده و مقدار کاهش وزن آن‌ها به همراه میزان سرعت خوردگی محاسبه گردید.

برای بررسی رفتار خوردگی با رسم منحنی پلاریزاسیون تافل، ابتدا مطابق استاندارد ASTM G1 [۱۹] نمونه‌هایی از فلز جوش الکترودهای E347-V و E347-Nb با سطح مقطع  $1 \text{ cm}^2$  تهیه گردید. سپس نمونه‌ها به منظور چربی زدایی با اتانول شسته و نهایتاً

گردید. برای تعیین ریز ساختار فلز جوش از نمودار سفلر استفاده شد، بدین منظور مقادیر کروم و نیکل معادل فلز جوش با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه گردید [۱]:

$$Ni_{eq}\% = Ni\% + 30 \times C\% + 0.5 \times Mn\% \quad (1)$$

$$Cr_{eq}\% = Cr\% + Mo\% + 1/5 \times Si\% + 0.5 \times Nb\% \quad (2)$$

برای بررسی و مطالعه ریز ساختار، نمونه‌هایی با سطح مقطع  $15 \times 10 \text{ mm}^2$  تهیه و سطح نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های شماره ۱۰۰ الی ۲۵۰۰ به ترتیب سنباده‌زنی و در نهایت به منظور بهبود کیفیت سطحی با استفاده از محلول آلومینای ۳ میکرون تحت عملیات صیقل کاری<sup>۱</sup> قرار گرفتند. سپس توسط محلول فرای<sup>۲</sup> (۵۰ گرم کوپریک کلرید، ۴۰ میلی لیتر هیدروکلریک اسید، ۳۰ میلی لیتر آب و ۲۵ میلی لیتر متیل الکل) تحت حکاکی قرار گرفتند. در مرحله بعد، ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه میکروسکوپ نوری مدل EPIPHOT NIKON مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت بررسی دقیق تر فازها، بررسی ریزساختاری با کمک یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل SERON TECHNOLOGY AIS 2300C با ولتاژ کاری ۳۰ کیلوولت و مود تصویربرداری الکترون ثانویه (SE) انجام شد. همچنین برای تعیین درصد فازهای فریت و آستنیت، از دستگاه FERITSCOPE ساخت شرکت FISCHER مدل FMP 30 استفاده شد. درصد فاز فریت در فلز جوش مطابق استاندارد AWS A4.0M اندازه‌گیری گردید [۱۶] و جهت صحت گذاری نتایج درصد فازها (قبل و بعد از آزمون خوردگی) با کمک نرم افزار آنالیزتصویری ImageJ نتایج مورد بررسی مجدد قرار گرفتند.

آزمون حساسیت به خوردگی بین‌دانه‌ای براساس استاندارد ASTM A262 (PRACTICE A) انجام گردید [۱۷]. نمونه‌های مورد نیاز با ابعاد  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  تهیه و برای افزایش حساسیت به خوردگی بین‌دانه‌ای و ایجاد رسوب کاربیده‌ها، به مدت یک ساعت در دمای  $675^\circ C$  تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. بعد از عملیات حرارتی سطح نمونه‌ها در ابتدا با استفاده از کاغذ سنباده ۸۰

۱ -Polishing

۲ -Fry

### نتایج و بحث

جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی فلزجوش الکترودهای E347-V و E347-Nb را در مقایسه با ترکیب شیمیایی استاندارد ارایه می‌دهد. براساس ترکیب شیمیایی ارایه شده در جدول ۲ مقدار کروم و نیکل معادل محاسبه شده (از روابط ۱ و ۲) فلزجوش الکترودهای E347-V و E347-Nb در جدول ۳ ارائه شده است.

توسط جریانی از هوای گرم خشک شدند. قبل از انجام آزمون‌های پلاریزاسیون تافل، نمونه‌ها تا رسیدن به پتانسیل مدار باز، به مدت ۱ ساعت در محلول NaCl ۳/۵٪ قرار گرفتند. رفتار خوردگی نمونه‌ها در محلول NaCl ۳/۵٪ در یک سل سه الکترودی شامل گرافیت به عنوان الکتروود شمارنده، الکتروود کالومل اشباع به عنوان الکتروود مرجع و نمونه‌های مورد آزمایش، به عنوان الکتروود کاری، با نرخ روبش ۱ mV/s از ۲۰۰ mV- نسبت به پتانسیل مدار باز تا ۲۰۰ mV+ مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۱- پارامترهای جوشکاری

حالت جوشکاری	تعداد لایه‌ها	دمای بین پاس ها (° C)	سرعت جوشکاری (cm/min)	اختلاف پتانسیل (V)	شدت جریان (A)	قطر الکترودها (mm)
تخت	۸	۱۲۰	۶	۳۰	۱۰۰	۳/۲

جدول ۲- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فلز جوش حاصل از جوشکاری الکترودهای E347-V و E347-Nb

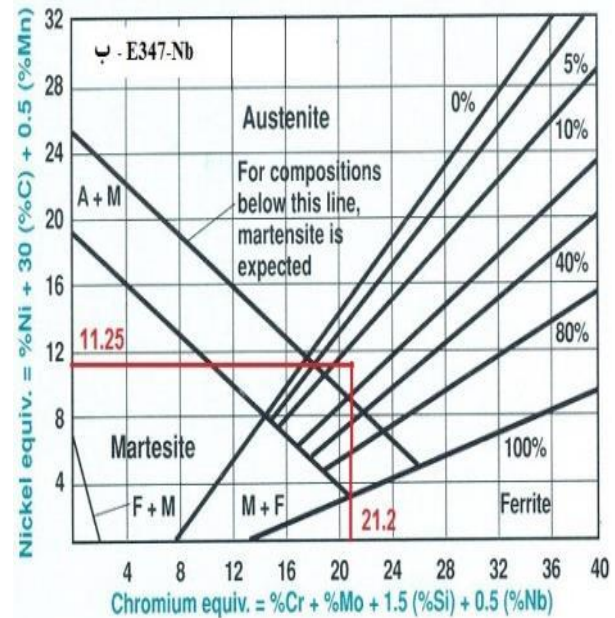
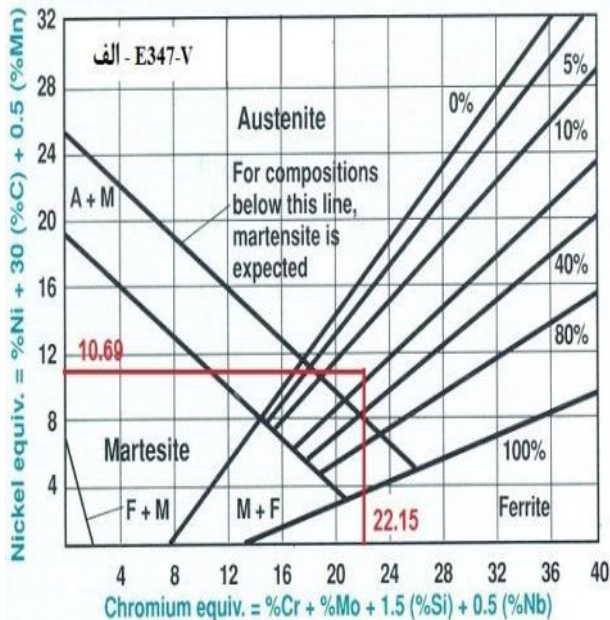
نمونه	C	Cr	Ni	Mo	Nb	Mn	Si	P	S	Cu	V
AWS A5.4	حداکثر ۰/۰۸	۱۸/۰-۲۱/۰	۹/۰-۱۱/۰	۰/۷۵	۸xC حداقل حداکثر ۱/۰۰	۰/۵-۲/۵	۱/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۷۵	---
E347-V	۰/۰۲۸	۲۱/۴۰۰	۹/۱۰۲	۰/۰۴۲	---	۱/۵۰۳	۰/۴۷۰	۰/۰۱۶	۰/۰۰۷	۰/۰۲۰	۰/۴۰۲
E347-Nb	۰/۰۴۵	۲۰/۰۱۰	۹/۱۰۱	Trace	۰/۶۰۱	۱/۶۰۰	۰/۶۰۲	۰/۰۲۰	۰/۰۰۶	۰/۰۳۱	---

جدول ۳- مقادیر کروم و نیکل معادل فلزجوش مربوط به الکترودهای E347-Nb و E347-V

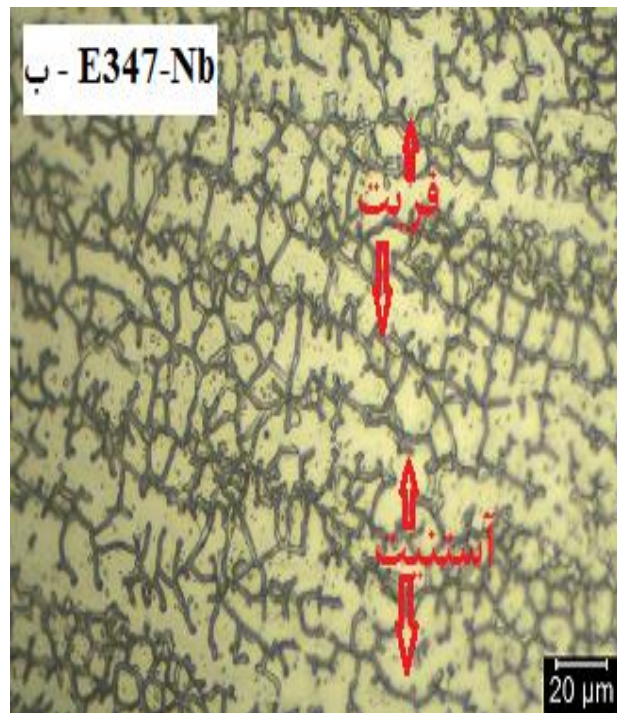
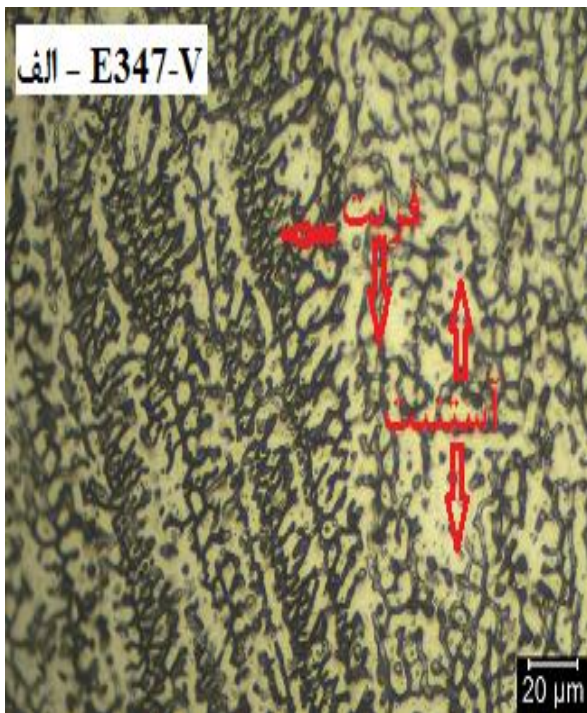
نمونه	Cr <sub>eq</sub> / Ni <sub>eq</sub>	Ni <sub>eq</sub>	Cr <sub>eq</sub>
E347-V	۲/۱	۱۰/۶۹	۲۲/۱۵
E347-Nb	۱/۸	۱۱/۲۵	۲۱/۲

حاصل از هر دو الکتروود E347-V و E347-Nb شامل آستنیت- فریت می باشد.

شکل ۱ موقعیت ریزساختار فلز جوش حاصل از الکتروودهای E347-V و E347-Nb بر روی دیاگرام شفلر نشان می دهد، با توجه به موقعیت تعیین شده بر روی دیاگرام شفلر مشخص می گردد که ساختار فلز جوش



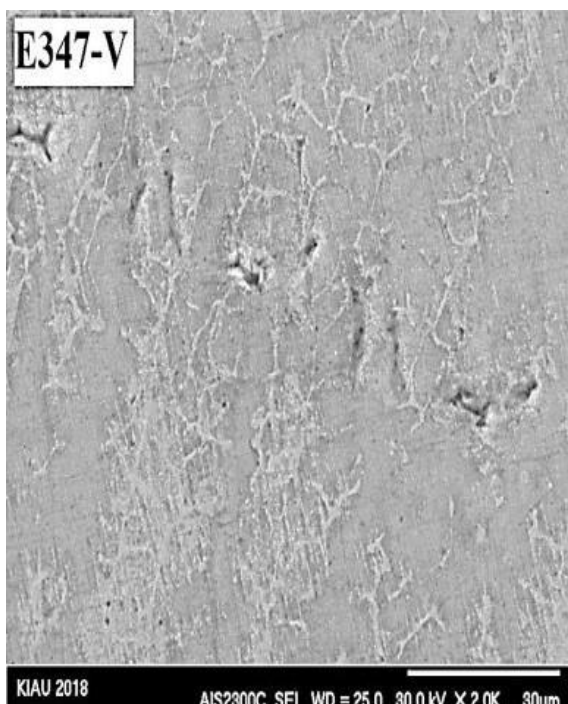
شکل ۱- تعیین ریزساختار فلز جوش با استفاده از نمودار شفلر [۳] (الف) الکتروود E347-V و (ب) الکتروود E347-Nb



شکل ۲- تصویر میکروسکوپی نوری از فلز جوش مربوط به الکتروودهای مختلف (الف) E347-V (ب) E347-Nb

گونه که از مقایسه تصاویر شکل ۲ (الف) و شکل ۲ (ب) مشخص است، درصد حجمی فاز فریت در ساختار فلزجوش حاصل از الکتروود E347-V بیش‌تر از الکتروود E347-Nb می‌باشد. نتایج آزمون فریت سنجی، فلزجوش الکتروود E347-V مشخص نمود که ریزساختار حاصل حاوی ۱۱ درصد حجمی فریت (۸۹A+۱۱F٪) می‌باشد، همچنین نتایج آزمون فریت سنجی، فلزجوش الکتروود E347-Nb مشخص نمود که ریزساختار حاصل حاوی ۸ درصد حجمی فریت (۹۲A+۸F٪) می‌باشد که هر دو مقدار در رنج مناسب (۳ الی ۱۲ درصد حجمی فریت) برای جلوگیری از ترک‌گرم می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. از طرفی بررسی دقیق‌تر شکل ۲ (الف و ب) و همچنین شکل ۳ (الف و ب) مشخص می‌نماید که متوسط فواصل بین شاخه‌های اسکلتی فاز فریت در فلزجوش حاصل از الکتروود E347-V حدود ۳ میکرون و متوسط فواصل بین شاخه‌های اسکلتی فاز فریت حاصل از الکتروود E347-Nb حدود ۵ میکرون می‌باشد. علت کم‌تر بودن متوسط فواصل بین شاخه‌های فاز فریت در فلزجوش حاصل از الکتروود E347-V نسبت به الکتروود E347-Nb ناشی از اثرگذاری بیش‌تر عنصر وانادیم در محدود کردن رشد شاخه‌های فریت در هنگام انجماد می‌باشد [۴-۶].

شکل ۲ تصویر میکروسکوپی نوری فلزجوش مربوط به الکتروودهای E347-V و E347-Nb را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از تصاویر شکل ۲ (الف) و ۲ (ب) مشخص است، ریزساختار میکروسکوپی فلزجوش حاصل از الکتروود E347-Nb، از فاز آستنیت به همراه فریت اسکلتی تشکیل شده است؛ ولی ریزساختار میکروسکوپی فلزجوش حاصل از الکتروود E347-V، از فاز آستنیت به همراه مخلوطی از فریت اسکلتی و فریت شبکه‌ای تشکیل شده است، علت این امر ناشی از اختلاف در نسبت  $Cr_{eq} / Ni_{eq}$  می‌باشد [۷]. جدول ۳ مقادیر نسبت  $Cr_{eq} / Ni_{eq}$  فلزجوش حاصل از الکتروودهای E347-V و E347-Nb را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که از جدول ۳ مشخص است، نسبت  $Cr_{eq} / Ni_{eq}$  فلزجوش حاصل از الکتروود E347-V مقدار ۲/۱ می‌باشد که بالاتر از نسبت  $Cr_{eq} / Ni_{eq}$  فلزجوش حاصل از الکتروود E347-Nb با مقدار ۱/۸ می‌باشد. تشکیل فریت اسکلتی یا فریت شبکه‌ای در حین انجماد فلزجوش تابعی از سرعت سرد شدن و نسبت  $Cr_{eq} / Ni_{eq}$  می‌باشد [۱]. از آنجایی که سرعت سرد شدن برای هر دو نمونه یکسان بوده است لذا با افزایش نسبت  $Cr_{eq} / Ni_{eq}$ ، فریت شبکه‌ای در کنار فریت اسکلتی در فلزجوش حاصل از الکتروود E347-V تشکیل شده است [۷ و ۲۰ و ۲۱]. همان-

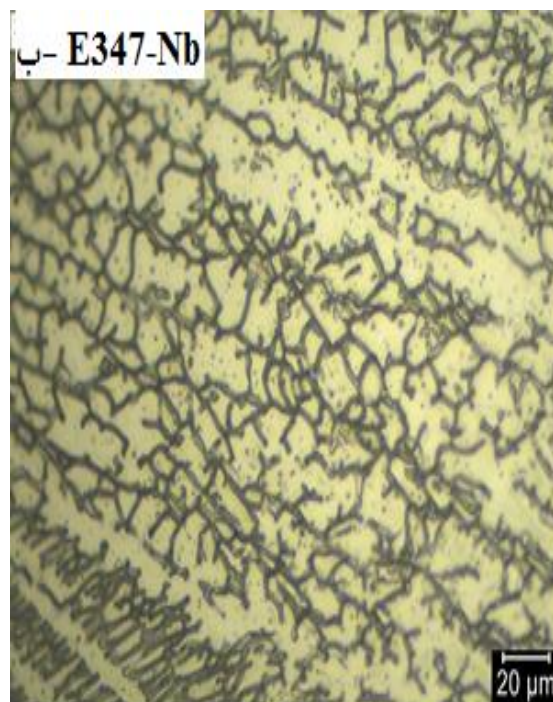


شکل ۳- تصویر SEM از فلزجوش مربوط به الکتروودهای مختلف (الف) E347-V (ب) E347-Nb

تغییرات ریزساختاری در فلز جوش حاصل از الکتروود E347-Nb قبل و بعد از آزمون خوردگی بین دانه‌های حدود ۸ درصد است که هردو در محدوده قابل قبول برای این آلیاژ (زیر ۲۰ درصد) می‌باشند [۶ و ۹].

جدول ۴ نتایج آزمون مقاومت به خوردگی حفره‌ای فلز جوش مربوط به الکتروودهای E347-V و E347-Nb را ارائه می‌دهد. بررسی نتایج آزمون مذکور نشان می‌دهد که نرخ خوردگی فلز جوش حاصل از الکتروود E347-V در حدود  $0.0606 \text{ gr/cm}^2$  و برای فلز جوش حاصل از الکتروود E347-Nb در حدود  $0.0675 \text{ gr/cm}^2$  است که نتایج مذکور، تغییرات قابل توجه (و بسیار زیادی را) در میزان خوردگی حفره‌ای فلز جوش حاصل از دو الکتروود را نشان نمی‌دهد. علت این امر ناشی از شباهت‌های ریزساختاری (و عدم اختلاف زیاد درصد حجمی فازها) می‌باشد که خواص الکتروشیمیایی نسبتاً مشابهی از خود نشان داده‌اند [۲۲ و ۲۳].

شکل ۴ تصویر میکروسکوپی نوری فلز جوش در آزمون حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای مربوط به الکتروودهای E347-V و E347-Nb را نشان می‌دهد. مقایسه شکل ۴ (الف و ب) با شکل ۲ (الف و ب) مشخص می‌نماید که عملیات حرارتی انجام شده منجر به حساس شدن و به دنبال آن خوردگی در فلز جوش شده است، همچنین با مقایسه تصاویر شکل ۴ (الف و ب) با تصاویر موجود در استاندارد ASTM A262 مشخص می‌گردد که هر دو تصویر با شکل Ditch استاندارد مذکور منطبق بوده و نشان دهنده کمی بیش‌تر بودن میزان خوردگی در فلز جوش حاصل از الکتروود E347-V می‌باشد که ناشی از اثرگذاری بیش‌تر عنصر نیوبیوم در محدود کردن خوردگی بین دانه‌ای می‌باشد [۱۱ و ۱۳]. بررسی تغییرات ریزساختاری فلز جوش قبل و بعد از آزمون حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای مربوط به الکتروودهای E347-V و E347-Nb (شکل ۲ و ۴) مشخص می‌نماید که تغییرات ریزساختاری در فلز جوش حاصل از الکتروود E347-V قبل و بعد از آزمون خوردگی بین دانه‌ای حدود ۱۵ درصد و



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی نوری فلز جوش در آزمون حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای مربوط به

الکتروودهای مختلف (الف) E347-V (ب) E347-Nb

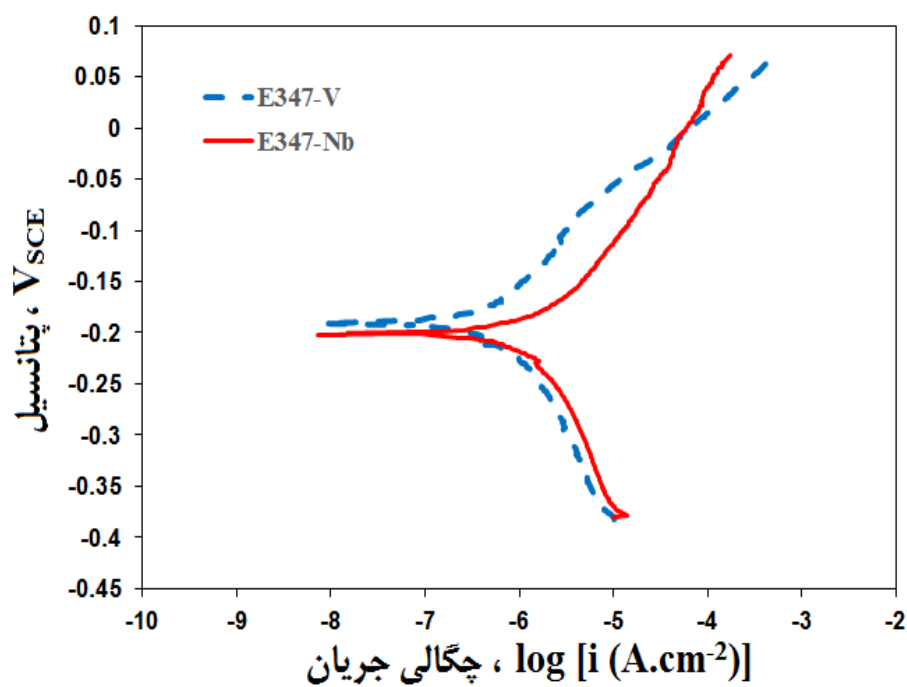


جدول ۴- نتایج آزمون خوردگی حفره‌ای مطابق استاندارد ASTM G48 برای مقاطع جوش الکترودهای E347-V و E347-Nb

نمونه	وزن اولیه (gr)	وزن ثانویه (gr)	کاهش وزن (gr)	سطح نمونه (cm <sup>2</sup> )	نرخ خوردگی (gr/cm <sup>2</sup> )
E347-V	۱۶/۷۳۸۲	۱۶/۱۲۶۷	۰/۶۱۱۵	۱۰/۰۹۰۵	۰/۰۶۰۶
E347-Nb	۳۹/۹۰۴۰	۳۸/۶۲۲۱	۱/۲۸۱۹	۱۸/۹۶۳۰	۰/۰۶۷۵

شکل ۵ رفتار خوردگی الکتروشیمیایی با رسم منحنی پلاریزاسیون تافل فلز جوش مربوط به الکترودهای E347-V و E347-Nb را نشان می‌دهد. داده‌های الکتروشیمیایی استخراج شده مربوط به نمونه‌های مذکور از آزمون پلاریزاسیون نیز در جدول ۵ ارائه شده است.

از طرفی بررسی دقیق نتایج جدول ۴ مشخص می‌نماید که نرخ خوردگی فلز جوش حاصل از الکترودهای E347-V حدود ۱۰٪ کم‌تر از نرخ خوردگی فلز جوش حاصل از الکترودهای E347-Nb است. به عبارت دیگر، در مورد مقایسه مقاومت دو ساختار فلز جوش نسبت به خوردگی حفره‌ای و حفره‌دار شدن، می‌توان عنوان نمود که نه تنها فلز جوش حاصل از الکترودهای E347-V مقاومت کمتری ندارد، بلکه نسبت به فرآیند حفره‌دار شدن می‌تواند مقاوم‌تر از الکترودهای E347-Nb باشد.



شکل ۵- نمودار پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی برای فلز جوش حاصل از الکترودهای E347-V و E347-Nb در محلول ۳/۵٪ نمک

جدول ۵- داده‌های مستخرج از آزمون پلاریزاسیون تافل فلز جوش حاصل از الکتروودهای E347-V و E347-Nb در محلول ۳/۵٪ نمک

نمونه	دانسیته جریان خوردگی ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	پتانسیل خوردگی ( $\text{V}_{\text{SCE}}$ )	شیب آندی ( $\text{V}/\text{dec}$ )	شیب کاتدی ( $\text{V}/\text{dec}$ )	نرخ خوردگی ( $\text{mm}/\text{year}$ )
E347-V	۰/۷۱۵۵	-۰/۱۹۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۰۸۳۱۴
E347-Nb	۳/۲۳۱۸	-۰/۲۰۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۳۳۷۵۵

حجمی فریت و نوع فریت تشکیل شده در ریزساختار مشاهده می‌شود، همچنین نتایج آزمون‌های خوردگی نیز مشخص می‌نمایند که با جایگزینی عنصر وانادیوم به جای نیوبیوم در الکتروود E347-16 حساسیت به خوردگی بین‌دانه‌ای فلز جوش در محدوده قابل قبول بوده و مقاومت به خوردگی حفراه‌ای فلز جوش تغییر چندانی نمی‌یابد، همچنین رفتار خوردگی الکتروشیمیایی فلز جوش‌های حاصل تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. لذا در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که از نظر متالورژیکی امکان جایگزینی عنصر وانادیوم به جای نیوبیوم در الکتروود E347-16 میسر بوده و با توجه به قیمت جهانی کم‌تر عنصر و ترکیبات ( فرو آلیاژ) وانادیوم نسبت به نیوبیوم از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر افزودن عنصر وانادیوم به جای نیوبیوم بر ریزساختار و مقاومت به خوردگی فلز جوش الکتروود E347-16 مورد بررسی قرار گرفته شد و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- ریزساختار فلز جوش حاصل از هر دو الکتروود E347-V و E347-Nb شامل فاز آستنیت و فریت بود.

۲- افزودن وانادیوم به جای نیوبیوم در الکتروود E347-16 باعث افزایش درصد حجمی فریت از ۸ به ۱۱ درصد در ساختار فلز جوش گردید.

۳- متوسط فواصل بین شاخه‌های فاز فریت در فلز جوش حاصل از الکتروود E347-V حدود ۳ میکرون و متوسط فواصل بین شاخه‌های فاز

همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است، شیب‌های آندی و کاتدی برای هر دو نمونه تقریباً برابر هستند. برابر بودن شیب‌های کاتدی و آندی برای هر دو نمونه به این معناست که نرخ واکنش‌های کاتدی و آندی روی هر دو نمونه تقریباً یکسان می‌باشد [۲۴-۲۶]. بررسی نتایج جدول ۵ مشخص می‌نماید که پتانسیل خوردگی فلز جوش حاصل از الکتروود E347-V ( $\text{mV}_{\text{SCE}} -191$ ) حدود  $12 \text{ mV}$  نجیب‌تر از پتانسیل خوردگی فلز جوش حاصل از الکتروود E347-Nb ( $\text{mV}_{\text{SCE}} -202$ ) است. نجیب‌تر بودن پتانسیل خوردگی فلز جوش حاصل از الکتروود E347-V می‌تواند متناظر با مقاومت به خوردگی کمی بیش‌تر این نمونه باشد. این مطلب در مقایسه جریان‌های خوردگی و همچنین نرخ‌های خوردگی، نمود بیشتری دارد به نحوی که نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۵ نشان می‌دهد که دانسیته جریان خوردگی برای فلز جوش حاصل از الکتروود E347-V کم‌تر از فلز جوش حاصل از الکتروود E347-Nb است. به همین صورت نتایج حاصل (جدول ۵) مشخص می‌نمایند که نرخ خوردگی فلز جوش حاصل از الکتروود E347-Nb حدود چهار برابر فلز جوش حاصل از الکتروود E347-V است، هر چند کاهش نرخ خوردگی فلز جوش حاصل از الکتروود E347-V را می‌توان از چند نقطه نظر بررسی نمود؛ اما به نظر می‌رسد اندازه دانه‌ها و درصد کاربیدهای تشکیل شده در فلز جوش نمونه‌های مختلف از مهم‌ترین عوامل موثر در این مقدار اختلاف باشند [۲۶-۲۸].

در مجموع بررسی نتایج آزمون‌های متالوگرافی مشخص می‌نمایند که با جایگزینی عنصر وانادیوم به جای نیوبیوم در الکتروود E347-16 تغییرات ساختاری ملموسی در فلز جوش مشاهده نمی‌گردد و تغییراتی جزئی در درصد

۶- در مجموع نتایج آزمون‌های ریزساختاری و خوردگی مشخص نمودند که امکان جایگزینی عنصر وانادیوم به جای نایوبیوم در الکتروود E347-16 از نظر متالورژیکی امکان‌پذیر می‌باشد.

### سپاسگزاری

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از حمایت‌های مادی و معنوی شرکت صنعتی آما جهت انجام این تحقیق ابراز می‌دارند.

فریت حاصل از الکتروود E347-Nb حدود ۵ میکرون بدست آمد.

۴- میزان حساسیت به خوردگی بین‌دانه‌ای فلزجوش حاصل از الکتروودهای E347-V و E347-Nb مشابه بوده در محدوده قابل قبول بود.

۵- افزودن وانادیوم به جای نیوبیوم در الکتروود E347-16 باعث تغییر چندانی در میزان مقاومت به خوردگی حفره‌ای فلزجوش ایجاد نمود، همچنین رفتار خوردگی الکتروشیمیایی فلزجوش‌های حاصل تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند.

### References:

1- J.C.Lippoid, D.J.Kotecki, Welding metallurgy and weldability of stainless steels, John Wiley & Sons, Hoboken, Newjersey, 2005.

2- K.H.Lo, C.H.Shek, J.K.Lai, Recent developments in stainless steels, Materials Science and Engineering R, 2009, 65, Pp. 39-104.

3- Atlas Steel, Technical handbook of stainless steels, Atlas Steels Technical Department, 2013, Pp. 1-49.

4- B.Holmberg, B.Leffler, Stainless steels and their properties, Avesta polarit AB, 2006, Pp.1-45.

5- M.Mcguire, Stainless steels for design engineers, ASM International Materials Park, 2008, Pp.210-240.

6- ASM Handbook, Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys, Vol 1, 10th Edition, ASM International Handbook Committee, 2005, Pp. 312-360.

7- ASM Handbook, Welding, brazing, and soldering, Vol 6, 9th Edition, ASM International Handbook Committee, 2002,

Pp 410-430.

۸- ف. کاویانی نژاد، فولاد های زنگ نزن و مقاوم به حرارت، فولاد های زنگ نزن و ویژگی های آنها، ۱۳۸۶ ص ۶۴-۲۱.

9- J. R. Davis, Corrosion of weldments, ASM International Materials Park, USA, December 2006, Pp.60-110.

10- M.A.Kuznetsov, E.A.Zernin, V.I.Danilov, D.E.Kolmogorov, L.N.Zoubenko, Corrosion and mechanical properties of austenic steel weld joints, Materials Science and Engineering, 2015, 91, Pp.1-8.

11- Bhadeshia Harshad K. D. H. Local brittle zones and the role of niobium, Materials Science Forum, 2014, 783-786, Pp. 2129-2135.

12- A.I. Filho, R.V. Silva, W.S. Cardoso, L.C. Casteletti, Effect of niobium in the phase transformation and corrosion resistance of one austenitic-ferritic stainless steel, Materials Research, 2014, 17, Pp. 801-806.

13- R.M.Andrianingtyas, M.S.Anwar, S.Hastuty, I.D.Widharyanti, A.Dahliyanti, N.Prastomo, E.Mabruri, Role of tungsten,

niobium and vanadium on corrosion resistance of austenitic stainless steels in chloride ion environment, AIP Publishing, May 2018,5, Pp.12-44.

14- P. S. Mitchell, The effect of vanadium on the microstructure and toughness of weld heat affected zones, Iron and Steel, Vol. 40, November 2005, Pp.1-10.

15- American Welding Society (AWS) A5 Committee on filler metals and allied materials, Specification for stainless steel electrodes for shielded metal arc welding, AWS A5.4/A5.4M:2012.

16- American Welding Society (AWS) A5 Committee on filler metals and allied materials, Standard methods for mechanical testing of welds, AWS A4.0/A4.0M, 2016.

17- ASTM A 262-02, Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels, United States, ASTM International, 2002.

18- ASTM G 48-03, Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by use of ferric chloride solution, United States, ASTM International, 2003.

19- ASTM G1 – 03, Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens, United States, ASTM International, 2003.

20- J. Łabanowski, Stress corrosion cracking susceptibility of dissimilar stainless steels welded joints, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 20, 1,225-228.

21- I. Hajiannia, M. Shamanian , M. Kasiri, Microstructure and mechanical properties of AISI 347 stainless steel/A335 low alloy steel dissimilar joint produced by gas tungsten arc welding, Materials and

Design, 2013,50,566–573.

22- S.Amina and S.E.Amara, Microstructure evolution, mechanical properties and pitting corrosion resistance of AISI 316L stainless steel weldment, The Serbian conference the advances in materials and processing technologies, 2015.

23- S.Prifiharni, M.S.Anwar, A.Nikitasari, E.Mabruri, The Hardness, microstructure and pitting resistance of austenitic stainless steel Fe25Ni15Cr with the addition of tungsten, niobium and vanadium, AIP Publishing, 2018, 5, Pp. 40-58.

24- M. Esmailian, Corrosion resistance of welds in type 316L stainless steel, Materials Performance, 2017, 56(3), Pp. 58-61.

25- A.B.Rhouma, T.Amadou, H.Sidhom, C.Braham, Correlation between microstructure and intergranular corrosion behavior of low delta-ferrite content AISI 316L aged in the range 550-700 °C, Journal of Alloys and Compounds, 2017, 708, Pp. 871-886.

26- M.Ghalambaz, M.Abdollahi, A.Eslami, A.Bahrani, A case study on failure of AISI 347H stabilized stainless steel pipe in a petrochemical plant, Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2017, Vol 9, Pp. 52-62.

27- H.S.Lee, J.S.Jung, D.S.Kim, K.B.Yoo, Failure analysis on welded joints of 347H austenitic boiler tubes. Engineering Failure Analysis, 2015, 57, 413 -420.

28- K. Devendranath Ramkumar, S. Anirudh, Shubham Singh, Sahil Goyal, Effect of fillers on the microstructure, mechanical properties, and hot corrosion behavior of Nb stabilized austenitic stainless steel welds, Journal of materials research, 2017,32,3, 582-598.