بررسی تأثیر دما و زمان عملیات حرارتی آستنیته شدن بر رفتار و مکانیسم خوردگی فولاد پرآلیاژ هادفیلد

مس ع ود سبزی [*]	مربی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، mas.metallurg88@gmail.com
محسن سبزی	کارشناس، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، mas.metallu88@yahoo.com
احمد منشى	استاد، گروه مواد و متالورژی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، a.monshi@yahoo.com

چکیدہ

در این پژوهش، رفتار خوردگی فولاد هادفیلد آستنیته شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۰۷۵ او ۲۲۵۵ در زمانهای نیم و یک ساعت مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، ابتدا ۴ عدد بلوک به شکل Y از فولاد هادفیلد تهیه شده و سپس عملیات حرارتی آستنیته شدن بر روی آنها انجام شد. میکروسکوپ نوری برای بررسی ریزساختار به کار گرفته شد. برای بررسی مورفولوژی خوردگی از میکروسکوپ الکترونی روبشی و برای آنالیز فازهای تشکیل شده در ریزساختار از پراش پرتو ایکس استفاده شد. برای بررسی رفتار خوردگی از روشهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۲۵/۵۸ استفاده شد. نتایج هردو روش نشان داد نمونهای که در دمای ۲۰۵۵ به مدت یک ساعت عملیات شده، مقاومت به خوردگی بالاتر، شدت جریان خوردگی کمتر و پتانسیل خوردگی نجیبتری نسبت به نمونهی آستنیه شده در دمای ۲۰۵۵ به مدت یک ساعت عملیات شده، مقاومت به خوردگی بالاتر، شدت جریان خوردگی از مورفولوژی خوردگی نجیبتری نسبت به نمونهی آستنیه شده در دمای ۲۰۵۲ به مدت نیم ساعت دارد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و موفولوژی خوردگی نشان داد که کاهش دمای آستنیته شدن در فرآیند عملیات حرارتی فولاد هادفیلد منجر به فراهم شدن شرایط برای وقوع خوردگی

واژههای کلیدی: فولاد منگنزدار هادفیلد، رفتار خوردگی، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، عملیات حرارتی آستنیته شدن.

Investigation on the Effects of Temperature and Time of Austenitizing Heat Treatments on the Behavior and Corrosion Mechanism of Hadfield High-Alloy Steel

M. Sabzi	Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.
M. Sabzi	Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.
A. Monshi	Department of Materials and Metallurgical, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Abstract

In this study, corrosion behavior of Hadfield steel after austenitizing in the temperatures 1000,1075,1150 and 1225°C for 0.5 and 1 hour was investigated. To do this, 4 Y-form casting blocks of Hadfield steel were prepared first and then dissolution austenitizing heat treatment was applied to them. Evaluation of the microstructures was conducted by optical microscopy. Corrosion morphology of samples were investigated by scanning electron microscopy and X-ray diffraction was used for the analysis of phases formed in the microstructure. For evaluation of corrosion behavior, potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy methods were used in the 3.5% NaCl solution. The results of both methods showed that sample which austenitized in the temperature of 1225°C for 1 hour, had got higher corrosion resistance, lower corrosion current and more noble corrosion potential compared to sample which austenitized in the temperature of 1000°C for 0.5 hours. Also, scanning electron microscopy images formed corrosion morphology indicated that decreasing in austenitizing temperature in the heat treatment process of Hadfield steel, led to occurrence of micro-galvanic localized corrosion.

Keywords: Hadfield manganese steel, corrosion behavior, electrochemical impedance spectroscopy, potentiodynamic polarization, austenitizing heat treatment

پرآلیاژ میباشند که معروفترین آنها به نام فولاد هادفیلد است که بدلیل انعطاف پذیری خوب، کارسختی بالا و مقاومت عالی در برابر سایش کاربردهای گستردهای در صنایع گوناگون نظیر صنایع سیمان، معدن، راهسازی و راهآهن دارد [۱و۲]. این فولاد، آلیاژی از آهن، کربن و منگنز است که در موارد خاص و بنا به کاربرد آن، عناصر آلیاژی دیگری نیز به این فولاد اضافه میشود. یکی از این عناصر تیتانیم میباشد. استفاده از عنصر تیتانیم جهت ریزدانه کردن ساختار و افزایش

اولین فولاد منگنزدار آستنیتی که دارای حدود ۱٫۲ درصد وزنی کربن و ۱۲ درصد وزنی منگنز بود، توسط رابرت هادفیلد^۱ در سال ۱۸۸۲ میلادی تهیه شد. فولاد آستنیتی پرمنگنز از دسته فولادهای

۱- مقدمه

¹ Robert Hadfield

^{*} نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mas.metallurg88@gmail.com

سختی در این فولاد نتایج بسیار مثبتی به جای گذاشته است [۴و۳]. اگرچه این عنصر با ایجاد کاربیدهای پایدار، باعث افزایش سختی و بهبود مقاومت سایشی فولاد هادفیلد شده ولی از طرفی هم با ایجاد کاربیدهای پایدار TiC، باعث کاهش چقرمگی آن میشود [۵]. در همین زمینه، اسری واستاوا⁽ و همکارانش [۶]، به بررسی تأثیر ذرات کاربید تیتانیم بر رفتار خوردگی کامپوزیتهای با زمینه فولاد هادفیلد پرداختند. این محققان نشان دادند که با افزایش میزان کاربید تیتانیم، مقاومت خوردگی کامپوزیت مذکور کاهش مییابد.

فولاد هادفیلد به دلیل دارا بودن مقدار کربن بالا، ساختار آن در حالت ریخته گری، شامل دانه های آستنیت و رسوب های کاربید مرزدانه ای است که در این حالت ترد و شکننده بوده و به نوعی غیرقابل استفاده هستند. برای رفع این مشکل رواندوست و همکارانش [۷] نشان دادند که اگر پس از ریخته گری، این فولاد تحت تندسرمایی مستقیم در آب قرار گیرد، کاربیدهای مرزدانه ای حذف شده و این عمل از اثرات نامطلوب کاربیدها بر روی خواص مکانیکی فولاد هادفیلد جلوگیری می کند. در همین راستا، حسینی و همکارانش [۱۰– ۸] گزارش دادند که اگر پس از فرآیند عملیات حرارتی آستنیته، فولاد هادفیلد را در حمام آب نمک سرد کنیم، میتوان از تشکیل ذرات کاربید مرزدانه ای در ساختار این فولاد جلوگیری نمود.

بدون شک، حضور عناصر آلیاژی و فرآیند تولید فولادها، تأثیر زیادی بر روی خواص مکانیکی و خوردگی آنها دارد. بعنوان مثال تور^۲ (۱۱] نشان داده که با کاهش میزان منگنز، مقاومت خوردگی در فولادهای آستنیتی افزایش مییابد. همچنین سبزی و معینیفر [۱۲] با مطالعاتی که بر روی تأثیر عناصر آلیاژی آلومینیوم و کروم بر رفتار خوردگی فولاد هادفیلد انجام دادند، گزارش نمودند که افزاودن آلومینیوم و کروم به ترکیب شیمیایی فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد، بترتیب باعث افزایش و کاهش مقاومت خوردگی این فولاد میشود.

بررسیها نشان داده است که پارامترهای فرآیند جوشکاری تأثیر زیادی بر رفتار خوردگی و ریزساختار اتصالات جوشکاری فولادها دارد [۱۴ – ۱۳]. به همین دلیل تحقیقاتی توسط سبزی و همکارانش [۱۵] فر رابطه با تأثیر گرمای ورودی بر مقاومت خوردگی اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد صورت گرفت. این محققین در نتایج تحقیقات خود گزارش دادند که افزایش گرمای ورودی در فرآیند جوشکاری ورقهای فولاد هادفیلد، منجر به کاهش مقاومت خوردگی اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد میشود. این محققین دلیل این امر را افزایش تشکیل کاربیدهای پیوسته و خوشهای شکل در مرزدانهها در اثر افزایش گرمای ورودی در فرآیند جوشکاری بیان نمودهاند. در تحقیقاتی دیگر [۱۶] به بررسی تأثیر نرخ سرد شدن بر مقاومت خوردگی منطقه ذوب اتصال

جوشکاری فولاد هادفیلد با استفاده از روشهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی پرداخته شده است و گزارش داده شده که افزایش نرخ سرد شدن منجر به افزایش مقاومت خوردگی منطقه ذوب اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد می شود.

یکی از علل اصلی تخریب مواد، خوردگی می،اشد. با توجه به کاربردهای ذکر شده برای فولاد منگنزدا هادفیلد، در برخی از کاربردها، فولاد مذکور در معرض عوامل خورنده بوده (بویژه در خطوط ریلی در کوهستان بدلیل وجود رطوبت زیاد) و بدون شک خوردگی یکی از علل تخریب این فولاد میتواند باشد. لذا در این پژوهش لازم دیده شد که به بررسی تأثیر زمان و دمای عملیات حرارتی آستنیته شدن بر رفتار و مکانیسم خوردگی فولاد هادفیلد پرداخته شود که در پژوهشهای پیشین به این موضوع پرداخته نشده است.

۲- روش تحقیق

فولاد مورد استفاده در این تحقیق، فولاد منگنزدار هادفیلد ASTM A-۱۲۸ [۱۷] بود. برای تهیهی این فولاد، ۴ عدد بلوک از فولاد هادفیلد ریخته گری شده و سپس آنالیز شیمیایی آنها توسط دستگاه کوانتومتر کنترل شد و در جدول ۱ نشان داده شده است. برای انجام عملیات حرارتی، فولاد هادفیلد ریخته گری شده را از دمای محیط به درون کوره المنتی الکتریکی قرار داده و با نرخ hr / C / hr تا دمای آستنیته مورد نظر در ۱۰۰۰، ۱۰۷۵، ۱۱۵۰و C°۱۲۲۵ حرارت داده شده و سپس به مدت نیم و یک ساعت در دماهای مذکور نگهداری شدند. پس از پایان عملیات حرارتی، همهی نمونهها از کوره خارج شده و به درون آب خالص سريع سرد شدند. برنامهی عمليات حرارتی اعمالی به همهی نمونهها در جدول ۲ نشان داده شده است. جهت بررسی ریزساختار نمونهها، نمونهها با استفاده از سمبادههای مختلف آمادهسازی شده و برای اچ کردن آنها از محلول نایتال ۲٪ استفاده شد. در نهایت ریزساختارهای حاصل توسط میکروسکوپ نوری بررسی شد. همچنین برای بررسی تأثیر دما و زمان آنیل انحلالی بر فازهای تشکیل شده در ساختار فولاد هادفیلد، از نمونههای آنیل شده در دمای به مدت نیم ساعت و $\rm C^{\circ C}$ به مدت یک ساعت، از پراش ۱۲۲۵°C یرتو ایکس استفاده گردید.

برای تهیهی نمونههای موردنیاز برای انجام آزمایشهای الکتروشیمیایی از یک یال هر بلوک، نمونهای استوانهای به قطر ۷mm و ارتفاع ۳۰mm بوسیلهی دستگاه تراش تهیه شد. در مرحله بعد، نمونههای تراشکاری شده با سمباده و پولیش پرداخت شده تا سطحی بدون آلودگی بدست آید. سپس یک قسمت به اندازهی ^۲mn از نمونه در نظر گرفته شده و مابقی پوشش داده شد. در این مرحله یک طرف نمونهی استوانهای را به درون محلول NaC1/NaC1 فرو برده و یک طرف دیگر آن به گیرهی دستگاه متصل گردید. به منظور ارزیابی رفتار خوردگی فولاد هادفیلد آزمایشهای الکتروشیمیایی، ابتدا هر نمونه در پتانسیل مدار باز به مدت زمان نیم ساعت غوطهور شد تا به حالت پایدار برسد [۸۸]. ابتدا آزمایش QCP بر روی نمونهها انجام شده و بعد طیف سنجی امپدانس

¹ Srivastava

² Toor

نشريه

محدوده فركانسی ۱۰۰kHz –۱۰mHz انجام شد. سیس آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده ۳۵۰mV- تا ۱۰۰۰۳V+ نسبت به OCP و با نرخ روبش ۰/۰۰۱V/s انجام شد.

لازم به ذکر است که آزمایشهای الکتروشیمیایی با استفاده از پيل استاندارد سه الكترودى، شامل الكترود مرجع Ag/AgCl، الكترود کمکی پلاتین و همچنین از نمونههای فولادی مورد آزمایش به عنوان الكترود كار، انجام شدند و سل مذكور به دستگاه پتانسيواستات – گالوانواستات (Autolab) مدل PGStat 302N متصل گردید. هر دو آزمایش الکتروشیمیایی مورد استفاده، در دمای $m C^{\circ}C$ انجام شده و برای اطمینان از به دست آمدن نتایج دقیق، هر آزمایش الکتروشیمیایی سهبار تکرار شد. پس از پایان آزمایشهای الکتروشیمیایی، از سطح مورد آزمایش نمونههای دارای بالاترین و کمترین مقاومت به خوردگی توسط ميكروسكوپ الكتروني روبشي (SEM) تصاويري تهيه شد.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی فولاد منگنزدار هادفیلد تولید شده برحسب

درصدوزنی.						
Steel Type	С	Mn	Cr	Si	Р	Fe
Hadfiel	1.2	12.2	1.7	0.4	0.02	Balanc
d	1	3	2	3	5	e

جدول ۲- برنامهی عملیات حرارتی برای تمام نمونههای مورد آزماىش.

0 ,					
مدت زمان قرار	دمای آستنیته	نمونه			
گیری، ساعت	شدن، درجه				
	سلسيوس				
• , ۵	۱۰۰۰	الف			
١	۱۰۰۰	ŗ			
۰ ،۵	١٠٧۵	Ų			
١	١٠٧۵	ت			
۵, •	110.	ث			
١	110.	ى			
• ,۵	١٢٢٥	ج			
١	١٢٢٥	\$			

۳- نتايج

فولاد هادفيلد، پركاربردترين فولاد آستنيتي منگنزدار مورد استفاده در صنعت می باشد که جهت کاربردهای سایشی پیشنهاد شده و در این پژوهش به برسی تأثیر زمان و دمای عملیات حرارتی آستنیته شدن بر رفتار خوردگی آن پرداخته شده است. ترکیب شیمیایی نمونهی تولید شده در جدول ۱ مشاهده می شود. همانطور که مشاهده می شود، کربن در حدود ٪۱/۲ در ترکیب وجود دارد. از طرفی هم عناصری نظیر آهن، کروم و منگنز وجود دارند که همگی کاربیدزا هستند. بنابراین انتظار میرود که میزان زیادی از ذرات کاربیدی در ساختار فولاد هادفیلد بوجود آید. باتوجه به دیاگرام تعادلی Fe-C-Mn که در شکل (۱) [۱۹] نشان داده شده است، ذرات کاربیدی برای فولاد

منگنزدار هادفیلد با C/۲/C تقریباً از دمای ^C۹۰۰ شروع به تشکیل کرده و تا دمای $^{\circ}C$ ادامه دارد. لذا برای حل شدن کاربیدهای موجود در فولاد منگنزدار هادفیلد، لازم است که این فولاد در دماهای بالاتر از C°۹۰۰ حرارت داده شود. بهمین منظور برای انجام عملیات حرارتی آستنیته شدن، دماهای ۱۰۰۰، ۱۰۷۵، ۱۱۵۰و C°۱۲۲۵ انتخاب شدند.



شکل ۱- نمودار تعادلی Fe-C-Mn در ۱۳ درصدوزنی Mn [۱۹].

۳-۱- مشاهدات ریزساختاری و آنالیز فازی

شکل ۲، تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از فولاد هادفیلد مورد استفاده در این پژوهش را در شرایط مختلف نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود، در حالت ریخته گری و بدون عملیات، ریزساختار متشکل از یک زمینه آستنیتی و مقدار زیادی کاربید پیوسته در مرزدانهها بوده که با انجام عملیات حرارتی در دماهای ۱۰۰۰، ۱۰۷۵، ۱۱۵۰و c^o۲۲۵[°]، از میزان کاربیدها در ریزساختار کاهش یافته و پس از عملیات حرارتی مقداری کاربید پراکنده در ریزساختار مشاهده می شود. دلیل زمینهی آستنیتی را می توان به حضور مقادیر بالای کربن و منگنز و همچنین عملیات حرارتی در محدودهی پایداری فاز آستنیت (با توجه به دیاگرام فازی) اثبات نمود. همچنین منگنز از تبدیل آستنیت به مارتنزیت در دماهای پایین جلوگیری می کند. پیش از این تعدادی ازمحققین [۲۰]، گزارش دادند که با افزایش منگنز در آلیاژهای Fe-Mn، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش مییابد، بطوریکه در آلیاژهای پرمنگنزی یک زمینهی کاملاً آستنیتی را میتوان مشاهده نمود. از تصاویر متالوگرافی مشاهده میشود که با افزایش دما و زمان عملیات آستنیته شدن، هم میزان کاربیدها کاهش یافته و هم ساختار دانه درشتتری ایجاد شده است که نشان از حل شدن کربن در زمینهی آستنیت دارند. در این تصاویر مشاهده می شود که نمونهی (الف) که در دمای به مدت نیم ساعت عملیات شده، دارای ساختار ریزدانهتر و $^\circ\mathrm{C}$ حجم ذرات کاربیدی بیشتری است و در مقابل، نمونهی (چ) که در دمای $^{\circ}\mathrm{C}$ دمای استنیته شده، دارای دارای ا ساختار دانه درشتتر و حجم ذرات کاربیدی کمتری است. برای بررسی بهتر این موضوع، میزان ذرات کاربیدی بوسیله نرم افزار Image J اندازه گیری شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل هم مشاهده می گردد که با افزایش دما و زمان در فرآیند عملیات حرارتی آستنیته شدن، از میزان رسوبا کاسته شده است.

نتایج مشاهده شده در تصاویر میکروسکوپ نوری با نتایج حسینی و همکارانش [۱۰ – ۸] شباهت دارد. این محققین پیش از این گزارش داده بودند که افزایش دما و زمان در فرآیند عملیات حرارتی آستنیته شدن منجر به افزایش اندازه دانههای آستنیت و کاهش میزان رسوبات کاربیدی در ریزساختار فولاد هادفیلد میشود. برای بررسی رسوبات تشکیل شده در نمونههای آستنیته شده در دمای 0° ۲۰۰۰ به مدت نیم ساعت (الف) و آستنیته شده در دمای 0° ۲۲۲ به مدت یک ساعت (π)، از آنالیز XRD استفاده شده و نتایج آن در شکل ۴ گزارش شده است. از الگوهای XRD هم ملاحظه میشود که کاربیدهای تشکیل شده در هر دو نمونهی آستنیته شده در دمای 0° ۲۰۰۰ به

مدت نیم ساعت و آستنیته شده در دمای $^{\circ}$ (Fe,Mn,Cr) به مدت یک ساعت، کاربیدهای کمپلکس $^{\circ}$ (Fe,Mn,Cr) بوده و فاز غالب (فاز زمینه)، آستنیت میباشد [7 - 1]. همچنین از الگوهای پراش پرتو ایکس ملاحظه میگردد که در نمونهی آستنیته شده در دمای $^{\circ}$ (۲۲۵ به مدت یک ساعت، نسبت به نمونهی آستنیته شده در دمای دمای $^{\circ}$ (۲۲۵ به مدت یک ساعت، نسبت به نمونهی آستنیته شده در دمای ردمای $^{\circ}$ (۲۲۵ به مدت یک ساعت، نسبت به نمونهی آستنیته شده در دمای ردمای $^{\circ}$ (۲۲۵ به میگردد که در نمونهی آستنیته شده در دمای $^{\circ}$ (۲۲۵ به می گردد که در نمونه که نمان آز کاهش تشکیل این ماربیدها در اثر افزایش دما و زمان آستنیته شدن دارد و مشاهدات ریزساختاری را تأئید میکند.



شکل ۲- تصاویر متالوگرافی از فولاد منگنزدارهادفیلد در بزرگنمایی ۱۰۰ در شرایط ریختهگری و عملیاتهای آستنیته شدن.



شکل ۳- توزیع کاربید در نمونههای مختلف توسط نرم افزار Image J .



۲-۳- آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

در شکل ۵ نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و در جدول ۳ نتایج مربوط به این آزمایش نشان داده شده است. مشاهده می شود که در بین تمام نمونه های مورد آزمایش، نمونه (چ) از مقاومت به خوردگی بالاتر، پتانسیل خوردگی نجیبتر، جریان خوردگی و نرخ خوردگی پایین تری برخوردار میباشد. چون که نمونهی (چ) در بالاترین دما و بیشترین زمان تحت عملیات آستنیته شدن قرار گرفته است و این امر منجر به افزایش حلالیت کربن در شبکه آستنیت و بزرگ شدن دانههای آستنیت در فولاد هادفیلد گشته است. در واقع رفتار الکتروشیمیایی بهتر نمونهی (چ) در بین همهی نمونهها، بدلیل کاهش میزان ذرات کاربیدی و کاهش تعداد مرزدانهها میباشد. در مقابل نمونهی (الف) که دارای بالاترین میزان کاربید و بیشترین تعداد مرزدانه است، مقاومت به خوردگی پایینتر، پتانسیل خوردگی منفیتر، جریان خوردگی و نرخ خوردگی بیشتری نسبت به دیگر نمونهها دارد. ذرات کاربیدی، ترکیبهایی هستند که رفتار نجیبی نسبت به زمینهی آستنیتی در فولاد هادفیلد از خود نشان میدهند. بنابراین زمانی که کاربیدها به دلیل کاهش دمای عملیات حرارتی به میزان بالایی در فولاد منگنزدار هادفیلد تشکیل میشوند، به ۲ دلیل خوردگی را تشدید میکنند [۲۱]: ۱- همانطور که در تصاویر متالوگرافی دیده شد، نمونهی (الف) بدلیل داشتن میزان کاربید بیشتر، دارای کمترین اندازه دانه در بین تمامی نمونهها میباشد. در نتیجه در نمونهی (الف) تعداد مرزدانهها بیشتر از سایر نمونهها بوده و مرزدانهها

محلهای پرانرژی هستند که از نظر شیمیایی فعال تر بوده و تمایل به خوردگی را افزایش می دهند. ۲- زمانی که ذرات کاربیدی نجیب تر در کنار زمینه یفعال قرار می گیرند، زوج الکتروشیمیایی تشکیل داده و باعث تضعیف شدن مقاومت به خوردگی خواهد شد. در مجموع، نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک حکایت از این دارد که افزایش مقاومت به خوردگی در فولاد منگنزدار هادفیلد می شود. بطوریکه مقاومت به خوردگی در فولاد منگنزدار هادفیلد می شود. بطوریک نمونه ی (چ) بهترین و نمونه ی (الف) ضعیف ترین مقاومت به خوردگی را نتایج حاصل از پژوهش سبزی و همکارانش [۱۶ و ۱۵] شباهت دارد. این محققین گزارش داده بودند که تشکیل کاربیدهای آهن و منگنز و می مینین تجمع این کاربیدها در مرزدانه های ریز اختار فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد، منجر به کاهش مقاومت خوردگی در این فولاد می شود.

این پژوهش همچنین اقدام به بررسی نرخ خوردگی در بازههای زمانی مختلف غوطهوری شد که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل باز هم مشاهده میشود که نمونهی (چ) نرخ خوردگی کمتری نسبت به سایر نمونهها دارد که این نشان دهندهی مقاومت خوردگی بالاتر این نمونه نسبت به نمونههای دیگر است. همچنین در این شکل مشاهده میشود که پس از گذشت حدود ۴ ساعت از زمان غوطهوری، نرخ خوردگی کاهش شدیدی پیدا میکند که این امر به دلیل تشکیل محصولات خوردگی بر سطح نمونهها می،باشد.



۔ شکل۵- نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در حداقل سهبار تکرارپذیری.

نرخ خوردگی، میلی متر بر سال	مقاومت پلاریزاسیون، اهم. سانتی متر مربع	پتانسیل خوردگی، میلی ولت	جریان خوردگی، میکروآمپر	نمونه
۰,۹۱۲۵	$\Delta \Psi \pm \Delta$	-1737 \pm 1.	971 ± 0	الف
٠,٧٨٩٧	$\lambda \textbf{F} \pm \Delta$	-1198±1•	${\tt d}{\tt FF}\pm{\tt d}{\tt }$	ب
•,٧۴٣٢	$1 \cdot \Lambda \pm \Delta$	-1117±1•	${\rm YFY}\pm \Delta$	ţ
•, Y • Y¢	۱۱۹ ± ۵	-1·78±1·	$\mathbf{TTD} \pm \mathbf{D}$	ت
۰,۶۴۳۵	174 ± 0	$-9\lambda \Psi\pm 1\cdot$	$ m YTT \pm \Delta$	ث
•,۵۷۶۴	$19\Delta\pm\Delta$	$ \wedge$ \wedge \wedge \wedge \cdot \cdot	$Y \texttt{T} \pm \texttt{D}$	ى
•, ۴ ۶۹۸	$ m YYY\pm \Delta$	-997 ± 1•	${\tt TF}\pm {\tt D}$	ج
۰ _/ ۳۹۹۱	۲۶۹ ± ۵	-401 ± 1.	$1 \wedge \pm \Delta$	ş

جدول ۳- نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در حداقل ۳ بار تکرارپذیری .



شکل ۶- سرعت خوردگی در نمونههای مختلف در ۶ بازه زمانی غوطهوری.

-۳- آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

در شکل ۷ نمودار نایکویست مربوط به آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۳/۵٪/NaCl را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، در آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی هم نمونهی (چ) مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به سایر نمونهها از خود نشان می دهد. از آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مقادیر مقاومت امپدانس واقعی ۲۰۹Ω.cm^۲ برای نمونهی (الف) و ۲۴۸Ω.cm^۲ برای نمونهی (چ) بدست آمد. در مجموع

همانگونه که مشاهده میشود، با مقایسه نمودارهای نایکویست نمونههای مختلف در شکل ۷، مشاهده میشود که قطر نیمدایرهی نمودارهای نایکویست که نمادی از مقاومت پلاریزاسیون نمونهها است [۲۱]، برای نمونهی (چ) که دارای میزان کاربید و تعداد مرزدانهی کمتری میباشد، صاحب بیشترین مقدار است. همچنین نتایج مقاومت به خوردگی حاصل شده از آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با نتایج مقاومت خوردگی حاصل از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک همخوانی دارند.



شکل ۷- نمودار نایکویست مربوط به آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در حداقل سهبار تکرارپذیری.

۳-۴- بررسی مورفولوژی خوردگی

پس از پایان آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، از سطح خوردگی نمونههایی که دارای بیشترین و کمترین میزان مقاومت به خوردگی بودند، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری تهیه شده و در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، شده و در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، در سطح خوردگی نمونههای (الف) (دمای آستنیته شدن 2° ۰۰۰۰ به مدت نیم ساعت) و (ب) (دمای آستنیته شدن 2° ۰۰۰۰ به مدت یک ساعت) یکسری حفرات خیلی درشتتری نسبت به سطح خوردگی نمونههای (ج) (دمای آستنیته شدن 2° ۱۲۲۵ به مدت نیم ساعت) و (چ) (دمای آستنیته شدن 2° ۱۲۲۵ به مدت یک ساعت) در سطح فولاد مشاهده میشود. در نمونههای (الف) و (ب) هم تعداد و هم عمق حفرههای ایجاد شده در سطح بیشتر است. چون در ریزساختار

نمونههای (الف) و (ب) میزان ذرات کاربیدی و تعداد مرزدانهها بیشتر بوده و این امر به خوردگی موضعی میکروگالوانیکی کمک کرده است [۲۳ و ۲۲]. همچنین سطح خوردگی هر چهار نمونه با نتایج حاصل شده از آزمایشهای الکتروشیمیایی مطابقت دارد. درواقع با بررسی مورفولوژی خوردگی مشخص شد که خسارات خوردگی در فولاد منگنزدار هادفیلد به شکل حفرههایی در لایههای سطحی میباشد که تعداد و عمق این حفرهها با افزایش دما و زمان در عملیات حرارتی آستنیته شدن، کاهش یافته است. مشاهدات حاصل از بررسی مورفولوژی خوردگی نمونهها با نتایج حاصل از تحقیقات سبزی و همکارانش [16 و 10] شباهت دارد. نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۹۹، جلد ۲۵، شماره ۲، تابستان، ۱۰۹۱، صفحه ۸۹–۸۸ – پژوهشی کامل – مسعود سبزی و همکاران



شکل ۸- تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مورد آزمایش نمونههای دارای بیشترین و کمترین مقاومت به خوردگی پس از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک.

۴- نتیجهگیری

در این پژوهش، رفتار خوردگی فولاد هادفیلد آستنیته شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۰۷۵، ۱۱۵۰و ۲۵۵۲۲ در زمانهای نیم و یک ساعت مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، ابتدا ۴ عدد بلوک به شکل Y از فولاد هادفیلد تهیه شده و سپس عملیات حرارتی آستنیته شدن بر روی آنها انجام شد. در مرحله بعد، آزمایشهای الکتروشیمیایی جهت بررسی رفتار خوردگی، میکروسکوپ نوری جهت بررسی ریزساختار، آنالیز فازی XRD جهت بررسی فازهای تشکیل شده و میکروسکوپ الکترونی جهت بررسی مورفولوژی خوردگی استفاده شد. نتایج حاصل شامل :

الف) با بررسی نتایج حاصل از آزمایشهای الکتروشیمیایی، بهترین مقاومت خوردگی به فولاد هادفیلد آستنیته شده در دمای C°۱۲۲۵ به مدت یک ساعت و بدترین مقاومت خوردگی به فولاد هادفیلد آستنیته شده در دمای C۰۰۰۵ به مدت نیم ساعت تعلق گرفت.

ب) نتایج آنالیز فازی XRD و مشاهدات میکروسکومپ نوری بیانگر این بود که کاربیدهای تشکیل شده در هر دو نمونهی آستنیته شده در دمای ۲۰۰۰⁰C به مدت نیم ساعت و آستنیته شده در دمای ۲۵^۵C بوده و فاز به مدت یک ساعت، کاربیدهای کمپلکس ۲۳۲⁽Fe,Mn,Cr) بوده و فاز غالب (فاز زمینه)، آستنیت میباشد. همچنین مشخص گردید که با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی آستنیته شدن، از میزان رسوبات کاربیدی کاسته شده و اندازه دانههای آستنیت نیز افزایش مییابند.

ج) بررسیها نشان داد که با افزایش دما و زمان در فرآیند عملیات حرارتی آستنیته شدن فولاد منگنزدار هادفیلد، عوامل تشدید کننده خوردگی موضعی (رسوبات و مرزدانه ها) کاهش می یابند.

د) با بررسی مورفولوژی خوردگی فولاد منگنزدار هادفیلد توسط

میکروسکوپ الکترونی روبشی دیده شد که خسارات خوردگی در این فولاد به شکل حفره میباشد که با افزایش دما و زمان در فرآیند عملیات حرارتی آستنیته شدن، تعداد این حفرات کاهش یافته است.

۵- مراجع

- Lindroos M., and et al., The Deformation, Strain Hardening, and Wear Behavior of Chromium-Alloyed Hadfield Steel in Abrasive and Impact Conditions. *Tribology Letters*, Vol. 57, pp. 1-11, 2015.
- [2] Barannikova S. A., Li Y., Malinovsky A., Pestsov D., Study of Localized Plastic Deformation of Hadfield Steel Single Crystals Using Speckle Photography Technique. Key

Engineering Materials, Vol. 683, pp. 84-89, 2016.

- [3] Limooei, M.B., and Hosseini, Sh., Optimization of properties and structure with addition of titanium in hadfield steels. *Proceedings of Metal 2012*, Czech Republic, Vol. 1, p. 1-6, 2012.
- [4] Najafabadi V.N., Amini K. and Alamdarlo M.B., Investigating the effect of titanium addition on the wear resistance of Hadfield steel. *Metallurgical Research Technologe*, Vol. 111, No. 6, pp. 375-382, 2014.

[۵] نعمتی نجف آبادی و.، مناجاتی زاده ح. و امینی ک.، بررسـی تـأثیر

تيتانيم بر بهبود خواص فولاد هادفيلد ASTM A128-C ، فصلنامه

[6] Srivastava A.K. and et al., Corrosion Behaviour of TiC-Reinforced Hadfield Manganese Austenitic Steel Matrix In-Situ Composites. *Open Journal of Metal*, Vol. 5, pp. 11-17, 2015.

[٧] رواندوست م.، نقوی م.، و شاعری م.ح.، بررسی اثر کوئنچ مستقیم بر ریز ساختار فولاد منگنزی هادفیلد. مجموعه مقالات یازدهمین Metallurgica Sinica(English Letters), Vol. 29, No. 1, pp. 46-57, 2016.

[23] Lim M. L. C., Kelly R. G. and Scully J. R., Overview of Intergranular Corrosion Mechanisms, Phenomenological Observations, and Modeling of AA5083. *Corrosion*, Vol. 72, No. 2, pp. 198-220, 2016.

[25] Srivastava A.K. and et al., Corrosion Behaviour of TiC-Reinforced Hadfield Manganese Austenitic Steel Matrix In-Situ Composites. *Open Journal of Metal*, Vol. 5, pp. 11-17, 2015.

- کنگره سالانه انجمن مهندسین متالورژی ایران، اصفهان، ج۱، م. ۱۳۸۶.
- [8] Hosseini SH., Limooei M.B., Hossein Zade M., Askarnia E. and Asadi Z., Optimization of heat treatment due to austenising temperature, time and quenching solution in Hadfield steels. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.7, pp. 1940-1943, 2013.
- [9] Hosseini SH. and Limooei M.B., Optimization of heat treatment to obtain desired mechanical properties of high carbon Hadfield steels. *World Applied Sciences Journal*, Vol. 15, pp. 1421-1424, 2011.
- [10] Limooei M.B., Hosseini SH., Optimization of Heat Treatment in Manganese Steel by Taguchi Method. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 598, pp. 43-46, 2014.
- [11] Toor I.U.H., Effect of Mn Content and Solution Annealing Temperature on the Corrosion Resistance of Stainless Steel Alloys. J. Chem., Vol. 2014, No, 2014, pp. 1-8, 2014.

آلومینیوم و کروم بر رفتار الکتروشیمیایی فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد. *فصلنامه علـوم و مهندسـی خـوردگی*، دوره ۵، شـماره ۵، صفحات ۲۸–۱۹، ۱۳۹۴.

- [13] Ervina Efzan M. N., Vigram Kovalan K. and Suriati G., A review of welding parameter on corrosion behavior of Aluminum. *Int. J. Eng. Appl. Sci.*, Vol. 1, No.1, pp. 17-22, 2012.
- [14] Afolabi A.S., Effect of Electric Arc Welding Parameters on Corrosion Behaviour of Austenitic Stainless Steel in Chloride Medium. AU J. T., Vol. 11, No. 3, pp. 171-180, 2008.

- [۱۶] سبزی م.، معینیفر ص. و نجفی,بیرگانی ۱.، بررسی تأثیر نرخ سرد شدن بر رفتار خوردگی منطقه ذوب اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد، *شـانزدهمین کنگـره ملـی خـوردگی*، تهـران، پژوهشـگاه صنعت نفت، ص ۱۰ – ۱، آذر ۱۳۹۴.
- Annual book of ASTM standards, ASTM 128 A / 128
 M, Standard specification for steel castings, austenitic manganese. ASTM International, Vol. 1, 2012.
- [18] Roberge P.A., Handbook of Corrosion Engineering. 2th Edition, pp. 6321-764, 2012.

- [20] Lee T.K. and Choi C.S., Driving Force for $\gamma \rightarrow \varepsilon$ Martensitic Transformation and Stacking Fault Energy of γ in Fe-Mn Binary System. *Metallurgical and Material Transaction A*, Vol. 31A, pp. 355-360, 2000.
- [21] Hong J. H., Lee S. H., Kim J. G. and Yoon J. B., Corrosion behaviour of copper containing low alloy steels in sulphuric acid. *Corrosion Science*, Vol. 54, pp. 174-182, 2012.
- [22] Hou R. Q. and et al., Localized Corrosion of Binary Mg-Ca Alloy in 0.9 wt% Sodium Chloride Solution. Acta