

بررسی اثر دمای عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی بر ریزساختار و خواص خوردگی فولاد دوفازی

حسین حسن‌نژاد^{۱*}، سید احمد لاجوردی^۲، اشکان نوری^۱

۱ استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲ استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

* نویسنده مسئول: h-hasannejad@araku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

چکیده

فولادهای دوفازی کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارند. با بررسی خواص مختلف این فولادها از قبیل خواص مکانیکی و خواص الکتروشیمیایی، میتوان کاربردهای جدیدی در استفاده از این نوع فولادها، متصور بود. هرچند خواص مکانیکی این فولادها در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است ولی خواص خوردگی این فولادها، نیاز به تحقیقات گسترده‌تری دارد. در این تحقیق، با استفاده از عملیات حرارتی میان بحرانی، به بررسی تأثیر دمای عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص خوردگی فولادهای دوفازی پرداخته شده است. به این منظور، با استفاده از دو روش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)، خواص خوردگی نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دماهای ۷۴۰، ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فاز مارتنزیت تأثیر دوگانه‌ای بر رفتار خوردگی فولاد دارد. از یک طرف بدلیل مقاومت به خوردگی بیشتر فاز مارتنزیت نسبت به فاز فریت، حضور مارتنزیت سبب افزایش مقاومت به خوردگی فولاد می‌شود و از طرف دیگر، به سبب اختلاف پتانسیل بین دو فاز مارتنزیت و فریت و ایجاد کوپل گالوانیک، سبب کاهش مقاومت به خوردگی آن می‌شود. بیشترین مقاومت به خوردگی مربوط به نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۷۷۰ درجه سانتیگراد می‌باشد و با افزایش دما به ۸۰۰ درجه سانتیگراد، به دلیل افزایش درصد مارتنزیت و تشدید کوپل گالوانیک بین فاز مارتنزیت (کاتد) و فاز فریت (آند)، مقاومت به خوردگی نمونه کاهش می‌یابد.

کلیدواژه: فولاد دوفازی، عملیات حرارتی میان بحرانی، خوردگی، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS).

Investigation of the Effect of Intercritical Annealing Heat Treatment Temperature on the Microstructure and Corrosion Properties of Dual-phase Steel

H. Hassannejad^{1*}, S.A. Lajevardi², A. Nouri¹

1. Assistant Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

2. Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

* **Corresponding Author:** h-hassannejad@araku.ac.ir

Submission: 2021, 06, 25 **Acceptance:** 2021, 11, 01

Abstract

Dual-phase steels have many applications in various industries. By studying the various properties of these steels such as mechanical and electrochemical properties, new applications can be imagined in the use of this type of steels. Although the mechanical properties of these steels have been studied in numerous studies, the corrosion properties of Dual-phase steels need to be extensively studied. In this research, using intercritical heat treatment, the effect of heat treatment temperature on the microstructure and corrosion properties of Dual-phase steels has been investigated. For this purpose, using two methods of potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), the corrosion properties of heat treated samples at 740, 770 and 800 ° C were investigated. The results showed that the martensite phase has a dual effect on the corrosion behavior of steel. On the one hand, due to the higher corrosion resistance of the martensite phase than the ferrite phase, the presence of martensite increases the corrosion resistance of steel. On the other hand, due to the potential difference between the two phases of martensite and ferrite and galvanic coupling, presence of martensite reduces corrosion resistance. The highest corrosion resistance was related to the sample prepared at 770 ° C. With increasing temperature to 800 ° C, due to the increase in the percentage of martensite phase and the intensification of the galvanic coupling between the martensite phase (cathode) and the ferrite phase (anode), the corrosion resistance of the sample decreases.

Keywords: Dual-phase steel, intercritical heat treatment, corrosion, potentiodynamic polarization, electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

۱- مقدمه

فولادهای دو فازی^۱ عموماً دارای ریزساختاری متشکل از یک ماتریس فریتی و یک فاز سخت به صورت جزیره‌های مارتزیتی هستند [۱] و [۲]. این فولادها غالباً به دلیل شکل پذیری مناسب و استحکام کششی بالا، کاربردهای زیادی خصوصاً در صنایع خودروسازی دارند [۳]، [۴]، [۵]، [۶] و [۷]. از طرف دیگر، مقاومت در برابر خوردگی این فولادها عامل مهمی است که بر دوام و قابلیت اطمینان آنها تأثیر بسزایی دارد [۸] و [۹]. هرچند تلاش‌های زیادی در مورد خصوصیات مکانیکی و ویژگیهای ریزساختاری فولادهای دو فازی انجام شده است [۱]، [۱۰] و [۱۱]، برای استفاده از این فولادها در کاربردهای مختلف صنعتی، باید خصوصیات دیگر آنها مانند خواص خوردگی نیز مورد واکاوی دقیق قرار گیرند. با این حال، بر خلاف خواص مکانیکی و ریزساختار این مواد، مطالعات کمی در مورد رفتار خوردگی فولادهای دو فازی وجود دارد.

به طور کلی، مقاومت در برابر خوردگی فولادهای دو فازی بالاست ولی به دلیل وجود فازهای مختلف در این فولادها و ایجاد اختلاف پتانسیل بین آنها، همیشه احتمال ایجاد پیل گالوانیک وجود داشته و می‌تواند خواص خوردگی آنها را تحت تأثیر قرار دهد. با بررسی‌های انجام شده، مشخص شده است که زوج گالوانیک فریت-مارتزیت در فولادهای دو فازی، اختلاف پتانسیلی کمتر از زوج گالوانیک فریت-پرلیت در فولادهای نرم از خود نشان می‌دهد [۱] و [۱۰]. نتایج برخی از محققین نشان می‌دهد که عوامل متعددی مانند ریزساختار، ترکیب شیمیایی، نحوه انجام عملیات حرارتی و تنش‌های موجود در این مواد، تأثیر زیادی بر خواص خوردگی این فولادها دارند [۱]، [۲]، [۸] و [۹]. در مورد ریزساختار، ندلن^۲ و همکارانش [۱۲] اثر کسر حجمی فاز مارتزیت بر رفتار خوردگی فولادهای دو فازی را مطالعه نموده و دریافتند که تغییر در کسر حجمی فاز مارتزیت، به دلیل تغییر در نسبت مساحت کاتد به آنود، تأثیر زیادی بر رفتار خوردگی این مواد

دارد. هرچند که در اکثر نتایج محققین، با افزایش درصد فاز مارتزیت، میزان خوردگی فولادهای دوفازی افزایش یافته است ولی برخی مانند آرتگا و همکارانش [۱۳]، سرعت خوردگی کمتری را در نمونه‌های با درصد مارتزیت بیشتر، گزارش کرده‌اند. اسماعیل^۳ و همکاران [۱۴]، میزان بهینه‌ی نسبت کاتد به آنود را در فولادهای دوفازی استفاده شده در بتن، حدود ۲۰٪ فاز مارتزیت تعیین نموده‌اند. برخی محققین [۱۵]، وجود فریت اپیتکسیال و مورفولوژی فاز مارتزیت را در میزان خوردگی فولادهای دوفازی مؤثر دانسته و نشان دادند که با ریزتر شدن ساختار مارتزیتی، مقاومت به خوردگی فولادهای دوفازی به دلیل افزایش سطح در معرض خوردگی، کاهش می‌یابد. پارامتر مؤثر بعدی بر خوردگی فولادهای دوفازی، ترکیب شیمیایی آنهاست که هم بر درصد فازها و هم ترکیب این فازها اثرگذار است. نتایج تحقیقات نشان داده است که با کاهش میزان کربن، به دلیل عدم وجود کاربید در ساختار و عدم تشکیل پیل‌های میکروگالوانیک، مقاومت به خوردگی فولادهای دوفازی افزایش می‌یابد [۱۳]. همچنین توزیع عناصر مختلف مانند منگنز و سیلیسیم، در فازهای فریت و مارتزیت، می‌تواند بر اختلاف پتانسیل بین این دو فاز اثر گذاشته و منجر به کاهش مقاومت خوردگی فولادهای دوفازی گردد [۱۵].

تا کنون تحقیقات اندکی در زمینه تأثیر نحوه عملیات حرارتی بر خواص خوردگی فولادهای دوفازی انجام شده است. به عنوان مثال، سلیمانی و همکارانش [۲]، به بررسی خواص مکانیکی و خوردگی فولاد CK45 و تبدیل آن به فولاد دوفازی توسط عملیات حرارتی کروی کردن و آنیل میان بحرانی، پرداختند. آنها دریافتند که انجام آنیل میان بحرانی در زمان کوتاه بر فولادهای کروی شده، باعث تشکیل آستنیت در ازای از بین رفتن ذرات سمنتیت شده و نهایتاً بهبود خواص مکانیکی و خوردگی فولادهای دوفازی را به دنبال دارد. هرچند که با افزایش زمان آنیل میان بحرانی، درصد فاز مارتزیت افزایش یافته و شکل‌پذیری و خواص خوردگی

¹ Dual-phase

² Nadlene

³ Ismail

فولادهای دوفازی، کاهش می‌یابد. همانطور که مشخص است، پارامترهای فرآیند عملیات حرارتی تأثیر زیادی بر خواص فولادهای دوفازی و خصوصاً خواص خوردگی آنها دارد. بنابراین در تحقیق حاضر، به بررسی اثر دمای عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی بر ریزساختار و خواص خوردگی فولادهای دوفازی پرداخته شده است. هدف اصلی این تحقیق تعیین دمای بهینه برای رسیدن به بالاترین مقاومت به خوردگی فولادهای دوفازی است به نحوی که بتوان علاوه بر استحکام آنها، خواص خوردگی مناسبی نیز در صنایعی همچون خودروسازی بدست آورد.

۲- مواد و روش آزمایش

در این تحقیق از فولاد X52 که یکی از پرکاربردترین فولادها در صنایع لوله سازی و نفت و گاز است، برای تهیه فولادهای دوفازی استفاده شده است. عملیات حرارتی شامل آنیل میان بحرانی در سه دمای ۷۴۰، ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه و سپس کوئینچ نمونه‌ها در آب می‌باشد. ریزساختار فولادهای دوفازی، پس از سنباده زنی، پولیش و اچ با محلول ۵٪ نایتال، توسط میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت. درصد حجمی فاز مارتزیت و متوسط اندازه دانه‌های فریت با روش شمارش نقطه‌ای و توسط نرم‌افزار MIP 4 student تعیین گردید.

برای بررسی مقاومت در برابر خوردگی فولادهای دوفازی، دو روش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول ۳.۵٪ کلرید سدیم استفاده شد. مساحتی معادل ۱ سانتیمتر مربع از نمونه‌ها به عنوان الکترود کاری در نظر گرفته شده و خواص خوردگی آنها با استفاده از پتانسیواستات IviumStat (ساخت شرکت Ivium Technologies از کشور هلند) کنترل گردید. در این آزمون-ها، از یک سیم پلاتینی و الکترود استاندارد نقره/کلرید نقره به ترتیب به عنوان الکترود شمارنده و الکترود مرجع استفاده شد. قبل از انجام هر آزمون، نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در محلول ۳.۵٪ کلرید سدیم قرار گرفته بود تا به پتانسیل تعادلی خود

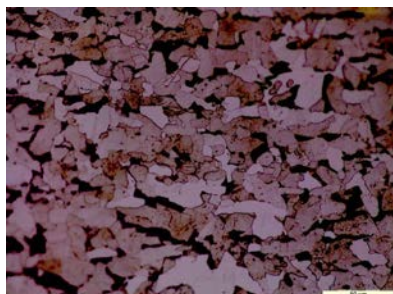
برسد. اندازه‌گیری‌های طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) با استفاده از دامنه ولتاژ ۱۰ میلی ولت در دامنه فرکانس ۱۰ میلی‌هرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز انجام شد و نتایج توسط نرم افزار IviumSoft مورد ارزیابی قرار گرفت. گستره پتانسیل در پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، ۲۵۰- تا ۵۰۰ میلی‌ولت نسبت به پتانسیل مدار باز انتخاب و سرعت روبش، ۱ میلی‌ولتر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

آنالیز تفرش اشعه ایکس توسط دستگاه زیمنس مدل D5000 و با تابش $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ (طول موج ۱.۵۴ آنگسترم) انجام شد. سرعت روبش برابر ۰.۰۲ درجه بر ثانیه و گستره زاویه تفرق، ۱۰ تا ۱۱۰ درجه در نظر گرفته شد. همچنین مورفولوژی سطح فولادهای خورده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، مدل XL-30 (فیلیپس) و میکروسکوپ نیروی اتمی، مدل AFM-DS45-40 مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار و فازی نمونه‌های عملیات حرارتی شده

در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به نمونه بدون عملیات حرارتی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که فولاد بدون عملیات حرارتی دارای ساختار فریتی - پرلیتی بوده و درصد فاز فریت و پرلیت به ترتیب ۵۸ و ۴۲ درصد می‌باشد. همچنین اندازه دانه فریت در این نمونه، حدود ۱۶ میکرومتر اندازه‌گیری شده است.



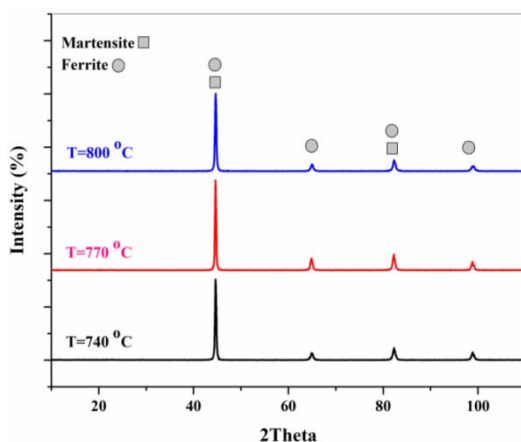
شکل ۱- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه بدون عملیات حرارتی (فولاد X52 اچ شده با نایتال ۲٪).

نتیجه آن، در هنگام سرد کردن فولاد از این دما و تبدیل آستنیت به مارتنزیت، فاز بیشتری مارتنزیت بدست می آید. نکته‌ی مهم در نتایج این جدول، افزایش شدید کسر حجمی فاز مارتنزیت در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد است که حدود ۴۰٪ اندازه گیری شده است که با توجه به مرجع [۱۴] بسیار بیشتر از مقدار بهینه‌ی این فاز (حدود ۲۰٪)، جهت دستیابی به بالاترین مقاومت به خوردگی در فولادهای دوفازی می‌باشد.

جدول ۱- میزان کسر حجمی فاز مارتنزیت و اندازه دانه فریت در نمونه های عملیات حرارتی شده.

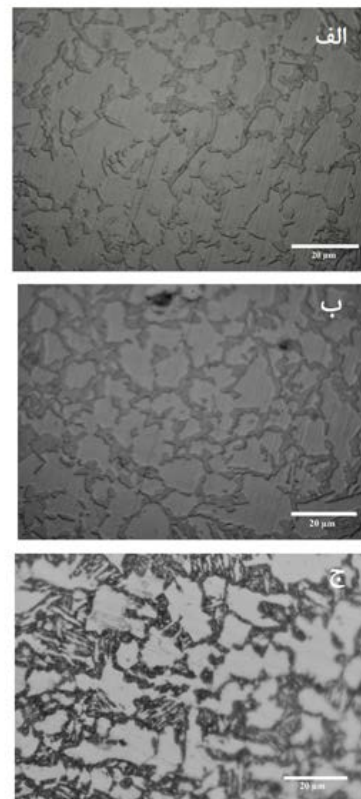
اندازه دانه فریت (میکرومتر)	کسر حجمی فاز مارتنزیت (%)	دمای عملیات حرارتی (درجه سانتیگراد)
۲۲.۵	۱۵.۴	۷۴۰
۲۱.۱	۲۹.۷	۷۷۰
۱۸.۸	۴۰.۲	۸۰۰

در شکل ۳ نمودار تفرق اشعه ایکس مربوط به نمونه های عملیات حرارتی شده نشان داده شده است. پیک های مشاهده شده در نمودار اشعه ایکس مربوط به فاز فریت و فاز مارتنزیت می باشد که برخی از آنها، بر روی هم افتاده است. تصاویر میکروسکوپ نوری و همچنین وجود فازهای فریت و مارتنزیت در نمودارهای تفرق اشعه ایکس، بیان کننده تشکیل فازهای فریت و مارتنزیت و ایجاد فولادهای دوفازی با انجام عملیات حرارتی می باشد.



شکل ۳- نمودارهای تفرق اشعه ایکس مربوط به نمونه های آنیل میان بحرانی شده در دماهای ۷۴۰، ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد.

در شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به نمونه های عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی شده در دماهای مختلف آورده شده است. با انجام عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی در دماهای مختلف مشاهده می گردد که ساختار فریتی و مارتنزیتی تشکیل شده است.



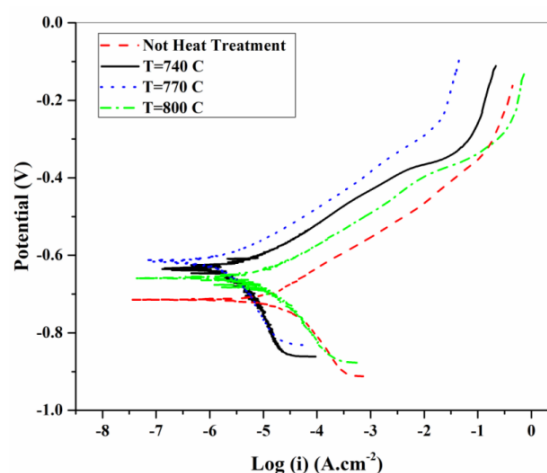
شکل ۲- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه های عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی شده در دماهای الف- ۷۴۰ ب- ۷۷۰ و ج- ۸۰۰ درجه سانتیگراد.

همانطور که در بخش روش تحقیق بیان شد، برای بررسی های ریزساختاری از نرم افزار آنالیز تصویری استفاده شد و نتایج کمی حاصل از اندازه گیری اندازه دانه فریت و کسر حجمی مارتنزیت در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این جدول، مشاهده می شود که با افزایش دمای عملیات حرارتی از دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد به دماهای ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد، اندازه دانه فریت کاهش می یابد. همچنین مشاهده می گردد که با افزایش دمای عملیات حرارتی، کسر حجمی فاز مارتنزیت نیز افزایش می یابد. در واقع با افزایش دمای عملیات حرارتی، مقدار درصد فاز آستنیت تشکیل شده افزایش می یابد و در

۳-۲- بررسی رفتار خوردگی

۳-۲-۱- نمودارهای پلاریزاسیون

در شکل ۴ نمودار پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولادهای پرلیتی و فولادهای عملیات حرارتی شده میان بحرانی در دماهای ۷۴۰، ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد (عملیات حرارتی دوفازی) آورده شده است. بطور کلی مشاهده می گردد که با انجام عملیات حرارتی دوفازی، پتانسیل نمونه ها افزایش پیدا کرده و نمودارهای پلاریزاسیون به سمت چپ منتقل شده اند که نشان دهنده کاهش جریان خوردگی و بهبود مقاومت به خوردگی نمونه ها با انجام عملیات حرارتی دوفازی می باشد.



شکل ۴- نمودار پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولادهای پرلیتی و فولادهای عملیات حرارتی شده میان بحرانی در دماهای ۷۴۰، ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد.

همچنین مشاهده می گردد که با افزایش دمای عملیات حرارتی، نمودارهای پلاریزاسیون به سمت مقادیر پتانسیل

جدول ۲- مقادیر آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای نمونه های مختلف.

نمونه ها	پتانسیل خوردگی mV	جریان خوردگی $\mu A.cm^{-2}$	شیب آندی mV/dec	شیب کاتدی mV/dec	سرعت خوردگی mpy	مقاومت پلاریزاسیون $\Omega.cm^2$
بدون عملیات حرارتی	-۷۱۴	۲۸۸۴۰	۹۰	-۱۷۵	۱۳.۲۵۲	۸۹۳.۵۷
آنیل میان بحرانی در دمای ۷۴۰	-۶۳۳	۳.۹۸۱	۹۲	-۱۹۲	۱.۸۲۹	۶۷۸۸.۸۴
آنیل میان بحرانی در دمای ۷۷۰	-۶۱۵	۲.۵۱۲	۸۳	-۱۶۴	۱.۱۵۴	۹۵۶۴.۴۷
آنیل میان بحرانی در دمای ۸۰۰	-۶۴۶	۱۲.۵۸۹	۸۸	-۱۸۹	۵.۷۸۵	۲۰۷۰.۹۵

مثبت تر منتقل شده است. نوری و همکارانش [۱]، پتانسیل فریت و مارتنزیت در فولادهای دوفازی را با استفاده از روش میکروکاپیلاری بررسی کردند که نتایج آن نشان که پتانسیل فاز مارتنزیت همواره و در هر دو حالت ۲.۲۶٪ و ۰.۳۴٪ سیلیسیم، بیشتر از فاز فریت می باشد. بنابراین افزایش پتانسیل خوردگی در نمونه های عملیات حرارتی شده (شکل ۴)، به احتمال فراوان به دلیل افزایش درصد حجمی فاز مارتنزیت با افزایش دمای آنیل میان بحرانی بوده که در جدول ۱ به آن اشاره شد.

برای ارزیابی کمی نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از برونیایی داده های تافل استفاده گردید. در این روش از روی نتایج و داده های وارد شده مربوط به منحنی های پلاریزاسیون توسط نرم افزار دستگاه گالوانواستات، مقادیر مقاومت پلاریزاسیون (R_p) و مقادیر شیب های آندی و کاتدی (β_a , β_c) بدست آمده و سپس با استفاده از معادله ۱ جریان خوردگی (i_{Corr}) در هر نمونه محاسبه شد.

$$i_{Corr} = \frac{dE}{di} = \frac{\beta_A \beta_C}{2/3 (\beta_A + \beta_C) R_p} \quad \text{معادله ۱:}$$

در جدول ۲ مقادیر کمی مربوط به دانسیته جریان خوردگی، پتانسیل خوردگی (E_{Corr})، شیب منحنی آندی، شیب منحنی کاتدی، مقاومت پلاریزاسیون و نرخ خوردگی (CR) بدست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون شکل ۴ آورده شده است.

به دلیل افزایش میزان مرز دانه ها و مکان های پر انرژی، خوردگی نمونه ای که در ۸۰۰ درجه سانتیگراد عملیات حرارتی شده است، کاهش شدیدی پیدا نموده است.

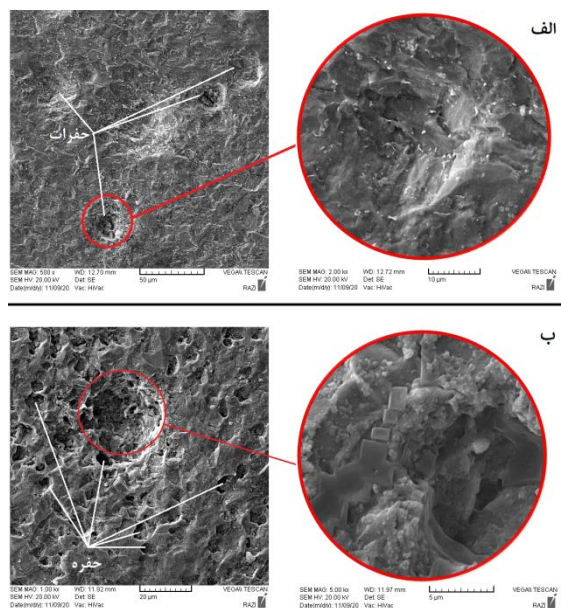
نکته مهم دیگر در خوردگی پیل گالوانیک، بحث سطح کاتد به آنند می باشد که هر چقدر سطح کاتد به آنند بزرگتر باشد سبب تشدید خوردگی گالوانیک می شود. بنابراین در ابتدا با انجام عملیات حرارتی به دلیل تشکیل فاز مارتنزیت بجای ساختار پرلیت، مقاومت به خوردگی افزایش می یابد، چون مقاومت به خوردگی فاز مارتنزیت نسبت به ساختار پرلیت بیشتر است. با افزایش دمای عملیات حرارتی میان بحرانی از ۷۴۰ به ۷۷۰ درجه سانتیگراد نیز مشاهده می شود که مقاومت پلاریزاسیون به مقدار اندکی افزایش و سرعت خوردگی کاهش می یابد. علت این موضوع می تواند به دلیل افزایش بیشتر درصد فاز مارتنزیت باشد که سبب بهبود مقاومت به خوردگی آن می گردد. با افزایش بیشتر دمای عملیات حرارتی میان بحرانی از ۷۷۰ به ۸۰۰ درجه سانتیگراد، بدلیل افزایش خوردگی گالوانیک بین فاز مارتنزیت و فاز فریت سرعت خوردگی افزایش می باشد. دلیل این افزایش در سرعت خوردگی این است که شدت کوپل گالوانیک بین فاز مارتنزیت و فریت با افزایش درصد فاز مارتنزیت و کاهش اندازه دانه های فریت (بدلیل افزایش سطح کاتد به آنند) بیشتر می شود.

۳-۲-۲- بررسی میکروسکوپی سطوح خورده شده

تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه ها بعد از تست پلاریزاسیون دینامیکی در شکل ۵ آورده شده است. در شکل ۵ الف که مربوط به نمونه فریتی-پرلیتی می باشد، مشاهده می شود که سطح نمونه بشدت خورده شده است. در شکل های ۵ ب و ۵ ج که به ترتیب، مربوط به نمونه های عملیات آنیل میان بحرانی شده در دماهای ۷۴۰ و ۷۷۰ درجه سانتیگراد می باشند، مشاهده می شود که سطح نمونه کمتر دچار خوردگی شده است. این امر نشان دهنده بهبود مقاومت به خوردگی این نمونه ها با انجام عملیات حرارتی دوفازی می باشد.

با توجه به نتایج جدول ۲، مشاهده می شود که با انجام عملیات حرارتی دوفازی در هر سه دماهای ۷۴۰، ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد، جریان و سرعت خوردگی نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی کاهش پیدا می کند. کمترین سرعت خوردگی زمانی بدست می آید که فولاد دوفازی در دمای ۷۷۰ درجه سانتیگراد عملیات حرارتی شده باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، مقاومت به خوردگی فاز مارتنزیت بیشتر از مقاومت به خوردگی فاز فریت می باشد [۱]. بنابراین افزایش کلی مقاومت به خوردگی می تواند به دلیل تشکیل فاز مارتنزیت با مقاومت به خوردگی بیشتر باشد. نکته مهم دیگری که از جدول ۲ می توان استنباط نمود، افزایش سرعت خوردگی و کاهش مقاومت پلاریزاسیون نمونه ها با افزایش دمای عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی از ۷۷۰ به ۸۰۰ درجه سانتیگراد می باشد. بطور کلی مارتنزیت نقش دوگانه در خوردگی می تواند داشته باشد [۱]. از یک طرف، مارتنزیت به دلیل پتانسیل خوردگی و مقاومت به خوردگی بیشتر نسبت به فاز فریت می تواند سبب افزایش مقاومت به خوردگی فولاد دوفازی گردد، که این مورد در نمونه های عملیات حرارتی شده در ۷۴۰ و ۷۷۰ درجه سانتیگراد رخ داده است. از طرفی دیگر، بدلیل اینکه با افزایش درصد حجمی فاز مارتنزیت، اختلاف پتانسیل فاز مارتنزیت با فاز فریت بیشتر می باشد، فاز مارتنزیت می تواند با فاز فریت پیل گالوانیک تشکیل داده و در نتیجه آن فاز فریت که نقش آنند را دارد، در فصل مشترک فاز فریت و مارتنزیت بیشتر خورده شود. بنابراین علت افزایش در سرعت خوردگی با افزایش دمای آنیل میان بحرانی از دمای ۷۷۰ به ۸۰۰ درجه سانتیگراد می تواند بدلیل تشکیل کوپل گالوانیک بین فازهای مارتنزیت و فاز فریت باشد. همچنین، با افزایش دما تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد و سپس کوئینچ نمونه، علاوه بر افزایش درصد مارتنزیت تشکیل شده، اندازه دانه های فریت کاهش یافته (جدول ۱) و همچنین احتمالاً تیغه های مارتنزیت کوچک تری به واسطه فوق تبرید بیشتر، تولید خواهد شد که البته نیاز به بررسی های بیشتری در این زمینه وجود دارد. با اینحال، به احتمال فراوان با کوچک شدن دانه های فریت و همچنین تشکیل مارتنزیت با تیغه های کوچکتر،

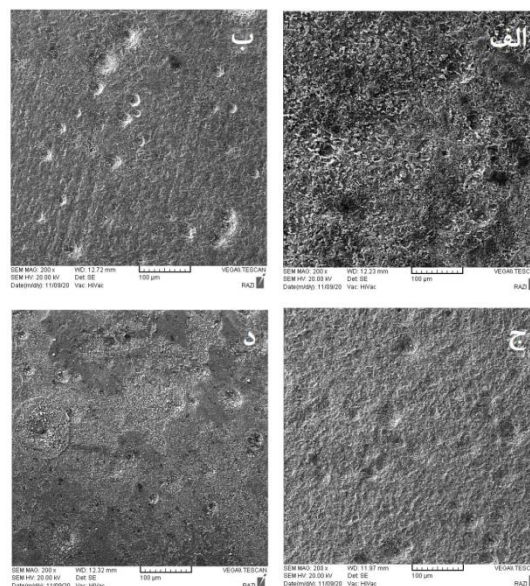
سانتیگراد، حفرات بیشتری در سطح نمونه پس از خورده شدن وجود دارد و همچنین عمق و شدت این خوردگی بیشتر می باشد. این امر نشان دهنده بیشتر شدن شدت کوپل گالوانیک بین فاز فریت و مارتنزیت به سبب افزایش سطح کاتد (فاز مارتنزیت) به سطح آنود (فاز فریت) می باشد.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی از حفرات تشکیل شده در سطح نمونه های عملیات حرارتی دوفازی شده در دمای الف- ۷۷۰ و ب- ۸۰۰ درجه سانتیگراد.

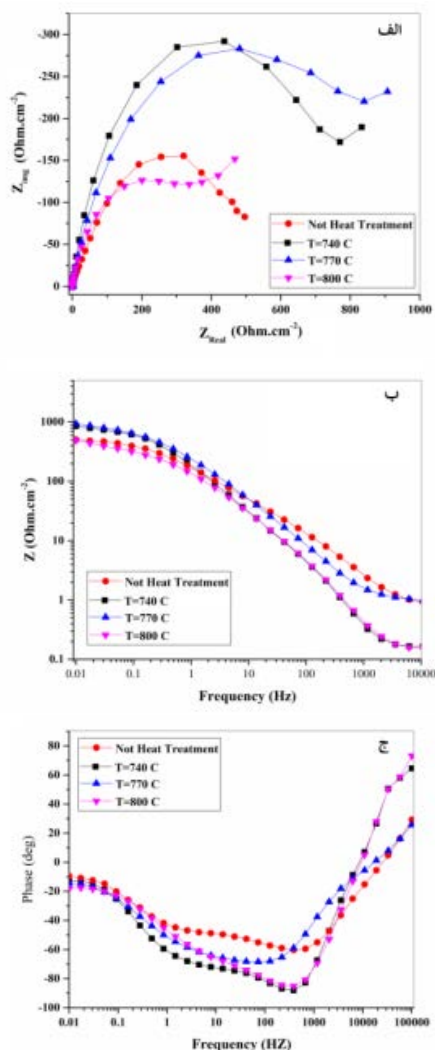
برای بررسی دقیق تر سطح خوردگی نمونه های عملیات حرارتی شده در دماهای ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد از میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شد. در شکل ۷ نتایج مربوط به تست AFM بعد از یکماه غوطه وری در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl آورده شده است. مشاهده می گردد که در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد و بعد از خوردگی، سطح نمونه دارای زبری بیشتری نسبت به نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۷۷۰ درجه سانتیگراد می باشد. این نتایج تأیید کننده نتایج قبلی می باشد که با افزایش دمای عملیات حرارتی و درصد فاز مارتنزیت، به سبب ایجاد کوپل گالوانیک شدیدتر بین فاز مارتنزیت و فاز فریت و همینطور بیشتر شدن سطح کاتد، مقاومت به خوردگی کاهش پیدا می کند.

با افزایش بیشتر دمای عملیات حرارتی از ۷۷۰ به ۸۰۰ درجه سانتیگراد مشاهده می گردد که دوباره سطح نمونه با شدت بیشتری دچار خوردگی شده است که تأیید کننده نتایج پلاریزاسیون دینامیکی (جدول ۲) می باشد.



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه ها بعد از تست پلاریزاسیون دینامیکی الف- نمونه فریتی-پرلیتی، نمونه های عملیات حرارتی دوفازی شده در دمای ب- ۷۴۰، ج- ۷۷۰ و د- ۸۰۰ درجه سانتیگراد

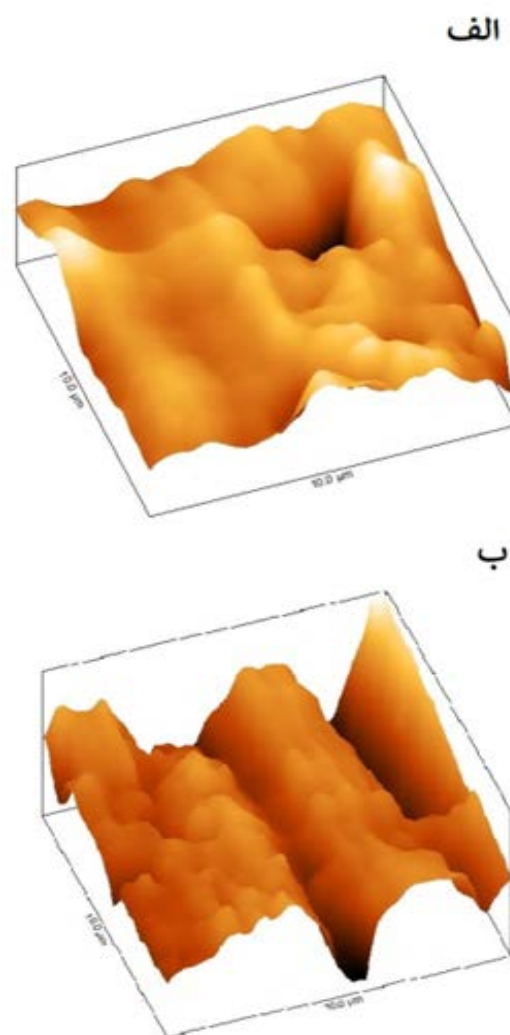
نوری و همکارانش [۱] در تحقیق خود مشاهده کردند که در خوردگی فولاد دوفازی سیلیم دار، بدلیل پیل گالوانیک بین فاز مارتنزیت و فریت، فاز فریت بیشتر دچار خوردگی می شود. برای بررسی پیل گالوانیک بین فازهای فریت و مارتنزیت در این تحقیق، تصویر سطح خورده شده فولاد بعد از تست پلاریزاسیون با بزرگنمایی بالاتر بررسی شد. در شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های عملیات حرارتی دوفازی شده در دمای ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد آورده شده است. مشاهده می شود که حفراتی در سطح نمونه ها بعد از تست پلاریزاسیون وجود دارد که مربوط به تشکیل کوپل گالوانیک بین فاز مارتنزیت و فاز فریت و خورده شدن سطح فریت می باشد. مشاهده می گردد که در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۸۰۰ درجه



شکل ۸- الف- نمودارهای نایکوئیست، ب- نمودارهای بُد و ج- نمودارهای بُد-فاز مربوط به فولادهای عملیات حرارتی شده در دماهای میان بحرانی مختلف پس از ۱ ساعت غوطه وری در محلول ۳.۵٪ NaCl

در شکل ۸ الف، نمودارهای نایکوئیست نمونه‌های عملیات حرارتی شده، نشانگر یک حلقه خازنی در محدوده فرکانس کاری می‌باشد. دلیل تشکیل حلقه خازنی ناشی از ثابت زمانی دو لایه الکتریکی و مقاومت انتقال بار است.

بطور کلی هر چقدر قطر نیم دایره مربوط به نمودارهای نایکوئیست بزرگ‌تر باشد، نشان دهنده مقاومت بیشتر نمونه‌ها به خوردگی می‌باشد [۱]. مشاهده می‌شود که بطور کلی با انجام عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی و تشکیل فولاد دوفازی، مقاومت نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند.

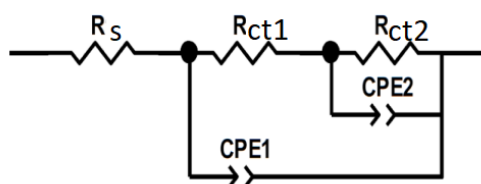


شکل ۷- تصویر میکروسکوپ اتمی از سطح نمونه‌های عملیات حرارتی دوفازی شده در دمای الف- ۷۷۰ و ب- ۸۰۰ درجه سانتیگراد.

۳-۲-۳- بررسی رفتار خوردگی با طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

برای بررسی بیشتر تأثیر دمای عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی بر رفتار خوردگی فولاد دوفازی، از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. در شکل ۸ نمودارهای نایکوئیست، بُد و بُد-فاز مربوط به فولادهای عملیات حرارتی شده در دماهای میان بحرانی مختلف پس از ۱ ساعت غوطه وری در محلول ۳.۵٪ NaCl وزنی آورده شده است.

و مقاومت انتقال بار مربوط به خوردگی از مسیر دیگر که همان فصل مشترک بین فازها می باشد را نشان می دهند.



شکل ۹- مدار الکتریکی مورد استفاده برای معادلسازی نتایج امپدانس الکتروشیمیایی در شکل ۸.

با توجه به نمودارهای امپدانس الکتروشیمیایی در این تحقیق برای معادلسازی از عنصر فاز ثابت (CPE) استفاده شد. امپدانس CPE به صورت زیر تعریف می شود:

$$Z_{CPE} = \frac{(i\omega)^n}{Q} \quad \text{معادله ۲:}$$

که در آن Q پارامتر خازنی مربوط به متوسط ظرفیت خازن دولایه (C_{dl}) است، و n پارامتری بدون بعد مرتبط با زاویه فاز ثابت است. زبری میکروسکوپی الکترودها باعث توزیع ناهمگن مقاومت محلول و خازن دولایه می گردد، که خود توضیح قابل قبولی برای نوع رفتار CPE به شکل نیم دایره است. CPE_1 عنصر فاز ثابت لایه دوگانه مربوط به دانه های فازهای موجود و CPE_2 عنصر فاز ثابت فصل مشترک فازها می باشد. در جدول ۳ نتایج حاصل از معادلسازی امپدانس الکتروشیمیایی با استفاده از مدار معادل شکل ۹ آورده شده است.

این امر نشان دهنده مقاومت بیشتر فولادی با ساختار فریتی-مارتنزیتی نسبت به ساختار فریتی-پرلیتی می باشد. همچنین مشاهده می گردد که با افزایش بیشتر دمای عملیات حرارتی میان بحرانی از ۷۷۰ به ۸۰۰ درجه سانتیگراد، اندازه قطر نیم دایره کوچک تر شده که نشان دهنده کاهش مقدار مقاومت به خوردگی در این نمونه می باشد [۱]. این نتایج تأیید کننده نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی (بخش ۳-۲-۱) می باشد. در شکل ۸ ب، نمودارهای بُد آورده شده است. مشاهده می گردد که بیشترین مقاومت امپدانس مربوط به نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۷۷۰ درجه سانتیگراد می باشد. در شکل ۸ ج، نمودارهای بُد-فاز نشان داده شده است. این نمودار حاوی دو دره (یا قله) می باشد که نشان دهنده حضور دو ثابت زمانی در این نمونه ها می باشد. در این حالت، دو مسیر مختلف برای خوردگی وجود دارد و دو خازن باید در معادلسازی برای این دو مسیر در نظر گرفته شود. مسیر اول می تواند مربوط به خوردگی از مسیر دانه های مارتنزیت و فریت و مسیر دوم می تواند مربوط به خوردگی فصل مشترک بین دو فاز فریت و مارتنزیت باشد.

برای مطالعه کمی و دقیق تر، نتایج حاصل از امپدانس الکتروشیمیایی با استفاده از نرم افزار IviumSoft و با استفاده از مدار الکتریکی مناسب معادلسازی شد. مدار معادلسازی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۹ آورده شده است. پارامترهای مورد استفاده عبارتند از: R_s ، R_{ct1} و R_{ct2} که به ترتیب مقاومت محلول، مقاومت انتقال بار مربوط به دانه ها (فازهای فریت و پرلیت در نمونه بدون عملیات حرارتی و فازهای فریت و مارتنزیت در نمونه های عملیات حرارتی شده)

جدول ۳- مقادیر حاصل از معادلسازی نتایج امپدانس الکتروشیمیایی با مدار معادل شکل ۹ برای نمونه های مختلف.

نمونه ها	R_s $\Omega.cm^2$	R_{ct1} $\Omega.cm^2$	CPE_1 $\mu F.cm^{-2}$	n_1	R_{ct2} $\Omega.cm^2$	CPE_2 $\mu F.cm^{-2}$	n_2
بدون عملیات حرارتی	۲۶	۱۱۲۴	۷۵۱۰	۰.۷۹۰	۲۴.۷۷	۴۱۷۰	۰.۹۰۱
آنیل میان بحرانی در دمای ۷۴۰	۲۵	۲۷۲۱	۱۲۳۰	۰.۸۲۵	۸۳.۴۲	۱۵۴۰	۰.۸۵۴
آنیل میان بحرانی در دمای ۷۷۰	۲۶.۳	۲۹۲۵	۱۰۲۰	۰.۸۷۲	۱۱۹.۳۱	۹۳۰	۰.۸۸۰
آنیل میان بحرانی در دمای ۸۰۰	۲۷.۲	۱۲۵۶	۷۲۱۰	۰.۸۰۹	۳۹.۱۱	۳۶۱۰	۰.۷۴۰

روش امیدانس، به دلیل پتانسیل اعمالی کم (۱۰ میلی ولت)، پیل گالوانیک بین فاز مارتنزیت و فریت تأثیر زیادی بر درصد تغییرات مقاومت پلاریزاسیون ندارد. این در حالی است که روش پتانسیودینامیک به دلیل اعمال پتانسیل بالاتر (بازه ی ۲۵۰- تا ۵۰۰ میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز)، تأثیر بیشتری روی مقاومت پلاریزاسیون نشان می دهد (جدول ۲). با افزایش دمای عملیات حرارتی از دمای ۷۷۰ درجه سانتیگراد به ۸۰۰ درجه سانتیگراد مشاهده می گردد که مقاومت انتقال بار از مسیر دانه ها و فصل مشترک فازها، کاهش و ظرفیت خازنی مربوط به این مسیرها افزایش می یابد. این امر، نشان دهنده کاهش مقاومت به خوردگی فولاد عملیات حرارتی شده با افزایش دما نسبت به نمونه های عملیات حرارتی شده در دمای ۷۴۰ و ۷۷۰ درجه سانتیگراد می باشد. با افزایش دمای عملیات حرارتی به ۸۰۰ درجه سانتیگراد، بدلیل افزایش درصد فاز مارتنزیت و کاهش اندازه دانه فریت و در نتیجه آن تشدید کوپل گالوانیک بین فاز مارتنزیت (کاتد) و فاز فریت (آند) به دلیل افزایش سطح کاتد به آند، سرعت خوردگی افزایش می یابد. هرچند که حتی در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد هم، میزان مقاومت به خوردگی نمونه عملیات حرارتی شده، از نمونه ی بدون عملیات حرارتی بهتر است. با مقایسه اطلاعات این بخش با اطلاعات بخش ۳-۲-۱ ملاحظه می گردد که نتایج امیدانس الکتروشیمیایی، تایید کننده نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی می باشد.

بطور کلی هر چقدر مقدار مقاومت الکتریکی بدست آمده در مدار معادلسازی بیشتر باشد، نشان دهنده این است که مقاومت در برابر انتقال الکترون و در نتیجه آن مقاومت در برابر خوردگی بیشتر می باشد. همچنین هر چقدر ظرفیت خازنی کمتر باشد، بدلیل پر شدن سریع تر خازن سبب می گردد تا مقدار یونها و بارهای عبوری کاهش پیدا کند و در نتیجه، مقاومت به خوردگی افزایش یابد. R_s میزان مقاومت محلول را نشان می دهد که در تمامی نمونه ها تقریباً ثابت و حدود $26 \Omega \cdot cm^2$ می باشد. با توجه به نتایج R_{ct1} و CPE_1 در جدول ۳ مشاهده می گردد، بطور کلی با انجام عملیات حرارتی دوفازی تا دمای ۷۷۰ درجه سانتیگراد، مقاومت انتقال بار مربوط به خوردگی از مسیر دانه های فریت-مارتنزیت (نمونه- های عملیات حرارتی شده) نسبت به مسیر دانه های فریت-پرلیت (نمونه بدون عملیات حرارتی) افزایش و ظرفیت خازنی آنها کاهش پیدا می کنند. همچنین، رفتار مشابهی در مقاومت انتقال بار مربوط به فصل مشترک فازها (R_{ct2}) و ظرفیت خازنی آنها (CPE_2) دیده می شود. این نتایج نشان دهنده افزایش مقاومت به خوردگی فولادها با انجام عملیات حرارتی دوفازی، نسبت به فولادهای فریتی-پرلیتی می باشد. دلیل این افزایش، مقاومت به خوردگی بهتر فاز مارتنزیت نسبت به ساختار پرلیت می باشد. نمونه هایی که در دمای ۷۴۰ و ۷۷۰ درجه سانتیگراد عملیات حرارتی شدند، بیشترین مقاومت انتقال بار از مسیر دانه های فریت-مارتنزیت و فصل مشترک بین فازها را از خود نشان می دهند. لازم به ذکر است که در

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی اثر دمای عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی بر ریزساختار و خواص خوردگی فولادهای دوفازی پرداخته شد. عملیات حرارتی در سه دمای ۷۴۰، ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد انجام و نتایج زیر حاصل شد:

۱. با افزایش دمای عملیات حرارتی، درصد فاز آستنیت افزایش می یابد و در نتیجه، فاز بیشتری مارتنزیت بدست می آید.
۲. نتایج آزمون های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امیدانس الکتروشیمیایی نشان داد که، به طور کلی با انجام عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی، میزان مقاومت به خوردگی نمونه افزایش می یابد.
۳. بیشترین مقاومت به خوردگی مربوط به نمونه ی عملیات حرارتی شده در دمای ۷۷۰ درجه سانتیگراد می باشد و با افزایش بیشتر دمای عملیات حرارتی، مقاومت به خوردگی کاهش می یابد.

۴. دلیل اصلی کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌ی عملیات حرارتی شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد، افزایش درصد فاز مارتنزیت و کاهش اندازه دانه فریت و در نتیجه آن تشدید کوپل گالوانیک بین فاز مارتنزیت (کاتد) و فاز فریت (آند) به دلیل افزایش سطح کاند به آند، می‌باشد.

منابع:

- [1] A. Nouri, H. Hassannejad, and M. Farrokhi-Rad, "Relationship between Microstructure and Corrosion Behavior in Dual-Phase Steels with Various Si Content," *Steel Res. Int.*, vol. 90, no. 11, pp. 1–8, 2019.
- [2] M. Soleimani, H. Mirzadeh, and C. Dehghanian, "Effects of spheroidization heat treatment and intercritical annealing on mechanical properties and corrosion resistance of medium carbon dual phase steel," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 257, no. September 2020, p. 123721, 2021.
- [3] H. Ashrafi, M. Shamanian, R. Emadi, and N. Saeidi, "Examination of phase transformation kinetics during step quenching of dual phase steels," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 187, pp. 203–217, Feb. 2017.
- [4] N. Saeidi, F. Ashrafizadeh, B. Niroumand, M. R. Forouzan, S. Mohseni Mofidi, and F. Barlat, "Examination and modeling of void growth kinetics in modern high strength dual phase steels during uniaxial tensile deformation," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 172, pp. 54–61, Apr. 2016.
- [5] B. Gao *et al.*, "A high-strength heterogeneous structural dual-phase steel," *J. Mater. Sci.*, vol. 54, no. 19, pp. 12898–12910, Oct. 2019.
- [6] T. Dutta, S. Dey, S. Datta, and D. Das, "Designing dual-phase steels with improved performance using ANN and GA in tandem," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 157, pp. 6–16, Feb. 2019.
- [7] Y. Okitsu and N. Tsuji, *Nanostructured steel for automotive body structures*. Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [8] H. E. Townsend, "Atmospheric corrosion performance of quenched-and-tempered, high-strength weathering steel," *Corrosion*, vol. 56, no. 9, pp. 883–886, Sep. 2000.
- [9] O. Keleştemur, M. Aksoy, and S. Yildiz, "Corrosion behavior of tempered dual-phase steel embedded in concrete," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 16, no. 1, pp. 43–50, Feb. 2009.
- [10] A. Nouri, H. Hassannejad, and M. Farrokhi-Rad, "Effect of Silicon Content on the Wear Behavior of Low-Carbon Dual-Phase Steels," *Tribol. Lett.*, vol. 67, no. 3, pp. 1–11, Sep. 2019.
- [11] A. P. Pierman, O. Bouaziz, T. Pardoen, P. J. Jacques, and L. Brassart, "The influence of microstructure and composition on the plastic behaviour of dual-phase steels," *Acta Mater.*, vol. 73, pp. 298–311, Jul. 2014.
- [12] R. Nadlene, H. Esah, S. Norliana, and M. A. M. Irwan, "Study on the Effect of Volume Fraction of Dual Phase Steel to Corrosion Behaviour and Hardness," Feb. 2011.
- [13] A. Ramirez-Arteaga, ... J. G.-R.-I. J. E., and U. 2010, "An electrochemical study of the corrosion behavior of a dual phase steel in 0.5 M H₂SO₄," *Citeseer*, 2010, Accessed: Jun. 25, 2021.
- [14] M. Ismail, E. Hamzah, G. Guan, and I. Rahman, "Corrosion performance of dual-phase steel embedded in concrete," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 35, pp. 81–90, Oct. 2010.
- [15] E. Salamci, S. Candan, and F. Kabakci, "Effect of microstructure on corrosion behavior of dual-phase steels," *Kov. Mater.*, vol. 55, no. 2, pp. 133–139, 2017.