نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 1، بهار و تابستان1397، صفحه 99-89

تاثیر ریزساختار فلزجوش بر رفتار خستگی و خستگی-خوردگی فلزجوش راسب شده بر فولاد زنگ‌نزن 304 جوشکاری شده توسط فرایند GTAW

حسین مهرابی شریف آباد[1]، محمود حاجی صفری[2*]

۱-گروه مهندسی مواد - جوشکاری، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

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

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۳ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۵)

چکیده

در این پژوهش به منظور رسیدن به دو ساختار مختلف آستنیتی (γ) و آستینتی-فریتی (γ+δ) در فلزجوش ایجاد شده در فولاد زنگ‌نزن۳۰۴ به ترتیب از فلزهای پرکننده ERNiCrMo-3 و ER309L استفاده شد و رفتار خستگی اتصالات ایجاد شده در دو محیط هوا و محیط خورنده آب دریا مورد ارزیابی و تحلیل واقع شد. مطالعات ساختاری انجام شده حاکی از تطابق قابل قبولی بین ساختار فلزجوش پیش‌بینی شده بر اساس دیاگرام شیفلر و بررسی‌های متالوگرافی بود. ارزیابی رفتار خستگی نمونه‌ها در دو محیط هوا و آب دریا نشان داد که ایجاد ساختاری مشابه با فلزپایه در موضع اتصال (γ) موجب استحکام خستگی بالاتر نمونه‌ها می‌شود. مطالعات شکست‌نگاری و آنالیز FESEM-EDS نشان داد شکست نمونه‌های جوشکاری شده با فلزپرکن ERNiCrMo-3 در مقایسه با نمونه‌های جوشکاری شده با فلزپرکننده ER309L در هر آزمون خستگی و خوردگی-خستگی، رفتار نرمتری (تشکیل دیمپل‌های یکنواخت‌تر و عمیق‌تر در منطقه نهایی شکست) ارائه می‌دهد. بعلاوه برخلاف نمونه‌های جوشکاری شده با فلزپرکننده ER309L، در نمونه‌های جوشکاری شده با فلزپرکننده ER-NiCrMo-3، عمدتا ترکیبات بین فلزی غنی از مولیبدن و تیتانیم در تشکیل دیمپل‌ها در سطح شکست مشارکت داشتند.

کلمات کلیدی: ۳۰۴، خستگی، خوردگی- خستگی، GTAW، ترکیب شیمیایی، ریزساختار.

Effect of Weld Metal Microstructure on the Fatigue and Corrosion-Fatigue Properties of GTA-Welded 304 Stainless Steel

H. Mehrabi Sharifabad[1], M. Hajisafari[2*]

1-Department of Materials - Welding Engineering, Bandarabas Branch, Islamic Azad University, Bandarabas, Iran

2-Department of Metallurgical and Materials Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

(Received 4 August 2017 ; Accepted 5 May 2018)

Abstract

In this research, two different filler metals, ERNiCrMo-3 and ER309L, were used for developing different microstructure, austenite (γ) and austenite and ferrite (γ+δ) in the weld metal and fatigue properties of welded samples were evaluated in the air and sea water environments. Microstructural studies indicated a good agreement between predicted microstructures via schiffler diagram and metallographic studies. Evaluation of fatigue properties in the air and sea water environments revealed the austenitic weld metal, like base metal microstructure, improved the fatigue

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: hajisafari1001@iauyazd.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

strength of welded samples. Fractographic studies and FESEM-EDS analysis showed more ductile fracture of welded samples by using ERNiCrMo-3, formation of more uniform and deeper dimples in the final zone of fatigue fracture, than that of welded samples by using ER309L. Furthermore, unlike dimple formation centers in welded samples by using ER309L, Mo-Ti rich intermetallics caused formation of dimples in the welded sampled via ERNiCrMo-3.

Keywords: 304, Fatigue, Corrosion-Fatigue, GTAW, Chemical Composition, Microstructure.

1- مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن گروهی از فولادهای پرآلیاژی بر پایه سیستم‌های Fe-Cr-C، Fe-Cr یاFe-Cr-Ni می‌باشد که می‌بایست حداقل 11wt% کروم بصورت محلول جامد در زمینه آنها موجود باشد. این عنصر با ایجاد یک لایه‌ی اکسیدی چسبنده و متراکم بر سطح زیرلایه مانع از اکسیداسیون و خوردگی فلز زیرلایه و ایجاد قابلیت مقاومت به خوردگی می‌شود[۱].بزرگترین گروه فولادهای زنگ‌نزن،فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی می‌باشد که در اکثر محیطها از مقاومت به خوردگی مطلوبی برخوردار هستند[۲]. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ از پرکاربردترین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی که در صنایع مختلفی از قبیل تولید انرژی، ساخت توربینها و توربوکمپروسها، صنایع غذایی، راکتورهای هسته‌ای و غیره مورد استفاده واقع می‌شود [۳].

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی از جوش‌پذیری نسبتا خوبی برخوردار بوده و توسط تکنیکهای مختلف جوشکاری قابل جوشکاری می‌باشد. ولی در صنعت عمدتا از فرایند جوشکاری قوس تنگستن–گاز محافظ (GTAW) به دلیل حفاظت کامل از موضع اتصال و گرمای ورودی کمتر برای اتصال‌دهی و تعمیر فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی استفاده می‌شود [۴]. از مشکلات اصلی ناحیه جوشکاری شده در این دسته از فولادها می‌توان به حساسیت بالا به خسارات خستگی، در صورت واقع شدن تحت بارهای دینامیکی اشاره نمود. بعبارت دیگرتغییرات زیاد خواص فلزجوش در فرایندهای جوشکاری ذوبی موجب حساسیت زیاد اتصالات جوشی به خسارت خستگی می‌شود[۵]. علت این امر را می‌توان به تاثیر زیاد عواملی از قبیل پارامترهای جوشکاری، ترکیب شیمیایی فلزجوش و غیره بر ریزساختار و در نتیجه خواص فلزجوش نسبت داد[۶-۹].

توضیح آنکه تغییر عوامل مذکور موجب تغییراتی در شکل، هندسه، ریزساختار و خواص فلزجوش شده که باعث تمرکز تنش در موضع اتصال و در نتیجه افت استحکام خستگی شود [۸-۱۲].Villart و همکاران [۱۱] نشان دادند که رفتار کششی داغ فولاد زنگ‌نزن AISI 444 جوشکاری شده به شدت به ترکیب شیمیایی فلزجوش راسب شده بستگی دارد. Kou [۱۳] گزارش نمود که اتصالات جوشی مکانهای مرجحی برای جوانه‌زنی و در نتیجه کاهش استحکام خستگی می‌باشند. Yuri و همکاران [۱۴] تاثیر ریزساختار و فریت دلتا را بر خستگی فولاد 304L مورد بررسی قرار دادند.Hascalik و همکاران [۱۵] رفتار خستگی اتصال غیر همجنس SS304/AISI 4340 ایجادشده توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را مورد بررسی قرار دادند. از دیگر تحقیقات انجام شده در خصوص خستگی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی می‌توان به بررسی تغییرات ساختاری ایجاد شده در۳۱۶L بر حسب سرعت اعمال کرنش حین خستگی کم چرخه اشاره نمود [۱۶]. Dong و همکاران [۱۷]گزارش نمودند استفاده از فلزپرکننده 304L و یا316L بجای استفاده از فلزپرکننده 308Lموجب کند شدن سرعت اشاعه ترک در خستگی فولاد 308L در محیط خورنده می‌شود. Suzuki و همکاران [۱۸] نشان داد عملیات نیتریدی نمودن فولاد ۳۰۴ موجب بهبود رفتار خستگی‌این فولاد می‌شود. Hung و همکاران [۱۹] گزارش نمودند محیط خورنده $FeCl_3$ موجب کاهش شدید مقاومت به خستگی فولاد 304Lمی‌شود. به هر حال تحقیقات چندانی در خصوص تاثیر ترکیب شیمیایی فلزجوش ایجاد شده در فولاد زنگ نزن ۳۰۴ بر استحکام خستگی اتصال حاصله ارائه نشده است.

نظر به اهمیت خصوصیات فلز جوش بر خواص مکانیکی و

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول1- جزئیات فرایند GTAW مورد استفاده در این پژوهش

شرایط جوشکاری						مشخصات الکترود W-2.5%Th Electrode	
گرمای ورودی (kJ/mm)	دمای بین‌پاسی (° C)	دبی دمش گاز محافظ lit/min	سرعت (mm/s)	ولتاژ (V)	جریان (A)	قطر (mm)	زاویه نوک الکترود
0.4-0.8	Max 400±5°C	10	2-3	15-18	120-150	2.4	30±5°

جدول2- ترکیب شیمیایی فلزپایه و فلزهای پرکننده مورد استفاده در این پژوهش

Ni_{eq}	Cr_{eq}	ترکیب شیمیایی (wt%)	فلز پرکن
14.40	19.13	Fe-0.08%C-18%Cr-8%Ni-2%Mn-0.75%Si-0.1%N	304 base metal
16.15	26.73	Fe-0.03%C-25%Cr-14%Ni-2.5%Mn-0.65%Si-0.75%Mo	ER 309L
66.90	33.25	Ni-0.03%C-23%Cr-1%Fe-0.5%Si-9.5%Mo	ER NiCrMo3

کارآمدی فولادهای زنگ‌نزن [۲۰و۲۱] و کابرد فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در سواحل جنوبی کشور، در این پژوهش رفتار خستگی و خوردگی-خستگی فولاد زنگ نزن ۳۰۴جوشکاری شده با GTAW مورد بررسی واقع شد. همچنین با استفاده از دو دسته فلزپرکننده ER309L و ERNiCrMo-3و ایجاد فلزهای جوش مختلف، تاثیر ترکیب شیمیایی و ساختار فلزجوش بر رفتار خستگی و خوردگی-خستگی اتصالات ایجاد شده مورد مطالعه و پژوهش واقع گردید.

2- روش پژوهش

ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI304 به ضخامت 12mm بعنوان فلزپایه و تست کوپن‌های جوشکاری به ابعاد $300\times150\times12mm^3$از ورق‌های مذکو ربرش زده شد. به منظور ایجاد دو ریزساختار مختلف در فلزجوش، از دو فلز پرکننده ER309Lو ERNiCrMo-3 به قطر 2mm استفاده شد.

عملیات جوشکاری توسط فرایند جوشکاری قوس تنگستن-گازمحافظ (GTAW) و تحت دمش گاز محافظ آرگون با خلوص 99.99%، مطابق با جزئیات جدول(۱) انجام شد. لازم به ذکر است بلافاصله قبل از جوشکاری، تست کوپن‌های تهیه شده مورد عملیات تمیزکاری مکانیکی و در ادامه توسط استون به روش آلتراسونیک چربی‌زدائی شدند.

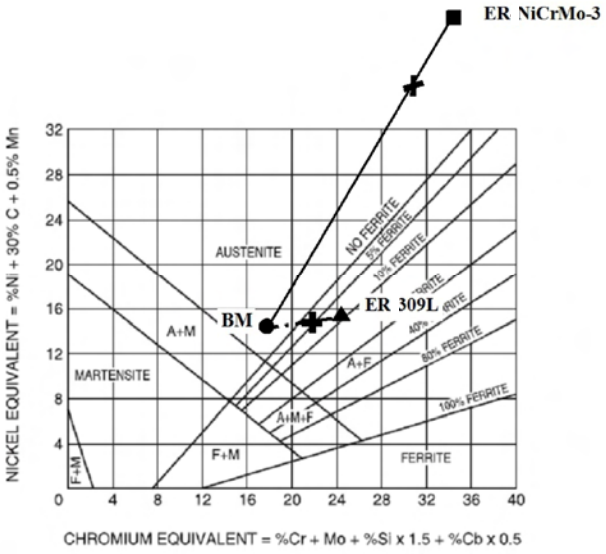
برای اطمینان از صحت جوش‌های ایجاد شده، از دو آزمون غیرمخرب چشمی (VT) و پرتونگاری (RT) مطابق با الزامات استاندارد ASME Sec.V و توسط دستگاه SIGMA 880 استفاده شد. در ادامه، نمونه‌های متالوگرافی از مقطع عرضی فلزجوش برش و بعد از آماده‌سازی سطحی مطابق با روش‌های استاندارد متالوگرافی توسط محلول اگزالیک ۱۰٪ ($H_2C_2O_4$)تحت جریان $1A/cm^2$ به مدت زمان 3sec الکترواچ شدند. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و مطالعات ریزساختاری دقیق‌تر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3-TESCANمجهز به آنالیزگر EDS انجام شد.

پروفیل سختی منطقه جوشکاری شده با استفاده از دستگاه تست میکروسختیHVS-1000 تحت بار 100gr و مدت زمان اعمال بار 20sec انجام شد.

نمونه‌های لازم برای دو آزمون خستگی و خوردگی- خستگی مطابق بااستانداردASTM-E466، در راستای عمود برخط جوش توسط وایرکات برش زده شد. نظر به تاثیر بالای کیفیت سطحی نمونه‌هابر نتایج حاصله، سطح تمامی نمونه‌هاتوسط سنباده‌ی ۸۰۰ صیقل داده شد. آزمون خستگی در دمای محیط (25ºC)، توسط دستگاه MSA-2014، با فرکانس بارگذاری 600RPM انجام شد.

با توجه به شرایط کاری فولاد ۳۰۴ مورد پژوهش در سواحل جنوبی، آزمون خوردگی-خستگی در محیط آب دریای خلیج فارس انجام شد. لازم به ذکر است قبل از شروع آزمون، نمونه‌ها به مدت 2hr در محلول آزمون غوطه‌ور شدند و سپس بارگذاری سیکلی در دمای محلول آزمون در دمای25±5ºC بر آن‌ها انجام شد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل1- پیش‌بینی ساختار فلزپایه و فلزپرکننده.+،× به ترتیب معرفی فلزجوش حاصل از ER309L و ERNiCrMo-3.

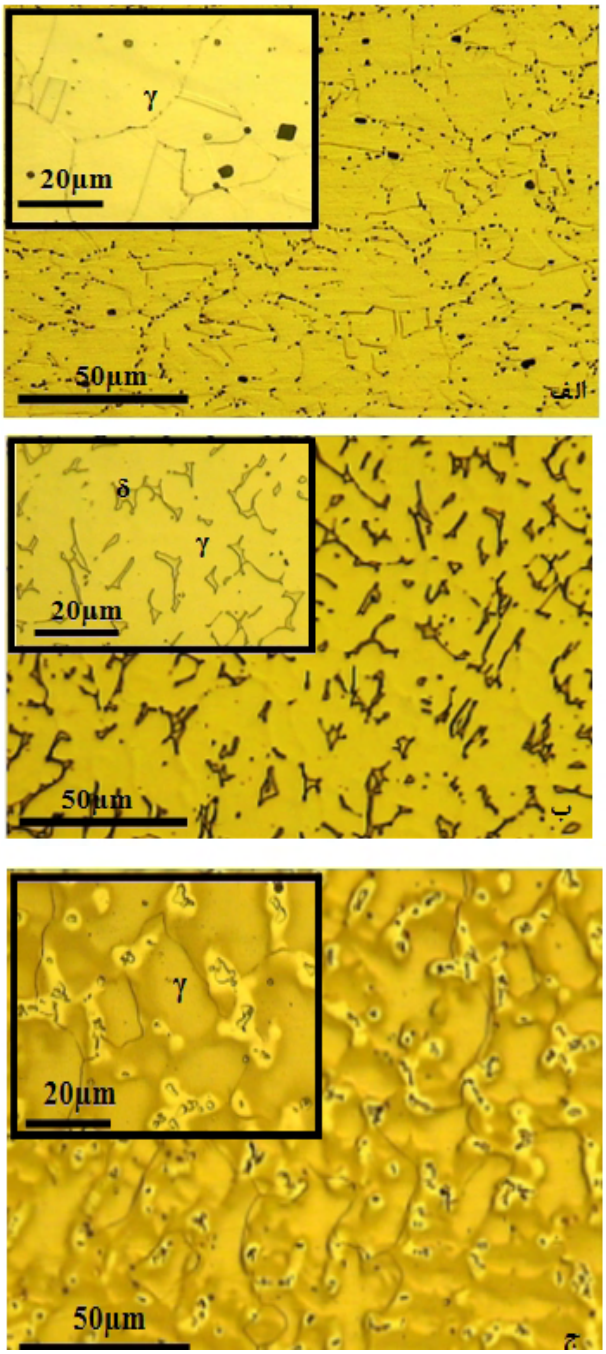
آزمون‌های خستگی و خستگی-خوردگی در حداقل پنج سطح تنش و در گستره $1/2\sigma_{UTS}$-$2/3\sigma_{UTS}$ انجام شد. برای تعیین استحکام کششی (σ_{UTS})، نمونه‌های دمبلی شکل در راستای عمود بر موضع جوشکاری، مطابق استاندارد ASTM-E9 تهیه و متوسط σ_{UTS} سه نمونه به عنوانσ_{UTS} آن نمونه گزارش شد. شکست‌نگاری سطوح شکست نمونه‌های خستگی و نمونه‌های خوردگی-خستگی و مطالعه ترکیب شیمیایی اجزاء تشکیل شده بر این سطوح شکست بااستفاده از میکروسکوپ FESEM مجهز به آنالیزگر EDS نقطه‌ای انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- مطالعات ریزساختاری

پیش‌بینی ساختار موضع اتصال بر اساس ترکیب شیمیایی فلزپایه و فلزهای پرکننده (جدول۲)، درجه رقت تعیین شده‌ی 25%و دیاگرام شیفلر انجام شد (شکل۱).

مطالعات ساختاری فلزپایه و فلزجوش راسب شده توسط فلزهای پرکننده مختلف در شکل(۲) (نوری) و شکل(۳) (SEM) ارائه شده است.همانگونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود همخوانی قابل قبولی بین ساختارهای پیش‌بینی شده توسط دیاگرام شیفلر و مطالعات تجربی وجود دارد. ریزساختار فلزپایه آستنیتی (γ) به همراه نواحی دوقلویی و فریت دلتا (δ) (قسمت الف از شکلهای ۲و ۳) می‌باشد.

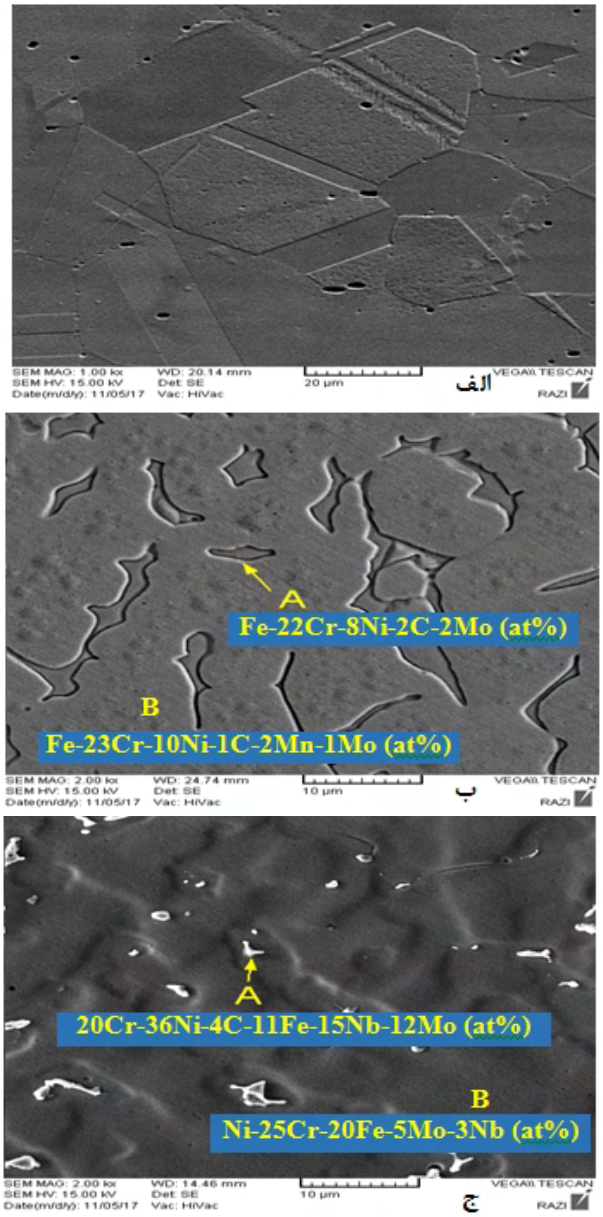


شکل2- ریزساختار نوری فلزپایه (الف) و فلزجوش راسب شده از فلزهای پرکننده ER309L(ب)، و ERNiCrMo-3(ج).

براساس نسبت Creq/Nieq فلزپایه (۱/۳۸) می‌توان پیش‌بینی نمود که انجماد فلزپایه در مد آستنیتی-فریتی (AF) و توالی انجماد به صورت $L\rightarrow L+\gamma\rightarrow L+\delta+\gamma\rightarrow\gamma+\delta\rightarrow\gamma$ [۲۲] می‌باشد. پیش‌بینی و مطالعات ریزساختاری انجام شده حاکی از تغییر ساختار فلزجوش از زمینه آستنیتی به همراه جزایر فریتی

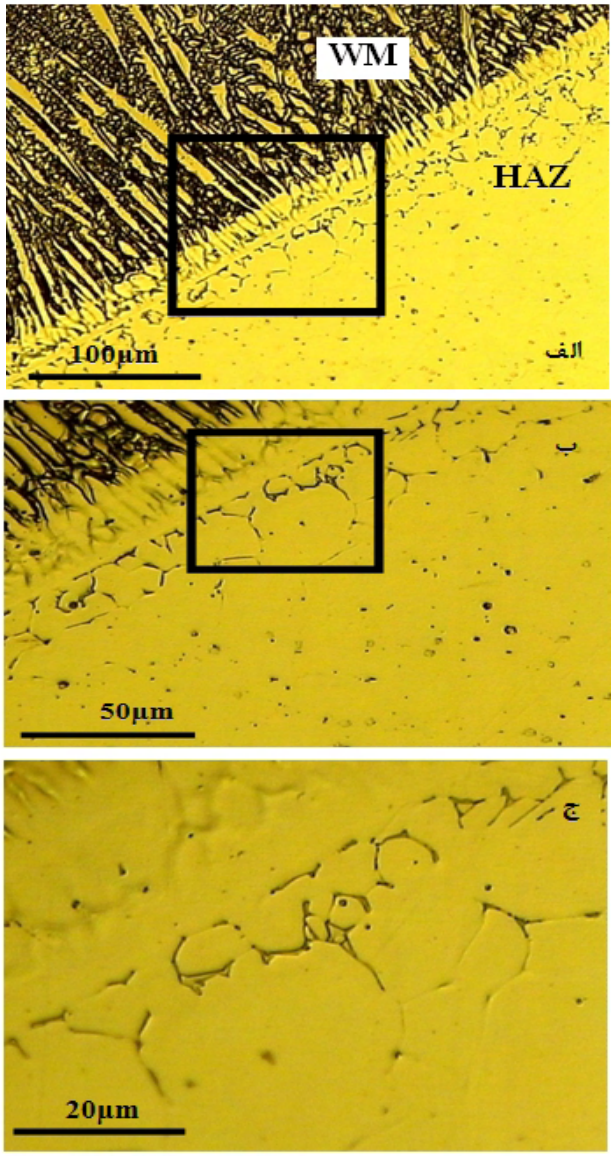
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

(γ+δ) به ساختار کاملا آستنیتی (γ) با تغییر فلزپرکننده از ER309L به ERNiCrMo-3 می‌باشد (قسمتهای ب و ج از شکلهای ۲و۳). استفاده از ERNiCrMo-3 موجب تشکیل ترکیبات بین‌فلزی غنی از مولیبدن و نیوبیم در محل برخورد سه‌گانه دانه‌های آستنیت زمینه‌ی فلزجوش می‌شود.



شکل3- مطالعه SEM فلزپایه (الف) و فلزجوش راسب شده از فلزهای پرکننده ER309L(ب) و ERNiCrMo-3(ج).

همانگونه که در شکل(۴) مشاهده می‌شود، انجماد فلز جوش با الحاق اتم‌ها در حوضچه مذاب به دانه‌های آستنیت در فصل مشترک منطقه متاثر از حرارت/فلزجوش (WM/HAZ) با مکانیزم رونشستی (اپیتکسیال) شروع و در ادامه با مکانیزم رقابتی ادامه می‌یابد. بعبارت دیگر دانه‌هایی که جهت آسان رشد آن‌ها در جهت عمود بر دیواره حوضچه جوش (راستای حداکثر خروج حرارت) واقع می‌شود با سرعت بیشتری نسبت به دیگر دانه‌ها به رشد خود ادامه می‌دهد.



شکل 4- الف) ساختار نوری نرمال فصل مشترک WM/HAZ.
ب) بزرگنمایی بیشتر از منطقه مشخص شده توسط مربع از قسمت الف.
ج) بزرگنمایی بیشتر از منطقه مشخص شده توسط مربع از قسمت ب.

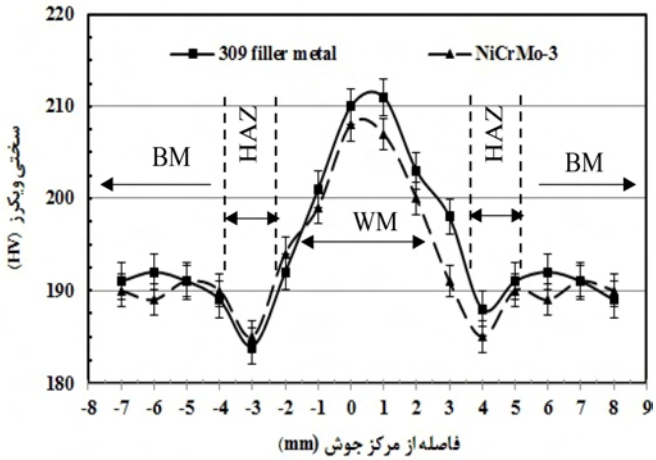
همچنین بررسی فصل مشترک WM/HAZ نشان داد که یک همجوشی کامل بین فلزجوش و فلزپایه اطراف ایجاد شده که در هماهنگی با صحت نتایج آزمون غیرمخرب پرتونگاری (RT)انجام شده بر نمونه‌های جوشکاری شده بود. مطالعات

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

ساختاری HAZ حاکی از رشد دانه‌ها در این منطقه داشت که می‌توان به حرارت ورودی جوشکاری نسبت داد.

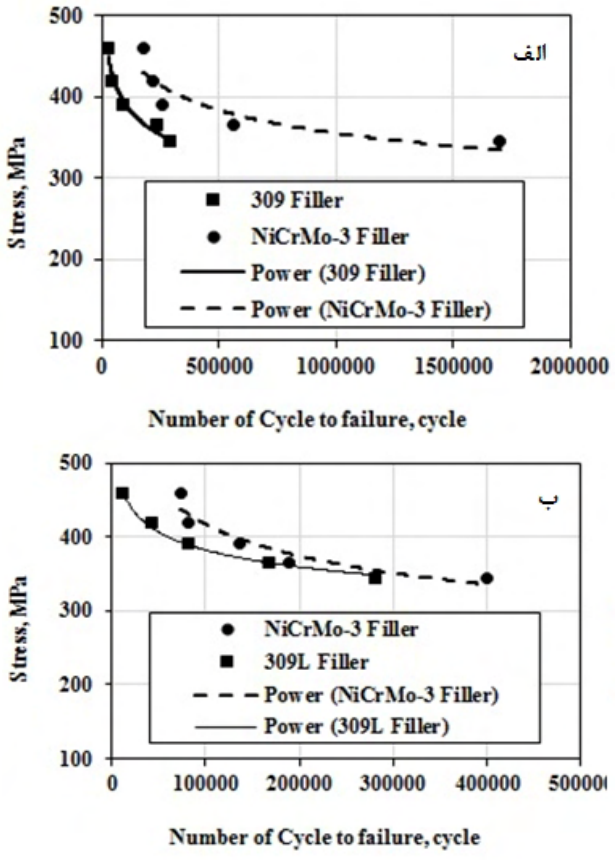
3-2- ارزیابی خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها

الف) میکروسختی‌سنجی. تاثیر ترکیب شیمیایی فلزجوش بر توزیع سختی در راستای عمود بر موضع اتصال در شکل(۵) نشان داده شده است. سختی بالاتر فلزجوش نسبت به سختی فلزپایه (200±5HV در مقایسه با 190±5HV) را می‌توان به حضور مقادیر قابل توجه عناصرآلیاژی (مولیبدن، کروم و غیره) در ترکیب شیمیایی فلزجوش نسبت داد (جدول۲). سختی کمتر HAZ در نمونه‌های جوشکاری شده در همخوانی کامل با مطالعات ریزساختاری و وقوع پدیده رشد دانه در این منطقه می‌باشد.



شکل5-تاثیر ترکیب شیمیایی فلزپرکننده بر پروفیل سختی عمود بر مقطع جوش.

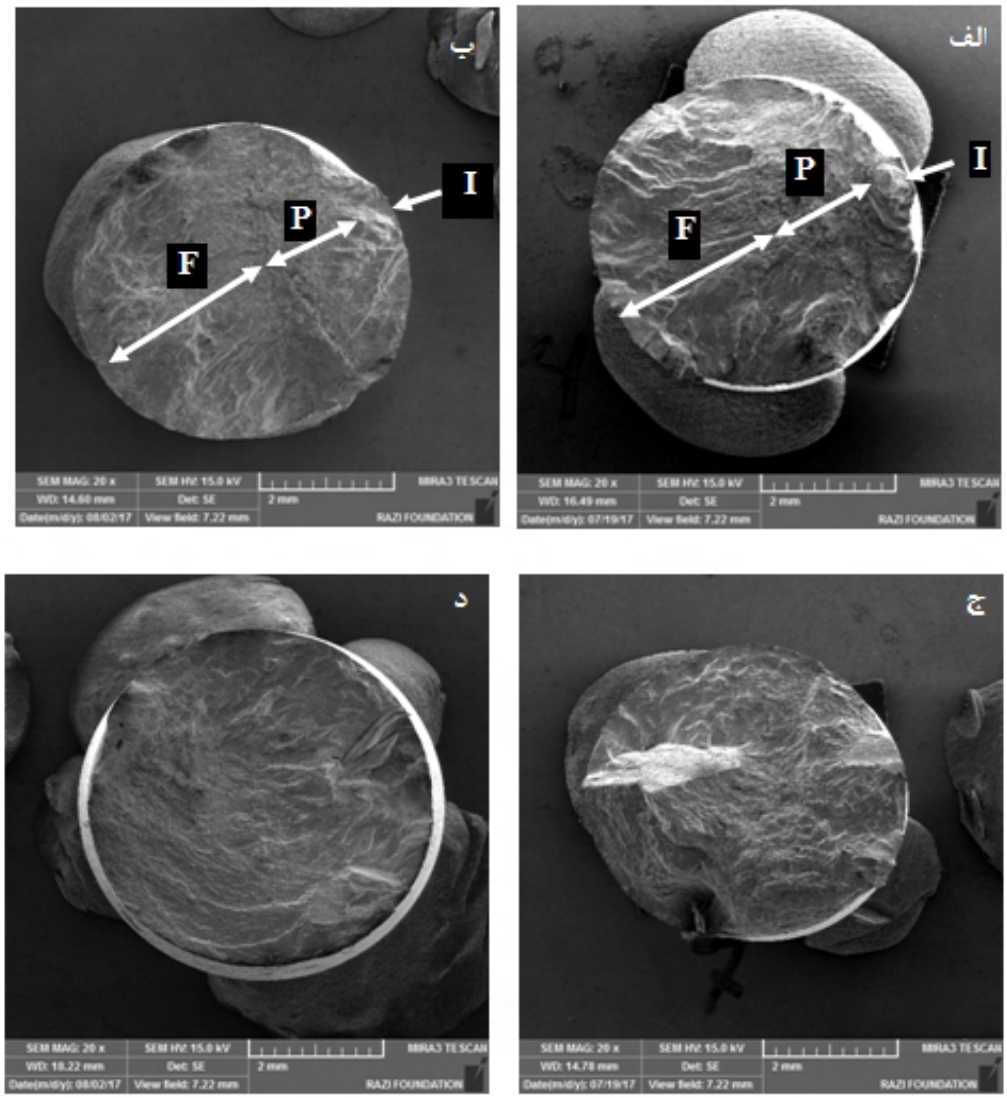
ب) آزمونهای خستگی و خوردگی–خستگی. بر اساس استحکام کششی (σ_{UTS}) نمونه‌ها (σ_{UTS} نمونه‌های جوشکاری شده با ER309Lو ERNiCrMo-3 به ترتیب 570±20MPa و 620±20MPa اندازه‌گیری شد)، پنج سطح تنش در گستره (345-460MPa) برای آزمون‌های خستگی و خوردگی–خستگی تعیین شد. نتایج این آزمون‌ها در شکل(۶) ارائه شده است. همانگونه که از این شکل برداشت می‌شود استحکام خستگی فلزجوش ایجاد شده با فلزپرکننده ERNiCrMo-3، در هر دو محیط هوا و محیط خورنده بیشتر از نمونه‌ی جوشکاری شده با فلزپرکننده ER309L می‌باشد و بارگذاری در محیط خورنده به شدت موجب کاهش استحکام خستگی نمونه‌ها می‌شود. استحکام خستگی بالاتر نمونه اولی را می‌توان به σ_{UTS} بالاتر [۲۳] و یکنواختی بیشتر ساختار فلزجوش ایجاد شده توسط ERNiCrMo-3 نسبت داد.



شکل6- تاثیر فلزپرکننده بر رفتار فلزجوش در آزمونهای (الف) خستگی، (ب) خوردگی-خستگی.

توضیح اینکه عمر خستگی یک نمونه (تعداد سیکل قابل تحمل توسط نمونه تا قبل از شکست) را عمر جوانه‌زنی ترک (N_i: تعداد سیکل بارگذاری لازم برای ایجاد ترک) و عمر اشاعه ترک (N_p: تعداد سیکل بارگذاری لازم برای اشاعه ترک و رسیدن به طول ترک بحرانی برای شکست) تعیین می‌نماید. برخلاف خستگی کم چرخه، در خستگی پرچرخه مشارکت N_i در عمر خستگی بیشتر از N_p می‌باشد [۲۳]. بنابراین با افزایش یکنواختی ریزساختار (کاهش مراکز تمرکز تنش) و افزایش استحکام زمینه می‌توان انتظار داشت که مقاومت زمینه در مقابل ایجاد ترک خستگی افزایش و ایجاد ترک خستگی به تاخیر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



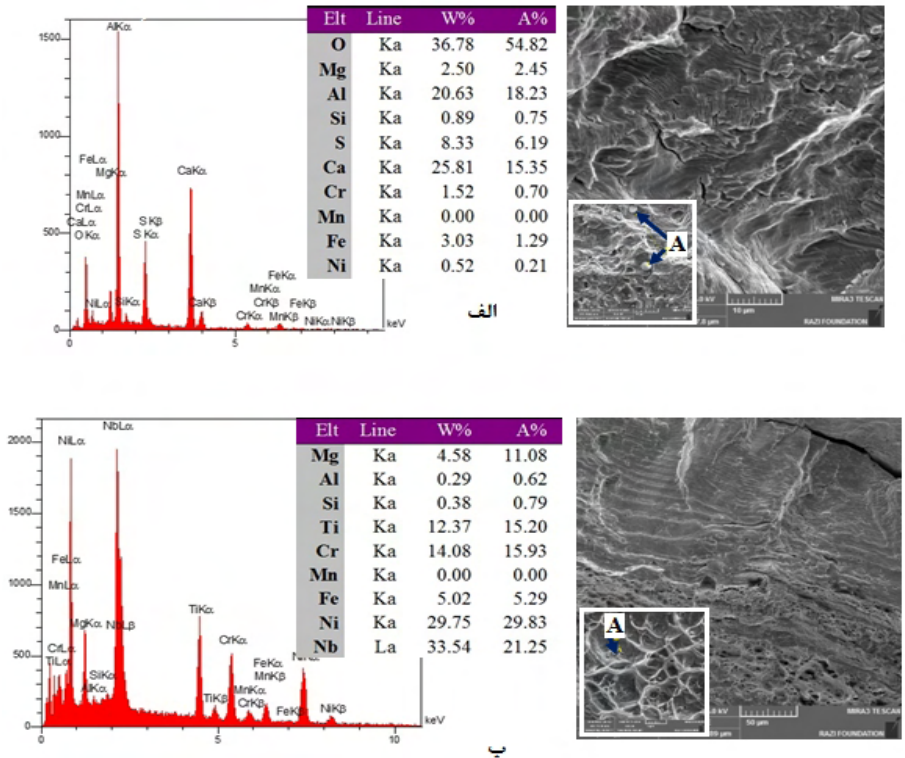
شکل7- مطالعه ماکروسکوپی سطوح شکست نمونه‌های خستگی (الف و ب) و خوردگی-خستگی(ج و د). نمونه‌های جوشکاری شده با فلزپرکننده ER309L (الف و ج) و جوشکاری شده با فلزپرکننده ERNiCrMo-3 (ب و د). علایم I، P و F به ترتیب معرف محل ایجاد ترک، منطقه اشاعه ترک و موضع شکست نهایی می‌باشد.

می‌افتد(N_i بیشتر) و در نتیجه استحکام خستگی پرچرخه افزایش می‌یابد. مقایسه ماکروسکوپی سطوح شکست خستگی و خوردگی-خستگی نمونه‌ها در شکل(۷) ارائه شده است.

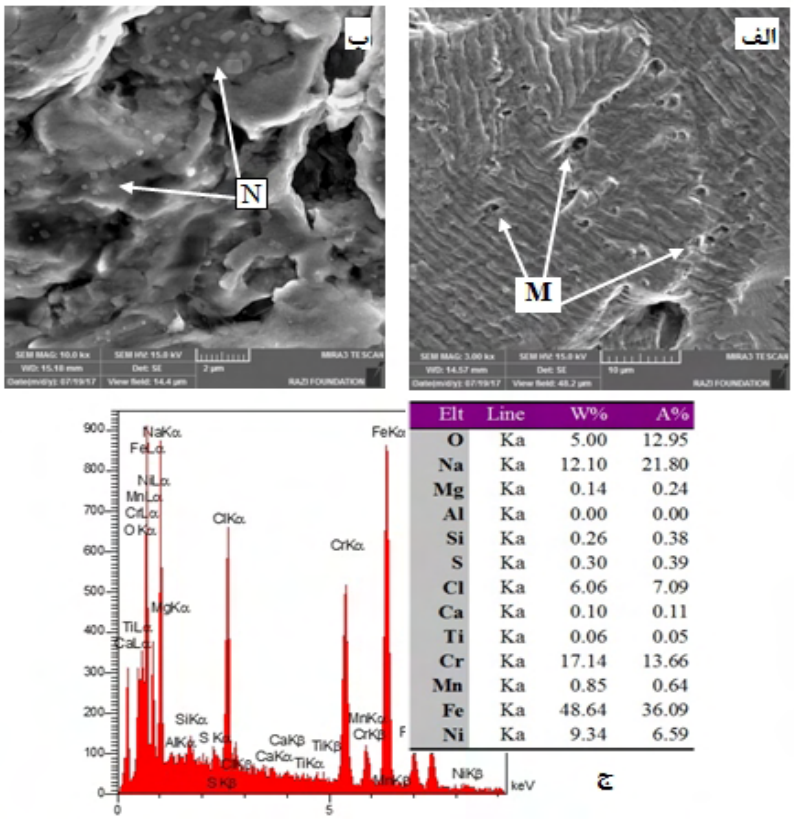
همانگونه که از این شکل برداشت می‌شود ترک در نمونه‌های خسته شده در محیط خورنده (شکل۷-ج و د) برخلاف نمونه‌های خسته شده در هوا (شکل۷-الف و ب)، از محل‌های متعددی از سطح شروع شده است. این را می‌توان به ایجاد ناهمواری‌های سطحی در نتیجه خوردگی در سطح نمونه های مذکور و ایجاد محل مناسب برای تمرکز تنش و ایجاد ترک نسبت داد.

مطالعه ترکیب شیمیایی اجزاء سطوح شکست نمونه‌ها در هر دو آزمون خستگی و خوردگی-خستگی نشان داد که در نمونه جوشکاری شده با فلزپرکننده ER309L، اغلب در مرکز دیمپل‌های موجود در سطح شکست ذرات اکسیدی وجود دارد. اما در نمونه جوشکاری شده با فلزپرکننده ERNiCrMo-3، ترکیبات بین فلزی غنی از Nb، Cr و Ti در تشکیل دیمپل‌ها موثر بودند (شکل۸).

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

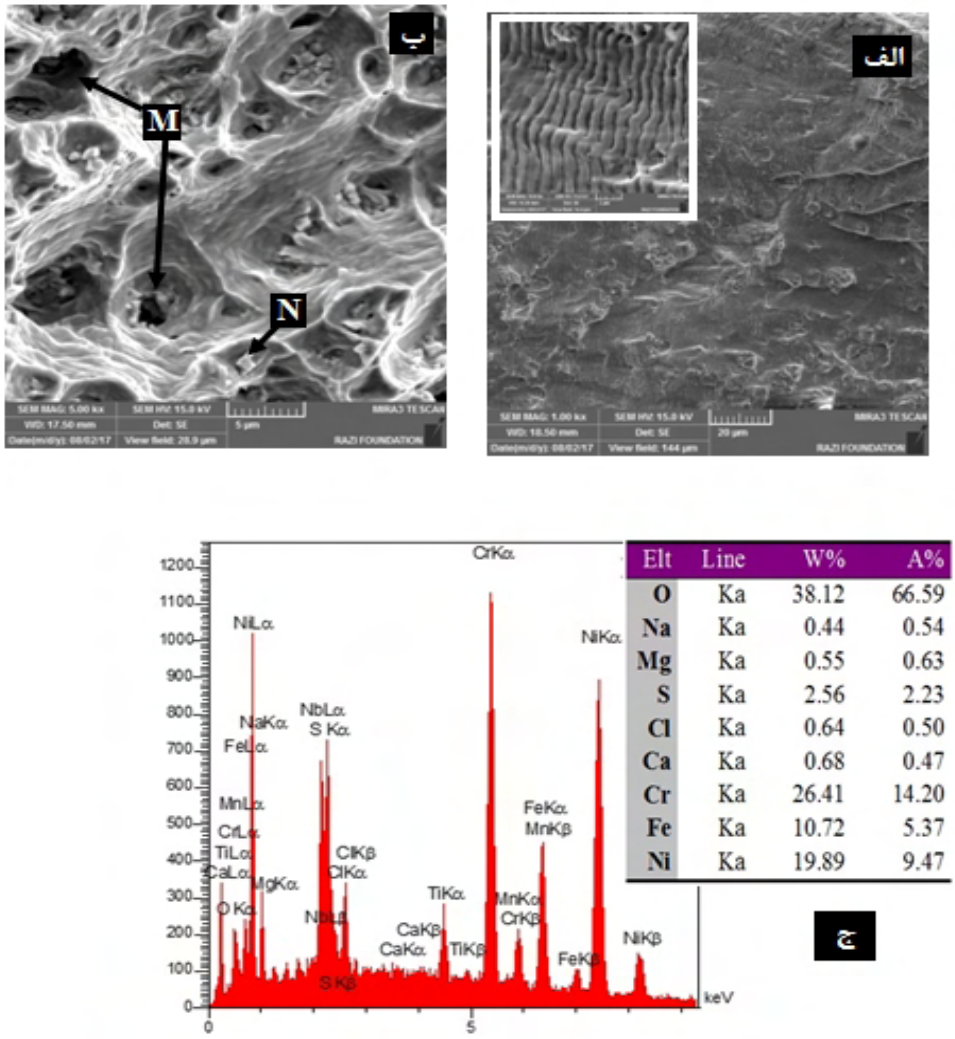


شکل8- تاثیر ترکیب شیمیایی فلزپرکننده بر سطوح شکست خستگی نمونه‌ها و ترکیب شیمیای مرکز دیمپلها (نقطه **A** در شکلهای مربوطه). (الف) نمونه جوشکاری شده با **ER309L**، (ب)نمونه جوشکاری شده با **ERNiCrMo-3**.



شکل9- مطالعه سطح شکست خوردگی-خستگی نمونه جوشکاری شده با فلزپرکننده **ER309L**. الف) تشکیل حفرات، (ب) تشکیل محصولات غنی از محیط خورنده، (ج) آنالیز **EDS** از ذرات **N. M** و **N** به ترتیب معرف حفرات و محصولات خوردگی در سطح شکست می‌باشد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل10- مطالعه سطح شکست خوردگی-خستگی نمونه جوشکاری شده با فلزپرکننده ERNiCrMo-3. الف) سطح شکست، (ب) تشکیل حفرات و محصولات غنی از محیط خورنده، (ج) آنالیز EDS از ذرات N. M و N به ترتیب معرف حفرات و محصولات خوردگی در سطح شکست می‌باشد.

مطالعات شکست‌نگاری نشان داد که نمونه جوشکاری شده با فلزپرکننده ER309L دستخوش خوردگی شدیدتری در بارگذاری سیکلی در محیط خوردنده شده است (تشکیل حفرات بیشتر در سطح شکست شکل(۹-الف) در مقایسه با شکل(۱۰-الف). همچنین مطالعات EDS ذرات تشکیل شده در سطوح شکست نمونه‌های خوردگی-خستگی، حاکی از تشکیل محصولات خوردگی غنی از سدیم و کلر در سطح شکست نمونه‌ها بود (شکل‌های ۹-ج و ۱۰-ج). این محصولات در نمونه جوشکاری شده با فلزپرکننده ER309L به میزان چشمگیری بیشتر از نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ERNiCrMo-3 بود (شکلهای ۹-ب و ۱۰-ب). خوردگی شدیدتر در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER309L را می‌توان احتمالا به اختلاف ساختار فلزجوش (γ+δ) و فلزپایه (γ) و همچنین تشکیل مناطق تهی شده از کروم در نمونه مذکور نسبت داد. توضیح آنکه تشکیل ذرات اکسیدی غنی از کروم در این نمونه موجب تهی شدن کروم از مناطق اطراف این ذرات و حساسیت به خوردگی می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ با

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

استفاده از دو فلزپرکننده ER309L و ERNiCrMo-3 به منظور ایجاد دو ساختار آستنیتی+فریتی (γ+δ) و آستنیتی (γ) در فلزجوش انجام و تاثیر این ساختار بر رفتار خستگی و خستگی-خوردگی نمونه جوشکاری شده مورد ارزیابی واقع شد. از مهمترین نتایج حاصله در این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

۱- برخلاف ساختار دوفازیδ+γدر فلزجوش راسب شده از فلز پرکننده ER309L، فلز پرکننده ERNiCrMo-3 موجب ایجاد ساختار γهمراه ترکیبات بین‌فلزی غنی از مولیبدن و نیوبیم تشکیل شده در نواحی سه‌گانه دانه‌های آستنیت شد.

۲-سختی فلزجوش تنهادر حدود۱۰٪ بیشتر از سختی فلزپایه بود که بدلیل حضور مقادیر قابل توجه عناصرآلیاژی (مولیبدن، کروم و غیره) در ترکیب شیمیایی فلزجوش می‌باشد. در مقابل رشد دانه‌ها در منطقه متاثر از حرارت موجب کاهش حدود ٪۵ سختی نسبت به سختی فلزپایه گردید.

۳- ترک خستگی از نواحی مختلف سطح نمونه‌های آزمون خستگی-خوردگی شروع شد. همچنین رفتار نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی نرمتر (تشکیل دیمپل‌های بیشتر در سطح شکست) از رفتار مذکور در نمونه‌های خستگی-خوردگی بود.

۴- منشاء تشکیل دیمپل‌ها در نمونه‌های جوشکاری شده با فلزهای پرکننده ER309L عمدتا ترکیبات اکسیدی بود ولی در نمونه ERNiCrMo-3 منشاء تشکیل دیمپل‌ها عمدتا ترکیبات بین فلزی غنی از ، نیوبیم و تیتانیم بود.

۵- فلزجوش راسب شده از فلزپرکننده ERNiCrMo-3 بالاترین استحکام خستگی و استحکام خستگی- خوردگی را در مقایسه با مقدار مربوط به نمونه جوشکاری شده با فلزپرکنندهER309L نشان داد.

منابع

1- Davis, J. R., (Editor), ASM Specialty Handbook: Stainless Steels, ASM International, USA, 1994.

2- McGuire, M. F., Stainless Steels for DesignEngineers, ASM International, USA, 2008.

3- Mohammadi, F.,Erosion-corrosion of 304 StainlessSteel, University of Alberta Publication, USA, 2011.

4- Lippold J. and Kotecki, D., Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, Wiley International Publication, USA, 2015

5- Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. and Fuchs, H., Metal Fatigue in Engineering, 2nd Edition, WileyInternational Publication, USA, 2000.

6- Murakami, Y., Metal Fatigue: Effects of SmallDefects and Nonmetallic Inclusions, ElsevierPublication, USA, 2002.

7- Oh, J., Kim, N.J., Lee, S. and Lee, E.W., "Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 340(1-2), pp.232-242, 2003.

8- Lakshminarayanan, A.K., Shanmugam, K. and Balasubramanian, V., "Effect of welding processes on tensile, impact, hardness and microstructure of joints made of AISI 409M FSS base metal and AISI 308L ASS filler metals", *Ironmaking & Steelmaking*, Vol. 36(1), pp.75-80, 2013.

9- Sun, J., Nie, P., Feng, K., Li, Z., Guo, B. and Jiang, E., "The elimination of pores in laser welds of AISI 304 plate using different shielding gases", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.248, pp.56-63, 2017.

10-Buchely, M.F., Colorado, H.A. and Jaramillo, H.E., "Effect of SMAW manufacturing process in high-cycle fatigue of AISI 304 base metal using AISI 308L filler metal", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.20, pp.181-189, 2015.

11-Villaret, V., Deschaux-Beaume, F., Bordreuil, C., Fras, G., Chovet, C., Petit, B. and Faivre, L., "Characterization of gas metal arc welding welds obtained with new high Cr–Mo ferritic stainless steel filler wires", *Materials & Design*, Vol.51, pp.474-483, 2013.

12-Lassen, T. and Recho, N., Fatigue life analyses of welded structures: flaws, John Wiley & Sons, 2006.

13-Kou, S., Welding metallurgy. New Jersey, USA, 2003

14-Yuri, T., Ogata, T., Saito, M. and Hirayama, Y., "Effect of welding structure and δ-ferrite on fatigue properties for TIG welded austenitic stainless steels at cryogenic temperatures", *Cryogenics*, Vol.40(4-5), pp.251-259, 2000.

15-Hasçalik, A., Ünal, E. and Özdemir, N., "Fatigue behaviour of AISI 304 steel to AISI 4340 steel welded by friction welding", *Journal of materials science*, Vol.41(11), pp.3233-3239, 2006.

16-Chandra, S.K., Shankar, V., Mariappan, K., Sandhya, R. and Chakraborty, P.C., "Effect of strain rate on the low cycle fatigue behavior of 316L (N) stainless steel weld joints", *Procedia Engineering*, Vol.55, pp.176-180, 2013.

17-Dong, L., Han, E.H., Peng, Q., Ke, W. and Wang, L., "Environmentally assisted crack growth in 308L stainless steel weld metal in simulated primary water", *Corrosion Science*, Vol.117, pp.1-10, 2017.

18-Suzuki, K., Nakamura, Y., Nakajima, M., Bai, Y. and Uematsu, Y., "Improvement of fatigue properties by solution treatment in Nitrided type 304 stainless

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

steel", *Procedia Materials Science*, Vol. 3, pp.627-633, 2014.
19-Huang, Y., Tu, S.T. and Xuan, F.Z., "Pit to crack transition behavior in proportional and non-proportional multiaxial corrosion fatigue of 304 stainless steel", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.184, pp.259-272, 2017.
20-Capello, E., Chiarello, P., Previtali, B. and Vedani, M., "Laser welding and surface treatment of a 22Cr–5Ni–3Mo duplex stainless steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol.351(1-2), pp.334-343, 2003.
21-Lee, H.T. and Lin, Y.D., "Microstructure and corrosion behaviour of alloy 690–SUS 304L butt joints formed by electron beam welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol.11(6), pp.650-656, 2006.
22-Ma, J.C., Yang, Y.S., Tong, W.H., Fang, Y., Yu, Y. and Hu, Z.Q., "Microstructural evolution in AISI 304 stainless steel during directional solidification and subsequent solid-state transformation", *Materials Science and Engineering: A*, Vol.444(1-2), pp.64-68, 2007.
23-Hertzberg, R.W., Deformation and fracture mechanics of engineering materials,5th Edition, John Wiley and SonsPublication, 2012.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]